



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
SEDE MORONA SANTIAGO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA MINAS

**EVALUACIÓN DE PRETRATAMIENTO INDIRECTO DE
MINERAL AURIFERO SULFUROSO MEDIANTE MICROONDAS**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MINAS

AUTOR:

WILDER FERNANDO QUIROZ FAJARDO

Macas – Ecuador

2024



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
SEDE MORONA SANTIAGO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA MINAS

**EVALUACIÓN DE PRETRATAMIENTO INDIRECTO DE
MINERAL AURIFERO SULFUROSO MEDIANTE MICROONDAS**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MINAS

AUTOR: WILDER FERNANDO QUIROZ FAJARDO

DIRECTOR: ING. ERNESTO REYES CÉSPEDES

Macas – Ecuador

2024

© 2024, Wilder Fernando Quiroz Fajardo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Wilder Fernando Quiroz Fajardo, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

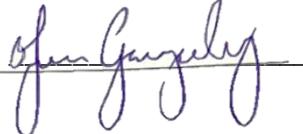
Macas, 26 de noviembre de 2024



Wilder Fernando Quiroz Fajardo
0106557648

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
SEDE MORONA SANTIAGO
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES
CARRERA MINAS

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **EVALUACIÓN DE PRETRATAMIENTO INDIRECTO DE MINERAL AURIFERO SULFUROSO MEDIANTE MICROONDAS**, realizado por el señor: **WILDER FERNANDO QUIROZ FAJARDO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Josue David Gonzales Coronel PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2024/11/26
Ing. Ernesto Reyes Céspedes DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2024/11/26
Ing. Christian Adrian Ordoñez Guaycha ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2024/11/26

DEDICATORIA

A mis queridos padres, Simón Cirilo y Carmen Amelia, a mi hermana, Carmen Alicia. A lo largo de este camino de preparación, su amor incondicional, apoyo constante y ejemplo de perseverancia han sido mi mayor inspiración. Su amor y aliento han sido fundamentales en cada paso de este viaje.

Con cariño,

Wilder

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a mi director de tesis, Ing. Ernesto Reyes Céspedes, por su orientación, apoyo y dedicación en este trayecto, su sabiduría, paciencia y compromiso fueron fundamentales para el éxito de este trabajo. También deseo agradecer a mi asesor, Ing. Christian Ordoñez Guaycha, por su inestimable asistencia, orientación y valiosas sugerencias que contribuyeron significativamente al desarrollo y calidad de esta tesis. A mis amigos profesionales, Ing. John Samaniego Navarrete, Ing. Moisés Chinchilima Duchi e Ing. Mario Flores Carvajal, les agradezco por su constante estímulo, apoyo y discusiones enriquecedoras que me han inspirado y motivado durante este camino académico. Este logro no habría sido posible sin el apoyo y contribuciones de todas estas personas, a quienes les estoy profundamente agradecido.

Con aprecio,

Wilder

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Planteamiento.....	2
1.2. Delimitación.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos.....	4
<i>1.4.1. Objetivo principal.....</i>	<i>4</i>
<i>1.4.2. Objetivos específicos.....</i>	<i>4</i>

CAPÍTULO II

2. REVISION DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEORICOS.....	5
2.1. Antecedentes.....	5
2.2. Distrito minero Chinapintza.....	11
<i>2.2.1. Ubicación geográfica.....</i>	<i>11</i>
<i>2.2.2. Entorno geológico.....</i>	<i>12</i>
<i>2.2.2.1. Marco tectónico.....</i>	<i>13</i>
<i>2.2.2.2. Geometría.....</i>	<i>13</i>
<i>2.2.2.3. Textura y estructura.....</i>	<i>14</i>
<i>2.2.2.4. Mineralogía de la mena.....</i>	<i>14</i>
<i>2.2.2.5. Mineralogía de la ganga.....</i>	<i>15</i>
2.3. Bases teóricas.....	15
<i>2.3.1. Procesamiento de minerales auríferos.....</i>	<i>15</i>
<i>2.3.2. Hidrometalurgia del oro.....</i>	<i>15</i>
<i>2.3.3. Lixiviación con cianuro.....</i>	<i>16</i>

2.3.3.1. Factores asociados a la cianuración.....	16
2.3.4. Menas refractarias	18
2.3.5. Ensayos a fuego	19
2.3.6. Pretratamiento mineral asistido por microondas	20
2.3.6.1. Interacciones microondas-mineral.....	21
2.3.6.2. Pretratamiento indirecto	22
2.3.7. Caracterización mineral.....	23
2.3.7.1. Técnica DRX – Difracción de Rayos “X”	23
2.3.8. Principios del “DRX”	23

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLOGICO.....	25
3.1. Síntesis del experimento	25
3.2. Materiales y Equipos.....	26
3.3. Preparación y cuarteo de la muestra	28
3.4. Pretratamiento indirecto.....	28
3.4.1. Extracción del mineral de magnetita.....	28
3.5. Caracterización mineral.....	31
3.6. Ensayos de lixiviación	32
3.6.1. Lixiviación directa	32
3.6.2. Lixiviación post pretratamiento	34
3.7. Ensayos a fuego.....	35
3.7.1. Digestión de botones de oro	37

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS.....	39
4.1. Pretratamiento indirecto.....	39
4.2. Caracterización mineral.....	39
4.2.1. Difracción de Rayos X (DRX) del mineral sin pretratamiento	39
4.2.2. Difracción de Rayos X (DRX) del mineral con pretratamiento	40
4.3. Lixiviación con cianuro de sodio	41
4.3.1. Lixiviación directa	41
4.3.2. Lixiviación post pretratamiento	42
4.4. Ensayos a fuego.....	43

4.5. Reconstrucción de cabeza	44
--	-----------

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
5.1. Conclusiones	48
5.2. Recomendaciones.....	50

GLOSARIO

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1:	Materiales y equipos en cada una de las etapas desarrolladas para la evaluación del pretratamiento indirecto con microondas.	26
Tabla 3-2:	Identificación y pesaje de relaves secados para ensayo a fuego.	35
Tabla 3-3:	Cantidad de reactivo empleado para una carga de fundición por ensayo a fuego.	35
Tabla 3-4:	Fases minerales presentes en la muestra de mena sin la aplicación del pretratamiento indirecto.	40
Tabla 3-5:	Fases minerales presentes en la muestra de mena sometido a pretratamiento indirecto por un periodo de 160 min.....	41
Tabla 3-6:	Identificación de valores calculados para reconstrucción de ley de cabeza y Recuperación Metálica de cada una de las lixiviaciones del mineral sin pretratamiento indirecto.	45
Tabla 3-7:	Identificación de valores calculados para reconstrucción de ley de cabeza y Recuperación Metálica de cada una de las lixiviaciones del mineral sometido a la aplicación del pretratamiento indirecto con microondas y susceptor magnético.	46

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1:	Ubicación del distrito minero Chinapintza.....	12
Ilustración 2-2:	Mapa geológico regional y estructural de la cordillera del Condor - Distrito de Zamora.....	13
Ilustración 2-3:	Microfotografía en luz reflejada de vetas de Chinapintza.....	14
Ilustración 2-4:	Clasificación de menas auríferas refractarias.....	19
Ilustración 2-5:	Gradiente de temperaturas en el calentamiento por microondas.....	22
Ilustración 2-6:	Esquema de etapas de calentamiento con microondas usando susceptor de microondas.....	23
Ilustración 2-7:	Esquema del modelo de Bragg.....	24
Ilustración 3-1:	Diagrama de desarrollo de la evaluación del pretratamiento indirecto con microondas.....	25
Ilustración 3-2:	Homogenización, cuarteo y envasado de muestra de mineral de mena.....	28
Ilustración 3-3:	Separación de magnetita de otros minerales asociados paramagnéticos.....	28
Ilustración 3-4:	Vista en planta y perfil del modelo interno de experimento de pretratamiento indirecto asistido con microondas.....	29
Ilustración 3-5:	Colocación de placa de aluminio en la base del microondas.....	29
Ilustración 3-6:	Proceso experimental del pretratamiento indirecto para mineral refractario mediante microondas y susceptor magnético.....	30
Ilustración 3-7:	Verificación de pH de soluciones cianuradas con tiras de papel indicador..	32
Ilustración 3-8:	Colocación de cianuro de sodio sobre papel para pesaje y posterior adición al proceso de lixiviación.....	33
Ilustración 3-9:	Desarrollo de los ensayos de lixiviación con cianuro de sodio usando agitador magnético y mecánico.....	34
Ilustración 3-10:	Crisoles de arcilla con las respectivas cargas para fundición en el ensayo a fuego.....	36
Ilustración 3-11:	Vertido de fundido del ensayo a fuego sobre la lingotera.....	36
Ilustración 3-12:	Cristalización y enfriamiento de líquido fundido sobre la lingotera (iz) y obtención de regulo de plomo (der).....	37
Ilustración 3-13:	Copelas con plomo adherido y botones de oro y plata liberados.....	37
Ilustración 3-14:	Digestión de botones de oro y plata con ácido nítrico y agua regia en un digestor electrónico.....	38
Ilustración 3-15:	Difractograma de muestra mineral de mena sin aplicación de pretratamiento indirecto.....	39

Ilustración 3-16: Difractograma de muestra mineral de mena después de la aplicación del pretratamiento.	40
Ilustración 3-17: Cinética de lixiviación directa de mineral de mena.....	42
Ilustración 3-18: Cinética de lixiviación del mineral de mena expuesto al pretratamiento indirecto en diferentes periodos.	43
Ilustración 3-19: Diagrama indicador de las cantidades de Au presente en los relaves.....	44

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Informe de ensayos de Absorción atómica.

ANEXO B: Informe de resultados de análisis de Difracción de Rayos X de la muestra sin aplicar el pretratamiento indirecto.

ANEXO C: Informe de resultados de análisis de Difracción de Rayos X de la muestra con pretratamiento indirecto de 160 min.

RESUMEN

El experimento realizado evaluó la eficacia de un pretratamiento indirecto en el mineral de mena de oro proveniente de la zona 7 del distrito Chinapintza, ubicado al sur del Ecuador, en procesos de lixiviación. El objetivo fue determinar si el pretratamiento mejoraba la recuperación metálica en comparación con la lixiviación directa. La metodología consistió en someter 65 g de mineral sobre una cama de 2 kg de magnetita (Fe_3O_4) en un crisol refractario y exponerlo a energía microondas utilizando un modelo DAEWOO KOR-63DB, con una placa de aluminio para distribuir el calor. Se utilizó Difracción de Rayos X para analizar las fases minerales antes y después del pretratamiento, detectándose Pirita, Cuarzo, Moscovita, Anglesita y Galena inicialmente, y adicionalmente Esfalerita en el material pretratado, reflejando modificaciones en la composición. Las lixiviaciones con cianuro de sodio (1000 ppm) mostraron recuperaciones de 71.52%, 76.21% y 68.74% para el mineral sin pretratar, mientras que el mineral pretratado registró recuperaciones inferiores: 14%, 59.63%, 50.64% y 45.22%, dependiendo del tiempo de exposición (20, 40, 80 y 160 minutos). En tal modo el pretratamiento indirecto no mejoró la eficiencia de lixiviación debido a la liberación de zinc y formación de ZnS , aunque podría ser útil para la desintegración parcial de sulfuros de hierro.

Palabras clave: < EVALUACIÓN DE PRETRATAMIENTO MINERAL >, < LIXIVIACIÓN DE MENA DE ORO >, < CARACTERIZACIÓN MINERAL MEDIANTE DRX (DIFRACCIÓN DE RAYOS X) >, < MICROONDAS EN PROCESOS MINEROS >, < ECUADOR (PAÍS) >.

0232-DBRAI-UPT-2025



SUMMARY

The experiment evaluated the effectiveness of an indirect pretreatment in leaching processes on gold ore from zone 7 of the Chinapintza district, in southern Ecuador. The objective was to determine if the pretreatment improved metal recovery compared to direct leaching. The methodology consisted of subjecting 65 g of ore on a 2 kg bed of magnetite (Fe_3O_4) in a refractory crucible and exposing it to microwave energy using a DAEWOO KOR-63DB model, with an aluminum plate to distribute the heat. X-Ray Diffraction was used to analyze the mineral phases before and after pretreatment, detecting at first Pyrite, Quartz, Muscovite, Anglesite, and Galena; then, Sphalerite in the pretreated material, reflecting modifications in the composition. The leaching with sodium cyanide (1000 ppm) showed recoveries of 71.52%, 76.21%, and 68.74% for the non-pretreated ore, while the pretreated ore recorded lower recoveries: 14%, 59.63%, 50.64%, and 45.22%, depending on the exposure time (20, 40, 80 and 160 minutes). Thus, the indirect pretreatment did not improve the leaching efficiency due to zinc release and ZnS formation, although it could be useful for the partial disintegration of iron sulfides.

Keywords: < MINERAL PRETREATMENT EVALUATION >, < GOLD ORE LEACHING >, < XRD (X-RAY DIFFRACTION) MINERAL CHARACTERIZATION >, < MICROWAVE IN MINING PROCESSES >, < ECUADOR (COUNTRY) >.



Lic. Jessica Galimberti Mg.

CI: 175646848-2

INTRODUCCIÓN

La extracción de oro en el Ecuador es una actividad que se ha ido desarrollando y tecnificando conforme las características minerales de cada sector, en el distrito minero Chinapintza la lixiviación con cianuro es un método común empleado para la extracción del metal precioso, sin embargo, algunas de las mineralizaciones presentes en la zona contienen trazas de sulfuros metálicos con presencia de oro encapsulado, esta asociación altera la interferencia en el contacto del cianuro con el oro para formar el complejo aurocianuro que es el propósito del uso de este agente lixivante.

El pretratamiento de minerales aurífero-sulfurosos busca liberar el metal precioso de la matriz mineral, uno de los métodos en estudio con efectos positivos en anteriores investigaciones alrededor del mundo es la exposición mineral a las microondas. Las microondas tienen un efecto de polarización selectiva de partículas, este intento de alineación polar por diferencia de campo eléctrico genera fricción y esta a su vez, calor, liberando al azufre a su estado de oxidación. Los susceptores magnéticos tienen la característica de absorber energía electromagnética y convertirla en calor, su uso en el pretratamiento de minerales sulfurosos tiene el fin de aportar calor al sistema cerrado del microondas dentro del cual se expone la muestra mineral, en este caso el mineral recibe calor desde arriba por las microondas y desde abajo por una almohada de magnetita (Fe_3O_4) que es uno de los susceptores más conocidos.

Esta investigación sienta un precedente en el país en el ámbito del pretratamiento indirecto de menas refractarias con microondas, el evaluar el método con un mineral de una mina específica permite concebir información base para considerar la aplicación a otras menas con presencia de pirita asociada al oro y que empleen la lixiviación con cianuro como técnica de recuperación metálica.

CAPÍTULO I

1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento

Alrededor del mundo la mineralogía de menas de oro puede tener asociaciones de acuerdo con la metalogénesis (Vassallo 2008), de cada depósito, de entre estos se destacan los sulfuros de hierro y arsénico. Bazan, Lara y Brandalez (2018, pág. 2) sostienen que los minerales refractarios de oro son aquellos en los cuales el metal no es recuperable por concentración gravimétrica básica o por lixiviación simple, de tal forma, el autor explica que son considerados materiales refractarios los que, por medio de procesos de cianuración, brindan una recuperación inferior el 75% del metal.

En el Ecuador para la recuperación de oro de asociaciones refractarias mediante cianuración, actualmente se realizan pruebas a escala laboratorio de biooxidación, oxidación con ácido nítrico, oxidación con peróxido de hidrógeno y oxidación con ozono, pruebas de flotación con reactivos especiales para deprimir las causas del preg-robbing seguido de pretratamiento con un surfactante catiónico para pasivar material carbonoso. Por tanto, se cree que ocurren grandes pérdidas a escala artesanal e industrial en especial en las minas menos tecnificadas (Jaramillo y Aguirre 2014, pág. 2).

Rodríguez et al (2022, pág. 39) precisan la idea de romper la estructura del mineral antes del proceso de lixiviación como tal y liberar el oro que bien puede encontrarse finamente disperso sobre los sulfuros, incluido dentro de los granos de pirita o bien dentro de la red cristalina de la pirita (oro invisible). El efecto positivo de esta técnica conforme Salinas et al (2004) se verá reflejada en el incremento de disolución de oro en los licores de lixiviación y un menor tiempo de cianuración.

Nanthakumar, Pickles y Kelebek (2007) en su investigación tratan el mineral de mena de Barrick Gold Strike mediante microondas por periodos de tiempo determinado de manera que se puede tener un punto de comparación de acuerdo con el tiempo de exposición del mineral, para el caso citado se logra según lo especifican, una recuperación de oro del 98% empleando magnetita como suscepto magnético para tener mayor exposición y capacidad de calor en el medio.

En la presente investigación se plantea expandir las variables del experimento de Nanthakumar, Pickles y Kelebek (2007) con el fin de diagnosticar los efectos que se manifiestan al exponer mineral de la mina “La Zamorana”, los resultados sean positivos o negativos tienen la capacidad

de abrir paso a desarrollar más investigaciones de acuerdo con las necesidades técnicas de cierto grupo clasificado como minería artesanal en los diferentes distritos del país que tengan en el mineral de mena asociaciones auríferas en sulfuros y se encuentren empleando la lixiviación como proceso de recuperación metálica

1.2. Delimitación

Esta investigación se desarrolla a escala de laboratorio en las instalaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo sede Morona Santiago, se centra en el estudio de la mena aurífera refractaria que se envía a procesos de lixiviación en el “distrito minero Chinapintza” ubicado en la provincia de Zamora Chinchipe al sur del Ecuador. Se contempla la Difracción de Rayos X (DRX) misma que se ejecuta en los laboratorios de las instalaciones de la Escuela Politécnica Nacional para determinar la composición mineralógica del material aguas abajo de los molinos, antes de ingresar a los tanques de lixiviación.

