



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN
METALURGIA Y MATERIALES.

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN
METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS MATERIALES.

EXTRACCIÓN DE ORO POR LIXIVIACIÓN DE LOS RELAVES DE UN
MINERAL DE COBRE DE LA REGIÓN DE TIQUICHEO, MICHOACÁN.

Tesis que para obtener el grado de
Maestra en Metalurgia y Ciencias de los Materiales presenta:

CECILIA VALADEZ AGUILAR.

Director de Tesis

DR. RAMIRO ESCUDERO GARCIA.

Morelia, Michoacán, Agosto de 2021

DEDICATORIA.

A mis dos amores Noé Armando y Noé Francisco.

AGRADECIMIENTOS.

Quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero para cursar mis estudios de posgrado. Al Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales por darme la oportunidad de ingresar a este maravilloso programa para así hacer mi sueño realidad desde los 13 años con este proyecto de investigación dentro de sus instalaciones; al Dr. Ramiro Escudero García, mi asesor, por atravesarse en un punto de mi vida en el cual me encontraba sin rumbo sobre lo que realmente quería hacer con mi vida profesional entonces llego el invitándome a este proyecto y me integro en su grupo de trabajo; Al Dr. Víctor Hugo López Morelos por su apoyo académico y personal,. A la Dra. Diana Fabiola Cholico Gonzales por apoyarme siempre y darme las palabras justas de aliento en esta lucha continúa conmigo misma, por aclarar mis dudas académicas y por sus revisiones puntuales al Dr. Ricardo Morales Estrella y al Dr. Egberto Bedolla.

A la Dra. Noemí Ortiz Lara y la M.C. María Remedios Cisneros Magaña, por siempre estar ahí y apoyarme con su conocimiento y la aclaración con las dudas por su sincera preocupación y amistad en el tiempo que compartimos laboratorio y clases de especialización.

Al amor de vida mi esposo Noé Armando Espinoza León quien en todo momento estuvo ahí para levantarme en mis caídas para hablarme con lo correcto cuando quise desertar, por no dejar rendirme y por ser mi inspiración, a mi hijo Noé Francisco quien es mi fuente de inspiración y lucha los amo, a mi suegra María de la Paz León Urbina quien estuvo a mi lado apoyándome incondicionalmente en todo momento. A mis hermanos Hernán Valadez y Alonso Valadez porque a pesar de la distancia siempre estuvieron presentes con sus llamadas y con sus palabras de aliento para continuar con mi sueño, a mis cuñadas Aidee Vázquez, Lupita Martínez y a mi mejor amiga casi hermana Elba María Gil Paredes porque siempre estuvieron aquí para mí por ser mi fuente de inspiración en cada uno de sus logros, a mi padre Juan Francisco Valadez Reyes por ser la persona

que más admiro y respeto y que además en los momentos más difíciles siempre estuviste y estas aquí, a mi madre María de Jesús Aguilar Macías por darme la vida y recapacitar en este punto de la vida. A mis sobrinas Fátima, Lunita y Elisa por ser mi fuente de inspiración y porque en un futuro me gustaría ser su fuente. Agradezco a Dios por tenerlos en mi vida los amo.

A mis compañeros académicos en este trayecto y que su apoyo siempre fue incondicional: María Mateos, Martín Vega, María Ramírez, Yareth Herrera y Hugo Marín. A mi gran amigo y excompañero de trabajo que sin sus palabras yo no me habría animado a aplicar en este programa al M.C. Abel Luis Manzano Rodríguez gracias por ese empujón, gracias por estar presente de manera incondicional siempre estaré en deuda contigo.

A la familia Monsiváis Ramos en conjunto con la minera de Tzitzio por sus aportes técnicos, a Dios y a los que olvide mencionar.

A ustedes, gracias por todo.

Índice

RESUMEN	1
SUMMARY	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.	3
1.1. Objetivo General.	4
<i>1.1.1. Objetivos Específicos.</i>	4
1.2. Justificación.....	4
1.3. Hipótesis.	5
1.4. Metas Científicas.	5
1.5. Metas Tecnológicas.	5
CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	6
2.1. Generalidades.	6
<i>2.1.1. Minería de México en el mundo.</i>	6
<i>2.1.2. Minería en México.</i>	6
<i>2.1.3. Minería en el estado de Michoacán.</i>	7
2.2. Mineralogía del oro.	12
<i>2.2.1. Antecedentes.</i>	12
<i>2.2.2. Propiedades.</i>	12
<i>2.2.3. Yacimientos.</i>	12
<i>2.2.4. Clasificaciones de menas orientadas a la extracción.</i>	13
<i>2.2.5. Grupo de minerales de oro.</i>	13
<i>2.2.6. Relaves para la extracción de oro.</i>	13
2.3. Revisión y discusión del estado del arte.....	14
<i>2.3.1. Flotación.</i>	14
<i>2.3.2. Separación Gravimétrica.</i>	15

2.3.3. <i>Concentradores Centrífugos</i>	16
2.3.4. <i>Recuperación Pirometalúrgica</i>	17
2.3.5. <i>Copelación</i>	17
2.3.6. <i>Procesos Hidrometalúrgicos</i>	17
2.3.7. <i>Agentes lixiviantes para la recuperación de oro</i>	20
2.4. <i>Caracterización física y química de los relaves</i>	26
2.4.1. <i>Difracción de Rayos X</i>	26
2.4.2. <i>Microscopia electrónica de barrido (MEB)</i>	27
2.4.3. <i>Caracterización química por espectroscopia de absorción atómica de flama</i>	27
2.4.4. <i>Caracterización fisicoquímica</i>	29
2.5. <i>Estudio de liberación</i>	30
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	31
Primera Etapa de Desarrollo Experimental.....	32
3.1 <i>Recolección de relaves</i>	32
3.2 <i>Caracterización de relaves</i>	34
3.2.1 <i>Análisis químico cuantitativo</i>	34
3.2.2 <i>Análisis químico cualitativo</i>	37
3.3 <i>Propiedades físicas de los relaves</i>	38
3.3.1 <i>Determinación de la densidad</i>	38
3.3.2 <i>Análisis de variación de pH en los relaves</i>	38
3.3.3 <i>Análisis granulométrico valorado</i>	38
3.3.4 <i>Análisis químico cuantitativo</i>	41
3.4 <i>Diseño de los procedimientos de recuperación de oro</i>	41
3.4.1 <i>Recuperación de oro por lixiviación</i>	41
3.4.2 <i>Descripción de la experimentación de lixiviación</i>	42

3.4.3 Caracterización de soluciones preñadas y de relaves.	45
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	46
4.1 Resultados de los análisis cuantitativos y cualitativos de los relaves.	46
4.1.1 Análisis químico cuantitativo por absorción atómica de flama.	46
4.1.2 Análisis Químico Cualitativo.	48
4.2 Propiedades Físicas.	52
4.2.1 Densidad de los relaves.	52
4.2.2 pH de los relaves.	52
4.3 Selección de Agentes Lixiviantes.	53
4.5 Propuesta de mecanismos de reacción de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización del lixiviante NRW Dezo.	57
4.6 Análisis termodinámico para la lixiviación de oro y cobre con el agente lixiviante NRW Dezo.	58
4.7 Lixiviación de oro con el agente lixiviante NRW Dezo.	59
4.7.1 Comportamiento de la concentración de Au con respecto al tiempo.	59
4.7.2 Comportamiento de la concentración de Au con respecto al pH.	60
4.7.3 Comportamiento en la concentración de Au con respecto al Potencial Óxido - Reducción (ORP) del sistema.	67
4.8 Comportamiento en la recuperación de cobre durante la lixiviación de los relaves. ..	72
4.9 Porcentajes de recuperación de oro y cobre.	74
4.9.1 Masa mineral de relaves, lixiviada con los agentes lixiviantes GoldMax y NRW Dezo.	75
4.10 Caracterización de relaves residuales de la lixiviación	76
4.10.1 Análisis químico cualitativo por difracción de rayos X.	76
4.10.2 Análisis químico cualitativo por microscopia de barrido (MEB).	78
4.11. Caracterización de las soluciones preñadas por espectroscopia FTIR.	80

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES TRABAJOS A FUTURO.....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	85

Índice de Figuras

Figura 2.1 Principales estados mineros.....	6
Figura 2.2 Regiones mineras del estado de Michoacán.	10
Figura 2.3 Esqueleto Instrumental de un equipo de absorción atómica de flama.	28
Figura 3.1 Desarrollo experimental de la Etapa 1, utilizado para la caracterización de los relaves.	31
Figura 3.2 Detalle del yacimiento mineralógico en la región de Tiquicheo Michoacán.	32
Figura 3.3 Ubicación geográfica del polígono con coordenadas 19°3'41.03 N100°44'28W	33
Figura 3.4 a) Representación esquemática del paleo fraccionado y alternado, b) Cuarteador Humboldt.	34
Figura 3.5 Horno de microondas Perkin Elmer modelo Titan MPS.	35
Figura 3.6 Viales de material de teflón para horno de microondas Perkin Elmer.	35
Figura 3.7 Espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer modelo 3100.	36
Figura 3.8 Relaves con tamaños de partícula heterogénea.	38
Figura 3.9 Desarrollo experimental en la etapa 2. Recuperación de Oro.	40
Figura 4.1 Difractograma del análisis por DRX a los relaves de mineral de cobre.	48
Figura 4.2 a) Micrografía de relaves lixiviados (extracción de cobre. Tanda B.C y Col. [10], b) Micrografías de los relaves Tiquicheo a magnificación de 5000x en MEB.	50
Figura 4.3 Micrografías de los relaves Tiquicheo a) magnificaciones de 1000X, b) 10000X en MEB.	51
Figura 4.4 Espectro de infrarrojo del agente lixiviante NRW Dezo.	54
Figura 4.5 Espectro de infrarrojo del agente lixiviante GoldMax.	54
Figura 4.6 Porcentaje de lixiviación efectuada en los relaves con NRW Dezo y GoldMax.	56

Figura 4.7 Comportamiento de la concentración de oro en mg/L y gpt con respecto al tiempo con NRW Dezo a concentraciones de 5, 10 y 15% (%w/w).	60
Figura 4.8a Comportamiento del pH con respecto al tiempo y la concentración de oro con el agente lixivante NRW Dezo al 5% (w/w).	61
Figura 4.8b Especies formadas durante la lixiviación a concentración 5% (w/w) NRW Dezo, de acuerdo al programa termodinámico Hydra Medusa Chemical Software.	62
Figura 4.9a Comportamiento del pH con respecto al tiempo y la concentración de oro con el agente lixivante NRW Dezo al 10% (w/w).	63
Figura 4.9b Especies formadas durante la lixiviación a concentración 10% (w/w) NRW Dezo de acuerdo al programa termodinámico Hydra Medusa Chemical Software.	64
Figura 4.10a Comportamiento del pH con respecto al tiempo y la concentración de oro 15% (w/w) NRW Dezo.	65
Figura 4.10b Especies formadas durante la lixiviación a concentración 15% (w/w) NRW Dezo, de acuerdo al programa termodinámico Hydra Medusa Chemical Software.	66
Figura 4.11 Compartimento del potencial óxido reducción con respecto al tiempo y la concentración de oro. Adición de 5% (w/w) de reactivo lixivante.	68
Figura 4.12 Compartimento del potencial óxido reducción con respecto al tiempo y la concentración de oro a concentración del 10% (w/w) del reactivo lixivante.	69
Figura 4.13 Compartimento del potencial óxido reducción con respecto al tiempo y la concentración de oro a concentración del 15% (w/w) NRW Dezo.	69
Figura 4.14 Diagrama Pourbaix de oro con el agente lixivante NRW Dezo acuerdo al programa termodinámico Hydra Medusa Chemical Software.	70
Figura 4.15 Diagrama Pourbaix de cobre con el agente lixivante NRW Dezo acuerdo al programa termodinámico Hydra Medusa Chemical Software.	71
Figura 4.16 Concentración de cobre en la solución preñada. Lixiviación de oro en los relaves con el agente lixivante NRW Dezo.	72
Figura 4.17a Comportamiento de la concentración de cobre con respecto al pH a concentración del 10% (w/w) del agente lixivante NRW Dezo.	73
Figura 4.17b Comportamiento de la concentración de cobre con respecto al pH a concentración del 15% (w/w) del agente lixivante NRW Dezo.	74

Figura 4.18 Porcentajes de masa mineral lixiviada de los agentes NRW Dezo y GoldMax en relaves.	76
Figura 4.19 Difractograma de los relaves residuales, obtenidos de las pruebas de lixiviación con el agente lixivante NRW Dezo al 10% (w/w).	77
Figura 4.20 Difractograma de los relaves residuales obtenidos de las pruebas de lixiviación con el agente lixivante NRW Dezo al 15% (w/w).	77
Figura 4.21 Micrografía de los residuos de relaves NRW Dezo al 15% de concentración, Figura a) con magnificación de 1000x, b) a 2500x y, c) a 5000X.	80
Figura 4.22 Espectro de infrarrojo de las soluciones preñadas al 10% (w/w) (línea azul) y 15% (w/w) (línea naranja) de concentración del agente lixivante NRW Dezo.	81

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Volumen de la producción minera del estado de Michoacán.	7
Tabla 2.2 Participación en volumen y valor de la producción.	8
Tabla 2.3 Compañías mineras que realizan explotaciones dentro del estado de Michoacán [7]	9
Tabla 2.4 Tipos de yacimientos que se encuentran dentro del estado de Michoacán [6].	11
Tabla 2.5 Materiales que pueden tratarse mediante lixiviación [16].	19
Tabla 2.6 Hidrometalurgia vs Pirometalurgia. [9]	25
Tabla 3.1 Parámetros establecidos en el horno de microondas para la digestión de los relaves. El método o rutina en el equipo está etiquetado como Mineral Sonora.	36
Tabla 3.2 Parámetros establecidos por el fabricante Perkin Elmer para la determinación de cobre y oro a partir de la absorbancia. λ es la longitud de onda.	37
Tabla 3.3 Número de tamices y aperturas de la serie Tyler.	39
Tabla 3.4 Parámetros establecidos para la lixiviación de los relaves con el agente lixivante GoldMax.	44
Tabla 3.5 Parámetros establecidos para la lixiviación de los relaves con el agente lixivante NRW Dezo.	45

Tabla 4.1 Cuantificación de oro y cobre en mg/L y porcentaje en el mineral de cabeza y relaves por la ruta disolución ácida-espectrometría de absorción atómica.	47
Tabla 4.2 Contenido de oro en seis tamaños de partícula.	47
Tabla 4.3 Elementos contenidos en los relaves, información obtenida en EDS.	49
Tabla 4.4 Comportamiento del pH con respecto al tiempo para el sistema relave-agua.	52
Tabla 4.5 Recuperaciones en mg/L de oro de los relaves de cobre, al lixiviar utilizando GoldMax y Dezo.	55
Tabla 4.6 Constantes de equilibrio químico calculadas para cada reacción propuesta en el mecanismo de reacciones.	58
Tabla 4.7 Energía libre de Gibbs en equilibrio químico obtenidas para cada reacción.	58
Tabla 4.8 Recuperación de oro y cobre lixiviado en porcentaje. Oro inicial en el relave = 0.6538 mg/L. Cu inicial = 17.50 mg/L.	75
Tabla 4.9 Elementos contenidos en los residuos de los relaves, información obtenida del análisis puntual por EDS. NRW Dezo del 10% (w/w).	78
Tabla 4.10 Elementos contenidos en los residuos de los relaves por análisis puntual por EDS. NRW Dezo del 15% (w/w).	79
Tabla 4.11 Propuesta de variables operativas para la lixiviación de relaves utilizando los reactivos GoldMax y NRW Dezo.	82

RESUMEN

El **tratamiento** de minerales auríferos como la **lixiviación**, utilizan reactivos dañinos tanto para el medio ambiente como para los operadores en las plantas, además de que cada vez la vigilancia sanitaria por parte de los organismos gubernamentales es más estrecha, incluso para conceder los permisos correspondientes de extracción y procesamiento de minerales. Con lo anterior, se justifica la reprocesamiento de residuos de labores mineras llamadas jales o **relaves**, principalmente a los considerados desechos mineros que contienen el metal de valor libre y disseminado. En este trabajo de investigación se propone un procedimiento de lixiviación de los relaves producto de una labor de procesamiento y obtención de cobre a partir de minerales malaquita y azurita, en este proyecto se explora el uso por separado de dos **agentes lixiviantes**: GoldMax y NRW Dezo de los que se carece de información técnica científica, pero que se han estado utilizando en algunas plantas para la obtención de metales preciosos. Los resultados experimentales muestran que mediante lixiviación los dos reactivos disuelven el **oro** contenido en el mineral, aunque con el agente lixiviante NRW Dezo se reporta más oro a la solución preñada que con el lixiviante GoldMax. Después de aproximadamente 30 minutos de contacto entre el relave y a 10 y 15 % (w/w) de reactivo NRW Dezo en agua corriente, la **recuperación** de oro es del 71% con respecto al contenido original en el relave; esto, equivale a disolver 45.83 gpt de oro. En el caso del lixiviante GoldMax su eficiencia es más baja en alrededor del 20%, comparada con el reactivo NRW Dezo. De los análisis por FITR y de la revisión bibliográfica en el análisis termodinámico se proponen reacciones químicas que muestran que los productos no son dañinos al medio ambiente y tampoco al personal ya que no pertenecen a compuestos cianurados.

SUMMARY

The **treatment** of gold minerals such as **leaching**, uses reagents that are harmful to both the environment and the operators in the plants, in addition to the fact that health surveillance by government agencies is increasingly close, even to grant the corresponding permits of mineral extraction and processing. With the foregoing, the reprocessing of mining work residues called tailings or tailings is justified, mainly those considered mining wastes that contain the metal of free and disseminated value. In this research work, a procedure for the leaching of the **tailings** product of a work of processing and obtaining copper from malachite and azurite minerals is proposed, in this project the use of two **leaching agents** is explored separately: GoldMax and NRW Dezo Of which there is a lack of scientific technical information, but which have been used in some plants to obtain precious metals. The experimental results show that by leaching the two reagents dissolve the **gold** contained in the mineral, although with the NRW Dezo leaching agent, more gold is reported to the pregnant solution than with the GoldMax leaching agent. After approximately 30 minutes of contact between the tailings and at 10 and 15% (w / w) of NRW Dezo reagent in tap water, the **gold recovery** is 71% with respect to the original content in the tailings; this is equivalent to dissolving 45.83 gpt of gold. In the case of the GoldMax leachate, its efficiency is lower by around 20%, compared to the NRW Dezo reagent. From the analysis by FITR and from the bibliographic review in the thermodynamic analysis, chemical reactions are proposed that show that the products are not harmful to the environment or to the personnel since they do not belong to cyanide compounds.

Palabras Clave: Flotación, densidad, mineral, rayos X y oro.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

La explotación del oro ha conducido al agotamiento de las menas relativamente ricas, en la mayoría de los casos el oro se encuentra en estado nativo y diseminado, aunque a tamaños menores a 50 micrómetros. Actualmente se procesan minerales de baja ley o relaves.

Las presas de relaves son depósitos minerales considerados de desecho al ser residuos de un procesamiento físico-químico anterior. Los relaves están compuestos principalmente por rocas porosas y arenas con especies minerales consideradas en su momento sin valor. Dependiendo del análisis químico, estos pueden ser reprocesados al encontrar que aún contienen especies minerales con gran valor como lo es el oro que en su momento no se consideraron como tales o porque era más factible recuperar primero otras especies valiosas, en el entendido de que en una sola operación de extracción es imposible recuperar más de una especie mineral o metal base.

El beneficio de los residuos o colas de las presas de relaves se está convirtiendo en una necesidad y un reto para el procesamiento de minerales debido a diversos factores: Uno se refiere a que los yacimientos minerales ricos se han ido agotando y por otra parte los metales preciosos en algunas menas se encuentran formando compuestos complejos y químicamente estables, o son del tipo refractario, o incluso los jales mineros pueden contener metales preciosos y tierras raras, además de lo anterior, los precios de los metales y los costos ambientales pueden justificar el reprocesamiento de algunos relaves viejos[1].