Como paso seguido surge la aplicación de pretratamiento asistido por microondas y magnetita (susceptor magnético) mediante el cual según precedentes investigativos alrededor del mundo aceleran la oxidación y disolución de minerales refractarios. La efectividad del método para el mineral en estudio puede ser tanto positiva como negativa, se verá reflejada en los valores de recuperación de oro en los licores lixiviados y concentración metálica de oro en los relaves.

1.3. Justificación

La aplicación del pretratamiento con microondas de una mena aurífero-sulfurosa surge como una propuesta innovadora para experimentar y comprender la cinética de lixiviación de acuerdo a la mineralogía asociada. Esta técnica busca desencapsular el oro de las partículas refractarias, facilitando su liberación y aumento de disolución durante la lixiviación con cianuro. Aprovechando la capacidad de las microondas para generar calor selectivamente en moléculas polares, se promueve la descomposición de minerales y la oxidación de sulfuros, verificando así la eficiencia del proceso de lixiviación. En el caso de una oxidación de sulfuros efectiva no solo se maximiza la recuperación de oro, sino que también se reduce el consumo de reactivos y energía, contribuyendo a la sostenibilidad y rentabilidad de la industria minera.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo principal

Evaluar el pretratamiento indirecto de mineral aurífero sulfuroso mediante microondas.

1.4.2. Objetivos específicos

Caracterizar el mineral aurífero aplicando la técnica DRX antes y después del pretratamiento.

Analizar la eficiencia de la lixiviación con el pretratamiento y sin el pretratamiento.

CAPÍTULO II

2. REVISION DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1. Antecedentes

Con el panorama cambiante del desarrollo y utilización de recursos minerales de oro, los recursos de oro fácilmente tratables están disminuyendo continuamente, mientras que los minerales de oro refractarios se están convirtiendo en los recursos más importantes en el campo de la extracción de oro (Liu et al. 2024, pág. 1079).

Liu et al. (2024) realizaron una investigación titulada “Pretratamiento de mineral de oro refractario mediante curado con ácido sulfúrico concentrado” en la capital de la república China, Beijing. El objetivo de esta propuesta fue utilizar ácido sulfúrico concentrado como oxidante y agente de lixiviación en un mineral de oro refractario encapsulado en sulfuro, descomponiendo la pirita en el ambiente de curado para exponer el oro y mejorar la eficiencia de la lixiviación. Los resultados experimentales mostraron que en condiciones de relación líquido sólido 3:1, temperatura de curado de 240 °C y tiempo de reacción de 1,5 h, la tasa de pérdida de peso y la tasa de eliminación de hierro de la muestra de mineral alcanzaron el valor más alto de 60,01% y 99,68%. respectivamente. La fase principal del residuo de curado fue $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, y la sílice fue casi la única fase después del lavado. Al mismo tiempo, al combinar el método de lixiviación de oro con sistema de tiosulfato de sodio, la tasa de lixiviación de oro aumentó del 3,67% al 81,30% antes y después del pretratamiento con ácido sulfúrico concentrado.

Li et al (2017) han desarrollado una investigación basada en la “Mejora de la lixiviación de oro a partir de una calcina de concentrado de oro refractario mediante pretratamiento separado de fracciones de tamaño grueso y fino” misma que tuvo lugar en Changsha, antigua ciudad china. El objetivo general del estudio fue evaluar la eficacia de diferentes métodos de lixiviación basado en el tamaño de partículas para mejorar la extracción de oro de una calcina de concentrado de oro refractario. La muestra de calcina contenía As, S y C. El diseño utilizado fue un estudio experimental con diferentes tratamientos de lixiviación. Los instrumentos empleados fueron equipos a escala de laboratorio para lixiviación y equipos para análisis químicos como EAA, DRX y SEM. Los resultados mostraron una proporción total de lixiviación de oro del 70,2%, con variaciones significativas apoyadas en el tamaño de las partículas. La lixiviación con álcali fue más efectiva para exponer el oro encapsulado en fracciones gruesas y medianas, mientras que el lavado con agua de curado con ácido sulfúrico fue más favorable para abrir la encapsulación en

fracciones finas. Este enfoque mejoró la proporción total de lixiviación de oro a un 93,6%, lo que demuestra ser una estrategia eficaz para intensificar la extracción de oro en calcinas refractarias de concentrado de oro con As, S y C.

SAIMM (1988) destaca su desarrollo investigativo acerca de “La extracción de oro a partir de concentrados sulfídicos mediante tostación y cianuración” desarrollada en la ciudad de Bendigo, Australia. El propósito fundamental de la investigación consistió en explorar la refractariedad del oro en minerales piríticos del Transvaal oriental, especialmente su asociación con sulfuros y material carbonoso gráfico, que afectan la recuperación del oro debido a su actividad de adsorción. La muestra consistió en tres concentrados de flotación del área de Barberton. Se utilizó un diseño experimental para evaluar los efectos de la tostación en la extracción de oro. Los instrumentos empleados incluyeron tamices húmedos, horno de mufla, Cyclosizer, espectrofotómetro de absorción atómica (AAS) y microscopio electrónico de barrido (SEM). Se observó que la cianuración directa resultó en extracciones de oro del 16 al 30%, mientras que después de tostar los concentrados a temperaturas de 650 a 700°C durante 20 minutos, las extracciones aumentaron significativamente a más del 86%. El examen de los residuos después de la cianuración indicó la presencia de oro en las calcinas, sugiriendo la encapsulación física de las partículas de oro como la razón principal del comportamiento refractario.

Qin et al. (2021) también han estudiado el mejoramiento de procesos de lixiviación, proceso que se redacta en su publicación “Recuperación de oro a partir de mineral de oro refractario sulfurado: Pretratamiento de Tostado por oxidación y extracción de oro” en la ciudad de Changsha, republica China. El propósito fundamental del estudio fue proponer una innovadora estrategia para recuperar oro a partir de minerales refractarios de oro, con el fin de mejorar la eficiencia de recuperación del oro y reducir la contaminación ambiental. La muestra consistió en minerales refractarios de oro que presentaban desafíos en su tratamiento, como baja recuperación de oro y contaminación ambiental. El diseño del estudio incluyó dos etapas de tostado para la eliminación de arsénico y azufre, seguido de lixiviación con tiourea para la recuperación del oro y un segundo tostado mejorado con cloración para la recuperación del oro en presencia de pirita. Los instrumentos utilizados incluyeron equipos de análisis químico y de proceso para evaluar la eficiencia de eliminación de arsénico y azufre, así como la exposición del oro durante el proceso de tostado. Los resultados obtenidos demostraron una eficiencia de eliminación de arsénico del 96.98% en la primera etapa de tostado, mientras que en la segunda etapa se logró una eficiencia de eliminación de azufre del 97.19% y una exposición del oro del 84.11%. Además, se propuso por primera vez el uso de tiourea y cloración mejorada con pirita para extraer oro de la escoria de tostado de la segunda etapa, logrando una eficiencia de recuperación de oro del 98.06%.

Saba et al. (2011) también corrigen algunas deficiencias de la lixiviación en su obra “Procedimiento de pretratamiento diagnóstico para la lixiviación cianurada simultánea de oro y plata a partir de un mineral refractario de oro/plata” en la ciudad de Tabriz, Irán. El objetivo general del estudio fue mejorar la disolución simultánea de oro y plata en un mineral refractario de oro mediante la determinación de etapas de pretratamiento. La muestra consistió en un mineral refractario de oro, en el cual se realizaron estudios mineralógicos mediante técnicas de capa delgada y secciones pulidas, además de análisis químicos. Se diseñó un procedimiento de "lixiviación diagnóstica" en base a estos estudios. Los resultados de la lixiviación diagnóstica sugirieron que los agentes de pretratamiento más efectivos para el oro y la plata son el cloruro férrico y el ácido sulfúrico, respectivamente. Las condiciones óptimas para la disolución simultánea de oro y plata se determinaron utilizando una técnica de diseño factorial de dos factores. Los pretratamientos con ácido sulfúrico y cloruro férrico aumentaron la eficiencia de la disolución del oro del 54.7% al 82% y de la plata del 37.4% al 81.6%.

Gavino (2018) ha desarrollado su tesis “Tratamiento por flotación y cianuración de minerales auríferos con presencia de pirita para la concentración y extracción de oro y plata a nivel experimental” en la ciudad peruana de Huacho. El propósito fundamental de su estudio fue examinar el tratamiento de minerales auríferos con presencia de pirita mediante flotación y cianuración para la concentración y extracción de oro y plata a nivel experimental. La muestra consistió en un mineral sulfurado con una ley de cabeza de 4.3 g/TM de oro y 230 g/TM de plata. Se utilizó un diseño experimental aplicado predictivo cuantitativo. En la etapa de flotación, se emplearon 20 kilos de mineral en pruebas cíclicas, mientras que en la cianuración se utilizaron 500 gramos de concentrados para cada prueba. La granulometría fue del 84% pasante a malla 200 en la molienda, con un pH de 7.8, lo que resultó en un concentrado de 41.60 g Au/TM y 1661 g Ag/TM, con una recuperación del 87.43% de oro y 68.23% de plata. En el proceso de cianuración, se mantuvo un pH entre 10.5 y 11 durante 36 horas, con una densidad de 1350 g/l. Las pruebas sin remolienda mostraron una granulometría del 93.66% pasante a malla 200 y una recuperación del 82.44% de oro y 63.26% de plata, mientras que las pruebas con remolienda tuvieron una granulometría del 91.16% pasante a la malla 325, con una recuperación del 85.23% de oro y 64.75% de plata. El consumo de cianuro fue de 5.975 kg/TM y de cal fue de 2.005 kg/TM para las pruebas sin remolienda, y de 5.922 kg/TM de cianuro y 2.213 kg/TM de cal para las pruebas con remolienda.

Rodríguez et al. (2022) han realizado la investigación que se fundamenta el artículo denominado “Consumo de cianuro de concentrado de pirita aurífera empleando ozono como pretratamiento” en la ciudad de Guanajuato, México. Tuvo como objetivo general del estudio, evaluar el impacto

del pretratamiento con ozono en el consumo de cianuro al cianurar un concentrado de pirita aurífera. La muestra consistió en un concentrado de pirita con una ley de 67.44% de FeS_2 . Se diseñaron pruebas de cianuración a 1000 y 3000 ppm de CN^- , observando una reducción del consumo de cianuro del 54% y 69% respectivamente con el pretratamiento de ozono. Se utilizó un diseño experimental para llevar a cabo estas pruebas. Los resultados indicaron una disminución significativa en el consumo de cianuro, lo que sugiere el potencial del pretratamiento con ozono para mejorar la eficiencia del proceso y reducir su impacto ambiental.

Coaguila y Lazaro (2018) también estudiaron minerales refractarios en su trabajo de tesis “Pretratamiento de la lixiviación de un mineral refractario de oro y plata asociado a sulfuros con la adición de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio” misma que tuvo lugar en la ciudad de Arequipa, Perú. El enfoque de este estudio fue evaluar la eficacia de un pretratamiento en la lixiviación de un mineral refractario asociado a sulfuros mediante la adición de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio, con el propósito de optimizar la recuperación de oro y plata en el proceso posterior de cianuración. La muestra consistió en un mineral refractario que presentaba una ley de cabeza de 16.183 g/TM de Au y 55.00 g/TM de Ag, compuesto principalmente por cuarzo, arcilla y diversos sulfuros como la pirita, estibina y pirargirita. Se utilizó un diseño experimental de análisis factorial lineal para identificar los factores y niveles que influyen en el proceso y sus interrelaciones. Los resultados mostraron que la extracción de oro y plata aumentó significativamente después del pretratamiento, alcanzando valores de 85.73% y 88.12% respectivamente, en comparación con el 62% de oro y 41% de plata obtenidos sin pretratamiento. Los parámetros óptimos para el pretratamiento fueron una concentración de sulfuro de sodio de 4.1 mol/L, hidróxido de sodio a 3.75 mol/L, un tiempo de 2.5 horas y un porcentaje de sólidos del 25%. Se observó que la concentración relativa de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio fueron los factores más influyentes en la extracción de oro y plata. El pretratamiento resultó en una remoción significativa del antimonio, contribuyendo al incremento del porcentaje de extracción de oro y plata.

Gudyanga et al (1998) de igual forma desarrolla su investigación en el “Pretratamiento reductivo-oxidativo de estibnita concentrada por flotación: consideraciones termodinámicas y cinéticas” en la ciudad de Santiago del país chileno. La misión del estudio fue analizar la termodinámica y cinética de la descomposición reductiva del estibnita (Sb_2S_3), un sulfuro refractario, utilizando una solución acidificada de iones de cromo (II) en un medio de cloruro (para la recuperación de Au). La muestra consistió en estibnita, y se empleó un diseño experimental para evaluar los efectos del pH y la concentración del reductor en la reducción del estibnita a antimonio (Sb) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), logrando una reducción de más del 80%. La sensibilidad a la

temperatura sugiere la presencia de dos modos de control de la velocidad: difusión en el rango de 60-90°C (333-363 K) y reacción química por encima de 90°C. A pesar de la reducción del mineral huésped del sulfuro (Sb_2S_3) en un 80%, se liberó muy poco oro (<16%). Un pretratamiento secuencial reductivo-oxidativo del mineral de estibinita logró una liberación del 90% del oro, lo que sugiere que en los minerales estibníticos, las especies de sulfuro no son completamente responsables de la refractariedad reportada. El oro puede estar en forma submicroscópica como partículas finamente diseminadas o en solución sólida como auroestibinita (Au_3S), lo que requiere un tratamiento oxidativo adicional después de la descomposición del sulfuro.

Salinas et al. (2004) pretrata minerales refractarios, su investigación “Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la peroxidación de minerales sulfurados con ozono” es desarrollada en Ciudad de México, país mexicano. Este estudio mantenía el enfoque de mejorar el proceso de cianuración de oro y plata en un mineral refractario mediante la preoxidación con ozono. La muestra estudiada consistió en un mineral con importantes cantidades de plata (Ag) y oro (Au), las especies minerales incluyeron principalmente pirita, con algunos contenidos de esfalerita, galena y cuarzo. Se empleó un diseño experimental que incluyó la preoxidación del mineral con ozono como pretratamiento a la cianuración. Se utilizaron técnicas de caracterización química y mineralógica para analizar la composición del mineral y su distribución granulométrica. La preoxidación del mineral con ozono resultó en una mejora significativa en la disolución de plata y oro durante el proceso de cianuración. Se observó un aumento del 10.8% en la disolución de plata y un aumento del 53% en la disolución de oro en comparación con el mineral no tratado con ozono, evidentemente la matriz del mineral se alteró significativamente con la preoxidación, lo que contribuyó a una mejor disolución de los valores de oro y plata.

Díaz (2012), ha desarrollado una investigación que va de la mano con la reducción de afección ambiental de procesos mineros, en su trabajo de tesis “Optimización de parámetros para la biooxidación de minerales polimetálicos del distrito minero Portovelo”, misma que fue desarrollada en la ciudad de Loja, Ecuador. El objetivo de esta investigación fue determinar los valores óptimos para biooxidación como son concentración de inóculo y concentración de inductor (Fe^{+2}) para la lixiviación de sulfuros polimetálicos y conseguir la mejor recuperación de oro de los minerales biolixiviados. Se utilizaron microorganismos *Acidithiobacillus ferrooxidans* nativos. Se realizaron pruebas en el laboratorio a 5 %, 10 %, 15 % y 20 % V/V de concentración de inóculo y cuatro concentraciones de inductor (Fe^{+2}) como: 2, 4, 6 y 8 g/L. Los resultados obtenidos luego de los ensayos de biooxidación fueron: la mejor productividad volumétrica (Q_p) fue de 0,241 g/Ldía para hierro y 0,295 g/Ldía para sulfatos. El mejor grado de extracción de hierro que se logró encontrar es de 42 % con los parámetros ensayados. Los

rendimientos de oro luego que las muestras fueron biooxidadas son cercanos al 68 % de recuperación.

El mismo tipo de pretratamiento es realizado por Jaramillo y Aguirre (2014) en la publicación “Efecto del tiempo de residencia sobre la biooxidación de un mineral aurífero refractario”, llevado a cabo también en la ciudad de Loja, Ecuador. El objetivo general del estudio fue evaluar el efecto del tiempo de residencia sobre un sistema continuo de biooxidación con la finalidad de obtener la mejor solubilización del mineral. La muestra estuvo constituida minerales sulfurados y microorganismos nativos utilizados en el proceso de biooxidación. El diseño que se utilizó fue un ensayo en reactores de tanque agitado, experimentando con tiempos de residencia de 2, 4, 6, 8 y 10 días, manteniendo constantes variables como velocidad de agitación (400 rpm), flujo de aire (3 vvm), altura del rotor (3.5 cm), temperatura (30°C), pH (1.8), tamaño de partícula (-200 mallas) y densidad de pulpa (15% p/v). Los instrumentos que se utilizaron fueron aquellos necesarios para medir la concentración de Fe²⁺, Fe total, sulfatos, proteína planctónica, proteína total, conteo microbiano, pH y Eh. Los resultados obtenidos han sido que la mejor solubilización del mineral se logró en un tiempo de residencia de 6 días, obteniendo una productividad volumétrica (Q_p) de Fe³⁺ de 6.64 g/Ldía, de SO₄²⁻ de 6.89 g/Ldía y una recuperación de oro del 17%.

Pacheco (2017) desarrolla en la ciudad de Quito, Ecuador, su tesis denominada “Estudio de la oxidación de un mineral sulfurado Aurífero refractario en medio acuoso para incrementar la disolución de oro en el proceso de cianuración”. El objetivo general del estudio fue evaluar tres métodos oxidativos para mejorar la recuperación de oro y plata. La muestra estuvo constituida por un mineral caracterizado por difracción de rayos X (DRX) que contenía pirita, arsenopirita, calcopirita, calcosita, caolinita y cuarzo, así como por espectrofotometría de absorción atómica (EAA) con 2.0 % Cu, 27.8 % Fe, 0.4 % Pb y 0.3 % Zn, y ensayo al fuego con 68.6 g/t de Au y 100.4 g/t de Ag. El diseño que se utilizó fue experimental, variando los agentes oxidantes: ácido nítrico, peróxido de hidrógeno y ozono, modificando el tamaño de partícula, concentración y tiempo de oxidación. Los instrumentos utilizados fueron equipos para realizar cianuración, para evaluar la eficiencia de la oxidación y la liberación de oro. Los resultados obtenidos han sido que la mejor recuperación de Au y Ag en solución se logró con ácido nítrico (HNO₃), alcanzando 80.4 % de Au y 29.5 % de Ag, utilizando un tamaño de partícula (d₈₀) de 92 μm, una solución de 3 N y 2 horas de oxidación. Con peróxido de hidrógeno (H₂O₂), se obtuvo una recuperación de 24.1 % de Au y 17.1 % de Ag, utilizando d₈₀ de 92 μm, una solución al 30 % en volumen y 0.75 horas de oxidación. Con ozono (O₃), se logró una recuperación de 44.8 % de Au y 7.9 % de Ag, utilizando d₈₀ de 92 μm, una saturación previa de 0.5 horas y 1 hora de oxidación. Así, el

HNO₃ resultó ser el agente oxidante más efectivo para la recuperación de oro en un mineral sulfurado aurífero refractario bajo las condiciones descritas.

Dentro de las propuestas alternativas de recuperación de oro refractario se tiene a Valdivieso (2017) en su tesis “Diseño de proceso de tratamiento para menas refractarias con alto porcentaje de preg-robbing” cumpliendo su desarrollo en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. La misión objetiva ha sido diseñar un proceso de tratamiento para una mena refractaria con alto porcentaje de preg-robbing, que reduce la eficiencia de la lixiviación con cianuro, obteniéndose recuperaciones menores al 10% mediante cianuración directa. La muestra estuvo constituida por esquisto grafitico con un contenido de grafito del 17.2 % en el material de cabeza. El diseño experimental incluyó pruebas de flotación con el reactivo REX® para deprimir el material causante del preg-robbing y un pretratamiento con un surfactante catiónico para pasivar el material carbonoso durante la lixiviación estándar y con carbón (CIL). Los instrumentos utilizados fueron microscopios de barrido electrónico, equipos de difracción de rayos X y análisis de láminas delgadas, además de equipos para pruebas de flotación, cianuración y lixiviación con carbón activado. Los resultados obtenidos mostraron que el uso de REX® disminuyó el preg-robbing de 50% a 3.69% con una dosis de 6.36 kg/ton, mientras que la cianuración con surfactante no aumentó la recuperación y tuvo un efecto negativo. El uso de carbón activado resultó muy positivo, aumentando las recuperaciones del 10% inicial a 87% de oro cianurable.

Dentro del Ecuador, no se detallan investigaciones previas en el pretratamiento indirecto asistido por microondas, es así como esta evaluación determinará la capacidad del microondas de mejorar los procesos de lixiviación que se emplean como alternativa de extracción de oro en el distrito Chinapintza al sur del país, vinculando sobre todo el posible uso al tratamiento de sulfuros auríferos con comportamientos refractarios con el fin de verificar el efecto que tiene en los procesos de lixiviación con cianuro.

2.2. Distrito minero Chinapintza

2.2.1. Ubicación geográfica

El distrito Minero Chinapintza se ubica en la Provincia de Zamora Chinchipe, Cantón Paquisha, al S-E del Ecuador frontera con Perú, localizado en la zona sub/andina y en las faldas occidentales de la cordillera del cóndor (Tapia 2021, pág. 1).

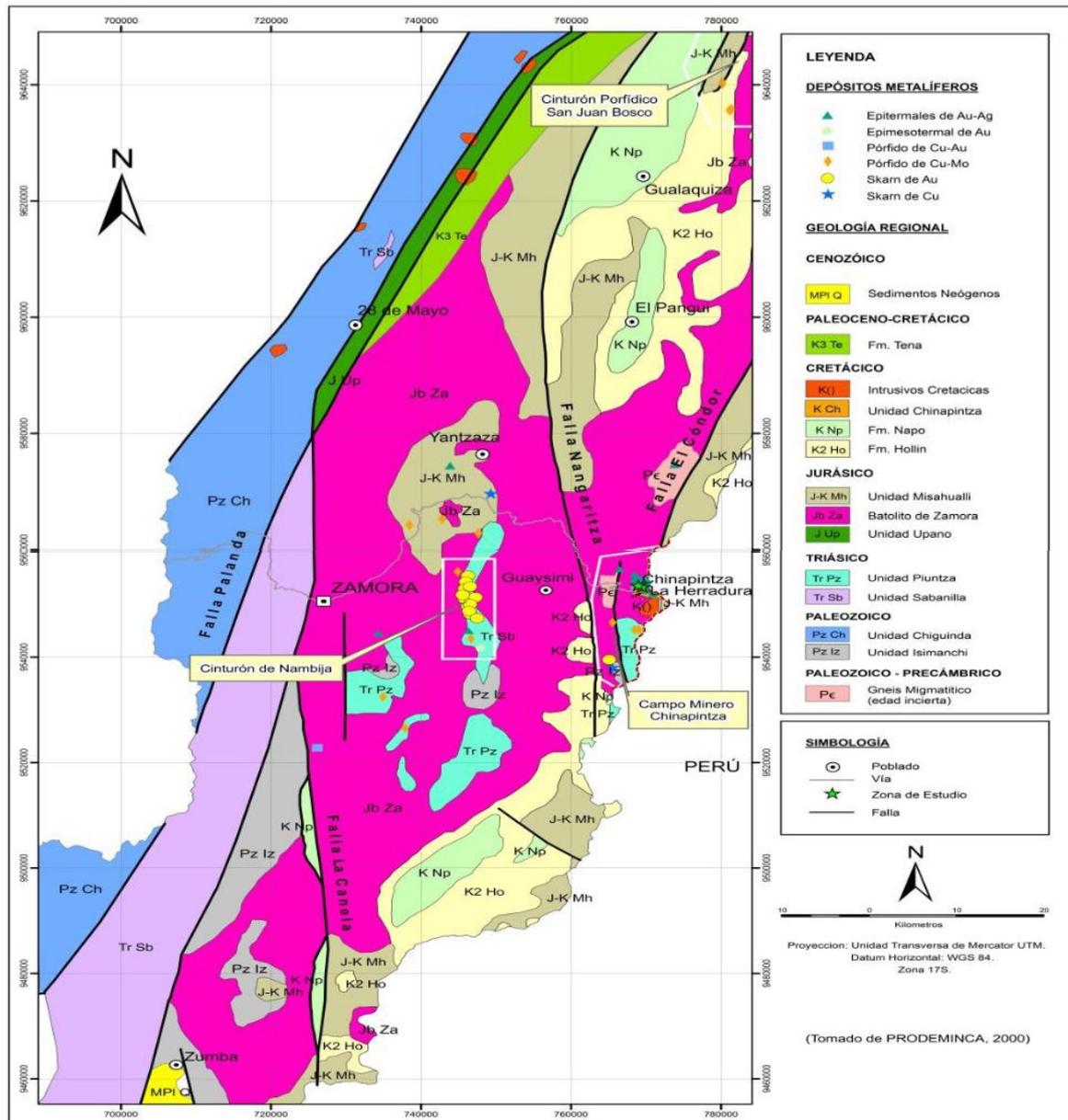


Ilustración 2-1: Ubicación del distrito minero Chinapintza.

Fuente: (Alvarado y Guartán. 2015, pág. 15)

2.2.2. Entorno geológico

Se encuentra constituido por un Basamento de rocas metamórficas del Triásico pre-Mesozoico y anfibolitas de Unidad Misahuallí intruidos por el batolito granodiorítico de Zamora de edad Jurásico Medio. Complejos extrusivo-intrusivo de composición andesita a riolita (principalmente dacita-riodacita) de edad Cretácico Medio, compuestos de volcanitas subaéreas (flujos, tobas y brechas) y sedimentos epiclásticas y volcanoclásticos proximales intrusiones subvolcánicas (pórfidos y microgranitoides) e.j. pórfidos Chinapintza y Biche. (PRODEMINCA 2000)



2.2.2.2. Geometría

El sistema de vetas polimetálicas principales tiene un rumbo NNW (variación 295-360°) y son verticales o fuertemente inclinadas (<65°) hacia el SW y NE. Ellos extienden por unos 5 km pero su mejor desarrollo es dentro del Pórfido Chinapintza en una distancia de c. 1.5km. En profundidad sus espesores son de 0.2 a 2m pero se ensanchan pronunciadamente hacia arriba y en las partes más altas se ramifican y presentan "stockworks" y brechas asociadas. Las vetas transversales tienen rumbos de ENE-WSW (fallas normales con un componente siniestral temprano y dextral tardío) y NWSE (paralelas a fallas interpretadas provisionalmente como siniestral). Las fallas menores mineralizadas dentro de las volcanitas riolíticas son más variables en orientación (rumbos E-W y NNE-SSW) (PRODEMINCA 2000).

2.2.2.3. Textura y estructura

Los sistemas de vetas mineralizadas subparalelas se anastomosan, forman abanicos imbricados (colas de caballo y, localmente duplexes extensionales de escala métrica a hectométrica. Los cuerpos imbricados de la roca encajonante en las estructuras mineralizadas tienen vetillas transversales, "stockworks" y localmente brechas. Las vetas muestran estructuras en cintas, bandeados, coliformes, de relleno de cavidades (drusas). El sulfuro masivo comúnmente aparece en cintas marginales lentes oblicuas debidas a dilatación de las fracturas de enlace. Paragénesis compleja con deposición de los sulfuros principales tanto en fases tempranas como tardías (PRODEMINCA 2000).

2.2.2.4. Mineralogía de la mena

El distrito es un referente dominado por pirita, esfalerita, galena y localmente pirrotina y arsenopirita con cantidades menores de calcopirita y bornita y trazas de oro, electrum y plata aurífera y nativo. La galena argentífera y la esfalerita manganífera. Minerales secundarios de cobre incluyen calcosina, covelina, malaquita y calcantita. Finura del oro/electrum: c.650 (promedio c.35% Ag) (PRODEMINCA 2000).

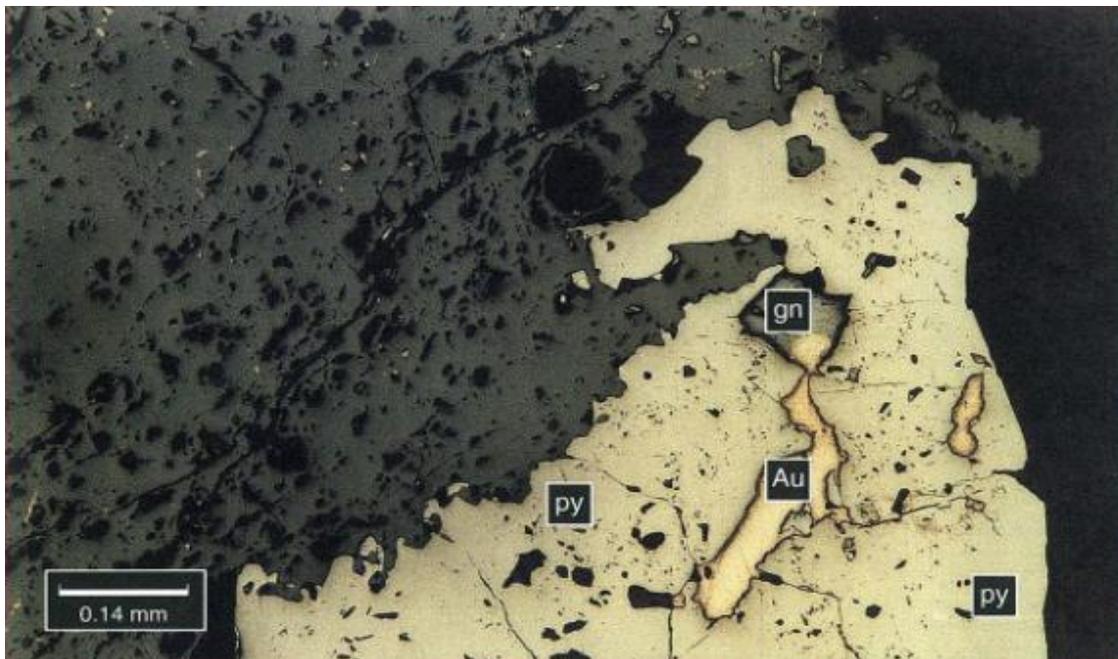


Ilustración 2-3: Microfotografía en luz reflejada de vetas de Chinapintza.

Fuente: (PRODEMINCA 2000)

2.2.2.5. Mineralogía de la ganga

Se disocia de la mena por su contenido de cuarzo, calcita, dolomita, minerales de manganeso (rodocrosita, kutnahorita, rodonita), sericita, smectita, Hita y caolín (PRODEMINCA 2000).

2.3. Bases teóricas

2.3.1. Procesamiento de minerales auríferos

En acuerdo con Londoño et al (2010), cada método utilizado en el proceso de preparación de minerales auríferos cumple una función específica y crucial. La molienda reduce el tamaño de las partículas para facilitar su manipulación y mejorar la liberación de los minerales valiosos. La medición de la distribución de tamaño de partícula proporciona información sobre la granulometría del material, lo que es fundamental para comprender su comportamiento en los procesos posteriores. El método Hardgrove evalúa la capacidad de molienda de un mineral, lo que permite determinar su idoneidad para procesos posteriores. Las etapas de concentración en Mesa Wilfley, JIG y flotación se utilizan para separar el mineral valioso del material de desecho, aumentando así la concentración de oro en la muestra. La oxidación en autoclave se emplea para tratar minerales refractarios, mejorando su susceptibilidad a la lixiviación. La cianuración es un método efectivo para extraer oro al disolverlo en una solución de cianuro, permitiendo su recuperación posterior. Por último, las técnicas de recuperación de oro de las soluciones de cianuración son esenciales para extraer el metal precioso de manera eficiente de las soluciones resultantes. La medición del peso específico y la densidad de pulpa proporciona información valiosa para el diseño y control de los procesos de tratamiento de minerales auríferos, asegurando así una operación óptima de la planta (pág. 239-331).

2.3.2. Hidrometalurgia del oro

Los procesos hidrometalúrgicos, según lo establece (Baena, Campos y Escobar [sin fecha], págs. 51-52), son una serie de reacciones empleadas en la extracción, purificación y recuperación de minerales y metales en entornos acuosos. En el caso específico de la recuperación de oro, los métodos hidrometalúrgicos son fundamentales. Entre los más destacados se encuentran la lixiviación, las técnicas de concentración y purificación de soluciones, así como la recuperación del oro. Dependiendo de la naturaleza de la mena, se aplican diversas estrategias como la cloración, la oxidación a presión y la oxidación biológica para mejorar la extracción de oro

durante la lixiviación. Estas técnicas buscan liberar el oro contenido y transformar los componentes que interfieren en formas menos reactivas.

El autor señala que las reacciones químicas más relevantes en la extracción del oro involucran al propio oro, otros metales de valor y las especies minerales que acompañan al mineral valioso. Estas reacciones, especialmente las relacionadas con los minerales ganga, pueden incrementar el consumo de reactivo y provocar la disolución de especies que afecten negativamente los procesos siguientes. Además, la precipitación de ciertas especies en la solución puede afectar la eficiencia general de la extracción de oro.

2.3.3. Lixiviación con cianuro

En la actualidad, Baena, Campos y Escobar, afirma que se denomina lixiviación, al lavado de una sustancia pulverizada para extraer las partes solubles. La lixiviación de un metal entrega: una solución enriquecida con el ion de interés (metal) la cual es llamada licor, además entrega un sólido que no se disolvió.

Cuando el oro es expuesto a la acción del cianuro en una solución acuosa que contenga oxígeno libre, Roeser y Mesa (2010, pág. 7) establece que se forma un complejo aniónico de oro y cianuro y un hidróxido de sodio alcalino. Las soluciones de cianuro alcalino son altamente selectivas ya que atacan preferiblemente los metales valiosos.

La disolución del oro en el proceso de cianuración puede ser representado por la siguiente reacción propuesta por Elsner (1846), citado en (Roeser y Mesa 2010, pág. 7):

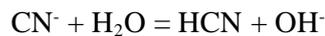


2.3.3.1. Factores asociados a la cianuración

Al igual que el conocimiento de las asociaciones minerales de la mena, para la extracción de oro con cianuro es efectivo el conocimiento de las variables que se asocian al proceso, se da de tal forma, soporte para apuntar a una mejor recuperación de oro controlando aspectos clave que se explican a continuación.

- **Concentración de Cianuro**

Roeser y Mesa (2010) quien cita a (Habashi, 1970), fundamenta que la velocidad de disolución de los metales preciosos aumenta linealmente con el aumento de la concentración de cianuro hasta alcanzar un máximo, a partir del cual un incremento adicional en la cantidad de cianuro tiene un efecto ligeramente retardante. La disminución en la tasa de disolución a concentraciones altas de cianuro se debe al aumento del pH de la solución. El ion cianuro sufre hidrólisis de acuerdo con la siguiente reacción:



- **Oxígeno**

La cantidad de oxígeno disuelto en soluciones diluidas de cianuro, refiriendo a (Roeser y Mesa 2010), depende de cuatro factores:

- La altitud (presión barométrica)
- La temperatura de la solución
- El tipo de intensidad de agitación
- La fuerza iónica de la solución

A bajas concentraciones de cianuro la velocidad de disolución depende únicamente de la concentración de cianuro, a altas concentraciones de cianuro la velocidad de disolución es independiente de la concentración de cianuro y depende únicamente de la presión del oxígeno.