Para poder establecer la ruta de procesamiento de los relaves, debe conocerse el tipo de matriz mineralógica de origen, el metal extraído, así como el tratamiento previo que se le aplicó, las trazas que quedan del mismo, así como el grado de liberación y su asociación química.

En el caso de los minerales encontrados en la región sureste del estado de Michoacán, se encuentran yacimientos minerales que contienen cobre, calizas, oro, plata y pizarra bituminosa, principalmente[2]. El presente trabajo de investigación involucra los relaves de labores de lixiviación de minerales de cobre (malaquita y azurita), de un yacimiento

ubicado en la localidad de El Limón de Papatzindán, municipio de Tiquicheo, Michoacán.

1.1. Objetivo General.

Establecer un procedimiento de lixiviación sustentable, técnica y económicamente factible para disolver el oro contenido en los relaves de un mineral de cobre previamente procesado mediante lixiviación ácida, de la región de Tiquicheo, Michoacán.

1.1.1. Objetivos Específicos.

- Analizar cualitativa y cuantitativamente las muestras de los relaves para establecer la presencia de oro y otros metales preciosos.
- Determinar las propiedades físicas en las muestras de los relaves (densidad, distribución de tamaño de partículas entre otros)
- Caracterizar y estudiar el comportamiento químico de los agentes lixiviantes GoldMax y NRW Dezo los cuales se encuentran a la vanguardia por ser amigables con el medio ambiente.

1.2. Justificación.

Actualmente el procesamiento de los relaves con especies valiosas demanda una constante investigación e innovación tecnológica que definan las mejores y eficientes rutas de beneficio, de manera sustentable. Cada yacimiento mineral o cada relave, debe ser tratado de manera particular, debido a que sus constituyentes minerales y asociaciones químicas son diferentes.

De acuerdo al creciente costo de los metales en el mercado mayor es su demanda, obviamente aumentando su precio con la ley. El procesamiento a partir de los relaves, resulta en proyectos de investigación que inician con la caracterización y que juegan con variables físicas y químicas buscando establecer las factibilidades operativas y económicas, con sustentabilidad ya que el crecimiento industrial como la misma población han contribuido a la generación de impactos ambientales, algunos de ellos considerables para el equilibrio ecológico y el ambiente por lo que se busca implementar la mejor ruta de procesamiento para obtener la mayor eficiencia de recuperación de

manera sustentable. Este proyecto propone la primera parte de la ruta, que es la disolución del oro que se encuentra en los jales motivo de investigación.

1.3. Hipótesis.

La lixiviación es un proceso químico de disolución de ciertas especies sólidas en medios acuosos bajo características específicas de acidez o de alcalinidad. Esta condición de pH en el medio acuoso se establece al identificar mediante caracterización química y física los componentes de interés contenidos en un mineral.

La caracterización química y física de los relaves de una planta de obtención de cobre a partir de los minerales malaquita y azurita, proporcionará la información necesaria para establecer las condiciones de lixiviación adecuadas para la disolución de oro o especies auríferas, además de otros metales de interés que se encuentran en los relaves, de manera sustentable, para la posterior recuperación de los metales de valor.

1.4. Metas Científicas.

- Recuperar al menos el 70% de los metales preciosos contenidos en los relaves.

1.5. Metas Tecnológicas.

- Aplicar los resultados de esta investigación a la recuperación de oro en la planta instalada en el municipio de Tiquicheo, Michoacán.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1. Generalidades.

2.1.1. Minería de México en el mundo.

México se destaca por ocupar el 1er lugar en la producción de plata a nivel mundial siendo el estado de Zacatecas el mayor productor del país y el nombre de la compañía presente es PLC Fresnillo de grupo Peñoles. Además México se ubica entre los 10 principales productores de 16 diferentes minerales como: plata, bismuto, fluorita, celestita, wollastonita, cadmio, molibdeno, plomo, zinc, diatomita, sal, barita, grafito, yeso, oro y cobre[3], actualmente se mantiene en el noveno lugar en producción de oro según el reporte de Gold Yearbook 2019, manteniéndolo desde el año de 2017 a la fecha [4].

2.1.2. Minería en México.

El país se destaca por ser un país minero, ya que es productor en varios minerales primarios como se menciona en la sección 2.1.1, el sector minero-metalúrgico que contribuye con el 4% del PIB nacional [3], 6 estados destacan en la producción minera de minerales primarios [4], se pueden apreciar en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Principales estados mineros.

Dentro de los estados que se muestran en la Figura 2.1 se caracterizan por producir minerales primarios (en su mayoría sulfuros) sin contar al estado de Michoacán que se destaca con el tercer lugar de la producción en minerales de hierro, el primer lugar lo tiene el estado de Colima y le sigue el estado de Coahuila, con respecto a la producción de oro, el estado de Sonora se consolida como el primer productor de oro con 7, 127 kg/mes, el segundo productor de metal áureo es el estado de Chihuahua con 1,847 kg/mes, seguido del estado de Durango con 1,020 kg/mes. Según los datos proporcionados por el INEGI[5].

2.1.3. Minería en el estado de Michoacán.

En el estado de Michoacán según datos del servicio geológico mexicano, presenta características oro – hidrográficas, geológica y climáticas que propician el desarrollo de las distintas actividades económicas, destacando entre ellas la agrícola, la turística y minero – metalúrgica[6]. A continuación, en la Tabla 2.1 se muestran hasta el año 2017 el volumen de los productos metálicos que son extraídos dentro del estado, incluyendo los metales preciosos. En la sección 2.1.2 se hace mención acerca de la producción de hierro quien destaca en primer lugar el estado de Michoacán, aunque la producción por año se observan decrementos, un cambio drástico del año 2013 a 2014 y un decremento en el año de 2017.

Tabla 2.1 Volumen de la producción minera del estado de Michoacán.

PRODUCTO	2013	2014	2015	2016	2017
Metálicos					
Oro	27	27	263	46	149
Plata	2,153	2,148	2.048	266	157
Cobre	1,117	1,192	598	1875	2,677

Es necesario destacar la información mostrada en la Tabla 2.1 porque existe el desconocimiento, los movimientos de la clandestinidad y la lucha de los territorios por parte de grupos delictivos que no han permitido explotar los recursos minerales que se

tienen en las diferentes regiones, la economía del estado no crece y no permite el desarrollo de nuevos proyectos emprendedores.

En la Tabla 2.2 se muestra la participación en volumen a nivel nacional y estatal además del valor en la producción nacional del oro.

Tabla 2.2 Participación en volumen y valor de la producción.

PRODUCTO (Kg)	VOLUMEN PRODUCCIÓN NACIONAL (t)	VOLUMEN PRODUCCIÓN ESTATAL (t)	VALOR PRODUCCIÓN NACIONAL (mdp)	VALOR PRODUCCIÓN ESTATAL (mdp)	%
ORO	126,820	149	97,141	114	0.11
PLATA	5,816,034	157	60652	1	0.002

En el estado de Michoacán se cuenta con una producción anual de 149 ton de oro y 157 ton de plata, el oro se encuentra presente en minerales de cobre de forma diseminada. A continuación, en la Tabla 2.3 se muestran los municipios con mayor participación minera, en la que se describen las compañías, las explotaciones de los recursos mineralógicos (metales extraídos) y la producción en tonelaje diaria.

Tabla 2.3 Compañías mineras que realizan explotaciones dentro del estado de Michoacán [7]

COMPAÑÍA	MINA	MUNICIPIO	SUSBTANCIA	PRODUCCIÓN Ton/día
Arcelor Mittal Steel	Las Truchas Vista Hermosa	Lázaro Cárdenas	Fierro	10,000
Ternium/ Las Encinas S.A.	Aquila El arroyo	Aquila	Fierro	1000
El Bastan	El Risco	Huetamo	Cobre, Oro, Plata, Zinc	800
Los Encinos Sago import export	Inguarán – Malacate Descubridora Santa Clara	La Huacana Aganguero	Cobre, plomo, zinc Cobre, plomo. Zinc y Oro	250 60

En el municipio de Lázaro Cárdenas se encuentra la compañía Arcelor Mittal, empresa trasnacional, la principal extracción es el hierro se muestra el tonelaje diario en la Tabla 2.3, siguiéndole Ternium, en secciones anteriores se ha descrito que la principal producción en recursos mineralógicos en el estado es el hierro, posteriormente con bajos tonelajes sigue la explotación del cobre, oro plomo plata y zinc, la compañía el Bastan del Cobre se destaca por tener la mayor productividad.

2.1.3.1. Regiones mineras y tipos de yacimientos en el estado de Michoacán.

Estas regiones se han agrupado de acuerdo al tipo de mineralización, tipo de yacimientos y litología [6]. En la Figura 2.2 se muestran las regiones mineras que se encuentran en el estado, Tlalpujahua cuenta con antecedentes de explotación de plata y cobre desde el virreinato, según registros aún hay jales e incluso menas minerales ricas por ser explotadas, sin embargo, la situación dentro del estado no permite el crecimiento de este.

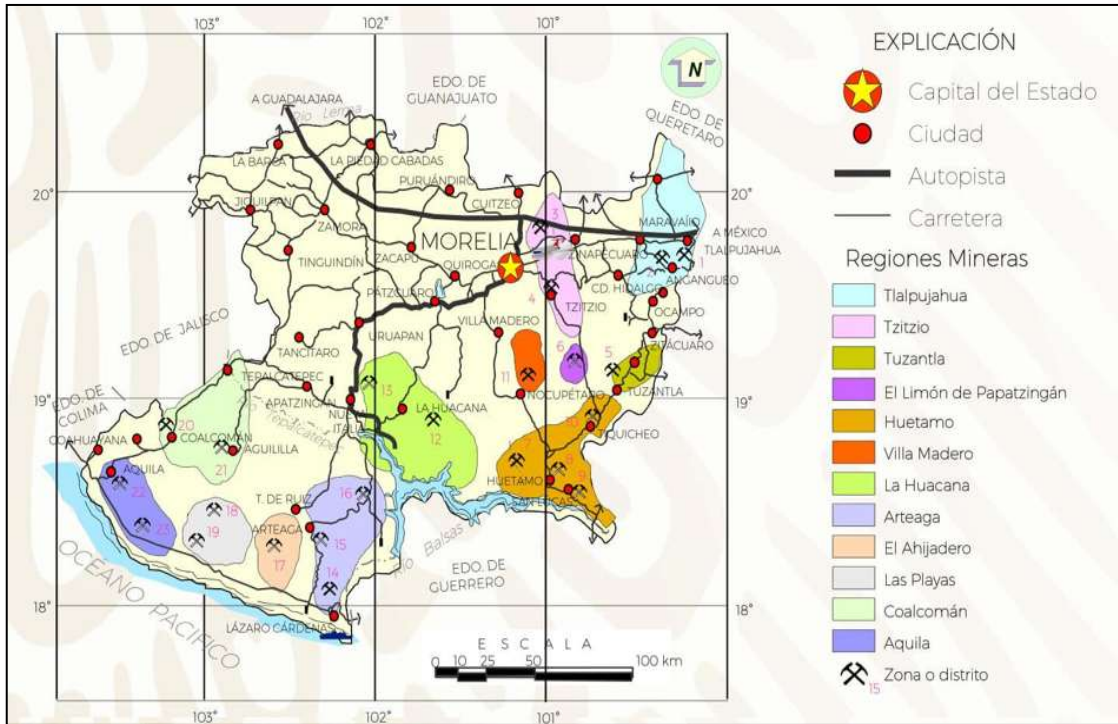


Figura 2.2 Regiones mineras del estado de Michoacán.

En la Tabla 2.4 se muestra que en el municipio del limón de Papatzingán lugar donde se encuentran los relaves a tratar.

Tabla 2.4 Tipos de yacimientos que se encuentran dentro del estado de Michoacán [6].

REGION MINERA	ZONA O DISTRITO MINERO	SUBSTANCIA	TIPO DE YACIMIENTO
Tlalpujahua	1. Tlalpujahua 2. Agangueo	Au, Ag	Hidrotermal
Tzitzio	3. Real de Otzumatlá 4. Tzitzio	Au, Ag, Sb	Hidrotermal
Tuzantla	5. Tiamaro	Au, Ag, Cu	Hidrotermal
El limón de Papatzingán Huetamo	6. Tzinzinguaro 7. El Baztán 8. San Ignacio 9. San Lucas 10. Tiquicheo	Au, Ag Cu, Au, Ag, Zn, Pb	Hidrotermal
Villa Madero	11. San Diego Curucupaceo	Au, Ag, Pb, Cu, Zn	Hidrotermal
Arteaga	12. Las Truchas 13. Los Pozos 14. Cerro Bola	Fe, Ag, Au	Hidrotermal
El Ahijadero	15. El Ahijadero	Au	Hidrotermal
Las Playas	16. El Jovero 17. El Costeño	Au, Fe, Ag	Hidrotermal
Coalcomán	18. La Minita 19. Arroyo Seco	Cu, Ag, Zn, Fe, Cu, Ag Pb, Zn, Ag	Hidrotermal
Aquila	20. Aquila 21. San Pedro	Fe, Ag, Au, Cu, Mn	Hidrotermal

En este proyecto la ubicación se caracteriza por tener yacimientos hidrotermales o también conocidos como filones hidrotermales de cuarzo y oro, donde junto con la pirita y otros sulfuros, el oro fue depositado por soluciones minerales ascendentes que lo contenían. El oro está simplemente mezclado mecánicamente con los sulfuros y óxidos y no en forma de combinación química [7].

2.2. Mineralogía del oro.

2.2.1. Antecedentes.

Se considera un metal conocido desde los tiempos paleolíticos 40,000 AC muy probablemente el primer metal hallado y dentro de su búsqueda se encontraron minerales de cobre, de los cuales se extrajo el oro. Siempre ha jugado un papel primordial en el desarrollo de la humanidad, puesto que ha sido un elemento determinante en la evolución económica en la historia del hombre y los países[8], ya que al contar con reservas de este se mide la riqueza del país siendo el primer lugar China seguida de Australia.

2.2.2. Propiedades.

El oro se localiza en la tabla periódica como Au, cristaliza en el sistema cúbico centrado en las caras con una dimensión de célula de 4.0701 Å [8], posee una dureza en la escala de Mohs de 2.5 a 3, su densidad es de 19.32 g/cm³, punto de fusión 1064.18 °C, es de amarillo dorado, dúctil, maleable además de que posee alta conductividad eléctrica y térmica, se considera un metal noble porque presenta estabilidad y resistencia a la corrosión[9].

2.2.3. Yacimientos.

La formación de un yacimiento da origen a muchas formas posibles de compuestos que conforman la mineralización natural. Sin embargo, existen algunos elementos que son conocidos con el nombre de metales preciosos y que generalmente no se encuentran en la naturaleza formando compuestos ni con el oxígeno ni con otras sales minerales, o muy raramente lo hacen. Entre ellos se destacan el oro, la plata, el platino, el paladio, el rodio, el osmio el rutenio y el iridio [8].

El oro además del estado nativo y del oro electrum (mezcla nativa de oro y plata), se encuentra en las siguientes sales arsenopirita (FeAsS), Calcopirita (CuFeS_2), piritita (FeS_2), pirrotita (Fe_7S_8) y asociado en forma de: calaverita (AuTe_2), nagyagita [$\text{Pb}_3(\text{Pb,Sb})_3\text{S}_6$][10] (Au,Te_3) y silvanita [$(\text{Au,Ag})_2\text{Te}_4$] [11].

2.2.4. Clasificaciones de menas orientadas a la extracción.

- Menas de oro nativo que puede separarse por gravedad, amalgamación y/o cianuración.
- Oro asociado con sulfuros, se puede encontrar en partículas diseminadas dentro de los sulfuros.
- Teluros de oro que aparecen junto con oro nativo y sulfuros
- Oro entre otros minerales con arsénico y/o antimonio.

2.2.5. Grupo de minerales de oro.

- No refractarios: El oro se puede recuperar en procesos como la lixiviación.
- Refractarios: Son todos aquellos en que el oro no puede ser recuperado más de un 80% mediante un proceso convencional.

La refractariedad es químicamente rara por ejemplo los teluros de oro insolubles [8].

2.2.6. Relaves para la extracción de oro.

Los relaves son materiales que se han descargado de plantas que están actualmente en funcionamiento o en desuso y de productos que no agregan valor. Este material es el resultado de varios procesos de extracción, y la historia del material dicta la mineralogía y la naturaleza de la ocurrencia de oro y las características mineralógicas de estos son diversas que dependen de los siguientes factores:

Tipo de material tratado originalmente, así como el proceso de extracción utilizado originalmente, edad de la deposición de los jales y la eficiencia de los procesos de extracción [12].

2.3. Revisión y discusión del estado del arte.

A continuación, se describen las diferentes rutas de procesamiento para recuperar el oro en los relaves propuestas por diversos autores, es importante definir en forma general algunos procesos que puedan ser factibles, así como la justificación.

2.3.1. Flotación.

La flotación es un proceso selectivo y puede ser usado para lograr una separación específica de un mineral complejo (i.e., constituido de dos o más especies sulfurosas). Es un proceso de separación fisicoquímica que utiliza la diferencia de las propiedades superficiales del mineral valor y de los minerales indeseados de la ganga, involucrando tres fases (sólidos, agua y espuma). Comprende tres mecanismos de recuperación desde la pulpa:

- 1) Adhesión selectiva de las partículas sólidas a las burbujas de aire.
- 2) Transporte de los sólidos en el agua de las burbujas que pasan a través de la cama de espuma.
- 3) Entrampamiento físico entre partículas adheridas a burbujas de aire en la cama de espuma.

La flotación utiliza las diferencias fisicoquímicas de las superficies de las partículas de las distintas especies minerales presentes. Después del tratamiento con reactivos, tales diferencias en las propiedades superficiales entre los minerales dentro de la pulpa de flotación se hacen evidentes y, para que la flotación se lleve a cabo, una burbuja de aire debe ser capaz de unirse a una partícula y llevarla a la superficie del agua. Un agitador colocado en la base de la celda proporciona suficiente turbulencia en la fase de la pulpa para promover la colisión entre las partículas y las burbujas, lo cual resultará en la adhesión de las partículas de valor a las burbujas de aire, para ser transportadas por ellas a la fase de espuma para su recuperación. Este proceso solo puede ser aplicado a partículas relativamente finas, ya que si son muy grandes, la fuerza de adhesión entre la partícula y la burbuja será menor que el peso de la partícula y la burbuja dejará caer su carga [13].

Para V.I Bragin y col. [14] la extracción de oro están involucrados principalmente en el reprocesamiento, ya que la composición mineral y el tamaño de grano del oro permiten

obtener el máximo resultado sin grandes gastos de capital. La mayoría de las presas de jales que contienen oro, formados como resultado del procesamiento de sulfuros y minerales mezclados utilizando la tecnología de lixiviación o por flotación, representan objetos complejos y difíciles de procesar, donde el componente valioso se puede encontrar en forma libre. En menor grado o en mayor grado se presenta por impregnación fina, con frecuencia tiene un tamaño de micras o nanomicras. El trabajo que realizaron muestra la distribución de oro de 0.2-0.4 g/ t (promedio 0.292 gr / t).

2.3.2. Separación Gravimétrica.

La separación gravimétrica es un proceso de separación por concentración en el cual las partículas de tamaños mixtos, formas y gravedades específicas se separan entre sí por la fuerza de la gravedad o por fuerzas centrífugas. La naturaleza del proceso es tal que la clasificación de tamaño y forma es una parte inherente, además de la separación en función de la gravedad específica, una característica de la cual el proceso deriva su nombre. Este proceso de concentración de minerales se ha producido ampliamente en la naturaleza, y la concentración de minerales pesados como oro, platino, casiterita, ilmenita, circón y diamantes en depósitos de arena de placer o playa la concentración por gravedad generalmente no es comercialmente factible [15].