- **Temperatura**

La disolución de oro sube a temperatura creciente como resultado del aumento de actividad y tasa de difusión de las especies reaccionantes, pero la solubilidad máxima se alcanza a las temperaturas 85°C; por encima de éste, la disminución en la solubilidad de oxígeno neutraliza los beneficios del aumento de actividad iónica y de las tasas de difusión (Baena, Campos y Escobar [sin fecha], pág. 55).

- **pH**

La presencia de cianuro en el sistema acuoso, según lo establece Roeser y Mesa (2010), tiene la capacidad de reducir directamente los campos de estabilidad del oro metálico y sus óxidos, favoreciendo la formación del complejo auro-cianuro ($\text{Au}(\text{CN})_2^-$). Teniendo un $\text{pH} > 9$, la

lixiviación del oro con soluciones de cianuro es más eficiente, ya que se evita la formación de ácido cianhídrico (HCN).

- **Área superficial**

El área superficial del oro y la plata expuesta a la solución de cianuro es proporcional a la disolución de los metales preciosos, por tanto, al disminuir el tamaño de la partícula habrá mayor exposición del área superficial, pero debe tenerse en cuenta que no deben generarse lodos ya que estos tienen un efecto contrario en el proceso de cianuración (Roeser y Mesa 2010, págs. 16-17).

- **Agitación**

En procesos controlados químicamente, según lo establece Roeser y Mesa (2010), la velocidad de agitación no afecta la velocidad del proceso, por otro lado, en procesos controlados por difusión, como la cianuración, la agitación sí tiene un efecto significativo: aumenta la velocidad de disolución del oro y la plata al disminuir el espesor de la capa límite del fluido que rodea las partículas, lo que facilita el acceso de los iones cianuro y el oxígeno a la superficie del metal precioso (pág. 16).

2.3.4. Menas refractarias

Las menas "refractarias" son las que no responden adecuadamente al proceso de cianuración y tienen diversas causas de refractariedad, Kongolo y Mwema (1998) destaca la oclusión de metales preciosos en sulfuros (pirita, arsenopirita, estibina), el recubrimiento de partículas de oro con compuestos químicos, la presencia de minerales acompañantes que consumen cianuro (cianicidas) y oxígeno (pirrotina, minerales de cobre), materiales carbonosos que adsorben complejos de cianuro, y aleaciones insolubles como "electrum", en la *ilustración 3* se diferencian los dos tipos de refractariedad química y física.

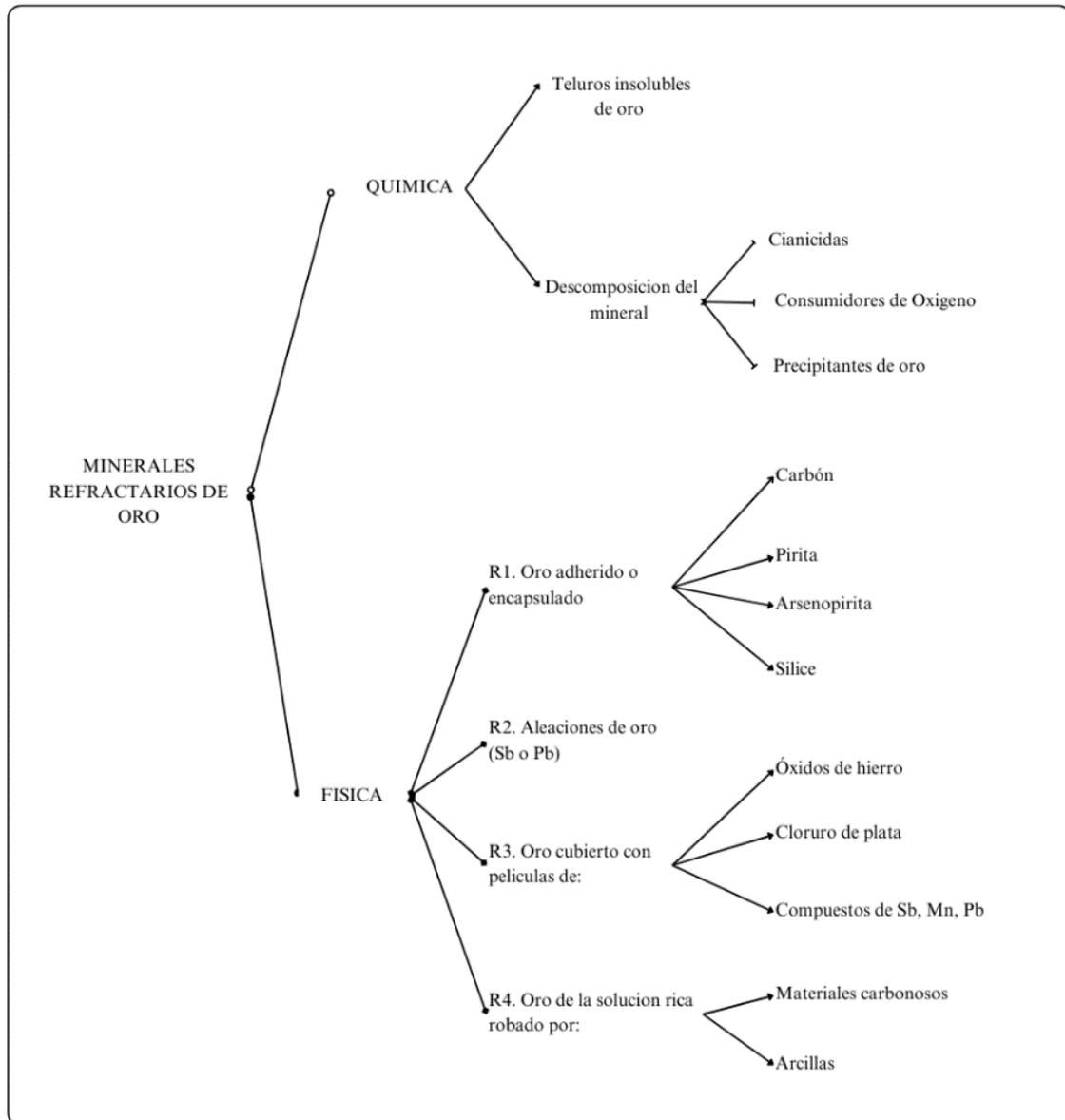


Ilustración 2-4: Clasificación de menas auríferas refractarias.

Fuente: (Kongolo y Mwema 1998)

2.3.5. Ensayos a fuego

Consiste principalmente en la fusión oxidante y/o reductora de una muestra en presencia de una mezcla de reactivos escorificantes y un colector, óxido de plomo. Al fundirse la muestra mineral, los metales preciosos son colectados por el plomo que se reduce a plomo metálico y la ganga es disuelta como escoria (Mesa 2018, págs. 2 - 4).

A continuación, se presentan las tres etapas de procedimiento a seguir para un ensayo a fuego de muestra tipo cuarzo - sulfuro propuesta por (Mesa 2018).

Preparación de la muestra: La muestra debe estar debidamente seca, y pulverizada. 25 g de muestra se pesan y exponen a un horno previamente calentado a una temperatura entre 400 y 700 °C, según el autor lo que se busca es eliminar el azufre, antimonio, arsénico, etc, que afectan la fundición.

Fundición: La muestra tostada y enfriada se mezcla con la carga de fundición y envasa en una funda, misma que se coloca en un crisol de arcilla limpio y adecuado, se compacta para evitar derrames en la fundición antes de cubrir con una capa de bórax. Se dispone las muestras de manera ordenada en el horno a una temperatura mayor a 900 °C hasta alcanzar la fusión total. Se vacía el contenido líquido en una lingotera, al enfriar al ambiente se aprecian las dos fases resultantes, la escoria arriba en forma de vidrio y el plomo metálico debajo, se pretende conseguir el plomo con la menor contaminación de escoria posible.

Copelación: El oro y la plata presente en los 25 g de muestra estaría presente contenido en el plomo, para realizar la separación se aprovecha las diferencias de puntos de fusión del plomo y la afinidad para absorber oxígeno, los metales preciosos no se oxidan a alta temperatura. La copela, construida por una mezcla quínésica porosa comprimida de cemento gris y ceniza de hueso, se coloca en el horno para un precalentado tras la preparación del horno a 750 °C, se coloca el plomo libre de escoria y se deja que el horno alcance una temperatura de 850 °C, el aire dentro de la cámara del horno debe alcanzar una temperatura entre 890 y 900°C para garantizar la fluidización del plomo y conservación de la plata.

Digestión de botones de oro y plata

El botón obtenido después de la copelación, basándose en lo estipulado por (Buitrón et al. 2020), debe ser colocado en un tubo de ensayo con ácido nítrico (HNO_3), este agente tiene la capacidad de disolver la plata. Según los autores, después debe agregarse agua regia que es una solución con 1 parte de ácido nítrico (HNO_3) y 3 partes de ácido clorhídrico (HCl), esta mezcla disuelve el oro presente en la muestra. Finalmente se debe aforar la solución, es decir llevarla a un volumen conocido. Para la cuantificación de oro recuperado en los ensayos a fuego se emplea un espectrómetro de absorción atómica.

2.3.6. Pretratamiento mineral asistido por microondas

El uso de microondas en el pretratamiento de minerales refractarios de oro, según (Haque 1999, págs. 17-18), mejora significativamente la recuperación del metal. Los minerales sulfídicos como

la pirita (FeS_2), arsenopirita (FeAsS) y pirrotita (FeS) son comúnmente tratados con microondas debido a su capacidad para calentarse fácilmente. El autor a la vez destaca que en estudios de laboratorio el pretratamiento con microondas en aire de un concentrado refractario de oro arsenopirítico logró volatilizar más del 80% de As y S como As_2O_3 y SO_2 , mientras que el hierro se oxidó a hematita (Fe_2O_3), resultando en una extracción de 98% de Au mediante lixiviación con cianuro alcalino.

2.3.6.1. Interacciones microondas-mineral

Haque (1999) señala que, las microondas calientan los materiales al inducir movimiento molecular mediante la migración de iones y la rotación de dipolos. La capacidad de penetración de microondas es limitada por la absorción de energía del material que están tratando de inducir, algunos metales no se calientan con microondas debido a su alta conductividad, mientras que los dieléctricos, que absorben energía de microondas, se calientan fácilmente. Los materiales no homogéneos pueden calentarse de manera desigual, pero este efecto puede minimizarse con una mezcla adecuada. Incluso los aislantes pueden calentarse con microondas por encima de cierta temperatura crítica. El tamaño del material también influye en su capacidad de calentamiento, y los materiales de baja absorción pueden calentarse utilizando un facilitador de calor de microondas (págs. 2-5).

- **Calentamiento volumétrico**

El calentamiento se produce en el interior del cuerpo, según especifica Menéndez y Hernández (2017) es a este efecto que se conoce como calentamiento volumétrico ya que, en principio, no existe este gradiente de temperaturas. De hecho, y dado que las pérdidas de calor son mayores en la superficie del cuerpo, podríamos considerar que el calentamiento se produce de dentro hacia fuera; al revés que en el calentamiento convencional.

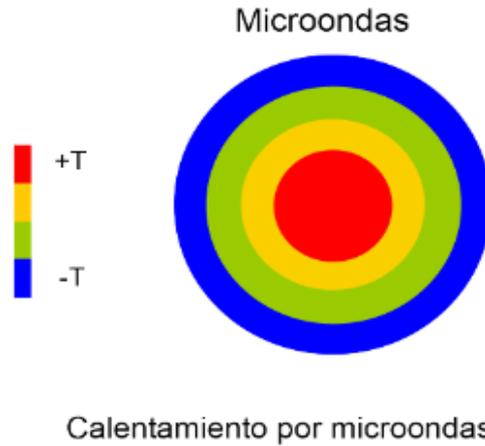


Ilustración 2-5: Gradiente de temperaturas en el calentamiento por microondas.

Fuente: (Menéndez y Hernández 2017, pág. 7)

- **Calentamiento selectivo**

Es un proceso en el cual la energía de las microondas se transforma en calor dentro de materiales específicos, según sus propiedades dieléctricas, mientras que otros materiales en el sistema no se ven notablemente afectados por la radiación (Menéndez y Hernández 2017, pág. 15).

- **Efectos no térmicos**

Los efectos no térmicos de las microondas mejoran reacciones químicas irreproducibles por calentamiento convencional, alinear moléculas con dipolos permanentes con el campo electromagnético genera calor por rotación, fricción y colisión, resultando en perfiles inversos de temperatura y sobrecalentamiento de disolventes en medios polares (Menéndez y Hernández 2017, pág. 188).

2.3.6.2. *Pretratamiento indirecto*

Conceptualmente el termino pretratamiento directo se adhiere al hecho de exponer el mineral al microondas únicamente en un crisol, por determinado tiempo y en algunos casos empleando técnicas específicas como el enfriamiento paulatino de la muestra o la mezcla manual. Los materiales pueden calentarse de manera más eficiente cuando se utilizan en combinación con un facilitador de calor para microondas (Haque 1999, págs. 2-5), bajo este concepto el pretratamiento indirecto emplea un suscepter, encargado de absorber la energía emitida por el microondas

generando calor de manera uniforme, en este caso la magnetita. A su vez se emplea un material reflector como lo es el aluminio, encargado de escudar las microondas y dirigirlas hacia el material próximo una mayor distribución energética (Nanthakumar, Pickles y Kelebek 2007, págs. 112-113).

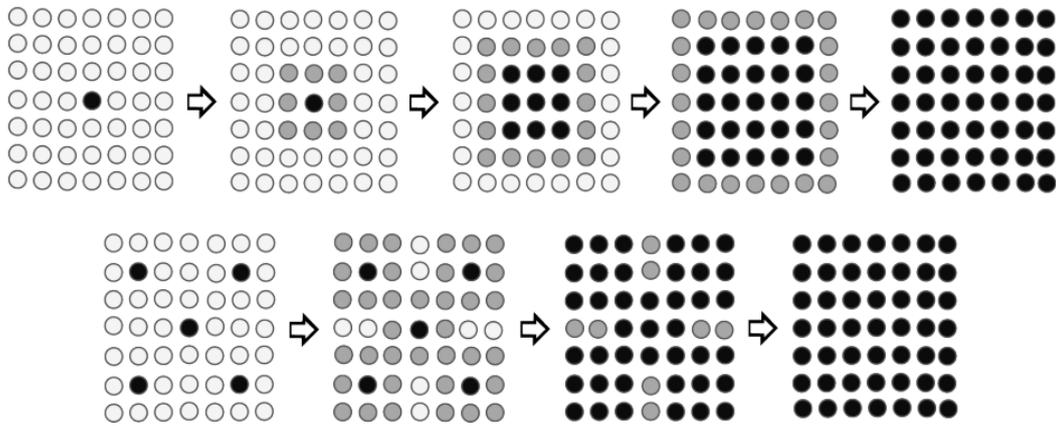


Ilustración 2-6: Esquema de etapas de calentamiento con microondas usando susceptor de microondas.

Fuente: (Menéndez y Hernández 2017, pág. 10)

2.3.7. Caracterización mineral

2.3.7.1. Técnica DRX – Difracción de Rayos “X”

Un ensayo “DRX” es una técnica analítica que, en minería, citando a Tuesta y Vásquez (2012), se utiliza para identificar y cuantificar las fases minerales presentes en una muestra, diferenciar polimorfos y fases amorfas, así como estudiar cambios estructurales en minerales bajo diversas condiciones de temperatura y presión. Este método es importante en la caracterización de la mineralogía de un yacimiento, proporcionando información estructural sobre los minerales tanto metálicos como no metálicos (págs. 2-6).

2.3.8. Principios del “DRX”

El DRX se basa en la difracción de rayos X a través de una muestra cristalina Tuesta y Vásquez (2012, págs. 1-2), los átomos dentro de los planos cristalinos dispersan los rayos X en ángulos específicos, creando picos de difracción que, según el autor, permiten identificar y cuantificar las fases minerales mediante la Ley de Bragg la cual es:

$$n\lambda = 2 d \sin\theta$$

donde:

n representa el orden de difracción

λ es la longitud de onda del haz incidente de rayos X

d es la distancia interplanar

θ es el ángulo de incidencia medido entre los planos en consideración y el haz incidente.

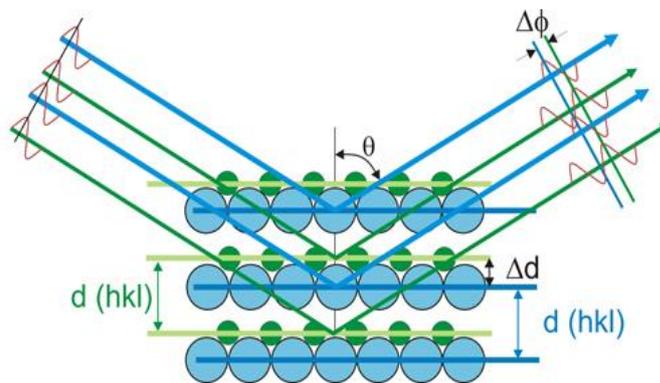


Ilustración 2-7: Esquema del modelo de Bragg.