Marsden O. y House I. [12] mencionan que las plantas que se dedican a la concentración de los relaves por gravedad son muy efectivas en la recuperación de oro completamente liberado en tamaños superiores a 50 μm y algunos equipos son efectivos en tamaños de hasta aproximadamente 10 μm , sin embargo, el oro puede perderse en las siguientes formas:

- Oro fino, que es demasiado pequeño para ser recuperado por el equipo instalado
- Oro escamoso que presenta un área de superficie más grande, lo que le permite llevarse partículas más ligeras, en las mesas gravimétricas.
- Oro hidrofóbico que se adhiere a la interfaz agua-aire, dando a la partícula una densidad aparente baja y se va a los relaves.
- Oro no liberado que se asocia con partículas de óxido, silicato o sulfuro y cuya densidad de partículas promedio es sustancialmente menor que la del oro.

Los equipos más conocidos de separación gravimétrica de oro son:

2.3.3. Concentradores Centrífugos.

Actualmente la concentración centrífuga se ha considerado como tecnología de vanguardia para el beneficio de minerales, ya que se trata de un proceso económico debido a que permite capturar partículas finas de oro, platino, plata, estaño, etc., empleando solo la fuerza centrífuga y agua como elemento que ayuda a la separación de dichas partículas.

Un método simple y mínimamente invasivo para estimar la tasa de recuperación de oro de los equipos de separación gravitatoria utilizados por los mineros artesanales y de pequeña escala en sitios de oro aluvial en las Guayanas, Sudamérica. En ésta localidad los mineros utilizaban el método de amalgamación, lo que hacia la operación de concentración dañina tanto para el personal que estaba en contacto directo con el mineral y el mercurio, como para las personas aledañas a la zona de operación. Por esta razón, era necesario implementar un método nuevo de beneficio para el mineral sin los riesgos que implicaba utilizar mercurio, pero a su vez, obteniendo un porcentaje de concentración del metal de valor igual o mejor que el obtenido por amalgamación. Se logró que la separación gravimétrica funcione perfectamente para el rango de tamaños de partícula que va de 75 a 500 μm , separando aproximadamente el 91% del oro presente en el mineral. Por lo que se concluye que la separación gravimétrica es una excelente opción en el tratamiento de beneficio de minerales auríferos.

El concentrador iCON I350 es el equipo con el que se cuenta en esta institución, emplea un campo centrífugo para concentrar oro libre y fino que usualmente no se recupera usando las técnicas tradicionales de operaciones artesanales a pequeña escala. La tecnología está basada en el conocido concentrador Falcón, asimismo el equipo está fabricado por Falcón y las principales características que hacen del equipo concentrador iCON ideal para aplicaciones tanto a pequeña como a gran escala capacidad de 100 kg hasta 15 toneladas por lote procesado, tiene facilidad para su instalación. Bajo costo de adquisición y operación. Para la operación el material es alimentado con mineral clasificado de molienda en forma de pulpa dentro del tazón rotatorio, que incluye un diseño especial de canales o riffles donde se capturan las partículas de oro. Periódicamente se producirá la cosecha o recolección del concentrado, en este caso rico en partículas de oro.

2.3.4. Recuperación Pirometalúrgica.

Se hace uso de reacciones y procesos a alta temperatura para la extracción y el refinado de metales. Los parámetros clave en pirometalurgia son la temperatura y el medio ambiente. Los beneficios derivados del uso de altas temperaturas incluyen equilibrios químicos favorables y altas velocidades de reacción, y la posibilidad de producir el metal en estado fundido o gaseoso que facilita su separación de otros productos de reacción [16].

2.3.5. Copelación.

Es un proceso de refinado en la metalurgia en las que las menas o metales aleados se tratan a temperaturas muy altas y en operaciones controladas para separar los metales nobles como el oro y plata a partir de metales base como plomo, cobre, zinc, arsénico. Este proceso se basa en el principio de que los metales preciosos no se oxidan ni reaccionan químicamente [8].

2.3.6. Procesos Hidrometalúrgicos.

La hidrometalurgia se refiere al empleo generalizado de soluciones acuosas y comprende el conjunto de procesos de lixiviación selectiva (disolución) de los componentes valiosos de las menas y su posterior recuperación de la solución por diferentes métodos y precipitación o electrolisis.

Etapas principales de los procesos Hidrometalúrgicos:

1. Dilución del componente deseado presente en el mineral
2. Concentración y/o purificación de la solución obtenida
3. Precipitación del metal deseado [17].

El proceso de lixiviación es uno de los ejemplos más importantes de reacciones heterogéneas que involucran fases sólidas, líquidas y, a veces, gaseosas. La lixiviación puede ocurrir a través de una variedad de procesos que pueden agruparse en procesos físicos, químicos, electroquímicos y electrolíticos, cada uno con ciertas características bien definidas. El proceso más simple para disolver una sustancia sólida es el proceso físico donde la fase acuosa es agua y no ocurre transformación química. El agua, aunque es el solvente más común, es quizás también uno ideal, ya que puede considerarse legítimamente como el más barato y no corrosivo de todos los reactivos comúnmente

conocidos y utilizados. Sin embargo, no debe interpretarse como un disolvente universal, como se puede ver en las muchas sustancias que son insolubles en agua corriente. Es interesante tomar nota de los factores que influyen en la solubilidad acuosa [16].

Nazarí A. y col. [18] Afirman que en la mayoría de los casos, las recuperaciones de oro que se pueden obtener de los relaves mediante lixiviación por cianuración estándar u otros métodos son bajas, típicamente del 40% al 70% y son limitadas por al menos un factor mineralógico; Gordon M. y col. [19] Enfatizan en que los relaves de cubierta pueden contener de 0.5 a 2 g/ton de oro y es extremadamente importante comprender la ocurrencia de oro para poder proponer un diagrama de flujo de proceso apropiado y optimizado. Se han aplicado técnicas mineralógicas innovadoras de los relaves, el oro puede quedar en los relaves de una planta de flotación de sulfuro si este no se encuentra liberado o si está recubierto con material no flotante o si se encuentra en partículas compuestas de minerales no hidrófobos, como óxidos o silicatos. Esta clase de materiales puede incluir partículas que contienen oro expuesto y, por lo tanto, es posible una mayor recuperación de oro por técnicas de lixiviación. Sin embargo, los relaves pueden contener minerales de sulfuro oxidados o parcialmente oxidados, que pueden interferir singularmente con la lixiviación por cianuro u otros reactivos además existen relaves que en su tratamiento (para el mineral de origen) fue lixiviado por diferentes métodos para recuperar el cobre o el mismo oro y que este no tuvo reacción alguna para su recuperación quedando ocluido en los relaves que generalmente se puede deber a un componente refractario. Las ocurrencias comunes de oro existentes en los relaves provenientes de una lixiviación son las siguientes:

- Oro retenido en silicato o ganga en la que parte del oro puede estar encapsulado en óxido o silicato, en el cual el oro permanece sin reaccionar en soluciones de cianuro, tiosulfato entre otros.
- Oro que puede estar ocluido en minerales de sulfuro, relaves que contienen oro en partículas finas principalmente pirita..

Botz y col. [20] afirman que el oro puede ser lixiviado principalmente de minerales, fuentes secundarias y materiales gastados que contienen oro como los relaves por cianuración. Sin embargo teniendo en cuenta el aumento de los accidentes ambientales más recientes en varios procesos de recuperación de oro en todo el mundo, ha causado

una grave contaminación de los recursos hídricos naturales por el uso de cianuro como agente lixiviante.

Actualmente el proceso de lixiviación es muy usado y tiene tendencia de mayores aplicaciones, por ser económico y en general menos contaminantes [9]; a continuación se muestra en la Tabla 2.5 los diferentes materiales que pueden ser tratados por lixiviación.

Tabla 2.5 Materiales que pueden tratarse mediante lixiviación [16].

Materiales	Ejemplos Representativos
Metales	Metales Preciosos, cobre, níquel, cobalto.
Óxidos e Hidróxidos	bauxita, lateritas, minerales de cobre oxidados, minerales de uranio, minerales de zinc, manganeso y nódulos.
Óxidos Complejos	cromita, niobita-tantalita, pirocloro, ilmenita, wolframita, scheelita.
Sulfuros	sulfuros de metales como cobre, níquel, cobre o zinc ; molibdenita.
Solenoides y Teluritas	lodos anódicos de la electrolisis de cobre.
Arseniuros	cobalto y níquel en minerales con arsénico.
Fosfatos	rocas de fosfatos, arena de monazita.
Silicatos	arcillas de silicatos, nefelina-sienita; minerales de berilio; serpentina.
Cloruros y Sulfatos	escoria de pirita de procesos de cloruro y sulfato.
Escorias y Lodos	escorias de conversión de cobre; lodo de vanadio (de la industria del aluminio); aleaciones ferro escorias.
Catalizadores	níquel / molibdeno / vanadio - catalizador gastado que lleva.
Escorias	Estas son aleaciones de metales pesados como hierro, cobalto y níquel con arsénico y antimonio, ocasionalmente tales como estaño.

Según la información proporcionada en esta tabla se sugiere que para la recuperación metales preciosos, una de las rutas más factibles es la lixiviación ya sea directo de una mena, proveniente en sulfuros, óxidos como cuarzo o de un depósito de relaves.

2.3.7. Agentes lixiviantes para la recuperación de oro.

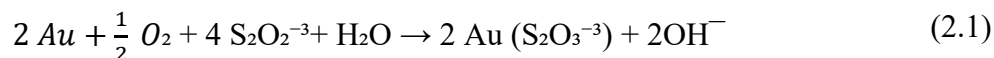
El procesamiento de minerales de oro es uno de los ejemplos de ensamblaje de varias operaciones importantes de unidades siderometalúrgicas. Históricamente, el punto de partida se remonta a 1887 y 1888, cuando se otorgaron dos patentes británicas clave a MacArthur y Forrest Brothers. La primera patente cubrió la disolución del oro de los minerales utilizando soluciones diluidas de cianuro de potasio, mientras que la segunda cubrió el uso de zinc finamente dividido para recuperar el oro de las soluciones de cianuro. Estas dos patentes sentaron las bases del proceso de cianuro, y esto rápidamente se estableció como el estándar de la industria para el procesamiento de oro [9].

Para que un metal precioso proveniente de un relave sea económicamente obtenido por el proceso de lixiviación, es necesario que haya un solvente económico y los problemas de la lixiviación son las condiciones mecánicas, químicas y económicas que permitan obtener una disolución con el componente deseado de la mena o jal y con un buen rendimiento [8].

Botz y col. [20] Enfatizan sobre los riesgos del uso del cianuro como agente lixiviante, sin embargo S. Sayed y col. [21] ofrece como alternativa para sobrellevar la problemática que provoca el uso de la cianuración ofrece diferentes agentes de lixiviación para la recuperación de oro tanto en minerales como en el tratamiento de los relaves. Los cuales son los siguientes:

2.3.7.1. Tiosulfato.

El oro se disuelve lentamente en tiosulfato alcalino. La velocidad de disolución está influenciada por las concentraciones de tiosulfato y se disuelve oxígeno, la temperatura del proceso y se puede mejorar agregando iones de cobre. El oro forma un complejo aniónico estable con tiosulfato de acuerdo con la reacción 2.1:



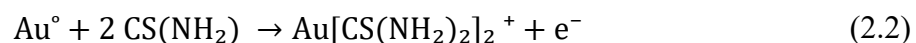
Aunque el complejo de tiosulfato de oro es bastante estable una vez formado, las condiciones alcalinas son necesarias para evitar la descomposición del tiosulfato por el ácido, el tiosulfato es catalizado por el cobre y tiene varias ventajas sobre el proceso de cianuración convencional, a pesar de su lento ritmo. Las tasas de lixiviación de oro utilizando tiosulfato se logran en presencia de amoníaco, junto con cobre. En los últimos años, el reactivo se ha considerado seriamente como un sustituto potencial del cianuro porque generalmente causa menos impactos ambientales: la lixiviación de tiosulfato exhibe menos interferencia de cationes extraños y plantea menos problemas de contaminación, el principal problema con la lixiviación de tiosulfato es el alto consumo de reactivo durante además, el proceso es generalmente lento, aunque aceptable. Las tasas de lixiviación se pueden lograr en presencia de amoníaco utilizando cobre (II) como oxidante, sin embargo el alto consumo de reactivos hace que la mayor parte sea poco económico en general, a pesar de sus posibles beneficios ambientales [21]

2.3.7.2. Tiourea.

La lixiviación de minerales de oro con tiourea fue desarrollada como una alternativa a la cianuración en 1940 en comparación con el cianuro como lixivante de oro, la tiourea tiene ciertas ventajas tales como:

- Baja sensibilidad a los metales básicos (Pb, Cu, Zn, As, Sb).
- Baja sensibilidad al azufre residual.
- Alta recuperación de oro a partir de concentrados de pirita y calcopirita.
- Recuperación satisfactoria de oro de minerales refractarios.

La tiourea y el oro forman un anión complejo simple en una solución ácida

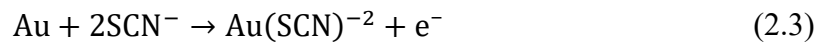


La reacción es rápida y la extracción de oro puede ser alcanzada hasta el 99% , la mayor desventaja de la tiourea en la lixiviación de oro los consumos son mayores a comparación del cianuro lo cual lo hace costoso[22].

2.3.7.3. Tiocianato.

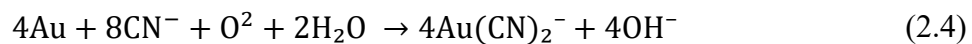
El oro se puede disolver en una solución de Tiocianato. El grado de disolución del oro se da bajo condiciones oxidantes como Fe_3^+ y valores de pH entre 1 a 3, para formar complejos de Au (I) y Au (II), el Tiocianato es un lixivante eficaz para el oro en

condiciones ácidas, produciendo velocidades de disolución que son comparables a las obtenidas con tiourea al tiempo que ofrece la ventaja de que da mayor estabilidad frente a la descomposición oxidativa, recuperado por encima del 95% de oro de soluciones ácidas, sus desventajas es que requiere considerablemente de agentes oxidantes incrementando los costos de operación. A continuación, se muestra la ecuación global de reacción:



2.3.7.4. Cianuro.

La cianuración es el proceso más usado para la recuperación de oro, en especial el que procede de las menas no refractarias. El cianuro de sodio es el agente de lixiviación más utilizado para el oro debido a su gran capacidad para extraerlo [17]. Destinado por más de 100 años, el cianuro ha ocupado un lugar destacado como un reactivo de lixiviación en minas de oro y fuentes secundarias debido a su alta eficiencia y costo relativamente bajo, y más del 18% del total la producción de cianuro se utiliza en operaciones mineras en todo el mundo para recuperar oro. Los iones de cianuro (CN^-) son los ingredientes activos del oro en el proceso de lixiviación que disuelve el oro contenido por complejación formando una solución preñada. Las reacciones generales se ven a continuación:



De las cuales luego el efecto del pH sobre la disolución de oro. Muestra que una máxima disolución de oro en cianuro se puede obtener a un pH de 10 a 10,5. Sin embargo, una serie de accidentes ambientales en varias minas de oro en todo el mundo ha precipitado una preocupación generalizada sobre el uso del cianuro como reactivo de lixiviación. En la mayoría de estos casos, el cianuro del procesamiento las operaciones ingresaron al medio ambiente ya sea por fugas a través de perforaciones en revestimientos protectores de lixiviación en pilas, o por derrame de estanques de solución desbordados o áreas de almacenamiento de relaves que causaron una contaminación severa de ríos y aguas subterráneas, la preocupación generalizada sobre el uso de lixiviación con cianuro. Se han propuesto varios sustitutos, pero en general, los lixiviantes sin cianuro tiourea y tiosulfato se consideran los sustitutos más realistas. estas soluciones se someten a procedimientos de separación y purificación, tales como cementación, reducción,

adsorción, coagulación, extracción con disolventes, separación por gravedad, flotación iónica [21].

Sin embargo, se buscan nuevas alternativas de reactivos que sean económicamente factibles, amigables con el medio ambiente, que tenga la misma eficiencia que el cianuro de sodio.

2.3.7.5. Dezo y GoldMax.

Estos agentes son de nueva formulación patentada y se consideran la máxima innovación ya que se consideran sustitutos del cianuro. Los cual son agentes de extracción de oro, que puede reemplazar el tradicional uso del cianuro de sodio que por lo general se considera como agente lixivante de oro y plata, puede aplicarse desde la molienda. Se planea como la solución definitiva a esta problemática ofreciendo al rubro minero, un lixivante eficaz, de bajo consumo, que ofrece alta recuperación de oro muy similar a la que se obtiene con el cianuro y a un precio razonable para hacer viable cualquier operación basado en el costo beneficio. Este agente es aplicable en minerales oxidados de oro y plata, mineral de sulfuro, relaves, puede aplicarse en lixiviación en pilas, en pozas, estanque de inmersión [23]. Alternativas de agentes lixiviantes al cianuro se encuentra el tiosulfato, que presenta un comparativo muy favorable para minerales que contienen cobre y cierta cantidad de materias carbonaceas, además de ser una alternativa no contaminante en comparación con la alta toxicidad del cianuro [24]. Sin embargo, las dosificaciones que se requieren son mayores y el rendimiento es menor.

La mineralogía no es el único factor que influye en la definición del proceso. Existen otros factores importantes a considerar en el desarrollo de algún proyecto como son los geológicos, medioambientales, geográficos económicos y políticos [25]. Los factores mineralógicos y metalúrgicos tienen un impacto directo en la extracción y selección de proceso debido a que determinan la respuesta del mineral al tratamiento químico [8].

2.3.7.6. Modificadores de pH en sistemas de lixiviación.

Oraby y col. [26] Mencionan que el modificador de pH más usado en los sistemas de lixiviación es el hidróxido de calcio (CaOH) en sistemas alcalinos, sin embargo el comportamiento del mismo puede llegar a formar una capa pasiva en las partículas o interactúa en las reacciones demandando mayor consumo de los agentes lixiviantes sobre

todo cuando existen especies de cobre, actualmente existe la problemática en la industria de tratar minerales o relaves que contienen oro y altos contenido de cobre o en trazas, se sugiere que dentro de los sistemas de lixiviación donde hay cobre y oro, se lixivie el oro de manera selectiva sobre el cobre en lugar de lixiviar el oro como el cobre usando como modificador el NaOH trabajando a pH alcalinos 11 a 11.5 para la hidroxalización y precipitación del cobre en los relaves ya que puede favorecer la disolución de oro durante el proceso de lixiviación [27].

A continuación, en la Tabla 2.6 se muestra una tabla comparativa de los procesos Hidrometalúrgicos y Pirometalúrgicos.

Tabla 2.6 Hidrometalurgia vs Pirometalurgia. [9]

	Hidrometalurgia	Pirometalurgia
Generación de SO ₂	Si se genera puede producir ácido o S elemental	Control de emisiones
Manejo de materiales	Fácil y poco manejo	Manejo de emisiones y metales fundidos
Consumo energético	Proceso a T ambiente	T > 1200 °C
Emisión de polvos	Fácil manejo al estar húmedo	Polvos finos arrastrados muy fácilmente y que necesitan manejos apropiados
Minerales complejos	Relativamente sencillo tratarlos	Muy complicados al hacerlos reaccionar y bajo control de impurezas
Minerales de baja ley	Lixiviar sin necesidad de concentrar	Obtención de un concentrado y difícil tratarlos
Disposición de residuos	Líquidos neutralizar Sólidos confinar	Manejo de Escorias

Para definir el procesamiento para la recuperación de oro, es necesario evaluar las diferentes variables, desde la caracterización del mineral y su análisis de costo – beneficio, el comparativo que se da en la Tabla 2.6 se hace énfasis que la hidrometalurgia es el procesamiento ideal para tratar minerales con baja ley para su posterior concentración ya que un proceso pirometalúrgico requiere de concentraciones altas y su costo beneficio es más alto a comparación de un tratamiento hidrometalurgico además si las variables se encuentran controladas puede ser benéfico para el medio ambiente. Cuando se habla acerca del reprocesamiento de los relaves, hacen referencia al

impacto ambiental, es difícil determinar una técnica de procesamiento, dado que si presenta sulfuros y tienen una ley alta, se pueden recuperar por flotación, pero estos relaves por experiencia tienen desde la época del virreinato, cuando no se tenía la tecnología con la que actualmente se cuenta en la industria minera. Cuando están presentes en óxidos y son de baja ley se considera la lixiviación, pero si la ley es mediana este se puede recuperar por medio de la pirólisis, aunque la evaluación del costo – beneficio en el tonelaje que se obtendrá definirá dicho proceso.

2.4. Caracterización física y química de los relaves.

En la metalurgia extractiva de minerales y de relaves auríferos, es posible encontrar oro libre (diseminado), ocluido y/o asociado a diferentes minerales. Esto conlleva necesariamente a estudios de caracterización del mineral con el fin de determinar la ocurrencia del oro y su comportamiento frente a los procesos extractivos, para seleccionar los procesos ambientalmente aplicables en el beneficio extracción y recuperación del metal valioso [28]. La muestra se caracterizará por estudios a partir de:

2.4.1. Difracción de Rayos X.

La difracción es el resultado del fenómeno conocido como "dispersión". Los campos eléctricos periódicamente cambiantes de las ondas entrantes de rayos X excitan los electrones de los átomos a vibraciones periódicas; estos electrones se convierten en la fuente de rayos X secundarios con la misma longitud de onda que los rayos X entrantes (dispersión coherente). Este estudio se realiza a partir del método de polvos cristalinos utilizando un Difractómetro de rayos X. El patrón de rayos X resultante es característico de cada material y se utilizará para identificar las especies minerales contenidas en la muestra analizada, para efectuar el estudio, esta muestra debe ser pulverizada y homogenizada.

Este método es muy eficiente para la identificación de polvos minerales ya que la difracción de rayos X permite el análisis en donde es posible obtener una composición mineralógica cualitativa y la estructura cristalina de las especies más abundantes y se obtiene una lista de espaciados e intensidades de la forma más rápida y sencilla. El programa arroja un gráfico (difractograma) que en abscisas indica el ángulo de difracción y en ordenadas la intensidad correspondiente. Los máximos o picos de intensidad corresponden a reflexiones de Bragg. Obtenido el difractograma y extraídos los datos de

difracción de la muestra, la identificación consiste en hallar en la base de datos el mineral [29].

2.4.2. Microscopia electrónica de barrido (MEB).

Se utilizará un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6400. El microscopio electrónico de barrido posibilita conocer la morfología superficial de las muestras, así como la composición química y la distribución de elementos en el campo analizado. Es decir que se basa en la obtención de una imagen del barrido de la misma con un haz de electrones, como resultado de las intersecciones entre los electrones incidentes y la muestra. El microscopio electrónico de barrido se compone de varios elementos básicos: un cañón, difracción de polvo de rayos X. Para analizar una muestra en el MEB se requieren generalmente condiciones estrictas de vacío en el interior del microscopio, ya que de lo contrario los electrones pueden ser dispersados por las moléculas de aire. Además, los mejores resultados se obtienen con muestras conductoras o convertidas en conductoras mediante un recubrimiento pelicular con un material conductor (generalmente, grafito; pueden emplearse también oro o aluminio). No obstante, actualmente existen microscopios electrónicos que no precisan ni recubrimiento de la muestra ni alto vacío en la cámara. En el MEB, diferentes detectores amplifican la señal emitida por la superficie de la muestra cuando es barrida por un delgado haz de electrones. La intensidad de la señal amplificada es visualizada en una pantalla de televisión convencional. Las interacciones entre los electrones incidentes y los átomos de la muestra se clasifican en elásticas, inelásticas y emisión de radiación de frenado. Los electrones son aquellos electrones del haz incidente que son reflejados por la muestra tras sufrir múltiples colisiones elásticas e inelásticas (Figura 6) las cuales originan la emisión de electrones secundarios de electrones retro dispersados y de rayos X característicos de los elementos presentes en la muestra el análisis químico cualitativo semicualitativo.

2.4.3. Caracterización química por espectroscopia de absorción atómica de flama.

Para determinar las leyes de oro y otra especie como el cobre será a través del método espectroscópico de absorción atómica de flama con el espectrómetro modelo 3100, marca Perkin Elmer.

Este es un método que está basado en la atomización del analito en matriz líquida y que utiliza comúnmente un nebulizador o cámara de nebulización para crear una niebla de la muestra y un quemador con forma de ranura que da una llama con una longitud de trayecto más larga, en caso de que la transmisión de energía inicial al analito sea por el método "de flama". La niebla atómica es desolvatada y expuesta a una energía a una determinada longitud de onda emitida ya sea por la dicha llama o una lámpara de cátodo hueco construida con el mismo analito a determinar o una lámpara de descarga de electrones. Véase la Figura 2.3 la cual ilustra los componentes del equipo.

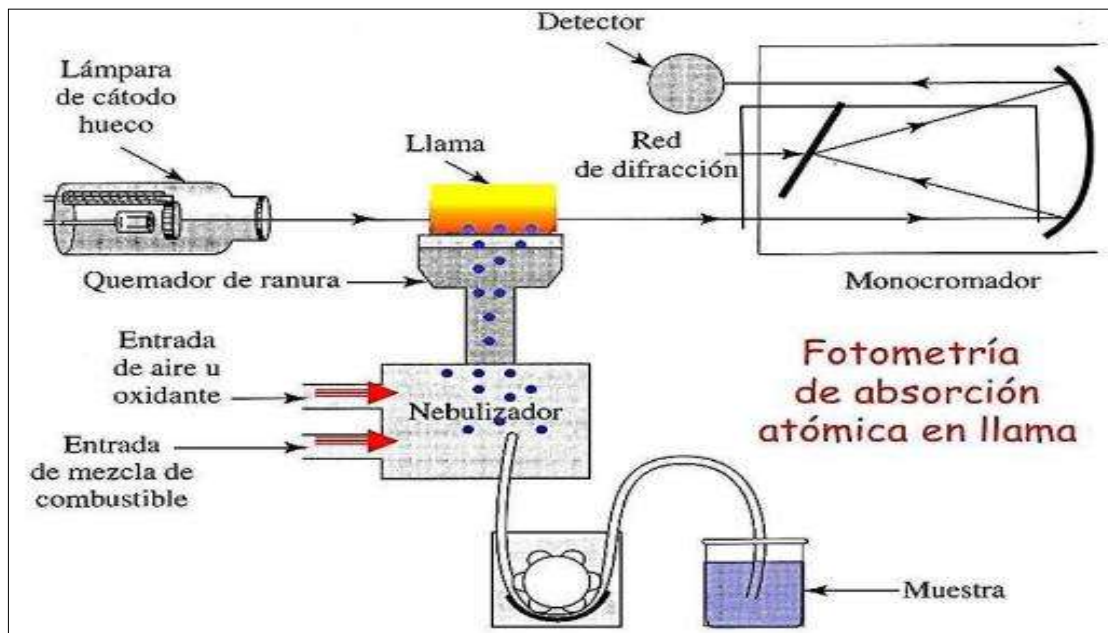


Figura 2.3 Esqueleto Instrumental de un equipo de absorción atómica de flama.

Tal como se muestra en la Figura 2.3, los instrumentos espectroscópicos de absorción atómica de flama están compuestos por cinco componentes las cuales son:

- Una fuente de energía radiante.
- Recipiente transparente en donde se coloca la muestra.
- Un dispositivo que aísla una región restringida del espectro para efectuar las mediciones.
- Un detector de radiación que convierte la energía radiante en una señal eléctrica útil
- Una unidad que procesa las señales y despliega resultados, la cual exhibe la señal que entrega el transductor medidor digital u otro dispositivo de registro [30].

Para realizar la lectura y determinar la cuantificación de cada elemento, las muestras de los relaves se disolverá la muestra de los relaves con agua regia y ácido fluorhídrico proporción 3:1 HCL y HNO₃, la adición del último es para favorecer la digestión completa de los relaves (diluir los silicatos).

2.4.4. Caracterización fisicoquímica.

Debido a que los diferentes procesos de separación requieren manejo de pulpas es necesario determinar las características fisicoquímicas del mineral tales como:

- Densidad o peso específico el cual se determinará con la técnica del picnómetro de helio ya que los relaves a tratar aún tienen especies solubles como la malaquita.

Todos los picnómetros de gas, al igual que el picnómetro de agua, se basan en el desplazamiento de volúmenes, es decir, lo que realmente realizan estos aparatos es una medición muy precisa del volumen real de un sólido. Si, además de medir el volumen con la mayor precisión posible se conoce su masa también con bastante exactitud, es posible calcular su densidad real en g/cm^3 , cuyo valor numérico equivale al peso específico relativo. La característica adicional del picnómetro de gas es que funciona con gases ideales potencialmente no reactivos con la superficie de las partículas sólidas. Por ello, esta técnica es independiente de que la morfología de la muestra sea más o menos regular o irregular o se encuentre en estado sólido o polvo, el helio cumple la ley de los gases ideales y, en caso de mantener la cantidad de gas y la temperatura constante por ello permite correlacionar de una manera inmediata la presión a la que está sometido el gas y el volumen que ocupa. Con las debidas operaciones previas de calibración, es posible calcular el volumen de cualquier sólido que comparta con el helio una cámara de volumen conocido. Por ello, el helio es un gas apropiado para calcular el verdadero volumen del esqueleto sólido de los suelos en este caso minerales o relaves [31].

- pH (nivel de acidez o alcalinidad) este permitirá conocer con que sistema se trabajará para elegir el reactivo correcto en caso de que el tratamiento sea en base húmeda, tipos de sales solubles y este puede interferir en las reacciones y mediciones de concentrados o en caso de existir separaciones físicas los valores se pueden perder en el medio acuoso [28].

2.5. Estudio de liberación.

Cualquier mineral o para este estudio los relaves contienen dos componentes principales: las partículas de mineral valioso y la ganga mineral no deseable al estar entrelazadas se conocen como medios.

En el procesamiento de minerales y relaves hay dos operaciones fundamentales:

- La liberación o desprendimiento de los minerales valiosos de los minerales de deshecho.
- La separación de esos valores de la ganga o lo que comúnmente se llama concentración.

La liberación de los minerales valiosos se realiza por medio de la pulverización o molido, lo cual implica una reducción de tamaño mediante una trituración, y si es necesario, molienda, hasta un tamaño de partículas tal que el producto sea una mezcla de partículas de mineral valioso y ganga relativamente separadas una de otra [32].

Se realizó un análisis granulométrico el cual es procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueden separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, para conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de valores de material (granulometría)[33].

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

En la metalurgia extractiva existen diferentes rutas para recuperar los metales o elementos base a partir de minerales y o relaves que pueden ser de tipo sulfuroso, oxidado y/o auríferos. En este capítulo se describen las técnicas de caracterización física y química, empleadas para “conocer” los relaves. A partir del conocimiento físico-químico de los relaves se propone la ruta de recuperación de oro, desde el punto de vista económico y sustentable; de lo último, se describen entonces, las técnicas aplicadas para la recuperación de oro a partir de jales o relaves provenientes de una labor minera de lixiviación de malaquita y azurita.

La metodología experimental consta de dos etapas, los diagramas de las Figuras 3.1 y 3.9 muestran los procedimientos utilizados.

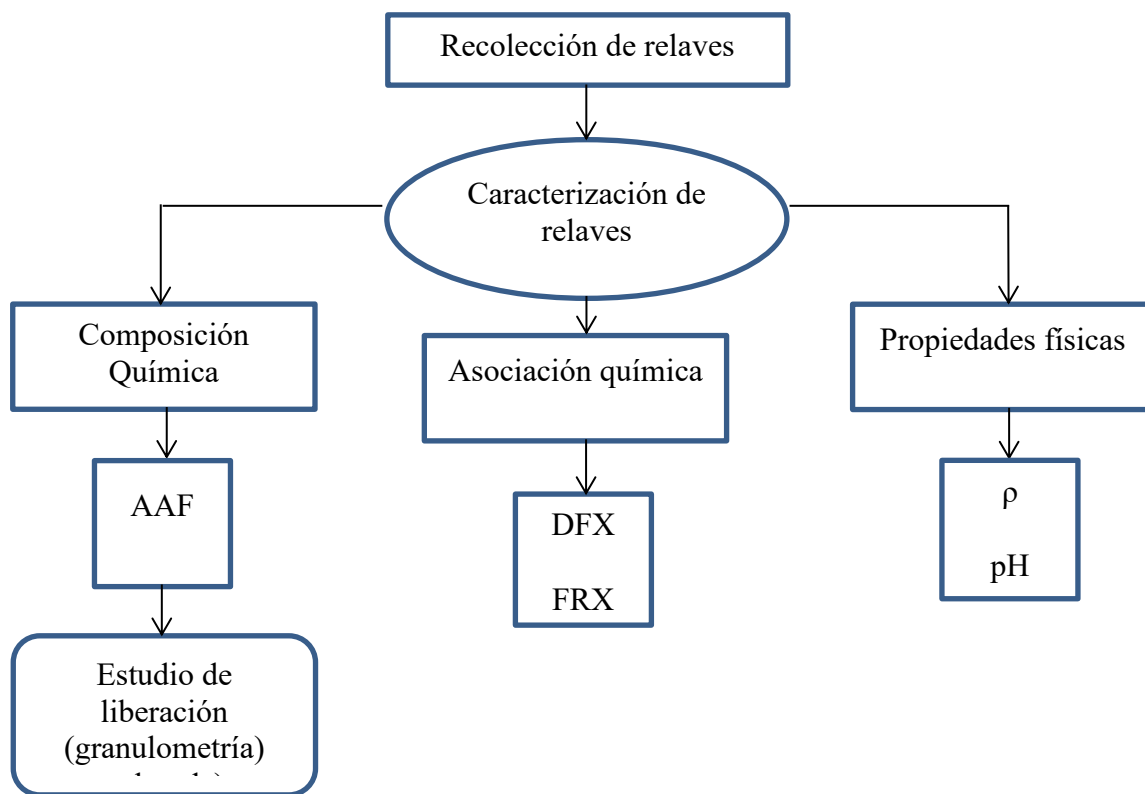


Figura 3.1 Desarrollo experimental de la Etapa 1, utilizado para la caracterización de los relaves.

Primera Etapa de Desarrollo Experimental

3.1 Recolección de relaves.

Se acudió al yacimiento y la planta de procesamiento de extracción de cobre con el objetivo de conocer la matriz mineralógica de origen, de donde provienen los relaves motivo de este estudio, El yacimiento es rico en cobre y está presente en forma de malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$). Se encuentran en la región de Tiquicheo, Michoacán. Para recolectar la muestra representativa fue necesario conocer la construcción de la presa de relaves con el fin de seleccionar la técnica correcta para realizar el muestreo, los relaves son desechos del proceso de obtención de cobre metálico por la ruta de lixiviación – cementación, los relaves y el yacimiento se ubican a $19^\circ 3' 41.03 \text{ N } 100^\circ 44' 28 \text{ W}$, en las Figuras 3.2 y 3.3 se muestran los detalles del yacimiento y la ubicación geográfica de acuerdo a la información que arroja el GPS.



Figura 3.2 Detalle del yacimiento mineralógico en la región de Tiquicheo Michoacán.

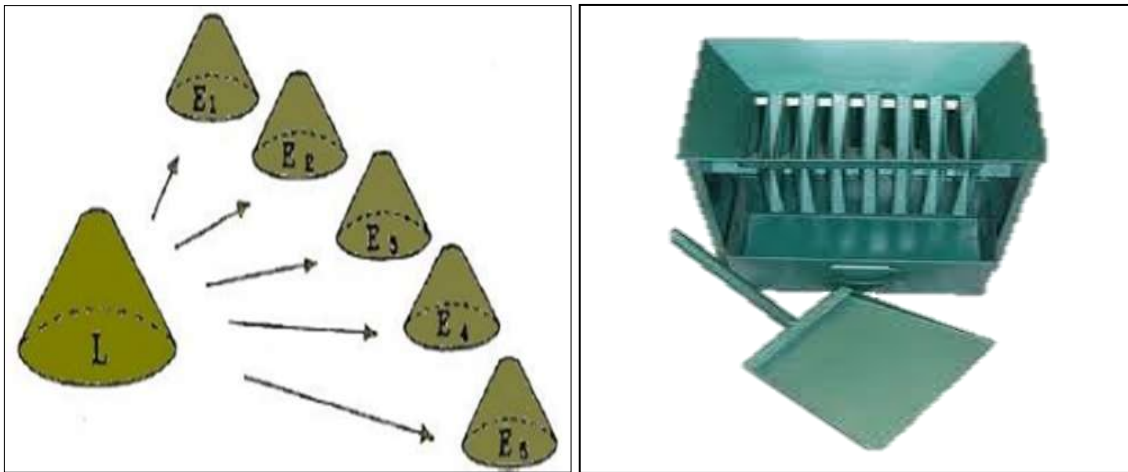


Figura 3.4 a) Representación esquemática del paleo fraccionado y alternado, b) Cuarteador Humboldt.

La muestra se homogenizó con el cuarteador Humboldt véase la Figura 3.4 b, hasta obtener una muestra de 6 kg para realizar la experimentación y otros estudios los cuales se describirán en este capítulo.

3.2 Caracterización de relaves

Los relaves se caracterizaron física y químicamente mediante el análisis cuantitativo como la absorción atómica de flama, cualitativo tal como la difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y microscopía electrónica de barrido para su identificación de especies mineralógicas que los componen y así lograr la cuantificación de oro contenido en dichas muestras.

3.2.1 Análisis químico cuantitativo.

Este estudio se realizó a partir de la disolución de la muestra de los relaves con agua regia y la adición de ácido fluorhídrico, la cual fue asistida por el horno de microondas Perkin Elmer modelo Titan MPS, véase la Figura 3.5.



Figura 3.5 Horno de microondas Perkin Elmer modelo Titan MPS.

Para la digestión de muestras se pesaron 0.25 gr de relaves pulverizados con $dp_{80} = -200$ mallas (menores a $75 \mu\text{m}$), previamente homogenizada, las cuales fueron colocadas en viales de teflón diseñados especialmente para el uso del horno de microondas (Figura 3.6). Se adicionaron 6 ml de HCL + 2 ml HNO₃ + 2 ml de HF, este último con la finalidad de favorecer la digestión completa de los silicatos. Cada análisis fue realizado con tres replicas.



Figura 3.6 Viales de material de teflón para horno de microondas Perkin Elmer.

Estos viales se colocaron dentro del horno de microondas en el cual se estableció un programa con control de temperatura y presión, en la Tabla 3.1 se muestran los parámetros con el que se llevó a cabo la digestión acida.

Tabla 3.1 Parámetros establecidos en el horno de microondas para la digestión de los relaves. El método o rutina en el equipo está etiquetado como Mineral Sonora.

Método: Mineral Sonora					
	T(°C)	P (bar) Recipiente	Rampa de calentamiento	Sostén (tiempo de permanencia)	P(%)
1	150	20	10	10	25
2	180	30	10	10	50
3	150	25	5	10	30
4	50	0	5	0	0
5	50	0	0	0	0

Al término del proceso de digestión las soluciones fueron retiradas de los recipientes de teflón y se vaciaron en viales de 50 ml, las cuales se aforaron a 25 ml con agua destilada para su posterior lectura en el equipo de absorción atómica Perkin Elmer modelo 3100 (Figura 3.7).