Fuente: (Tuesta y Vásquez 2012, pág. 2)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLOGICO

3.1. Síntesis del experimento

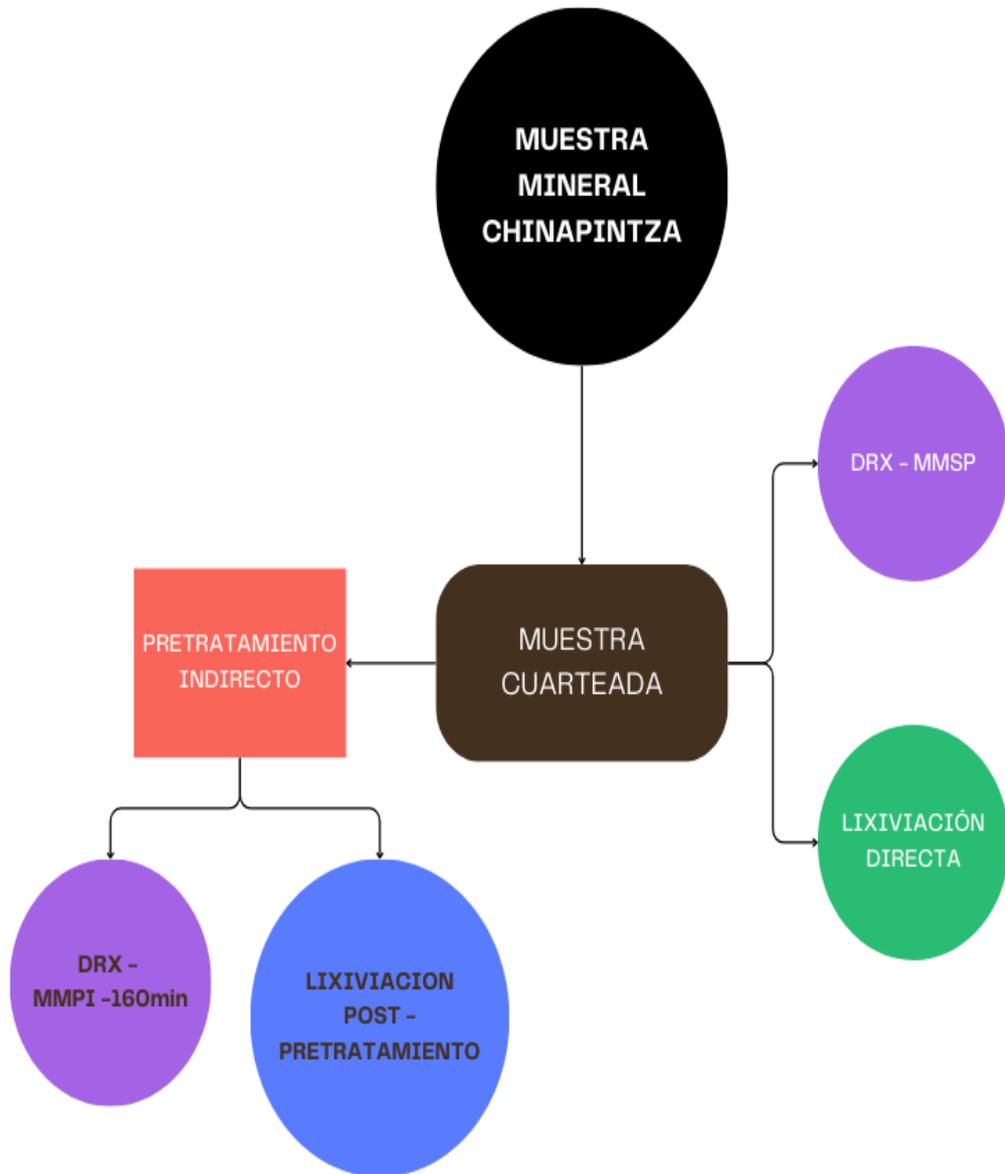


Ilustración 3-1: Diagrama de desarrollo de la evaluación del pretratamiento indirecto con microondas.

Fuente: El autor.

3.2. Materiales y Equipos

Tabla 3-1: Materiales y equipos en cada una de las etapas desarrolladas para la evaluación del pretratamiento indirecto con microondas.

No.	Etapas	Cantidad	Material / Equipo	Función
1.	Preparación y cuarteo de la muestra.	1	Horno	Secado de la muestra de salida de molino de bolas tras 4 horas del proceso de conminación.
		1.8 Kg	Muestra mineral	Muestra de mineral aurífero que será sometida a los procesos que comprende la investigación.
		1 u	Balanza analítica	Control de masa de materiales.
		4 u	Recipientes	Separación ordenada y codificación pertinente de muestras.
2.	Caracterización mineral antes y después del pretratamiento.	1	Equipo DRX	Identificación cuantitativa de fases minerales de mena antes y después del pretratamiento.
3.	Pretratamiento indirecto.	1	Microondas DAEWOO KOR-63DB	Dispensador de energía electromagnética dentro de su propio medio. Capacidad de 17L.
		2kg	Magnetita	Susceptor energético; genera calor y transfiere al medio circundante.
		1 u	Plataforma de Aluminio	Distribuidor de calor en la base del recipiente grande de arcilla refractaria.
		2 u	Crisoles de arcilla refractaria	Crisol grande contiene la magnetita, crisol pequeño contiene el mineral expuesto a experimentación
		1 u	Cronómetro	Controlar los intervalos de tiempo de exposición del mineral al microondas.
		4 u	Envases	Almacenamiento y codificación de muestras.
5.	Lixiviación.	2 u	Agitadores magnéticos	Suspensión de partículas evitando zonas muertas y ayudando a la oxigenación en las reacciones químicas.
		1 u	Agitador de hélice	

		1000 ppm	NaCN	Reacción química con el oro y formación del complejo soluble en agua.
		4 u	Imán	Útiles en la dinámica de la pulpa en los agitadores magnéticos (unidos en pares).
		3 (700ml)	Vasos plásticos	Envases de lixiviación.
		20 litros	Agua destilada	El agua destilada al no estar en contacto con otros iones o cationes reduce la posibilidad de interferencias químicas y facilita el contacto entre el Cianuro de Sodio y el mineral.
		50 g	Cal	Regulador de pH de la pulpa.
		35 u	Papel filtro	Separador de fases solido liquido de las alícuotas.
		3 u	Vasos graduados de vidrio	Control de volumen de líquidos.
		1 u	pH metro	Medición del pH de la solución de lixiviación.
		35 u	Frascos para líquidos	Contenedores de los licores extraídos a diferentes horas del proceso de lixiviación.
5.	Ensayos a fuego.	45.19 g	Litargiro	Oxidante de impurezas.
		31.97 g	Carbonato	Fundente y regulador.
		1.65 g	Sílice	Formador de escoria.
		19.84 g	Bórax	Reductor y fundente.
		2.76 g	Harina	Reductor de óxidos.
		1 u	Crisol	Fuente de fundición de reactivos y muestra.
		1 u	Copela	Purificador de oro y plata.
6.	Digestión de botones de oro.	3 partes	Ácido Clorhídrico	Combinados estos reactivos resultan en agua regia.
		1 parte	Ácido Nítrico	
		1 u	Matraz Erlenmeyer	Fuente en la cual se prepara el agua regia.
		1 u	Digestor	Facilitador de la disolución del oro.
		- ml	Agua destilada	Reactivo útil para llevar la solución a un volumen conocido.
		1 u	Pipeta	Control de volúmenes.
		1 u	Campana de extracción	Succión de gases en área cerrada.

Fuente: El autor.

3.3. Preparación y cuarteo de la muestra

Bajo la noción de mantener una selección y cuarteo de muestras homogéneas con el fin de evitar un efecto pepita se realiza un tamizado y esparcido manual de la muestra tras un secado por 5 horas a 150 grados C dentro de un horno. El mineral se recoge en una fuente metálica seca, se voltea la muestra sobre una superficie plana y con el uso de una regla se divide en 4 partes iguales el cuerpo generado, al colocarlas en fundas etiquetadas se registra su peso para obtener la masa total inicial.



Ilustración 3-2: Homogenización, cuarteo y envasado de muestra de mineral de mena.

Fuente: El autor.

3.4. Pretratamiento indirecto

3.4.1. Extracción del mineral de magnetita



Ilustración 3-3: Separación de magnetita de otros minerales asociados paramagnéticos.

Fuente: El autor.

De un mineral proveniente de minería aluvial en la provincia de Zamora Chinchipe se separa y concentra la magnetita del resto de cristales y arenas diamagnéticas mediante el uso de un imán de 20 cm de diámetro y 2.5 cm de espesor, una vez separada de la muestra inicial se realiza una segunda separación ayudando a concentrar más la magnetita, de la misma forma se realiza una tercera aplicación magnética con el fin de tener la máxima concentración de magnetita mineral. De toda la magnetita concentrada, para el pretratamiento indirecto se emplean 2kg de muestra mismos que sirven para cubrir las paredes del crisol de arcilla refractaria que contiene la muestra mineral para su exposición en el microondas.

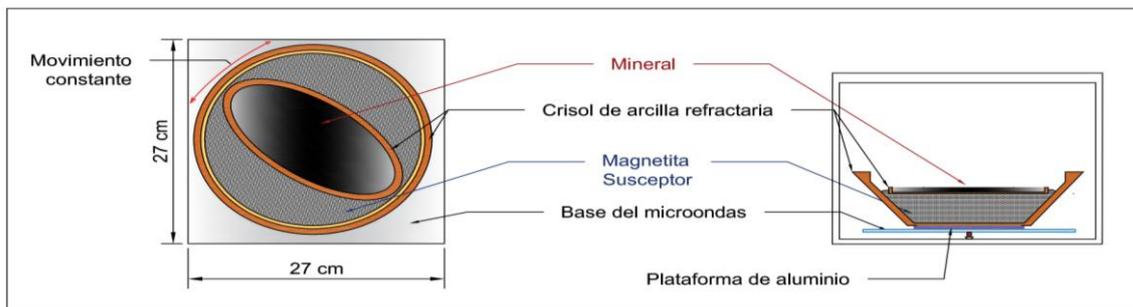


Ilustración 3-4: Vista en planta y perfil del modelo interno de experimento de pretratamiento indirecto asistido con microondas.

Fuente: El autor.

En la investigación realizada por Nanthakumar, Pickles y Kelebek (2007) para el pretratamiento indirecto se emplean 80 g de magnetita, un crisol de alrededor de 120 g que contiene a la magnetita y 4 crisoles pequeños de 20 g cada uno que se colocan sobre la cama susceptora y contienen el mineral que para este caso tiene una capacidad de 2g de mineral cada una, en cada periodo de exposición a las microondas, mismos que han sido de 5, 10, 20, 30 y 40 min. Para la investigación citada, los autores emplean un microondas modelo Sylvania, SM80701 con dimensiones de 29 cm de largo, 27 cm de ancho y 17 cm de alto, respectivamente, la frecuencia de este modelo de microondas sería de 2450 MHz con una potencia de 700 W.



Ilustración 3-5: Colocación de placa de aluminio en la base del microondas.

Fuente: El autor.

Para el experimento de evaluación de lixiviación del mineral refractario que se desarrolla en la presente se dispone de un microondas DAEWOO KOR63DB, este tiene como características una potencia de salida de 800 W y en este caso al igual que el microondas del experimento base, la frecuencia que lo representa es de 2450 MHz



Ilustración 3-6: Proceso experimental del pretratamiento indirecto para mineral refractario mediante microondas y susceptor magnético.

Fuente: El autor, 2024.

En la ilustración 3-6 se observa que en la base del microondas se coloca un disco de aluminio manteniendo el diseño original propuesto por Nanthakumar, Pickles and Kelebek (2007), la placa metálica aporta a la distribución energética y uniformidad del calentamiento.

Para la evaluación del pretratamiento indirecto del mineral aurífero sulfuroso proveniente del distrito minero Chinapintza se desarrolla una ampliación de valores de variables de capacidad de crisoles y del tiempo de exposición, teniendo alrededor de 350 g como peso del crisol grande con 24 cm de diámetro, 2 kg de magnetita, y el crisol que contiene el mineral tiene 20 cm x 12 cm con una capacidad de 65g de mineral que al tener mayor superficie se eleva la capacidad de absorción energética por el mineral de mena tanto con las microondas en la parte superior como en la parte inferior con el material susceptor. Los tiempos de exposición al microondas se da en periodos de 20, 40, 80 y 160 min, se repite el proceso para cada periodo hasta obtener una masa mineral pretratada mayor a 100 g que es la masa de mineral de cabeza para los ensayos de lixiviación con cianuro.

Las muestras de mineral expuestas se almacenan en fundas plásticas con sus respectivos códigos de etiquetas, al ser 50g la masa mínima para los ensayos DRX, se realizan tres repeticiones del pretratamiento para la muestra mineral con periodo de 160 min con el fin de observar si hubo cambios o no en las fases minerales tras la exposición a las microondas.

3.5. Caracterización mineral

Para cuantificar la presencia de fases minerales en la muestra mineral de mena que es cabeza en los ensayos de lixiviación directa, 100 gramos de una de las muestras cuarteadas en la fase inicial de la investigación se pesan y envasan con el código de Muestra Mineral Sin Pretratamiento Indirecto (MMSPI). Del mineral previamente expuesto al microondas en un periodo de tiempo de 160 minutos se realizan 4 repeticiones con el fin de coleccionar más de 200 g de mineral, 100 de los cuales serán pesados y envasados con el código de Muestra Mineral Pretratada Indirectamente (MMPI_160.min)

Las muestras MMSPI y MMPI_160.min son enviadas a la ciudad de Quito para el análisis mediante la técnica de Difracción de Rayos X, en el laboratorio del departamento de metalurgia extractiva de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador.

El mineral se expone a un análisis de los planos cristalinos de los minerales en varias direcciones angulares, los difractogramas representan la variación de intensidad de difracción en las direcciones angulares 2θ . Según lo especifican (Endara y Criollo 2024; De la Torre y Criollo 2024), la determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en las muestras en estudio se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffrac plus (EVA Y TOPAS) para cualificación y semicuantificación.

Para relacionar a que mineral corresponden los picos de intensidad leídos en el ensayo se tienen bases de datos en las cuales se predispone de un valor estándar de intensidad de difracción de una variedad de minerales, metales, arcillas, polímeros, entre otros materiales, algunas de estas fuentes de información pueden ser el (ICDD), (COD), (AMCSD), entre otros.

En el laboratorio de metalurgia extractiva de la Escuela Politécnica Nacional se emite el informe de resultados con la interpretación cuantificada de fases minerales de cada muestra incluyendo el respectivo difractograma.

Las especificaciones del reporte de (Endara y Criollo 2024) aclaran que el límite de detección del equipo empleado en la prueba es del 1% para compuestos con cristalización definida, es decir el mineral amorfo no es identificado, tampoco cuantificado.

3.6. Ensayos de lixiviación

3.6.1. Lixiviación directa

La lixiviación directa para esta investigación se realiza con el mineral de cabeza que previamente fue homogenizado y cuarteado, la relación agua destilada – mineral fue de 2 a 1, es decir que ingresan a los envases de cianuración 100 g de mineral de mena y 200 g de agua que es lo mismo que 200 ml de agua por que la densidad de esta es de 1 g/ml.

El cianuro de sodio según varias fuentes es óptimo en condiciones de pH que va desde 9.5 a 11.5, se realiza una primera medición de pH antes de la adición de cianuro de sodio a la solución verificando un valor de 6, para elevar el pH se aporta en proporciones de 0.1 g hasta verificar la coloración azulada oscura que posee esta numeración en el papel pHmetro empleado para esta actividad.



Ilustración 3-7: Verificación de pH de soluciones cianuradas con tiras de papel indicador.

Fuente: El autor, 2024.

Una vez estabilizado el pH de la solución se realizan mediciones antes de la recolección de alícuotas en los respectivos periodos de muestreo.



Ilustración 3-8: Colocación de cianuro de sodio sobre papel para pesaje y posterior adición al proceso de lixiviación.

Fuente: El autor.

La concentración de cianuro de sodio es de 1000 ppm, respecto del volumen de solución, esta relación resulta en la adición de 0.2 g de Cianuro para los 200 ml de solución;

$$1000 \text{ ppm} = \frac{1g}{l}$$

$$200 \text{ ml} = 0.2l$$

$$0.2g = 0.2 l$$

La manipulación del cianuro de sodio se ejecuta con bastante precaución debido a su alta toxicidad, se usan guantes, mascarilla y una hoja de papel que se coloca sobre la balanza para tarar a 0 y realizar el pesaje sobre esta, ya que de esta forma se reduce la deliquesencia del agente. Según la (Real Academia Española 2024) una sustancia es deliquescente cuando esta posee la capacidad de absorber la humedad del aire hasta formar una solución acuosa.



Ilustración 3-9: Desarrollo de los ensayos de lixiviación con cianuro de sodio usando agitador magnético y mecánico

Fuente: El autor.

Se realizan tres ensayos de cianuración directa durante 24 horas, tomando alícuotas de 15 ml de solución cada 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas para sus análisis de recuperación de oro a través de absorción atómica en el laboratorio metalúrgico ALBEXUS en la sede principal de la ciudad de Piñas. Al obtener 15 ml de alícuota se agregan 15 ml de agua destilada al sistema para mantener el volumen de solución estable. Inclusive después de dejar reposar breves minutos la solución de las alícuotas puede contener partículas sólidas suspendidas motivo por el cual se filtra antes del envasado.

3.6.2. Lixiviación post pretratamiento

Una vez acumulada la masa requerida de 100 g de mineral pretratado en cada uno de los periodos de exposición al microondas se configuran los ensayos en igual forma que para la lixiviación directa, es decir, se usa la misma concentración de cianuro de sodio establecida en 1000 ppm en una solución de 200 ml de agua destilada.

Las mediciones de pH se realizan antes de agregar el cianuro de sodio a la solución para estabilizarlo con cal en un rango de 9.5 a 11.5 y luego de haber agregado el cianuro de sodio se realizan las mediciones para verificar que no existan posibles cambios y en su caso corregirlos por la variación de alcalinidad a acidez.

De las alícuotas que se extraen cada 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas se prevé conocer la concentración de oro para obtener la cinética de reacción y en este caso presenciar el efecto del cianuro de sodio en los tiempos establecidos con cada una de las muestras pretratadas en el microondas en periodos de 20, 40, 80 y 160 min.