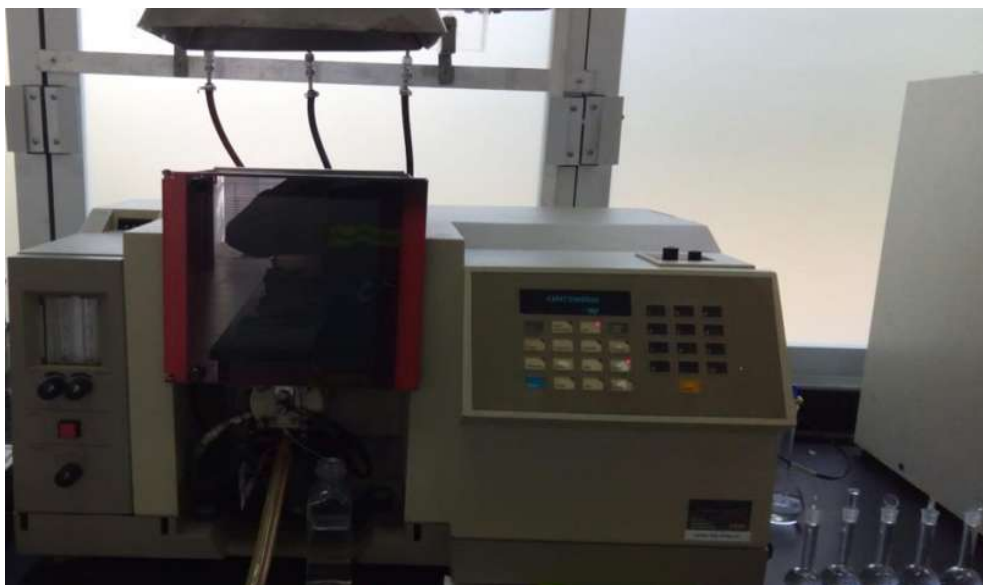


Figura 3.7 Espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer modelo 3100.

Para realizar las lecturas de absorbancia de oro y cobre se prepararon patrones en solución acuosa de concentración conocida para elaborar una curva de calibración para cada elemento, los estándares que se utilizaron contienen 1000 partes por millón (ppm) de Au en HCL al 10% y 1000 ppm de Cu en HNO₃ al 2% de concentración. Se elaboraron los patrones tomando alícuotas con concentraciones de 1, 2, 3, 4 y 5 ppm las cuales se depositaron en matraces volumétricos de capacidad de 50 ml los cuales se aforaron con los ácidos a las concentraciones antes mencionadas para cada elemento.

Los parámetros establecidos para realizar las lecturas de absorbancia de oro y cobre en el equipo de absorción atómica se incluyen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Parámetros establecidos por el fabricante Perkin Elmer para la determinación de cobre y oro a partir de la absorbancia.

Au	Cu
$\lambda= 242.8 \text{ nm}$	$\lambda= 324.8 \text{ nm}$
Slit= 0.7 nm	Slit= 0.7 nm
Energía= 35 mA	Energía= 47 mA

La curva de calibración se obtuvo a partir del gráfico de la absorbancia obtenida y las concentraciones conocidas de los patrones, se obtiene la pendiente (m) de la recta, así como los valores de la variable independiente b y la variable desconocida o pendiente X, la cual es sustituida por los valores de absorbancia obtenida en los relaves y las soluciones preñadas, X proporciona la información de la concentración de los elementos en ppm (mg/L).

3.2.2 Análisis químico cualitativo.

El análisis se realizó en una muestra representativa de 10 gr previamente secada y pulverizada a -200 mallas (menores a 75 μm), con el objetivo de conocer la asociación química presente en los relaves, llevándose a cabo en el Difractómetro de Rayos X (DRX), marca Bruker Da Vinci advance, Modelo D8 con los siguientes parámetros:

Voltaje: 40 Kv; Rango: 5.0 a 85 grados; Tiempo: 0.3 segundos; Incremento de paso: 0.02 grados.

3.3 Propiedades físicas de los relaves

3.3.1 Determinación de la densidad.

Se toman 10 gr de muestra representativa de los relaves (5 réplicas) previamente secada para la determinación de la densidad con el picnómetro de helio Micromeritics Accupyc1330, de acuerdo a la norma ASTM D854.

3.3.2 Análisis de variación de pH en los relaves.

Este análisis se realizó en los relaves con la finalidad de conocer el nivel de acidez o alcalinidad que tienen los jales desde su procedencia, ya que este fue tratado para la extracción de cobre por medio ácido. Los parámetros con el que se realizaron las lecturas fueron en pulpas con 30% de sólidos, con tiempos de agitación de 0.5 hr hasta 48 horas a temperatura ambiente, se utilizó el potenciómetro Hanna modelo HI 98121waterproof pH/ORP y T meter.

3.3.3 Análisis granulométrico valorado.

La recolección de la muestra en campo, no se obtuvo con tamaños de partícula homogénea, la distribución de ella variaba entre gruesos y finos tal como se observa a continuación en la Figura 3.8. Como se puede observar de esa figura, la distribución de tamaño de las partículas de los relaves es heterogénea ya que se tienen particulados gruesos de aproximadamente 3.8 a 5.0 cm y hacia polvos finos.



Figura 3.8 Relaves con tamaños de partícula heterogénea.

Por lo anterior, se realizó un análisis granulométrico valorado en los relaves sin realizar modificaciones a su origen para conocer en que número de malla se encuentra la mayor distribución de oro presente para establecer el dp_{80} con el cual se trabajó durante la experimentación para la recuperación del mismo. A continuación, en la Tabla 3.3 se muestran las series de tamices que se utilizaron para realizar el análisis granulométrico, el estudio se realizó con un tiempo de residencia de 30 minutos y la cantidad de muestra que se pasó por los tamices fue de 1000 gr. Esta serie fue tomada con respecto a la escala de Tyler.

Tabla 3.3 Número de tamices y aperturas de la serie Tyler.

Número de malla	Abertura
1.5 ”	38.1 mm
7/8 ”	8.00 mm
8	2.36 mm
10	2.00 mm
40	850 μm
60	250 μm
100	150 μm
200	75 μm

Segunda Etapa de Desarrollo Experimental.

En la Figura 3.9 se muestra la segunda etapa de la metodología experimental que comprende el establecimiento de la ruta para la recuperación de oro a partir de la lixiviación y de la separación gravimétrica, la selección de reactivos y establecimientos de parámetros, así como la caracterización de los valores obtenidos de oro en concentrados, relaves y soluciones preñadas a partir de análisis cualitativos y cuantitativos.

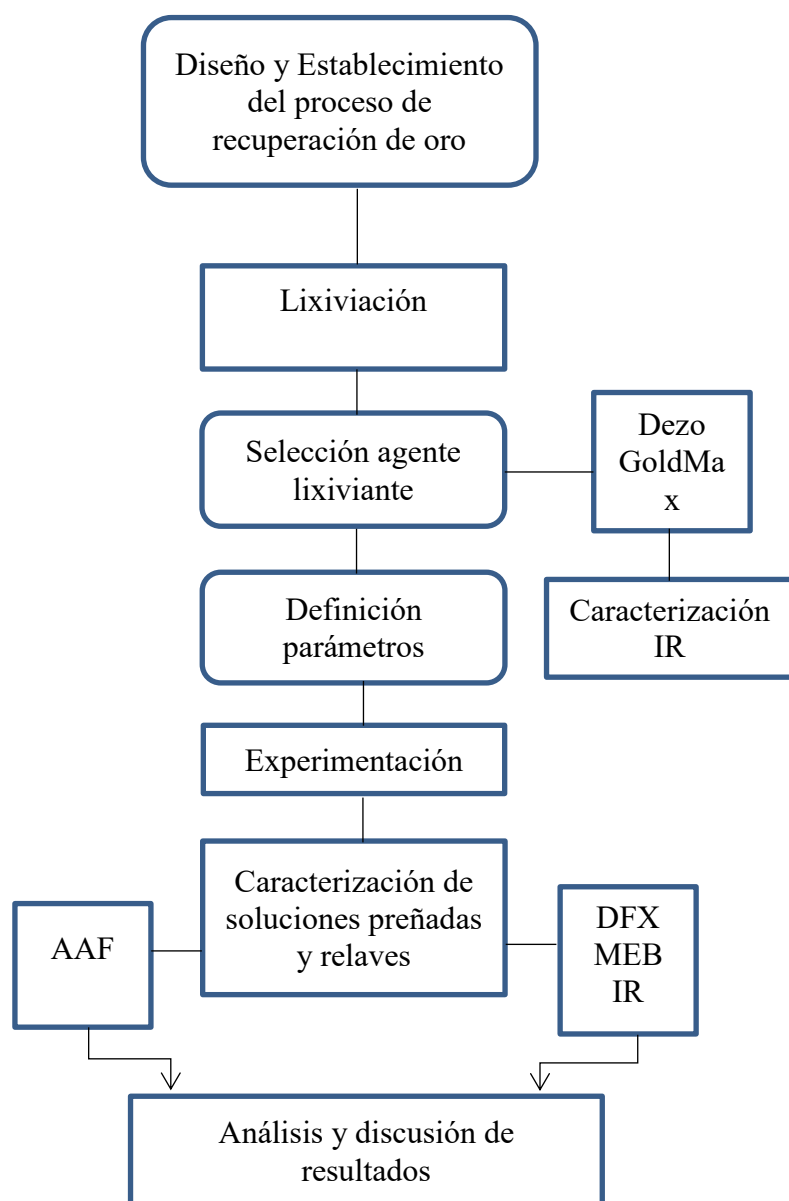


Figura 3.9 Desarrollo experimental en la etapa 2. Recuperación de Oro.

3.3.4 Análisis químico cuantitativo.

El procedimiento de preparación de las muestras para su análisis es similar al descrito en la sección 3.2, con la diferencia que la cuantificación de oro se realizó para los diferentes tamaños retenidos en cada malla durante el proceso de tamizado; al establecerse el dp_{80} de la muestra se reduce con la ayuda de un pulverizador de discos marca Bico, véase la Figura 3.10.



Figura 3.10 Pulverizador de discos marca Bico.

3.4 Diseño de los procedimientos de recuperación de oro.

Una vez determinada la ley de oro en los relaves motivo de esta investigación, tanto en la muestra original como por rango de tamaño dp_{80} , además de identificar las demás especies minerales que contiene la muestra mineral, se puede establecer la ruta de recuperación de oro más factible económica y sustentable.

3.4.1 Recuperación de oro por lixiviación.

3.4.1.1 Selección de lixiviantes.

Para establecer la ruta de lixiviación se realizó un estudio acerca de los lixiviantes en el mercado y estudiados científicamente. Al mercado de la industria minera ingresaron al país dos agentes lixiviantes provenientes de Perú y China, ambos con características similares; sin embargo, su apariencia física es muy diferente; en el caso del agente peruano conocido como GoldMax se presenta con una granulometría gruesa ($dp_{80} = 2.00$

mm) y el lixivante chino conocido como Dezo, tiene un $dp_{80} = 150 \mu\text{m}$, el aroma es característico y ambos tienen densidad de 1.3 Kg/dm^3 , ambos agentes se encuentran patentados y no se cuenta con información técnica-científica acerca de su funcionamiento, sin embargo se trabajó con las fichas técnicas que aporta cada fabricante; a falta de información éstos serán caracterizados por el método de espectroscopia infrarroja.

3.4.1.2 Caracterización de los agentes lixiviantes GoldMax y Dezo.

La caracterización se llevó a cabo en el equipo de espectroscopia FTIR modelo Tensor 27 por el método de ensayo de identificación de las principales bandas, mediante el procedimiento de obtención espectros e indicación del número de onda en cm^{-1} de las principales bandas.

La muestra de los agentes lixiviantes es previamente secada ya que al estar en contacto con el medio ambiente tiene un comportamiento higroscópico la cual puede causar una interferencia durante la medición. Se pesaron 0.03 mg de muestra la cual se mezcló con 0.25 mg de KBr grado espectroscópico; la mezcla se colocó en una prensa hidráulica digital CrushIR para formar pastillas que son colocadas dentro del espectrómetro FTIR para proceder con el análisis.

3.4.2 Descripción de la experimentación de lixiviación.

Los materiales que se utilizaron durante la experimentación son:

- Parrilla agitadora Thermo scientific modelo SP 13132033 Q
- Agitador magnético a 580 rpm
- Potenciómetro Hanna modelo HI 98121 waterproof pH/ORP
- Vaso de precipitado
- Pipeta volumétrica de 10 ml
- Viales de 50 ml

Reactivos:

- Agua bidestilada
- NaOH al 10% marca JT Baker

- Agentes lixiviantes a concentraciones de 0.5 a 15%

Se realizaron experimentos a diferentes concentraciones de agente lixiviante, con el objetivo de conocer la eficiencia y las mejores condiciones operativas para la recuperación o extracción del oro contenido en los jales.

Los agentes lixiviantes se prepararon en base a porcentajes en peso (% w/w); por ejemplo, para una concentración de 10% se pesaron 50 gr de lixiviante y se adicionó en 450 gr de agua destilada, posteriormente en otro vaso de precipitado, previamente colocado en una parrilla con agitación, se adicionó la mitad del volumen de la mezcla anterior, lentamente se adicionaron 150 gr de relaves para después aforar hasta 500 ml con el resto del lixiviante, tomando lecturas de pH del medio acuoso nuevo, pH inicial de lixiviante y la muestra de los relaves (pulpa); las pruebas fueron realizadas con distintos tiempos de residencias, se extrajeron alícuotas de 10 ml de pulpa con la ayuda de la pipeta volumétrica de la misma capacidad las cuales fueron depositadas en los viales de 50 ml.

Los tiempos de lixiviación o de residencia fueron los siguientes: 5, 10, 15, 30, 60 y 120 minutos, durante las extracciones se realizaron lecturas de pH cuidando el rango de trabajo de acuerdo a los parámetros establecidos, si la lectura de pH disminuía este se fue ajustando con la dosificación de NaOH al 10%, registrando el volumen en mililitros que fue adicionado, durante toda la experimentación se monitoreó la variación del ORP.

Los parámetros con los que se realizaron las pruebas de lixiviación, se muestran en las Tablas 3.4 y 3.5.

Tabla 3.4 Parámetros establecidos para la lixiviación de los relaves con el agente lixivante GoldMax.

Agente lixivante GoldMax	
Sistema de lixiviación	Abierto a agitación constante
Sistema de agitación	580 rpm
Concentración GoldMax %(w/w)	5, 10 y 15% (w/w)
% Sólidos	30
T	25 °C
pH	10.5 - 11
Modificador pH	[NaOH] 10%
t residencia (minutos)	0 – 120

Tabla 3.5 Parámetros establecidos para la lixiviación de los relaves con el agente lixivante NRW Dezo.

Agente lixivante NRW Dezo	
Sistema de lixiviación	Abierto a agitación constante
Sistema de agitación	580 rpm
Concentración NRW Dezo %(w/w)	5, 10 y 15% (w/w)
% Sólidos	30
T	25 °C
pH	11 – 11.5
Modificador pH	[NaOH] 10%
t residencia (minutos)	0 – 120

3.4.3 Caracterización de soluciones preñadas y de relaves.

3.4.3.1. Análisis químico cuantitativo

Se cuantificó el oro y el cobre en las soluciones preñadas y en los relaves obtenidos después de la lixiviación por espectroscopia de absorción atómica de flama, descrita en este mismo capítulo bajo las mismas condiciones.

3.4.3.2 Análisis químico cualitativo.

Los relaves se caracterizaron por difracción de rayos X y SEM aplicando los métodos descritos en este capítulo.

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En los yacimientos minerales el oro se encuentra de forma libre diseminada en tamaños micrométricos de partícula, en betas de espesores de centímetros, o formando compuestos complejos. En cualquiera de los casos anteriores se puede acompañar de especies oxidadas o parcialmente oxidadas, sulfuros o con minerales carbonatados; las industrias del procesamiento de minerales para recuperarlos diseñan procedimientos rápidos, eficientes y factibles económicamente. En el caso de procesamiento de relaves o desechos con contenidos importantes de oro se aplica la lixiviación; sin embargo, para dicha extracción se selecciona el reactivo lixivante que asegure cierta eficiencia en la disolución del oro, que sea lo más amigable posible con el medio ambiente y que su manipulación sea lo menos peligrosa posible.

En este capítulo se muestran y discuten los resultados de la lixiviación de un mineral aurífero que contiene oro diseminado, utilizando los reactivos lixivantes NRW Dezo y GoldMax. Se analizan también los resultados experimentales del análisis químico y morfológico de los relaves residuales.

4.1 Resultados de los análisis cuantitativos y cualitativos de los relaves.

Los relaves recolectados en campo fueron preparados para su posterior análisis desde la homogenización hasta el pulverizado, a continuación, se muestran los resultados obtenidos.

4.1.1 Análisis químico cuantitativo por absorción atómica de flama.

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados de la cuantificación de oro y cobre en los relaves recolectados en campo, incluyendo el análisis del mineral de cabeza antes de ser procesado para la extracción de cobre, en donde se observa que la muestra de los relaves presenta alta concentración de oro y que ésta no sufrió modificación alguna durante la extracción del cobre.

Tabla 4.1 Cuantificación de oro y cobre en mg/L y porcentaje en el mineral de cabeza y relaves por la ruta disolución ácida-espectrometría de absorción atómica

Nombre de la muestra	Au, mg/L	Au, gpt	Cu, mg/L	Cu, %
Mineral de Cabeza	0.68	68.59	39.38	3.93
Relaves Tiquicheo (Lab.)	0.65	64.55	17.58	1.730

Por su parte la Tabla 4.2 muestra el resultado del análisis granulométrico de los relaves, este fue realizado con el objetivo de establecer el tamaño de partícula que contiene el mayor contenido de partículas de oro y de esta manera establecer este tamaño para el resto del trabajo experimental.

Tabla 4.2 Contenido de oro en seis tamaños de partícula.

Número de malla	Diámetro (apertura)	mg/L	Gpt
Malla 1.5"	37.5 mm	0.55	55.06
Malla 7/8	22.4 mm	0.59	58.76
Malla 8	2.36 mm	0.66	65.81
Malla 10	2.0 mm	0.55	55.35
Malla 40	425 μ m	0.62	62.08
Malla 60	250 μ m	0.69	69.19
Malla 100	150 μ m	0.73	72.43
Malla - 200	< 75 μ m	0.69	69.03

De la tabla anterior se observa que en la malla 100 (150 μm) se obtuvo la mayor concentración de oro retenido, con 73 mg/L (72.43 gpt). Este tamaño de partícula se estableció para realizar el estudio de extracción.

4.1.2 Análisis Químico Cualitativo.

4.1.2.1 Difracción de rayos X.

En este análisis se identificaron las siguientes especies mineralógicas presentes en los relaves: Azurita ($\text{Cu}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$), hematita (Fe_2O_3), bornita (Cu_5FeS_4), grupos feldespatos, teluritas Si_6 (TeO_3), y albita ($\text{Na Al Si}_3\text{O}_8$), en la Figura 4.1 se puede observar el difractograma obtenido durante el análisis al mineral del relave.

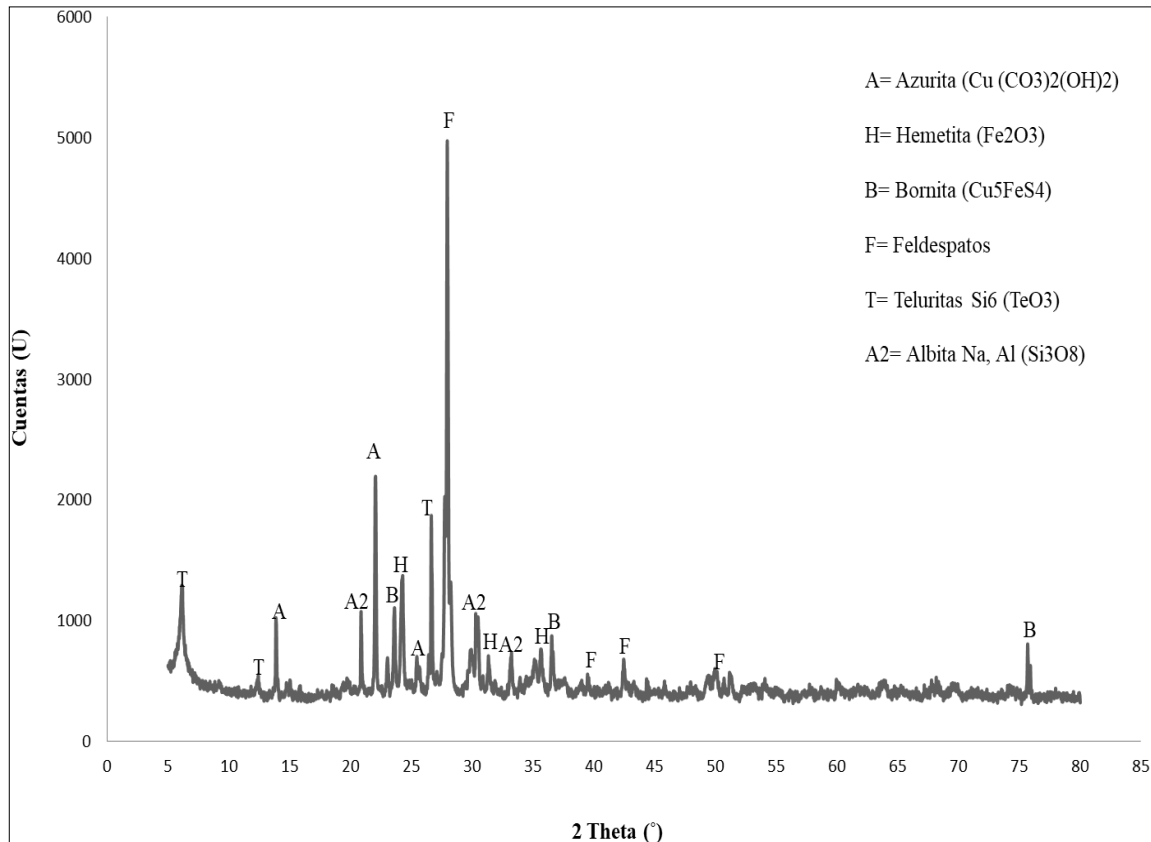


Figura 4.1 Difractograma del análisis por DRX a los relaves de mineral de cobre.

De acuerdo a la caracterización química cuantitativa y cualitativa se confirma que los relaves aún contienen cobre el cual se encuentra en especies oxidadas con ciertos contenidos de sulfuros; con respecto a los resultados obtenidos se confirma que de

acuerdo a Oviedo J y col. la región cuenta con yacimientos epitermales que contiene cuarcitas y feldespatos [10].

4.1.2.2 Microscopia electrónica de barrido.

Los resultados obtenidos en el análisis por EDS se muestran en la Tabla 4.3; se identificaron especies elementales presentes en los relaves como trazas de cobre, de silicio, aluminio, calcio, magnesio, azufre, entre otros; en la misma tabla se incluyen las proporciones de cada elemento los cuales se obtuvieron en el análisis puntual a magnificaciones de 1000x y 5000x. Estos resultados confirman la información que proporciona el análisis de difracción de rayos X.

Tabla 4.3 Elementos contenidos en los relaves, información obtenida en EDS.

Elemento	% w/w
Carbón	2.86
Oxígeno	48.26
Sodio	2.07
Magnesio	3.57
Silicio	22.05
Azufre	0.98
Potasio	1.29
Titanio	0.64
Hierro	7.93
Cobre	1.82
Aluminio	7.45
Calcio	1.08

La procedencia de estos relaves son desechos de un proceso de extracción de cobre por lixiviación de malaquita y azurita con ácido sulfúrico; de acuerdo con Tanda B.C. y col. [34] el ácido sulfúrico es utilizado comúnmente para disolver el cobre de los minerales de óxido/zona de transición, sin embargo este interactúa con varios silicatos y minerales de óxido para solubilizar una variedad de cationes metálicos como K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} , se ha observado que el ácido sulfúrico no es factible para la lixiviación de minerales que contienen carbonato de calcio y magnesio ya que estos son muy solubles en ácidos [34]. Esto explica porque en este análisis puntual se encuentran trazas de cobre debido a que su disolución no fue eficiente por la interferencia de los elementos antes mencionados e incluidos en la Tabla 4.3, los cuales por su naturaleza se encuentran en mayor proporción.

La Figura 4.2a muestra las micrografías obtenidas por Tanda B.C. y Col.[34] y en la Figura 4.2b la micrografía de los relaves la cual fue realizada a magnificaciones de 5000X.

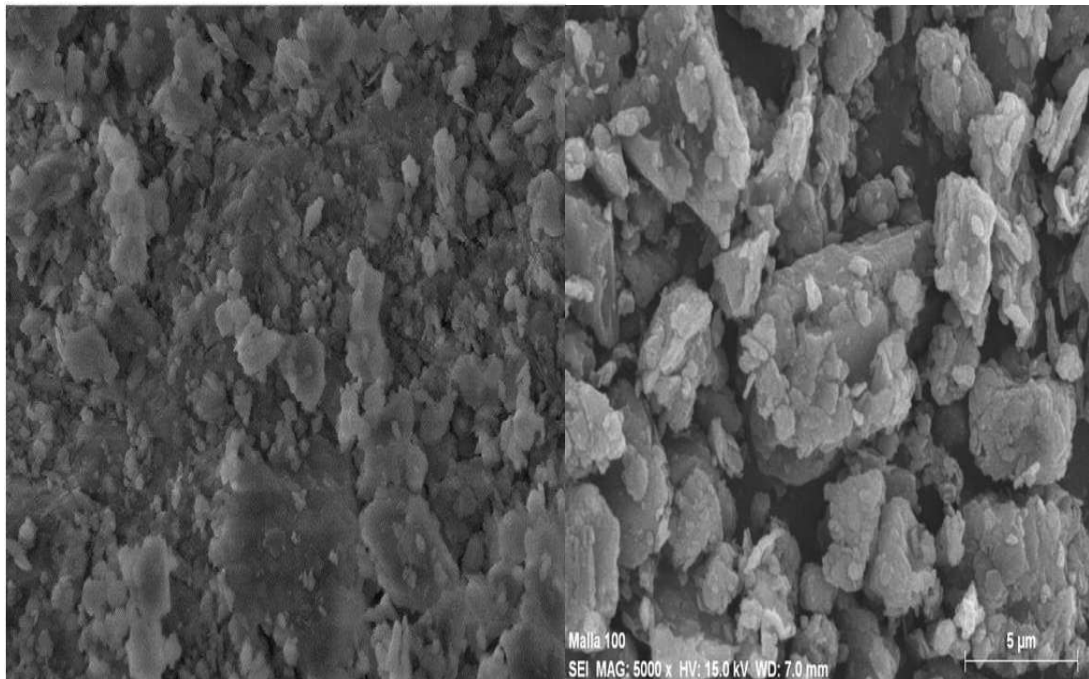


Figura 4.2 a) Micrografía de relaves lixiviados (extracción de cobre. Tanda B.C y Col. [10], b) Micrografías de los relaves Tiquicheo a magnificación de 5000x en MEB.

En ambas micrografías se observan morfologías similares en los relaves después de haber recibido un tratamiento de extracción de cobre, esto se debe a que los relaves de

Tiquicheo aún contienen trazas de cobre en forma de azurita, malaquita y crisocola, este último se caracteriza por tener sílice, aluminio y calcio, principalmente, y es por eso que se confirman las especies en forma de feldespatos en los difractogramas de rayos X; la morfología tiende a ser laminar, escamosa de espiga, características de los carbonatos de cobre como la crisocola. Por otra parte, en las Figuras 4.3a y 4.3b se muestra las micrografías de los relaves obtenidas en el microscopio electrónico de barrido a magnificaciones de 1000X y 10000X que confirman la morfología de las especies antes mencionadas.

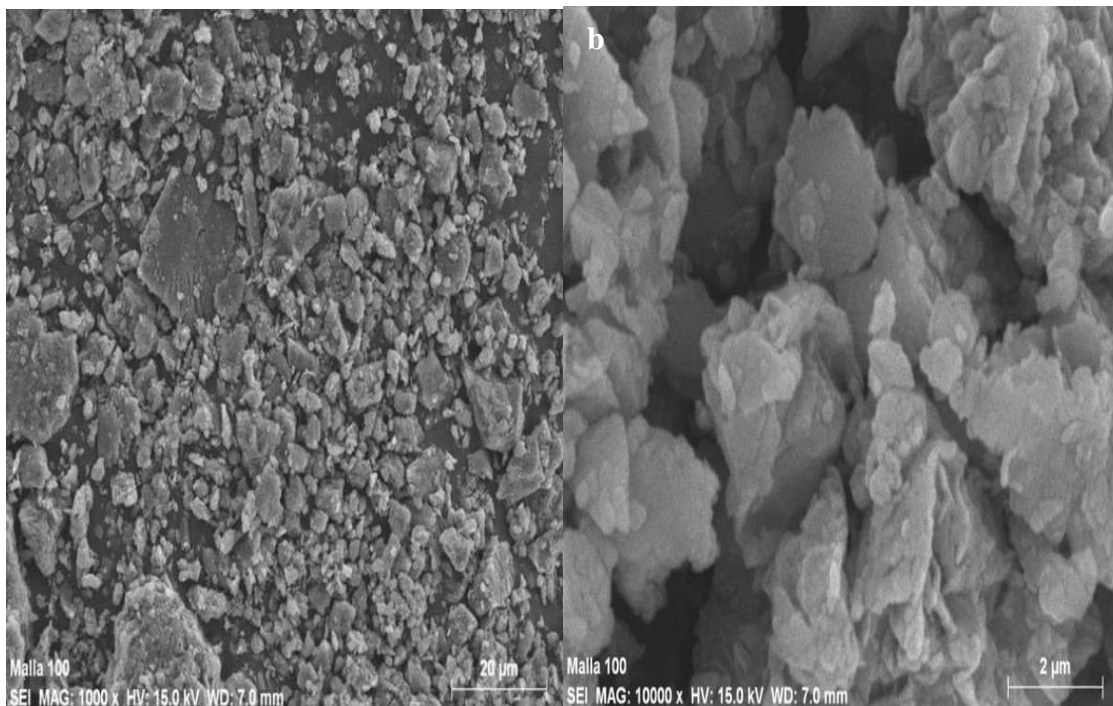


Figura 4.3 Micrografías de los relaves Tiquicheo a) magnificaciones de 1000X, b) 10000X en MEB.

Las especies de oro presentes no son detectadas en este análisis ni en difracción de rayos X, por ser análisis puntuales en el caso del MEB y por la sensibilidad del equipo de difracción de rayos X.

4.2 Propiedades Físicas.

4.2.1 Densidad de los relaves.

El picnómetro de helio micomeritics accupyc 1330 arrojó un valor de densidad de 2.70 g/cm³ en las cinco muestras representativas, la prueba se realizó con 11.63 g a una temperatura de 25.3 °C.

4.2.2 pH de los relaves.

En la Tabla 4.4 se muestra la información del comportamiento del pH del medio con respecto al tiempo de permanencia de los relaves en agua corriente. Se puede apreciar que conforme el tiempo avanza el pH se incrementa, esto se atribuye a que los relaves al estar en contacto con el agua y en agitación constante siguen reaccionando, liberando especies debido a que muchos minerales de cobre son inherentemente alcalinos (óxidos, carbonatos, haluros de hidroxilo y sulfatos básicos), al igual que la roca huésped circundante de minerales de ganga [34].

Tabla 4.4 Comportamiento del pH con respecto al tiempo para el sistema relave-agua.

t (min.)	pH
0	3.82
5	3.81
30	3.92
60	4.00
120	4.10
240	4.11
1440	5.13

4.3 Selección de Agentes Lixiviantes.

De acuerdo a los objetivos específicos establecidos en esta investigación se seleccionaron y estudiaron los agentes lixiviantes GoldMax y NRW Dezo que de acuerdo a su información técnico científico es reservado, por lo que se consideró la caracterización por FTIR con la finalidad de identificar los grupos funcionales en ambos agentes lixiviantes, para tratar de explicar su funcionamiento y estudiar el comportamiento químico y termodinámico de ambos durante el tratamiento de los relaves.

4.3.1 Caracterización de los agentes lixiviantes GoldMax y NRW Dezo por FTIR.

En las Figuras 4.3 y 4.4 se observan espectros similares de los agentes lixiviantes, debido a que el reactivo Dezo es una réplica del GoldMax. De acuerdo a los resultados del análisis por FTIR y Sócrates [35], se identificaron los grupos funcionales: Cianuro (CN^-), Cianato (CNO^-), Tiocianato (SCN^-), a una región de longitud de onda de 2250 cm^{-1} , tal como se muestra en ambos espectros; sin embargo, se vuelven a repetir los grupos funcionales (SCN^-) y (CNO^-) en las regiones de IR con longitud de onda 2085.63 cm^{-1} y 1306.11 cm^{-1} , 1216 cm^{-1} , 624 cm^{-1} , respectivamente. También se identificaron grupos funcionales como $(\text{HPO}_4^{2-})_4$ en la región de 460 cm^{-1} , así como HSO_4^- ; en la región 3435 cm^{-1} se localiza el grupo OH^- debido a que la muestra tiene comportamiento higroscópico, aunque la muestra fue previamente secada para su análisis para que este no interfiriera, en la región de 1600 a 1667 cm^{-1} se identificó el grupo funcional $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ detectándose nuevamente en la región de $1200 - 1100\text{ cm}^{-1}$ y en 1453 cm^{-1} NH_4^+ y en las regiones de 785 a 701 cm^{-1} P_2O_7^- . Estos agentes lixiviantes son patentados pero de acuerdo a lo que se observa en los espectros de infrarrojo y su ficha técnica se puede considerar una combinación de sustancias.

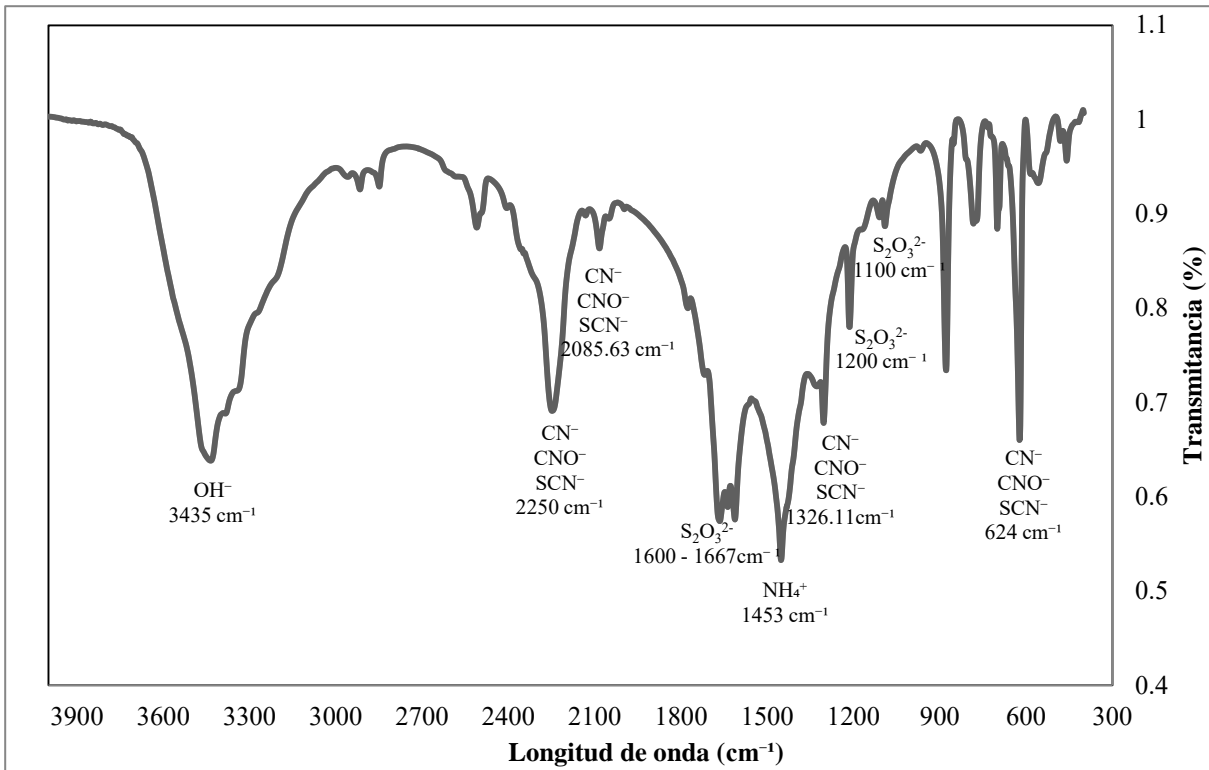


Figura 4.4 Espectro de infrarrojo del agente lixivante NRW Dezo.

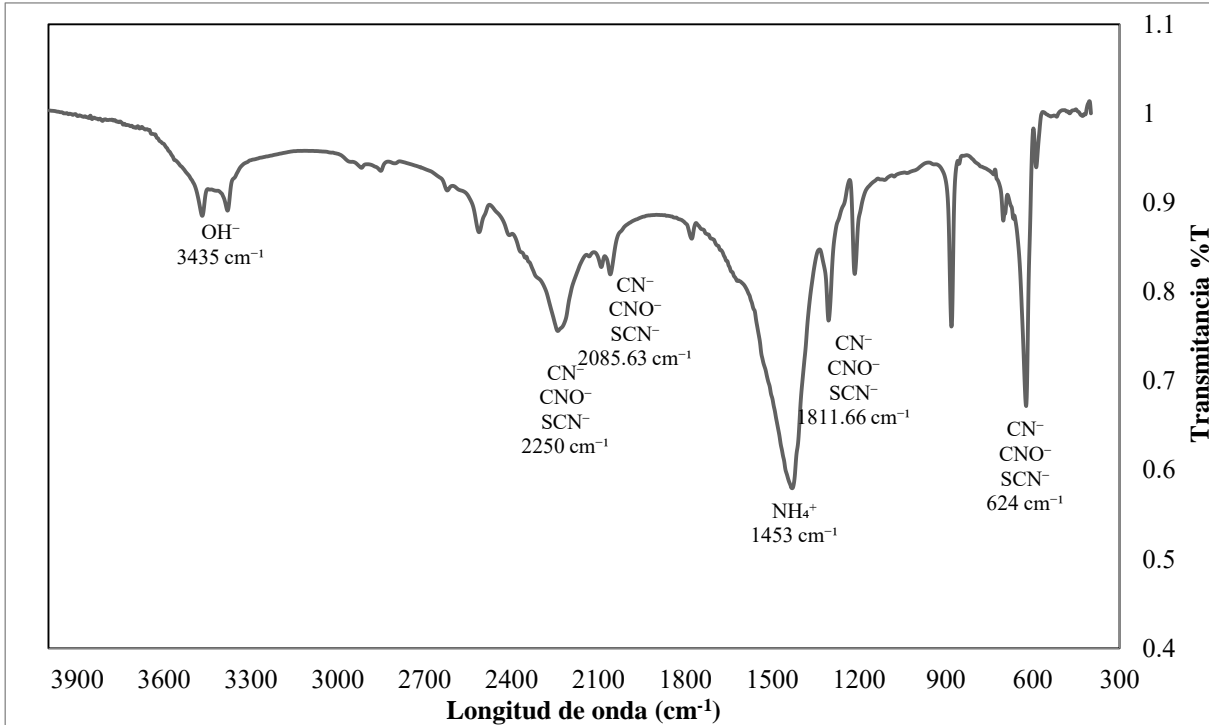


Figura 4.5 Espectro de infrarrojo del agente lixivante GoldMax.

De acuerdo al espectro de infrarrojo se puede observar que el agente lixivante GoldMax en el comportamiento de las bandas son parecidas a excepción de la región de 1660 a 1260 cm^{-1} y 1200 a 1100 cm^{-1} en donde se detecta el grupo funcional del tiosulfato en el agente lixivante NRW Dezo y el grupo hidroxilo es más predominante, sin embargo este estudio ofrece una aproximación acerca de la composición molecular que tiene cada uno de ellos, sin embargo no se afirma que los grupos funcionales pertenecientes a las especies con cianuro tales como CN^- , CNO^- y SCN^- estén presentes ya que la proporción elemental reportada por ambos fabricantes confirman el carbón, nitrógeno y azufre así como el fósforo entre otros; de acuerdo al trabajo reportado por Arapa P. M. G. [36] afirma que los residuos de GoldMax pueden ser utilizados como fertilizantes por contener fosfatos y otros componentes que son benéficos para el suelo; sin embargo no existe referencia alguna acerca del agente NRW Dezo solo la afirmación del fabricante que es amigable con el medio ambiente pero no especifica para que casos es mayormente favorable.