3.7. Ensayos a fuego.

De cada ensayo de lixiviación se tiene como resultado dos productos, los licores enriquecidos y los relaves, para determinar la concentración de oro en los relaves es decir la cantidad de oro que no ha reaccionado con el cianuro de sodio se tiene como alternativa realizar un ensayo a fuego que consiste en adicionar cargas útiles a cada muestra de relave.

La masa de los relaves secados tanto de la lixiviación directa como de la lixiviación de mineral pretratado indirectamente se resumen en la tabla

Tabla 3-2: Identificación y pesaje de relaves secados para ensayo a fuego.

Nombre del relave	Masa de relave secado (g)
R. Lixiviación Directa 1	28.625
R. Lixiviación Directa 2	28.306
R. Lixiviación Directa 3	29.161
R. Lixiviación post-pretratamiento 20 min	29.97
R. Lixiviación post-pretratamiento 40 min	26.339
R. Lixiviación post-pretratamiento 80 min	29.184
R. Lixiviación post-pretratamiento 160 min	27.792

Fuente: El autor, 2024.

Después de que el relave pasa por un proceso de secado por 2 horas a una temperatura entre 400 y 700 °C en horno, el propósito es eliminar el azufre y otros elementos nocivos para el ensayo. Las cargas para la fundición son pesadas de acuerdo con las proporciones establecidas por (Humble 2006, pág. 29). Las cuales son:

Tabla 3-3: Cantidad de reactivo empleado para una carga de fundición por ensayo a fuego.

Reactivo carga	Cantidad (g)
Litargirio	45.19
Carbonato	31.97
Sílice	1.65

Bórax	19.84
Harina	2.76

Fuente: (Humble 2006).



Ilustración 3-10: Crisoles de arcilla con las respectivas cargas para fundición en el ensayo a fuego.

Fuente: El autor, 2024.

Se establece la carga única para cada una de las muestras, se mezclan los reactivos y se colocan en cada uno de los crisoles, se compacta la mezcla con la yema de los dedos y se cubre con bórax en la parte superior. Cada uno de los crisoles con cargas se coloca en el horno a una temperatura de 900 °C. Pasadas dos horas de fundición, con una pinza se extrae cada uno de los crisoles y se vierte ordenadamente el fundido sobre la lingotera, tras breves minutos se observa la cristalización por diferencia de la temperatura ambiente.



Ilustración 3-11: Vertido de fundido del ensayo a fuego sobre la lingotera.

Fuente: El autor, 2024.

Los botones de plomo se obtienen golpeando los régulos hasta la eliminación máxima de vidrio para exponerlos a altas temperaturas en la etapa de copelación, la cual diluye el plomo en los poros de cada copela y bajo el control de temperaturas libera una aleación de oro y plata en la parte superior de cada copela en caso de que exista presencia de los metales en los relaves.



Ilustración 3-12: Cristalización y enfriamiento de líquido fundido sobre la lingotera (iz) y obtención de regulo de plomo (der).

Fuente: El autor, 2024.



Ilustración 3-13: Copelas con plomo adherido y botones de oro y plata liberados.

Fuente: El autor, 2024.

3.7.1. Digestión de botones de oro

Para cada uno de los botones aleados de oro y plata se coloca en un tubo de ensayo hasta notar la coloración blanquecina en la que se exhibe la dilución de Ag y se expone por 20 min al equipo digestor, en este paso se intenta diluir la plata presente en el botón, a continuación, se adiciona agua regia en una concentración de 3 partes de HCl y 1 parte de HNO_3 , esta sustancia ejerce la disolución del oro presente, para este paso se exponen las soluciones por 40 min al digestor.



Ilustración 3-14: Digestión de botones de oro y plata con ácido nítrico y agua regia en un digestor electrónico.

Fuente: El autor.

Una vez digeridos los botones, cada una de las mezclas son llevadas a un volumen conocido y son envasadas con sus respectivos códigos de identificación para ser enviadas a laboratorio en donde se ejecuta la absorción atómica en la cual se determina la concentración de oro en la solución y por tanto en los relaves del proceso de lixiviación.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Pretratamiento indirecto

La aplicación del pretratamiento indirecto mediante microondas para el mineral del complejo minero Chinapintza ha sido realizada bajo la guía de un experimento ejecutado en la Republica China contemplando la expansión de variables y considerando el uso de equipos con características similares, en el caso del experimento guía se usa un microondas modelo Sylvania, SM80701 con frecuencia de 2450 MHz y una potencia de 700 W, mientras que para la presente investigación se ha empleado el modelo DAEWOO KOR63DB con una potencia de salida de 800 W y una frecuencia de 2450 MHz.

Las variables escaladas dentro del experimento fueron la masa de magnetita empleada como susceptor magnético, la capacidad y superficie del crisol interno que contiene el mineral y por tanto el volumen de mineral de mena que se expone en cada periodo, al haber ampliado el volumen tanto de los crisoles como del susceptor y el mineral, se expanden los periodos de exposición.

4.2. Caracterización mineral

4.2.1. Difracción de Rayos X (DRX) del mineral sin pretratamiento

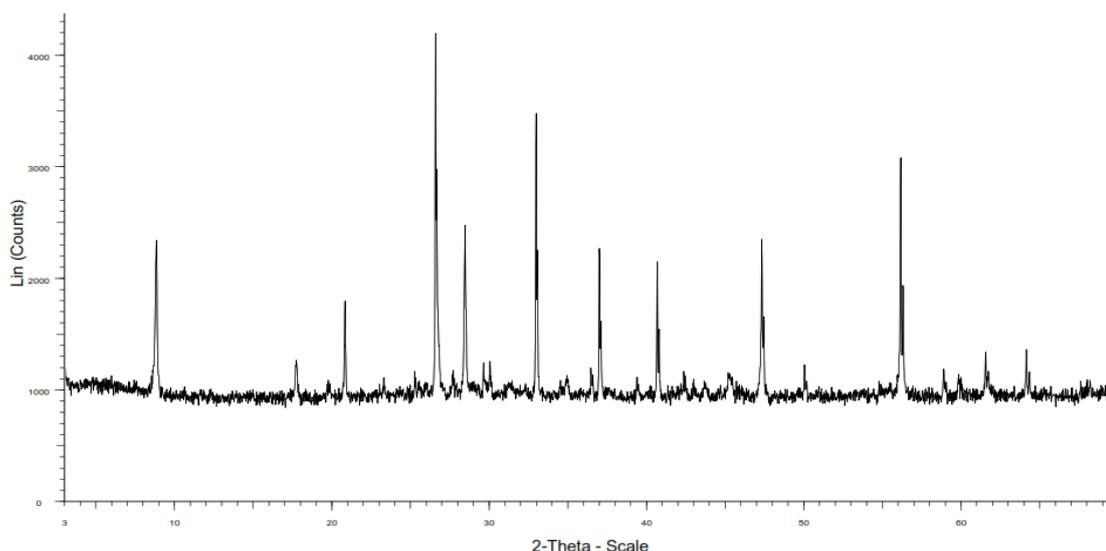


Ilustración 3-15: Difractograma de muestra mineral de mena sin aplicación de pretratamiento indirecto.

Fuente: (Endara y Criollo 2024)

Tabla 3-4: Fases minerales presentes en la muestra de mena sin la aplicación del pretratamiento indirecto.

Difracción de Rayos X de muestra de mineral de mena para lixiviación directa		
Fases minerales	Formula	Semicuantificación %
Pirita	FeS ₂	48
Cuarzo	SiO ₂	30
Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	20
Anglesita	PbSO ₄	1
Galena	PbS	1

Fuente: (Endara y Criollo 2024)

En la tabla 3-4 se muestran los resultados de fases minerales identificadas y cuantificadas de la muestra de mineral sin pretratamiento, la mitad 2% del total de la muestra analizada presenta pirita en su mineralización, seguido del cuarzo y moscovita como minerales secundarios, a su vez los minerales que menos presencia presentan son la Anglesita y Galena con un 1% del total cada uno.

4.2.2. Difracción de Rayos X (DRX) del mineral con pretratamiento

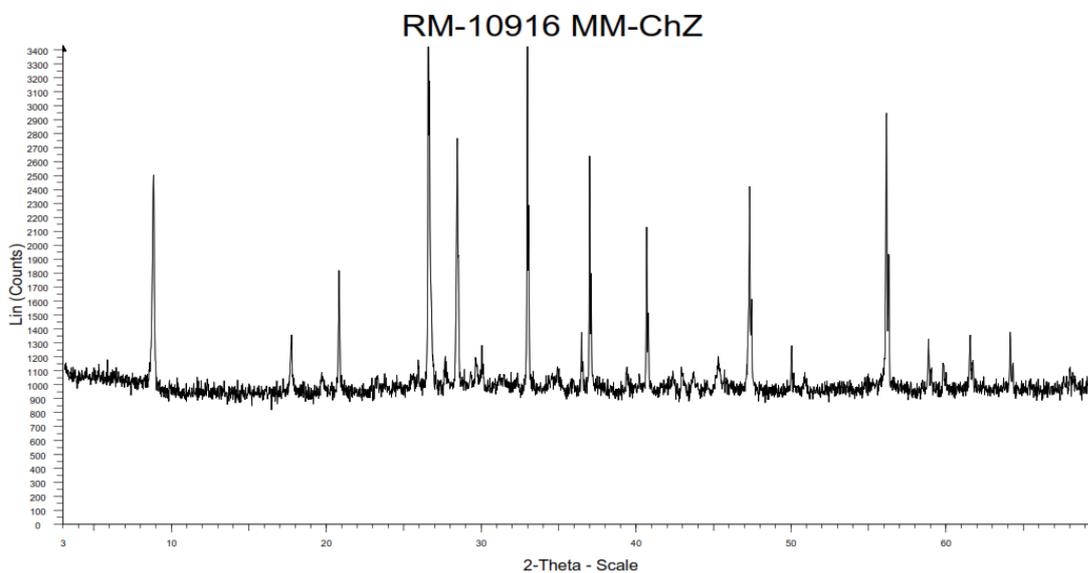


Ilustración 3-16: Difractograma de muestra mineral de mena después de la aplicación del pretratamiento.

Fuente: (De la Torre y Criollo 2024)

Tabla 3-5: Fases minerales presentes en la muestra de mena sometido a pretratamiento indirecto por un periodo de 160 min.

Difracción de Rayos X de muestra de mineral de mena pretratada indirectamente		
Fases minerales	Formula	Semicuantificación %
Pirita	FeS ₂	34
Cuarzo	SiO ₂	28
Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀) (OH) ₂	27
Esfalerita	ZnS	8
Anglesita	PbSO ₄	2
Galena	PbS	1

Fuente: (De la Torre y Criollo 2024)

Después de haber aplicado el pretratamiento indirecto con el microondas y el suscepto magnético, en comparación con los valores que presenta inicialmente la muestra que se dispone para lixiviación directa, la concentración de pirita en la muestra disminuye a un 34 %, el cuarzo disminuye un 28%, se observa un incremento del 7% en la cantidad de moscovita, en este caso también se observa la presencia de Sulfuro de Zinc (Esfalerita) con un 8 % de contenido, la anglesita en su caso sube un 1% su contenido, por último la galena mantiene su concentración antes y después del pretratamiento.

4.3. Lixiviación con cianuro de sodio

4.3.1. Lixiviación directa

Recolectando alícuotas cada 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas del proceso de lixiviación se realiza un diagrama que permite reconocer el comportamiento del proceso objetivo de la cianuración que en este caso sería formar el complejo aurocianuro en el menor tiempo posible reaccionando de manera óptima con el oro presente en la solución.

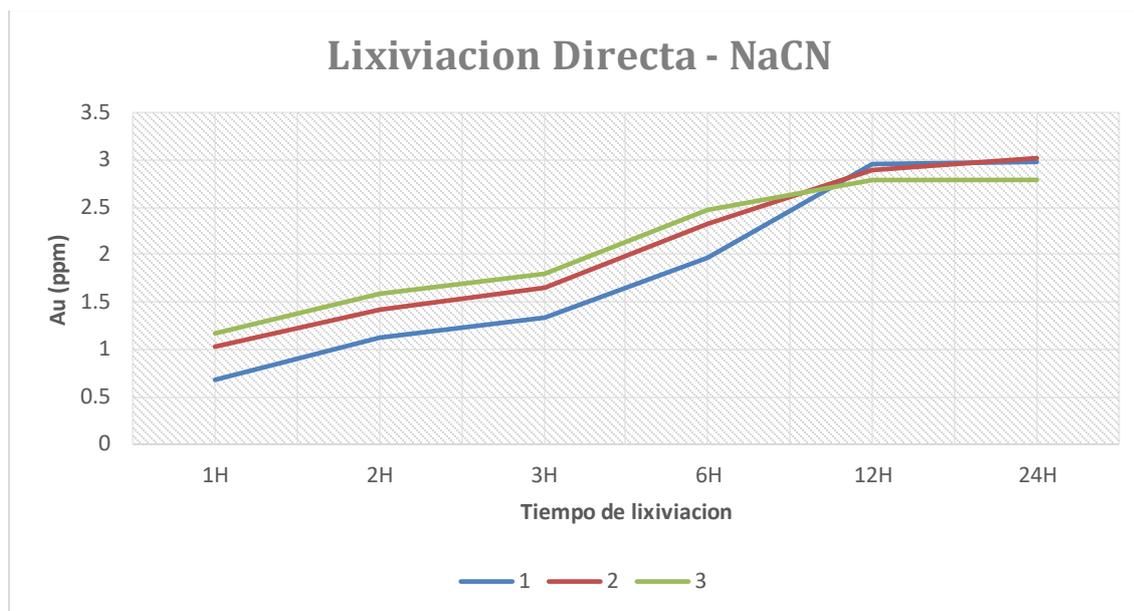


Ilustración 3-17: Cinética de lixiviación directa de mineral de mena.

Fuente: (Ríos 2024)

Las lixiviaciones directas 1, 2 y 3 a la primera hora registran valores de 0.68, 1.03 y 1.17 ppm, estas presentan valores de incremento paralelo hasta las 6 horas, a las 24 horas, en el orden anterior se observan valores de 2.98, 3.02 y 2.79 ppm. Se puede observar que en el periodo de tiempo desde las 12 a las 24 horas la reacción se mantiene estable en las lixiviaciones 1 y 3, en el caso de la número 2 cambia de un 2.89 a 3.02 ppm.

4.3.2. Lixiviación post pretratamiento

El tiempo de lixiviación total, la concentración de cianuro de sodio y los periodos de recolección de alícuotas de 20 ml se mantienen tanto para el proceso de lixiviación del mineral sin pretratamiento como del mineral expuesto al pretratamiento indirecto con microondas, esta configuración permite mantener un punto de crítica y una base comparativa para identificar la influencia del pretratamiento indirecto en la recuperación de oro con cianuro.

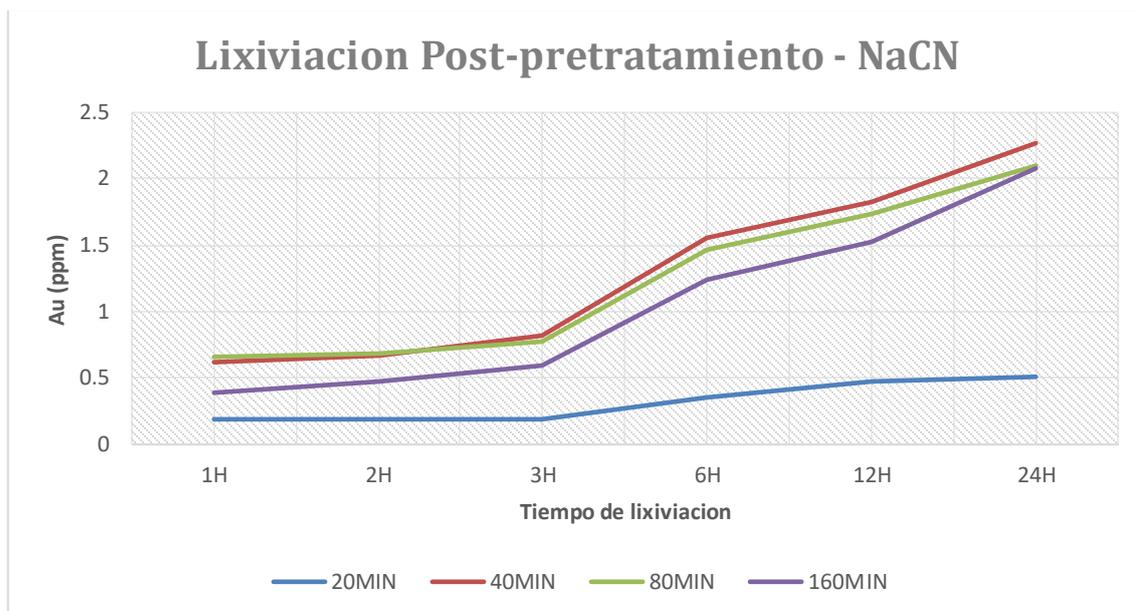


Ilustración 3-18: Cinética de lixiviación del mineral de mena expuesto al pretratamiento indirecto en diferentes periodos.

Fuente: (Ríos 2024)

Cada una de las muestras obtenidas del proceso de pretratamiento presenta variaciones permitiéndose identificar para el mineral pretratado indirectamente por 20 min un valor de 0.19 ppm en las primeras 3 horas de lixiviación, a partir de este punto mantiene un margen de subida paulatina que alcanza 0.51 ppm al cabo de las 24 horas.

Las muestras pretratadas por 40, 80 y 160 min, en la primera hora del proceso de lixiviación disponen valores de 0.62, 0.66 y 0.39 ppm, el alcance final de oro que ha reaccionado con el cianuro de sodio en las 24 horas es de 2.27, 2.1 y 2.08 ppm respectivamente.

4.4: Ensayos a fuego

Los ensayos a fuego de los relaves de cada una de las lixiviaciones fluctúan en sentido contrario a la recuperación metálica en los licores, si se tienen altas recuperaciones de oro en los licores entonces el contenido de oro en los relaves será baja, así mismo se la recuperación metálica es baja, el oro que se está perdiendo en los relaves tendrá valores relativamente altos.