4.4 Comparación de rendimientos de recuperación de los agentes lixiviantes GoldMax y NRW Dezo.

Se realizaron comparativos de rendimiento para la recuperación de oro de ambos agentes lixiviantes con la finalidad de seleccionar el más adecuado para el tratamiento de los relaves, se trabajó con concentraciones de 0.5, 1, 2 y 5% (w/w); a continuación, en la Tabla 4.5 se muestran los resultados obtenidos de la recuperación de oro.

Tabla 4.5 Recuperaciones de oro de los relaves de cobre, al lixiviar utilizando GoldMax y NRW Dezo.

Concentración del lixivante % (w/w)	(GoldMax) Au, mg/L	(GoldMax) Au, gpt	(Dezo) Au, mg/L	(Dezo) Au, gpt
0.5	ND	ND	ND	ND
1	ND	ND	ND	ND
2	0.213	21.82	0.220	22.01
5	0.219	21.98	0.312	31.21

Tal como se muestra en la tabla anterior, a bajas concentraciones de lixiviante el rendimiento es nulo ya que no se detectan valores de oro, sin embargo a partir del 2% de adición las concentraciones de oro en la solución aumentan, observando un comportamiento similar en ambos reactivos (0.213 y 0.220 mg/L, respectivamente), aunque a concentraciones de 5% (w/w) la diferencia en rendimiento se hace más evidente, siendo 0.219 mg/L para el agente lixiviante NRW Dezo y 0.312 mg/L para el GoldMax; ambos estudios se realizaron a los mismos tiempos, mismo modificador de pH, así como el pH establecido por el fabricante y proveedor. En la Figura 4.5 se muestra el gráfico comparativo de los rendimientos de ambos agentes lixiviantes reportados en porcentaje de lixiviación o por ciento de oro lixiviado para cada tratamiento realizado en los relaves.

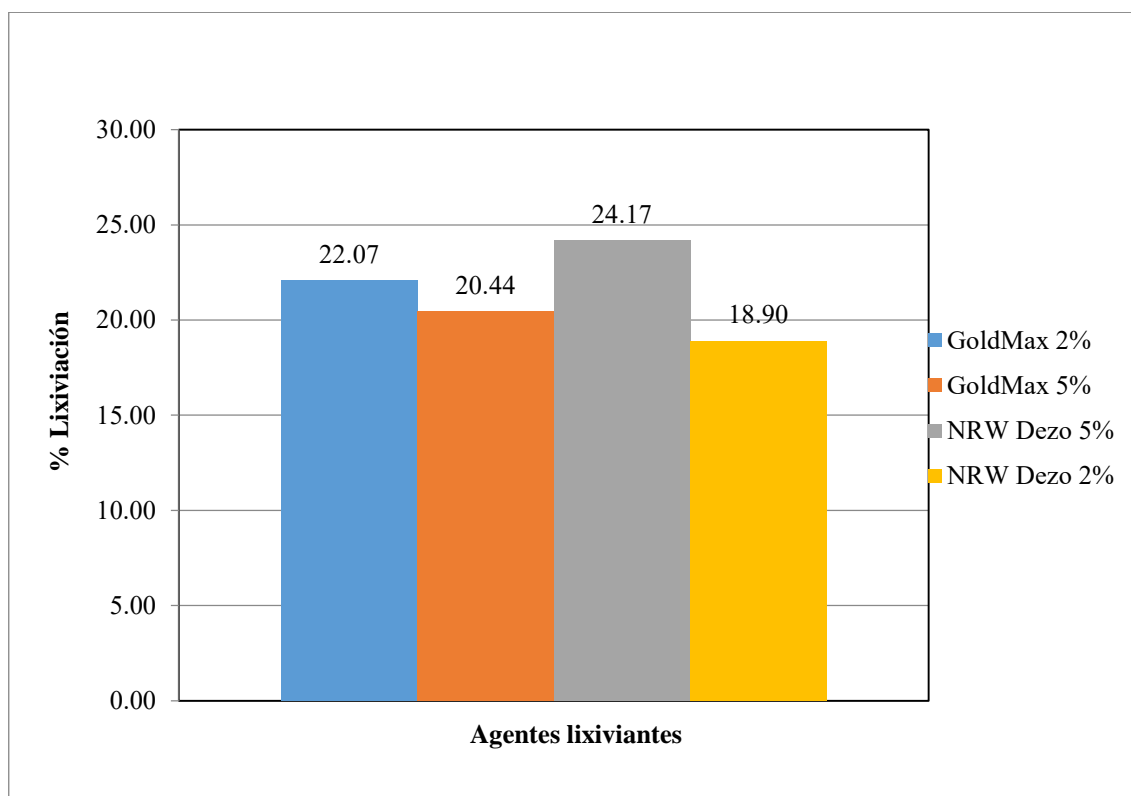


Figura 4.6 Porcentaje de lixiviación efectuada en los relaves con NRW Dezo y GoldMax.

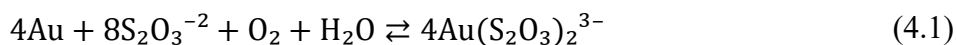
De la figura anterior y de la tabla 4.5 se determinó que el mayor porcentaje de masa lixiviada y el más alto contenido de metales en la solución preñada se obtuvieron con el

agente lixivante NRW Dezo a concentración del 5% (w/w). Con los datos anteriores se seleccionó el agente lixivante antes mencionado para continuar con el estudio de la extracción de oro en los relaves.

4.5 Propuesta de mecanismos de reacción de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización del lixivante NRW Dezo.

Los grupos funcionales principales y con mayor predominancia es el tiosulfato, amonio y el cianato, sin embargo, de acuerdo a los fabricantes y proveedores, así como a los resultados del análisis químico, este no contiene especies con cianuro, por lo que no se considera dentro de la discusión de resultados.

Cuando se usa un agente lixivante como el tiosulfato de acuerdo con Marsden y colaboradores [12] el oro es disuelto en un medio alcalino en un rango de pH de 11 a 11.5, sin embargo para formar un complejo estable de oro con el tiosulfato es necesario de un oxidante tal como se muestra en la reacción 4.1.

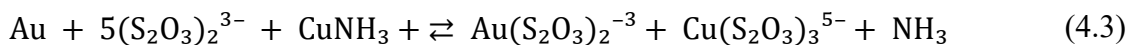


Para acelerar la reacción se sugiere la dosificación de un catalizador, por ejemplo tetramina de cobre, sin embargo los relaves por su naturaleza contienen especies de cobre (II) presentes en la malaquita, azurita, crisocola y bornita lo cual favorece la reacción con el amonio [12].

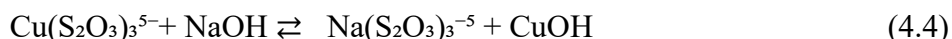


Schlesinger M. y colaboradores [37] afirman que las especies de cobre presentes en carbonatos tales como la azurita y la malaquita son altamente solubles y tienden a reaccionar rápidamente hasta la disolución completa en cuestión de minutos, por lo tanto este factor es importante para acelerar la reacción durante la extracción de oro, sin embargo, Marsden O y col. [12] sostiene que en algún punto de la extracción de oro se pueden llegar a formar complejos estables con amoniaco.

En la ecuación 4.3 se representa la reacción del cobre amoniacal al combinarse con el tiosulfato y el oro, formando el complejo de tiosulfato de oro y tiosulfato de cobre.



Durante la extracción de oro para activar el sistema de lixiviación se dosificó hidróxido de sodio 2.77 M para hidroxalizar el cobre tal como lo propone Oraby E y colaboradores [26] , que afirman que el cobre tiende a reaccionar mayormente con cualquier agente lixivante sobre todo cuando existen especies de cianuro llevando a la alza el consumo de estos e incrementando costos durante la lixiviación, se propone la reacción 4.4.



4.6 Análisis termodinámico para la lixiviación de oro y cobre con el agente lixivante NRW Dezo.

De acuerdo a los mecanismos de reacciones propuestas en la sección 4.5 se muestran las constantes de equilibrio y la energía libre de Gibbs obtenidas a concentraciones 5, 10 y 15% (w/w). En la Tabla 4.6 se muestra las constantes de equilibrio para cada reacción, observando que la constante más alta es en la reacción propuesta para la extracción oro reaccionando con el grupo tiosulfato.

Tabla 4.6 Constantes de equilibrio químico calculadas para cada reacción propuesta en el mecanismo de reacciones.

Keq	5% (w/w)	10% (w/w)	15% (w/w)
Ec. 4.1	1.35×10^{24}	3.55×10^{21}	1.39×10^{20}
Ec. 4.2	6.55	20.80	41.48
Ec. 4.3	10.08	10.73	2.96
Ec. 4.4	6.21	28.75	20.76

Tabla 4.7 Energía libre de Gibbs en el equilibrio químico obtenidas para cada reacción.

ΔG Cal/mol	5% (w/w)	10% (w/w)	15% (w/w)
Ec. 4.1	-32899.12	-29382.12	-27464.08
Ec. 4.2	-1112.73	-1797.05	-2205.85
Ec. 4.3	-1368.17	-1405.09	-643.31
Ec. 4.4	-1081.41	-1988.69	-1795.92

En la Tabla 4.7 se muestran las energías libres de Gibbs en el equilibrio observando que el comportamiento de esta misma es negativo lo cual indica que la espontaneidad de las reacciones es alta y por lo tanto suceden.

En las siguientes secciones se hablará acerca de las recuperaciones de oro y cobre con respecto al tiempo explicando los comportamientos durante su extracción con diagramas especies, diagrama de Pourbaix y diferentes gráficos.

4.7 Lixiviación de oro con el agente lixivante NRW Dezo.

Se realizó la lixiviación de los relaves del mineral de cobre, utilizando solamente el reactivo NRW Dezo a concentraciones de 5, 10 y 15% (w/w). Se monitorearon las variaciones del pH y el ORP del medio. El pH se modificó mediante la adición de hidróxido de sodio al 10%(w/w), con el objetivo de hidroxalizar el cobre presente en los relaves para que este no interactuara durante la extracción de oro tal como lo sugiere Oraby E. y Colaboradores [26].

4.7.1 Comportamiento de la concentración de Au con respecto al tiempo.

En el Figura 4.6 se muestra el comportamiento del sistema de reacción con respecto a la concentración de oro en la solución preñada. Se observan tres comportamientos o etapas en las curvas; en la primera etapa la velocidad del cobre reportado a la solución es alta, mientras que la segunda etapa hay una desaceleración reflejada en el cambio de pendiente, finalmente en la última etapa la concentración de oro con respecto al tiempo llega a un máximo que se mantiene constante a partir de los 30 minutos de haber iniciado la lixiviación. En el caso de la adición de 5 % (w/w) de reactivo lixivante la segunda etapa es más lenta, seguramente por la menor disponibilidad de reactivo para disolver el oro en el mineral.

De acuerdo a Munive G. y col. [27], este comportamiento está relacionado con la disponibilidad y presencia del grupo funcional del agente lixivante que se encuentra en la solución; estas condiciones favorecen la tasa de disolución del oro en soluciones en un medio alcalino, para este caso particular en los relaves con el agente NRW Dezo.

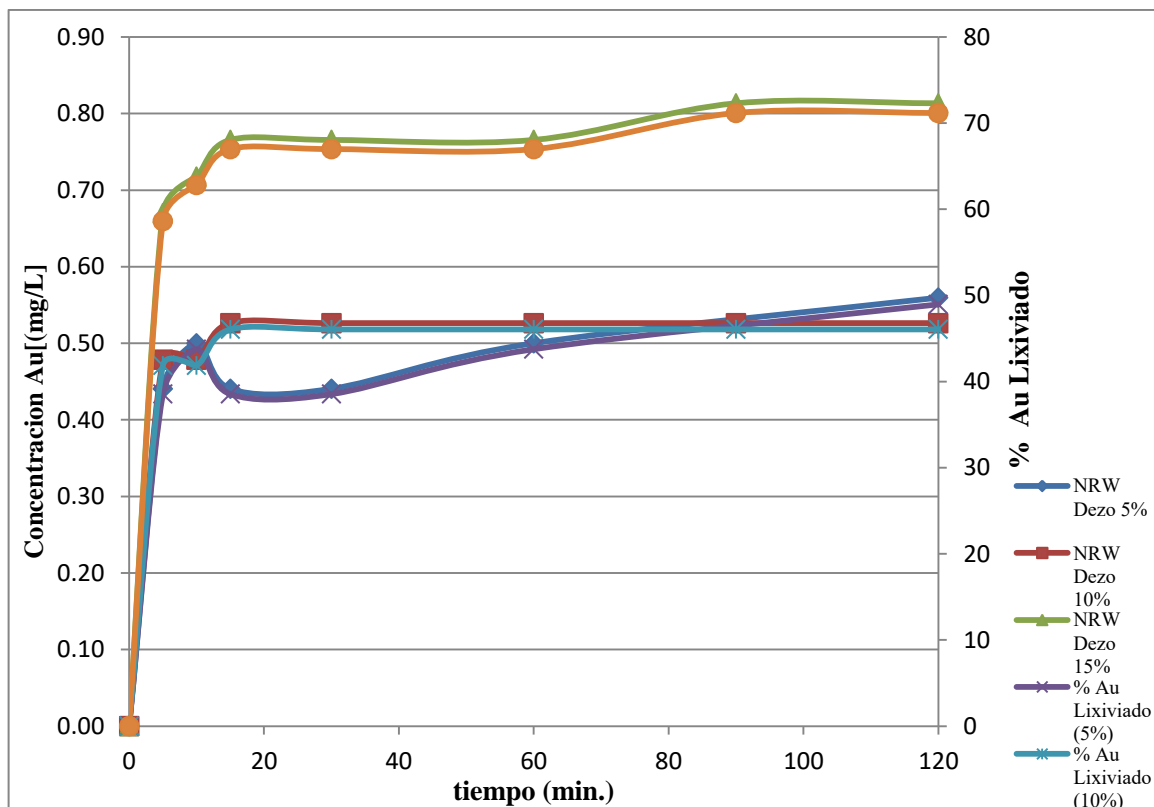


Figura 4.7 Comportamiento de la concentración de oro en mg/L y gpt con respecto al tiempo con NRW Dezo a concentraciones de 5, 10 y 15% (%w/w).

Se establece que el comportamiento de la lixiviación de oro es relativamente rápido, al influir además del reactivo la naturaleza de los relaves ya que las especies de cobre en su mayoría son carbonatadas tal como la malaquita y la azurita. Este comportamiento coincide con lo reportado por Schlesinger M. E. y colaboradores [38], que establecen que los minerales de cobre en forma de carbonatos presentan una cinética de disolución rápida, en tiempos que pueden ser de segundos a minutos; por lo tanto, dichas especies de cobre puede justificar el comportamiento de las reacciones de lixiviación durante la experimentación ya que conforme el paso del tiempo la extracción de oro y cobre van en aumento de forma rápida.

4.7.2 Comportamiento de la concentración de Au con respecto al pH.

En el Figura 4.8, 4.9 y 4.10 se observan los comportamientos de pH con respecto al tiempo y a diferentes concentraciones del agente lixivante Dezo, dentro del mismo gráfico se muestran las variaciones en la concentración de oro con respecto al pH.

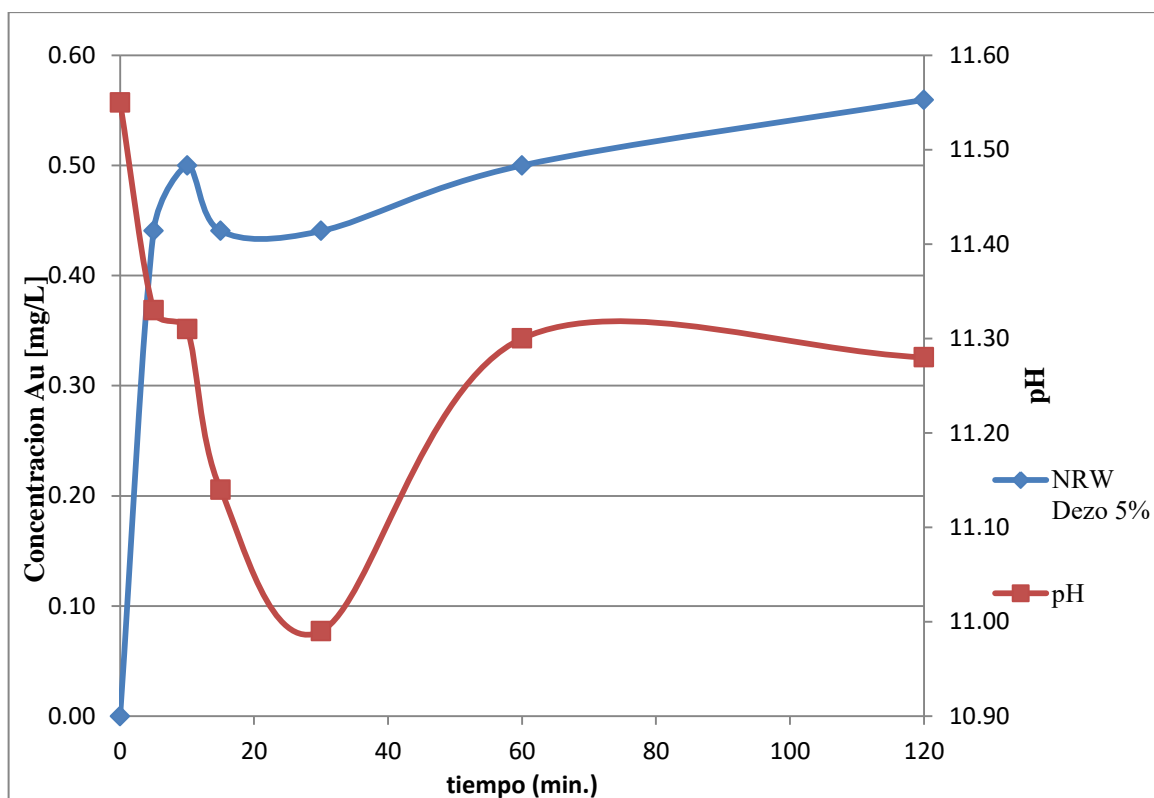


Figura 4.8a Comportamiento del pH con respecto al tiempo y la concentración de oro con el agente lixivante NRW Dezo al 5% (w/w).

En la Figura 4.8 a se muestra la curva de concentración al 5% (w/w) se observa que el rendimiento del pH en el sistema baja teniendo un comportamiento inestable debido a la posibilidad de formación de otras especies el cual se explicara en la Figura 4.8 b; sin embargo, en el minuto 30 se observó un decremento de pH a 10.99 el cual se estabiliza nuevamente con la adición de modificador de pH; este comportamiento se repite hasta que se logra un comportamiento estable alcanzado una lectura de pH de 11.2.