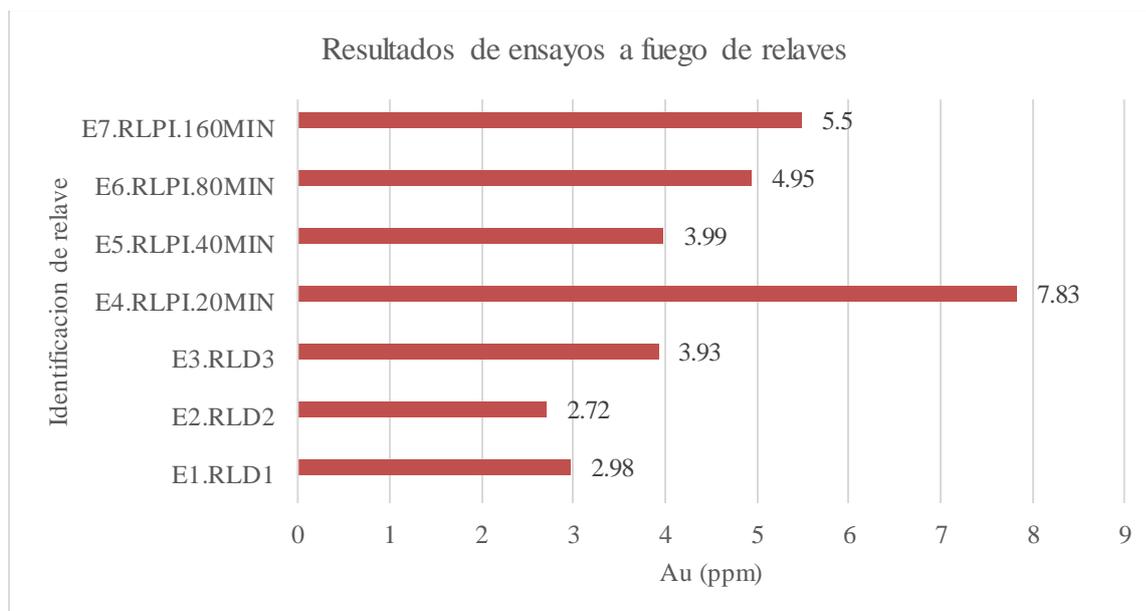


Ilustración 3-19: Diagrama indicador de las cantidades de Au presente en los relaves.

Fuente: (Ríos 2024)

La lixiviación que menos valor de recuperación metálica representa es la ejecutada tras el pretratamiento indirecto en un periodo de 20 min con una ley de 0.51 ppm a las 24 horas del proceso, de tal forma el oro contenido en los relaves es alto representando un valor de ley de 7.83 ppm. La lixiviación directa 2 es la que mejores resultados proyecta esta presenta una concentración de 3.02 ppm en la alícuota obtenida a las 24 horas en pos de esta recuperación, el valor de ley de las colas es el mínimo entre las demás con 2.72 ppm.

4.5. Reconstrucción de cabeza

Para la reconstrucción de cabeza de un proceso de lixiviación con una disposición preliminar de concentración metálica en los licores de lixiviación y en las colas de los relaves se considera la masa metálica que corresponde a su concentración en los licores y los relaves. Para el caso de las alícuotas, se realiza una sumatoria de la masa metálica presente en cada una de las alícuotas antes de realizar el cálculo de la masa de oro en la cabeza.

$$M_{Au \text{ en Licores}} = \sum(C_{Au} \times V_{de \text{ Agua}}) \quad (1)$$

$$M_{Au \text{ en Relaves}} = C_{Au \text{ en Relaves}} \times M_{de \text{ Relaves}} \quad (2)$$

$$M_{Au \text{ en Cabeza}} = M_{Au \text{ en Licores}} + M_{Au \text{ en Relaves}} \quad (3)$$

Donde:

Σ : Sumatoria

M Au: Masa de oro [mg, g, kg]

C Au: concentración de oro [ppm, %, g/t]

V: Volumen [ml, L]

M: Masa [mg, g, kg]

Cálculo de Recuperación Metálica

Al igual que las ecuaciones 1, 2 y 3, la ecuación 4 es utilizada para este cálculo siendo empleada para cálculos de similares en procesos de lixiviación según (Restrepo, et al [sin fecha], págs. 28 - 56)

$$\text{Recuperación Metálica (\%)} = \frac{M \text{ Au en Cabeza}}{M \text{ Au en Licores}} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

M Au: Masa de oro [mg, g, kg]

Para las lixiviaciones directas después de aplicada la aritmética de cálculo de masa de oro tanto en las colas como en los licores se verifican valores de 71.52%, 76.21% y 68.74% de recuperación metálica para los ensayos 1, 2 y 3 correspondientemente.

Tabla 3-6: Identificación de valores calculados para reconstrucción de ley de cabeza y Recuperación Metálica de cada una de las lixiviaciones del mineral sin pretratamiento indirecto.

Lixiviación directa								
No. (identificación de muestra)	Tiempo	Licores - Au (ppm)	Masa-Au licores (mg)	Relaves-Au (ppm)	Masa relaves (kg)	Masa-Au relaves (mg)	Masa Au cabeza (mg)	RM %
1.00	1H	0.68	0.01	2.98	0.03	0.09	0.30	71.52
	2H	1.12	0.02					
	3H	1.33	0.02					
	6H	1.97	0.04					
	12H	2.96	0.06					
	24H	2.98	0.06					
	TOTAL		0.21					

2.00	1H	1.03	0.02	2.72	0.03	0.08	0.32	76.21
	2H	1.42	0.03					
	3H	1.65	0.03					
	6H	2.32	0.05					
	12H	2.89	0.06					
	24H	3.02	0.06					
	TOTAL		0.25					
3.00	1H	1.17	0.02	3.93	0.03	0.11	0.37	68.74
	2H	1.59	0.03					
	3H	1.79	0.04					
	6H	2.48	0.05					
	12H	2.78	0.06					
	24H	2.79	0.06					
	TOTAL		0.25					

Fuente: (Ríos 2024)

En el caso de las lixiviaciones después de haber aplicado el pretratamiento indirecto en diferentes periodos específicos de 20, 40, 80 y 160 min se registran valores de Recuperación Metálica de 14 %, 59.625%, 50.639% y 45.224%.

Tabla 3-7: Identificación de valores calculados para reconstrucción de ley de cabeza y Recuperación Metálica de cada una de las lixiviaciones del mineral sometido a la aplicación del pretratamiento indirecto con microondas y susceptor magnético.

Lixiviación Post - Pretratamiento								
t – PI (identificación de muestra)	Tiempo	Licores - Au (ppm)	Masa-Au licores (mg)	Relaves- Au (ppm)	Masa relaves (kg)	Masa-Au relaves (mg)	Masa Au cabeza (mg)	RM %
20MIN	1H	0.19	0.004	7.83	0.02997	0.234665	0.273	14
	2H	0.19	0.004					
	3H	0.19	0.004					
	6H	0.36	0.007					
	12H	0.47	0.009					
	24H	0.51	0.010					
	TOTAL		0.038					
40MIN	1H	0.62	0.012	3.99	0.02634	0.105093	0.260	59.625

	2H	0.67	0.013					
	3H	0.82	0.016					
	6H	1.56	0.031					
	12H	1.82	0.036					
	24H	2.27	0.045					
	TOTAL		0.155					
80MIN	1H	0.66	0.013	4.95	0.02918	0.144461	0.293	50.639
	2H	0.68	0.014					
	3H	0.77	0.015					
	6H	1.46	0.029					
	12H	1.74	0.035					
	24H	2.1	0.042					
	TOTAL		0.148					
160MIN	1H	0.39	0.008	5.5	0.02779	0.152856	0.279	45.224
	2H	0.48	0.010					
	3H	0.59	0.012					
	6H	1.24	0.025					
	12H	1.53	0.031					
	24H	2.08	0.042					
	TOTAL		0.126					

Fuente: (Ríos 2024)

Se verifica que en el caso de la lixiviación directa 2 el valor de recuperación metálica ha sido de 76.21%, siendo técnicamente aceptable al encontrarse por encima del 75%, por otro lado, las lixiviaciones efectuadas aplicando el pretratamiento no alcanzan el margen técnico, obteniendo como valor máximo un 59.625% en la muestra que se ha expuesto al microondas y suscepter por un periodo de 40 minutos, por realizar una comparativa se destaca que el valor mínimo resultado de las lixiviaciones directas es de 68.74% .

Si bien los mejores resultados registrados por Nanthakumar, Pickles y Kelebek (2007) y la presente investigación ha sido con el mineral expuesto al pretratamiento indirecto por un periodo de 40 min, en el caso del mineral de Chinapintza no se consigue mejorar la recuperación metálica aplicando esta técnica de manera adversa los resultados son penalizantes disminuyendo los valores máximos comparativos estudiados de un 76.21% a un 59.625% .

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Las fases minerales presentes en la mena antes y después del pretratamiento indirecto están distinguidas por un 48% de pirita (FeS_2) inicial y un 34% final, un 30% de cuarzo (SiO_2) inicial y 28% final, también se distingue moscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) con un 20% inicial y un 27% final, en el caso de la anglesita (PbSO_4), esta tiene una concentración inicial del 1% y un 2% final, la galena (PbS) mantiene su concentración en 1% antes y después del pretratamiento, un mineral que no tiene presencia antes del pretratamiento es la esfalerita (ZnS), mientras que al final del experimento presenta una ocurrencia del 8%.
- De las tres lixiviaciones directas con cianuro de sodio (NaCN) a 1000 ppm se obtienen recuperaciones metálicas aceptables estando sus valores en 71.52%, 76.21% y 68.74%. Trabajando con la misma concentración del agente lixivante, para los ensayos del mineral pretratado indirectamente durante 20, 40, 80 y 160 min se obtienen recuperaciones del 14%, 59.62%, 50.63% y 45.22% respectivamente. Si bien al igual que en el experimento guía la mayor recuperación de oro en la lixiviación después de aplicar el pretratamiento indirecto se observa en el mineral expuesto por 40 min al microondas, para el mineral del complejo minero Chinapintza usado en este estudio, dicha recuperación no es aceptable tomando en cuenta que con la lixiviación directa el menor valor registrado ha sido de 68.74% y la lixiviación del mineral pretratado por los 40 min únicamente alcanza un 59.62%. La ampliación de variables del pretratamiento indirecto no resulta propicia para mejorar los procesos de lixiviación, presentando en su caso valores con mayor concentración de oro en los relaves, lo cual indica la ineficiencia del proceso al aplicar el pretratamiento indirecto.
- Al exponer el mineral aurífero sulfuroso al microondas con el empleo de un suscepto magnético se comprueba la oxidación alrededor de un 16% de sulfuro de hierro. El índice de recuperación máxima en la lixiviación más eficiente del mineral pretratado por 40 min con respecto del mínimo obtenido en las lixiviaciones directas permite diferenciar un margen del 9% de pérdida en la recuperación de oro después de haber aplicado el pretratamiento indirecto.
- Identificando la presencia de Esfalerita (ZnS) como fase mineral después de los 160 min de exposición se puede relacionar un encapsulamiento natural de Zinc en las trazas de pirita en el mineral de mena sin pretratamiento, al momento en que los sulfuros sufren alteraciones debido a la polarización inducida por las microondas y el calor elevado por la magnetita se

supone la emanación de Zinc de la matriz de pirita, a su vez por las mismas condiciones fisicoquímicas del pretratamiento el Zinc reacciona con cierta parte del azufre en el medio formando esfalerita.

- La esfalerita presente en la pulpa de lixiviación puede ser el agente cianicida y reductor de los efectos de formación del complejo aurocianuro limitando la reacción del oro, en este caso el zinc al estar presente como componente del mineral de cabeza para la lixiviación puede reaccionar con cierta cantidad del cianuro de sodio dispuesto al proceso creando un complejo de zinc cianurado $Zn(CN)_4$ y reduciendo por tanto la eficiencia en la recuperación de oro respecto de la lixiviación directa.

5.2. Recomendaciones

La caracterización mineral para este tipo de estudios puede ser más ahondada realizando un ensayo con microscopio electrónico de barrido el cual permite verificar la morfología, textura, composición elemental, tamaño y forma de las partículas e inclusive aporta con información cristalográfica lo cual permitiría tener más opciones de configuración del experimento.

Realizar cambios en los tiempos de exposición al microondas para la aplicación del método de pretratamiento y a su vez en la concentración de NaCN que se dispone para las lixiviaciones tanto antes como después del pretratamiento, esto permitiría tener un punto de vista más amplio del comportamiento del mineral en cada proceso.

Finalmente se recomienda continuar con esta línea investigativa con el fin de aportar con puntos de vista variados de que tipo de mineralización puede tener características óptimas para la recuperación del oro por lixiviación después de haber aplicado el pretratamiento indirecto. Inclusive se puede abrir intentos de evaluación de pretratamiento directo de minerales refractarios de diferentes zonas mineras del Ecuador, es decir ya no se usa la magnetita como cama susceptible para la fuente contenedora del mineral y en su caso se expone esta última de manera directa sobre la base del microondas.

GLOSARIO

Pretratamiento indirecto: Proceso previo a la lixiviación o procesamiento del mineral aurífero que utiliza microondas para mejorar la eficiencia en la recuperación de oro. Implica la oxidación de la matriz sulfurosa y la eliminación del carbono orgánico.

Mineral aurífero: Mineral que contiene oro.

Sulfuroso: Relativo a los minerales que contienen azufre, como la pirita o la arsenopirita.

Microondas: Tecnología de calentamiento basada en ondas electromagnéticas de alta frecuencia.

Lixiviación: Proceso de extracción de metales valiosos mediante la disolución de minerales en una solución acuosa.

Oxidación: Reacción química en la que una sustancia pierde electrones y aumenta su estado de oxidación.

Cianuración: Método de extracción de oro mediante el uso de cianuro de sodio.

Refractario: Mineral o concentrado que presenta dificultades para su procesamiento debido a su composición o características.

Carbonáceo: Relativo a la presencia de carbono orgánico en el mineral.

Tostación: Proceso de calentamiento controlado en presencia de oxígeno para oxidar minerales sulfurosos.

Cinética de reacción: Estudio de la velocidad a la que ocurren las reacciones químicas.

Susceptor: Material que absorbe energía de microondas y la convierte en calor.

Recuperación de oro: Porcentaje de oro extraído con éxito del mineral.

DRX (Difracción de Rayos X): Técnica analítica para identificar la estructura cristalina de los minerales.

BIBLIOGRAFÍA

1. **ALVARADO SISALIMA, Victoria Elizabeth. & GUARTANMEDINA, José Arturo.** Caracterización de los materiales del distrito minero Chinapintza por Fluorescencia de Rayos-X. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja-Ecuador, 2015. págs. 30-45. [Consulta: 2024-06-01]. Disponible en: <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/13529>
2. **AMCSD.** *American Mineralogist Crystal Structure Database* [blog]. RRUFF. [Consulta: 2024-06-01]. Disponible en: http://www.minsocam.org/msa/Crystal_Database.html
3. **BAENA, Jaime; et al.** Notas de clase metalurgia extractiva. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín-Colombia, 2000, págs. 23-28
4. **BAZAN, Vanessa; et al.** “Characterization of gold refractory minerals”. *Editorial UNCA*, vol. 1, n°3, (2018). (United State of America). Págs. 2-6
5. **BUITRÓN ORTEGA, Diana; et al.** “Validación del método para la determinación de oro por ensayo al fuego combinado con espectrometría de absorción atómica en muestras geológicas mineras metalúrgicas”. *Info ANALITICA*, vol. 9, n°. 1, (2020), págs. 119-136
6. **CALLE GUERRERO, Leonardo Davis & GUARTAN MEDINA, José Arturo.** *Caracterización geológica y mineralógica de la zona minera La Herradura, área minera de Chinapintza, provincia de Zamora Chinchipe – Ecuador* [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja. Loja-Ecuador, 2024, págs. 34-67. [Consulta: 2024-11-12]. Disponible en: <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/8978>
7. **COAGUILA CORNEJO, Rudy Milton. Y LÁZARO TACO, Víctor Ronald.** “Pretratamiento de la lixiviación de un mineral refractario de oro y plata asociado a sulfuros con la adición de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio”. *Técnico*, vol. 1, n°3, (2018), págs. 119-136.
8. **COD.** *Crystallography Open Database.* [blog] Estados Unidos, [Consulta: 12 noviembre 2024]. Disponible en: <https://www.crystallography.net/cod/>
9. **DE LA TORRE CHAUVIN, Ernesto Hale & CRIOLLO TIRADO, Evelyn Pamela.** Resultados Análisis de Difracción de Rayos X. No. referencia: ST-8777. Quito: Escuela Politécnica Nacional, departamento de Metalurgia Extractiva, 2024. 2 p.
10. **DÍAZ BANEGAS, Esvar Darío & AGUIRRE CHAMBA, Paulina Isabel.** *Optimización de parámetros para la biooxidación de minerales polimetálicos del distrito minero Portovelo.* [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja. Loja-Ecuador, 2012, págs. 34-67. [Consulta: 2024-11-12]. Disponible en: <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/3778>

11. **ENDARA DRANICHNIKOVA, Diana. & CRIOLLO TIRADO, Evelyn Pamela.** Resultados Análisis de Difracción de Rayos X. No. referencia: ST-8799. Quito: Escuela Politécnica Nacional, departamento de Metalurgia Extractiva, 2024. 2 p.
12. **ENDERICA ORTEGA, Fernanda Karina.** *Tratamiento de menas auríferas asociadas a minerales de arsénico.* Investigación. [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad Nacional de Colombia. Medellín-Colombia: 2023, págs. 23-65 [Consulta: 2024-11-12]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83778>
13. **GAVINO JIMÉNEZ, Paolo Jesús.** *Tratamiento por flotación y cianuración de minerales auríferos con presencia de pirita para la concentración y extracción de oro y plata a nivel experimental.* [En línea]. (Trabajo de titulación) (Pregrado). Universidad Nacional “José Faustino Sánchez Carrión”. Perú, 2028, págs. 24-34. [Consulta: 2024-10-10]. Disponible en: <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/3014>
14. **GUDYANGA, F; et al.** “Reductive-oxidative pretreatment of a stibnite flotation concentrate: Thermodynamic and kinetic considerations”. *Minerals Engineering*, vol. 11, n°. 6, (1998) (United State of America). Págs. 34-65.
15. **HAQUE, Kazi.**, “Microwave energy for mineral treatment processes—a brief review”. *ELSEVIER*, vol. 57, n° 1, (1999) (Canada). Págs. 1-24
16. **HUMBLE, Jim.,** *Fire Assay - Home study Course.* 6. Action Mining Services. (2006)
17. **ICDD,** *Powder Diffraction File.* 2024. S.l.: icdd.com. (2024)
18. **JARAMILLO, Katherine. & AGUIRRE, Paulina.** “Efecto del tiempo de residencia sobre la biooxidación de un mineral aurífero refractario.” *MAKASANA*, [En línea] 2014, (Ecuador). vol. 1, n° 608, Págs. 34-65. [Consulta: 2024-11-12]. Disponible en: <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/563>
19. **JARAMILLO, Katherine. y AGUIRRE, Paulina.** “Influencia de los parámetros de agitación y aireación en la biooxidación de un mineral aurífero refractario”. *Excellence in Engineering To Enhance a Country's Productivity*”. vol. 11, n°. 6, (2014) (Ecuador). pág. 1-2.
20. **SAIMM.** “The extraction of gold from sulphidic concentrates by roasting and cyanidation”. *THE SOUTHERN AFRICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY*, vol. 88, no. 4, (1988), págs. 23-45
21. **LI, Qian; et al.** “Improvement of Gold Leaching from a Refractory Gold Concentrate Calcine by Separate Pretreatment of Coarse and Fine Size Fractions”. *Minerals*, vol. 7, no. 5, (2017), pág. 1-34
22. **LIU, Yisa; et al.** Pretreatment of refractory gold ore by curing with concentrated sulfuric acid. *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 41, no. 5, (2024), pág. 1-4

23. **LONDOÑO, Jorge; et al.** Técnicas mineralógicas, químicas y metalúrgicas para la caracterización de menas auríferas. Bogotá: (2010)
24. **MENÉNDEZ DIAZ, José Ángel. & HERNÁNDEZ MORENO, Ángel Salvador.** Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas. [En línea] (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Técnica de Cotopaxi. Cotopaxi-Ecuador. 2017. [Consulta: 2024-10-02]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/148728>
25. **MESA, Luis.** *Protocolo de ensayos al fuego y análisis de soluciones cianuradas*. 2018.
26. **NANTHAKUMAR, B; et al.** “Microwave pretreatment of a double refractory gold ore”. *Minerals Engineering*, [En línea] 2007, (United State of America), vol. 20 (11), págs. 12-34 [Consulta: 2024-11-02]. ISSN 08926875. Disponible en: DOI 10.1016/j.mineng.2007.04.003.
27. **PACHECO PACHECO, Eduardo Lenín.** Estudio de la oxidación de un mineral sulfurado aurífero refractario en medio acuoso para incrementar la disolución de oro en el proceso de cianuración. [En línea] (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador. 2017. [Consulta: 2024-11-02]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17515>
28. **PRODEMINCA.** *Evaluación de los distritos mineros del Ecuador*. [En línea] Quito-Ecuador: Ilustrada, 2000, [Consulta: 2024-11-02]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books/about/Evaluaci%C3%B3n_de_distritos_mineros_del_Ecu.html?hl=es&id=3BrhJwAACAAJ&redir_esc=y
29. **QIN, Hong; et al.** “Recovery of gold from sulfide refractory gold ore: Oxidation roasting pretreatment and gold extraction”. *Minerals Engineering*, [En línea], (España), vol. 164 (106822), págs. 234-303, [Consulta: 2024-10-02]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687521000510>
30. **REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, Delicuescente: ASOCIACION DE ACADEMIAS DE LA LENGUA ESPAÑOLA.** (2024)
31. **RESTREPO BAENA, Oscar Jaime; et al.** Notas de clase metalurgia extractiva. Medellín: (2015)
32. **RIOS AGUILAR, Cinthia.** Informe de ensayo No. 30175. Piñas: Laboratorio Metalúrgico Albexus, 2024. 3 p.
33. **RODRIGUEZ, Carolina; et. al.** Consumo de cianuro de concentrado de pirita aurífera, empleando ozono como pretratamiento. *EPISTEMUS*, [En línea], 2022, (España), vol. 15 (31), págs. 234-303, [Consulta: 2024-10-02]. ISSN: 2007-4530. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-81962021000200038

- 34. ROESER, Monika & MESA, Luis.** “Cianuración de minerales portadores de oro”. S.I.: 2010
- 35. SABA, Mojtaba; et al.** Diagnostic pre-treatment procedure for simultaneous cyanide leaching of gold and silver from a refractory gold/silver ore. *Minerals Engineering*, [En línea], 2011, (China), vol. 24 (15), págs. 1703-1709, [Consulta: 2024-11-05]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687511003463>
- 36. SALINAS, Eleazar; et al.** Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono. *Rev. Soc. Quim. Mex*, [En línea], 2004, (México), vol. 48 (4), págs. 315-320, [Consulta: 2024-11-05]. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932004000400021
- 37. TAPIA MUÑOZ, Paulina del Carmen.** Análisis de la afectación a los derechos de la naturaleza por el incumplimiento del código orgánico ambiental en la explotación de los recursos naturales no renovables en el distrito minero Chinapintza. [En línea] (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Católica de Cuenca. Cuenca-Ecuador. 2021. [Consulta: 2024-10-02]. Disponible en: <https://dspace.ucacue.edu.ec/items/459d3720-5bd4-4520-88e6-9bced458f9f5>
- 38. TUESTA, Erika. & VASQUEZ, Yezeña.,** Aplicación de la técnica de difracción de rayos x (drx) en la industria minera., vol. 1, 2012. [Consulta: 2024-10-02]. Disponible en: <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CNM9-011.pdf>
- 39. VALDIVIESO BERMEO, Paulo Andrés.** Diseño de proceso de tratamiento para menas refractarias con alto porcentaje de preg-robbing. [En línea] (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil-Ecuador. 2017. [Consulta: 2024-09-30]. Disponible en: <https://www.fict.espol.edu.ec/sites/fict.espol.edu.ec/files/VALDIVIESO.pdf>
- 40. VASSALLO, L.F.** *Yacimientos minerales metálicos*. [En línea]. 4ta . Querétano-México: Centro de Geociencias, 2008. [Consulta: 2024-09-30]. Disponible en: <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-nacional-autonoma-de-mexico/beneficio-de-minerales/yacimientos-minerales-metalicos/36497057>
- 41. KONGOLO, Kitala & MWEMA Mutamba.** *The extractive metallurgy of gold* [en línea]. En: *Hyperfine Interactions*, vol. 111, 1998, pp. 281–289 [consulta: 13 enero 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1023/A:1012678306334>.



ANEXOS

ANEXO A: INFORME DE ENSAYOS DE ABSORCIÓN ATÓMICA – PAG 1 DE 3



INFORME DE ENSAYO

Nº. 30175

Cliente	: <u>Christian Ordoñez</u>
Dirección	: <u>Av. Amazonas y Chile - Cuenca</u>
Tipo de Muestra	: <u>Solución</u>
Envase	: Frasco Plástico
Condición de la Muestra	: En buenas condiciones para analizar
Recepción de Muestra Nº	: 20973
Fecha de Recepción de Muestras	: 2024-06-07 14:29:41.0
Fecha Inició Análisis	: 2024-06-07
Fecha Terminó Análisis	: 2024-06-07
Fecha de Emisión del Informe	: 2024-06-07

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-
31024174234,
ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE
INFORMACION, o=SECURITY
SATA S.A. S. c=EC
Date: 2024.06.07 10:04:48
+0500

**Cinthia Ríos Aguilar
Jefe de Laboratorio**

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

Página 1 de 3

INFORME DE ENSAYO

Nº. 30175

RESULTADOS

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	Comp.	Cod.	Au (Sol)*
	Nº	Alb.	ppm
Wilder Quiroz RLD-1	1	117484	2.98
Wilder Quiroz RLD-2	1	117485	2.72
Wilder Quiroz RLD-3	1	117486	3.93
Wilder Quiroz PI-20	1	117487	7.63
Wilder Quiroz PI-40	1	117488	3.99
Wilder Quiroz PI-80	1	117489	4.95
Wilder Quiroz PI-160	1	117490	5.50
Wilder Quiroz Licor LD1 2H	1	117491	1.12
Wilder Quiroz Licor LD2 2H	1	117492	1.42
Wilder Quiroz Licor LD3 2H	1	117493	1.59
Wilder Quiroz Licor LD1 3H	1	117494	1.33
Wilder Quiroz Licor LD2 3H	1	117495	1.65
Wilder Quiroz Licor LD3 3H	1	117496	1.79
Wilder Quiroz Licor LPI 1H 20 min	1	117497	0.19
Wilder Quiroz Licor LPI 1H 40 min	1	117498	0.62
Wilder Quiroz Licor LPI 1H 80 min	1	117499	0.66
Wilder Quiroz Licor LPI 1H 160 min	1	117500	0.39

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

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 HNO₃ (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.

COMENTARIOS:

FINAL DEL DOCUMENTO

INFORME DE ENSAYO

Nº. 30175

RESULTADOS

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	Comp.	Cod.	Au (Sol)*
	N.º	Alb.	ppm
Wilder Quiroz LPI 2h 20 min	1	117501	0.19
Wilder Quiroz LPI 2h 40 min	1	117502	0.67
Wilder Quiroz LPI 2h 60 min	1	117503	0.66
Wilder Quiroz LPI 2h 160 min	1	117504	0.48
Wilder Quiroz LPI 3h 20 min	1	117505	0.19
Wilder Quiroz LPI 3h 40 min	1	117506	0.82
Wilder Quiroz LPI 3h 60 min	1	117507	0.77
Wilder Quiroz LPI 3h 160 min	1	117508	0.59
Wilder Quiroz LPI 6h 20 min	1	117509	0.36
Wilder Quiroz LPI 6h 40 min	1	117510	1.56
Wilder Quiroz LPI 6h 60 min	1	117511	1.46
Wilder Quiroz LPI 6h 160 min	1	117512	1.24
Wilder Quiroz LPI 12h 20 min	1	117513	0.47
Wilder Quiroz LPI 12h 40 min	1	117514	1.62
Wilder Quiroz LPI 12h 60 min	1	117515	1.74
Wilder Quiroz LPI 12h 160 min	1	117516	1.53
Wilder Quiroz Licor LPI 24h 20 min	1	117517	0.51
Wilder Quiroz Licor LPI 24h 40 min	1	117518	2.27
Wilder Quiroz Licor LPI 24h 60 min	1	117519	2.10
Wilder Quiroz Licor LPI 24h 160 min	1	117520	2.06
Wilder Quiroz Licor LD1 1H	1	117521	0.66
Wilder Quiroz Licor LD2 1H	1	117522	1.03
Wilder Quiroz Licor LD3 1H	1	117523	1.17
Wilder Quiroz Licor LD1 6H	1	117524	1.97
Wilder Quiroz Licor LD2 6H	1	117525	2.32
Wilder Quiroz Licor LD3 6H	1	117526	2.46
Wilder Quiroz Licor LD1 12H	1	117527	2.96
Wilder Quiroz Licor LD2 12H	1	117528	2.69
Wilder Quiroz Licor LD3 12H	1	117529	2.76
Wilder Quiroz Licor LD1 24H	1	117530	2.96
Wilder Quiroz Licor LD2 24H	1	117531	3.02
Wilder Quiroz Licor LD3 24H	1	117532	2.79

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

Página 3 de 3

ANEXO B: INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LA MUESTRA SIN APLICAR EL PRETRATAMIENTO INDIRECTO. PÁG. 1-2.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



Resultados Análisis de Difracción de Rayos X

Solicitante : Sr. Fernando Quiroz
No. Referencia : ST - 8799
Fecha : 31 - 07 - 2024
Muestras recibidas : Una muestra sólida denominada:
Muestra 1 : CH MMSP (Código registrado según cliente).

La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en la muestra se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffrac plus (EVA Y TOPAS) para cualificación y semi-cuantificación. A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis.

Mineral	Fórmula	Muestra 1 Contenido (%)
Pirita	FeS ₂	48
Cuarzo	SiO ₂	30
Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	20
Anglesita	PbSO ₄	1
Galena	PbS	1

NOTA: El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida. Las muestras presentan contenido de material amorfo, no identificado por esta técnica de análisis.



Ing. Diana Endara PhD.
Jefa de Departamento



MSc. Evelyn Criollo
Jefa de Laboratorio

ANEXO B: INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LA MUESTRA SIN APLICAR EL PRETRATAMIENTO INDIRECTO. PÁG. 2-2.

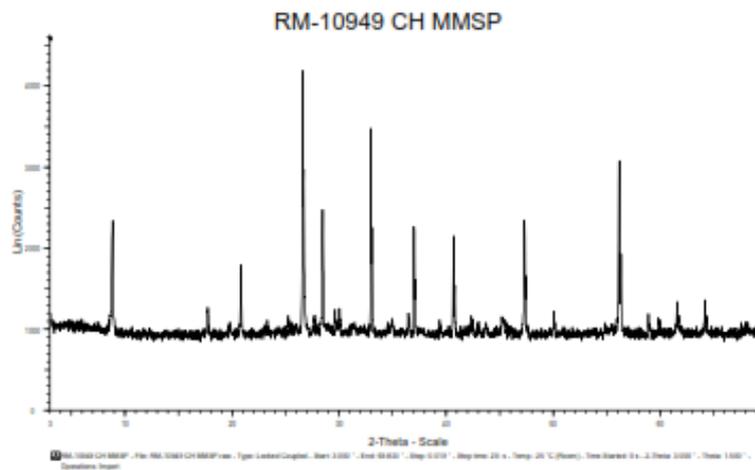


**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



ANEXOS

Anexo No. 1: Difractograma de la muestra 1.



ANEXO C: INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LA MUESTRA CON PRETRATAMIENTO INDIRECTO DE 160 MIN. PÁG. 1-2.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



Resultados Análisis de Difracción de Rayos X

Solicitante : Sr. Wilder Fernando Quiroz Fajardo
No. Referencia : ST - 8777
Fecha : 26 - 06 - 2024
Muestras recibidas : Una muestra sólida denominada:
Muestra 1 : Mineral de mena Chinapintza - Zamora (Código registrado según cliente).

La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en la muestra se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffrac plus (EVA Y TOPAS) para cualificación y semi-cuantificación. A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis.

Mineral	Fórmula	Muestra 1 Contenido (%)
Pirita	FeS_2	34
Cuarzo	SiO_2	28
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	27
Esfalerita	ZnS	8
Anglesita	PbSO_4	2
Galena	PbS	1

NOTA: El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida. La muestra contiene material amorfo no cuantificado por esta técnica de análisis.



ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVIN

Ing. Ernesto de la Torre PhD.
Jefe de Departamento (S.)



EVELYN PAMELA CRIOLLO TIRADO

MSc. Evelyn Criollo
Jefa de Laboratorio

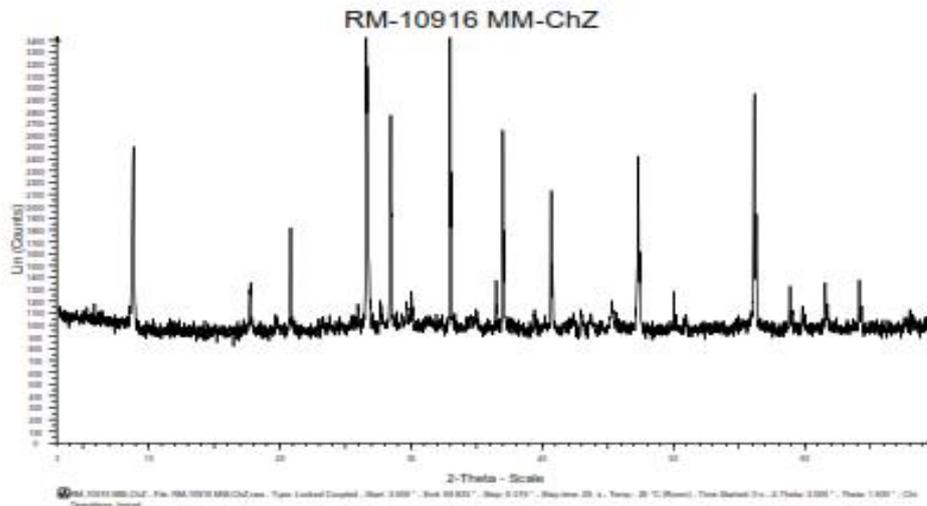
ANEXO C: INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LA MUESTRA CON PRETRATAMIENTO INDIRECTO DE 160 MIN. PÁG. 2-2.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



Anexo No. 1: Difractograma de la muestra 1.





ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA
NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO

Fecha de entrega: 03/02/2025

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Wilder Fernando Quiroz Fajardo
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Recursos Naturales
Carrera: Minas
Título a optar: Ingeniero en Minas
<p style="text-align: center;"> Ing. Ernesto Reyes Céspedes Director del Trabajo de Integración Curricular</p> <p style="text-align: center;"> Ing. Christian Adrian Ordoñez Guaycha Asesor del Trabajo de Integración Curricular</p>