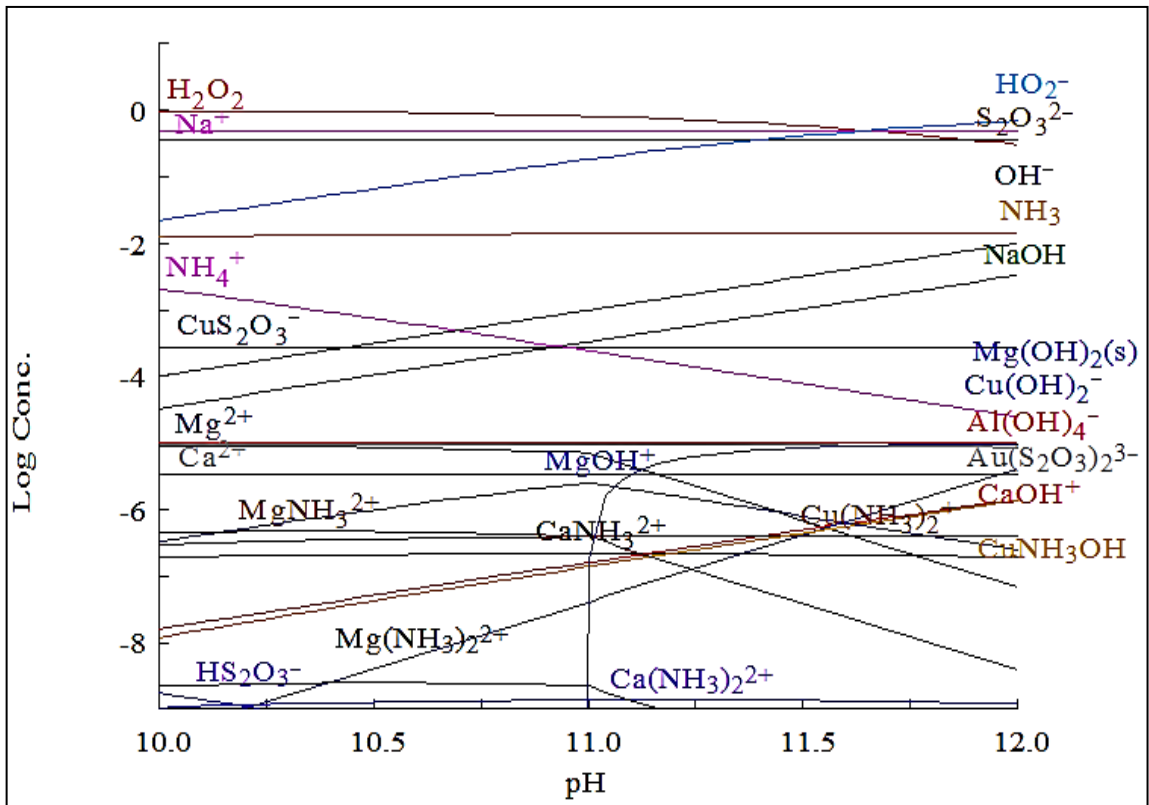


Figura 4.8b Especies formadas durante la lixiviación a concentración 5% (w/w) NRW Dezo, de acuerdo al programa termodinámico Hydra Medusa Chemical Software.

En la Figura 4.8b se muestra el diagrama de especies que pudieron formarse durante la lixiviación y que son predichas de acuerdo al programa de computación termodinámico Hydra Medusa Chemical Software, tomando en cuenta los elementos presentes en los relaves de Tiquicheo. De acuerdo a los resultados obtenidos en los difractogramas se muestran los feldespatos el cual está conformados por varios elementos como es aluminio, calcio, magnesio, silicio, entre otros, sin embargo, este diagrama fue construido con el Programa Termodinámico Medusa que contiene una base de datos limitada que no proporciona los datos adecuados para el caso del silicio.

Se puede observar de acuerdo a los mecanismos de reacción propuestos anteriormente y con los resultados obtenidos del diagrama de especies que la variación del pH desde 10.90 hasta 11.20 conduce a la aparición de las especies CuNH_3 , $\text{Cu(NH}_3)_2$, y MgOH , y que al disminuir las lecturas de concentración, así como el pH, los cationes de Mg, Ca, Na, NH_4 y tiosulfato en los rangos de 10 a 11, éstos no reaccionan en su totalidad,

observándose la formación del complejo del tiosulfato de cobre; en el rango de pH de 11 a 12.

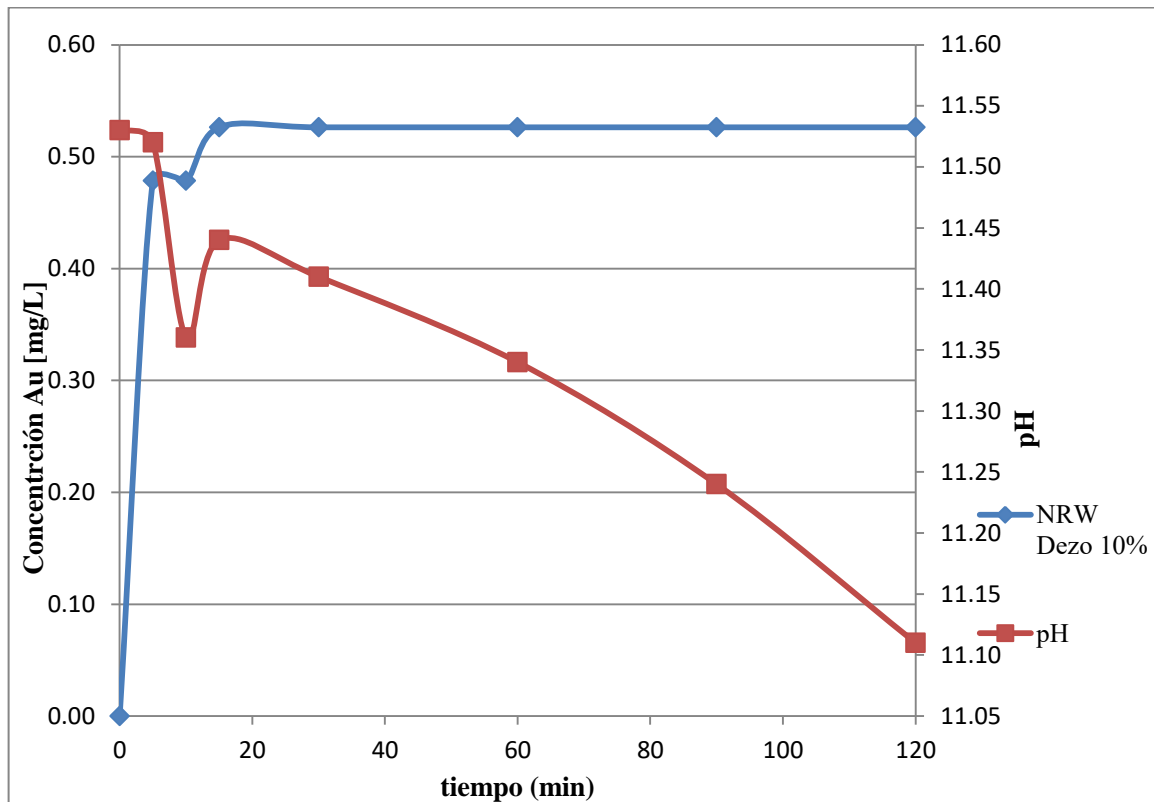


Figura 4.9a Comportamiento del pH con respecto al tiempo y la concentración de oro con el agente lixiviante NRW Dezo al 10% (w/w).

Con respecto a la Figura 4.9a en donde se representa la curva de concentración al 10% (w/w) se observa que en el sistema el comportamiento de pH es estable durante los primeros 5 minutos pero, este baja significativamente con respecto al tiempo alcanzando estabilizarse observando un declive del mismo; revisando el comportamiento de la concentración de oro con respecto al pH, se tiene en los primeros minutos un decremento en la lixiviación de oro para después observar un incremento y un comportamiento estable en la curva porque el agente lixivante llegó a su máxima capacidad de recuperación en el sistema, los decrementos en el rendimiento del pH se puede deber a la formación de otras especies el cual se explicará en la Figura 4.9b como se ha mencionado durante toda la investigación relaves aun contienen trazas de cobre y aún

pueden estar reaccionando debido a las especies presentes como carbonatos de aluminio, calcio y magnesio, que son muy afines a los medios alcalinos y ácidos [34].

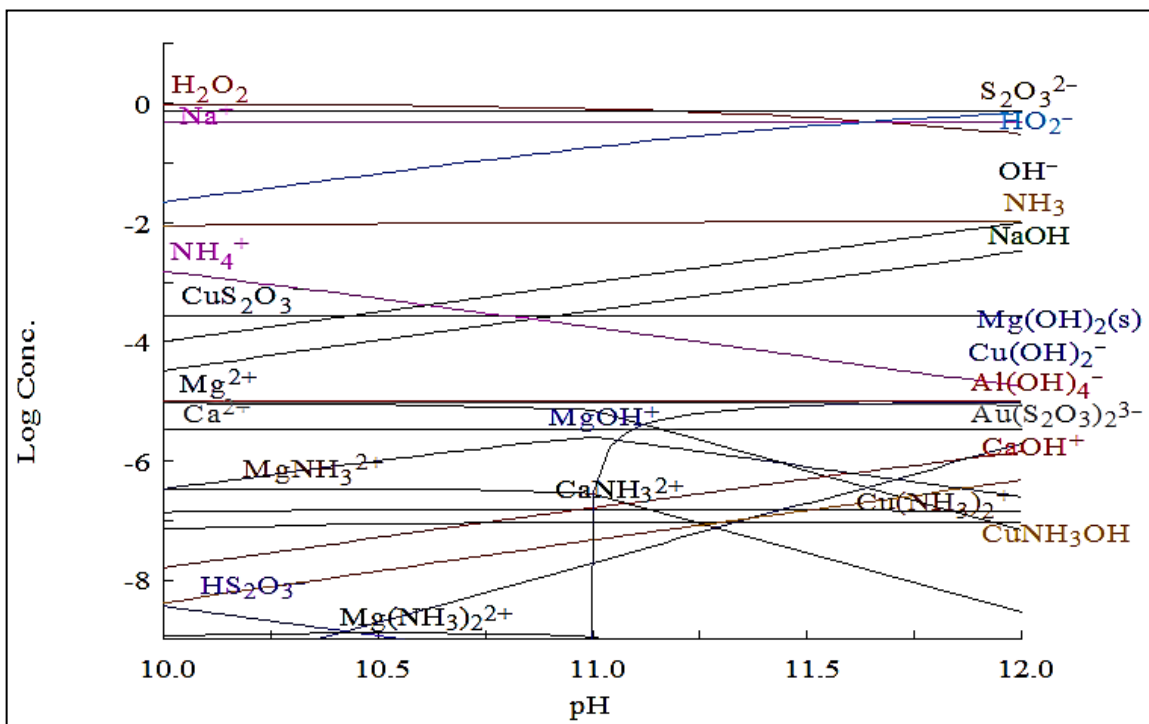


Figura 4.9b Especies formadas durante la lixiviación a concentración 10% (w/w) NRW Dezo de acuerdo al programa termodinámico Hydra Medusa Chemical Software.1

En las lecturas de pH de 11.5 a 11.10 se observa en la figura 4.9b la formación de especies tales como el NaNH_3 , MgOH y que partir del valor de 11.35 se formaron especies tales como CaOH , Cu(OH)_2 , CuNH_3 , Al(OH)_4 , se observa el complejo del tiosulfato de oro manteniéndose estable a pH de 11.55 a 12, se sigue observando cobre amoniacal y los hidróxidos de cobre el cual se buscó precipitar para que este no interfiriera durante la extracción de oro, dando como resultado una reacción rápida manteniendo constante el pH para evitar interferencias con otras especies las cuales se mencionaron en este texto, se observa que el comportamiento de las reacciones son espontaneas pero no se dan en su totalidad, se observa amoniaco e hidróxido de sodio en un punto donde la lixiviación alcanzó la máxima recuperación de oro para después mantenerse constante, se aprecia hidróxido de calcio el cual aunque este no se analizó en

DRX se observó durante la lixiviación formando una nata de color blanco en la superficie de la solución con comportamiento hidrofóbico y que esta fue importante romper durante las extracciones de las alícuotas.

En la curva de la Figura 4.10a del sistema con concentración del 15% (w/w) de agente lixivante se observa que el pH disminuye constantemente así como la velocidad de lixiviación de oro; este comportamiento coincide con lo reportado por Oraby y col.[26] que establece que los decrementos de pH se deben a la disolución y precipitación del cobre y otras especies lo cual se discutirá en la Figura 4.9b.

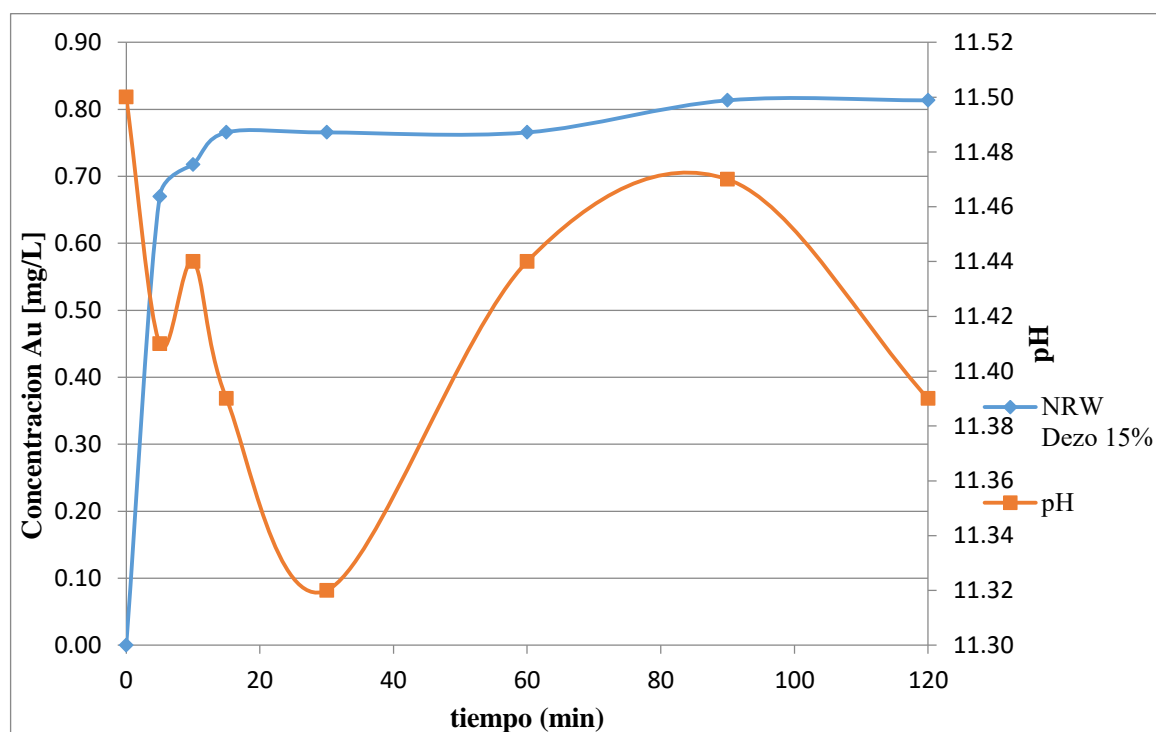


Figura 4.10 a Comportamiento del pH con respecto al tiempo y la concentración de oro 15% (w/w) NRW Dezo.

De acuerdo con la Figura 4.10b en el rango de pH 11.10 a 11.39 se observa la formación de especies de $MgOH$, $CaNH_3$, mientras que entre 11.4 y cerca de 11.8 ocurre la formación de cobre amoniacal en solución, presentándose el complejo de oro tiosulfato en el mismo rango de concentración y con el mismo comportamiento, aunque los hidróxidos de cobre se encuentran por debajo de la escala de concentración; con esto se concluye que se alcanzó a hidroxalizar el cobre principalmente, alcanzando una

recuperación de oro con 46.53 gpt bastante alta a comparación de las otras pruebas con concentraciones de 5 y 10% (w/w).

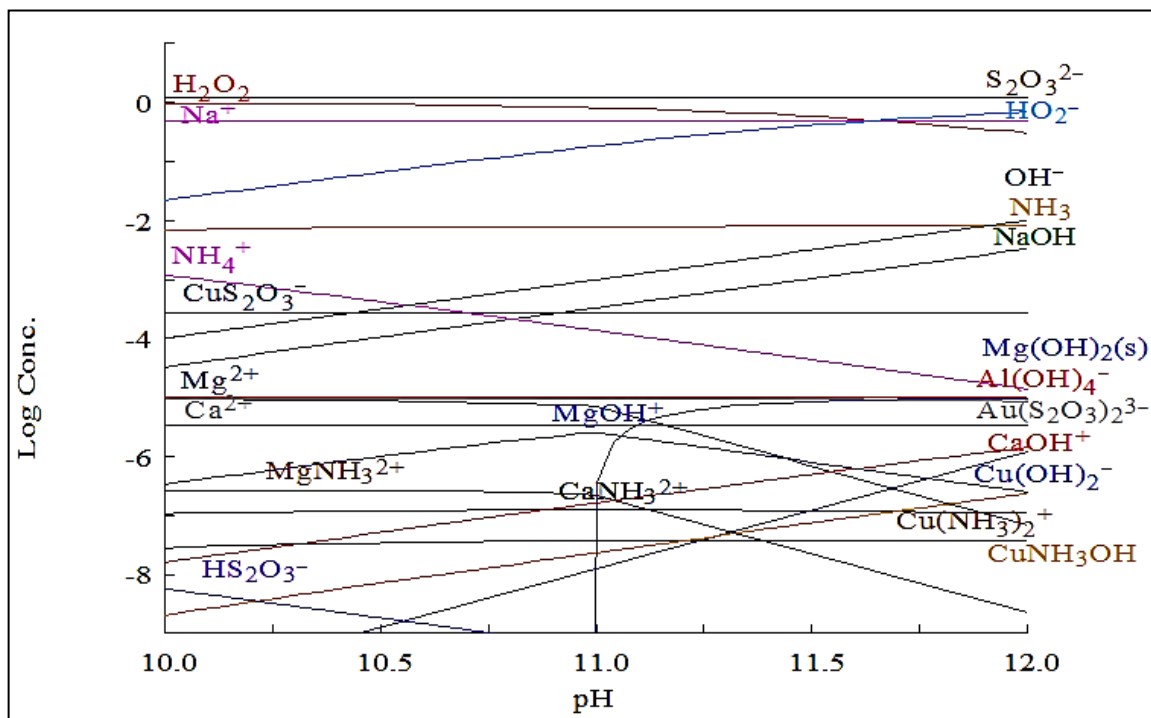


Figura 4.10 b Especies formadas durante la lixiviación a concentración 15% (w/w) NRW Dezo, de acuerdo al programa termodinámico Hydra Medusa Chemical Software.

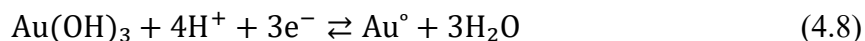
Con respecto al carácter ácido o alcalino de la solución preñada, Marsden y col. [12] establecen que el oro no reacciona en sistemas acuosos en rangos de pH mayores a 11.6. A pH <1 en condiciones muy oxidantes (potencial de soluciones > 1,4 v), se pueden formar iones de Au (III) en solución como se representa en la reacción 4.6



El Au (I) es inestable en agua bajo todas las condiciones potenciales de pH como se indica en la reacción 4.7, en esta reacción tiene una reducción de E° más alto que la reducción de Au (III) y, en consecuencia, el oro se oxida rápidamente a Au (III) sin que se forme Au (I) en un grado significativo.



Entre aproximadamente pH 1 y 13 y potenciales muy altos, se puede formar hidróxido de Au (III) insoluble, de acuerdo a la ecuación 4.8.



A pH 13 y aproximadamente 0,6 V, las especies de hidroauratos solubles, se forman de reacciones con potenciales mayores que los requeridos para la reducción de oxígeno.



Esto explica la estabilidad del oro en solución acuosa. Otros agentes oxidantes como los ácidos nítrico, sulfúrico y perclórico son ineficaces para disolver el oro en ausencia de ligandos acomplejantes [12].

4.7.3 Comportamiento en la concentración de Au con respecto al Potencial Óxido - Reducción (ORP) del sistema.

En las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12 se observan el comportamiento del ORP a medida que el lixivante disuelve el oro de los relaves. Conforme aumenta la concentración de oro en la solución, el valor de ORP disminuye. A los 120 minutos de inicio de la lixiviación, el valor de ORP para la adición de 5 % de lixivante es de 0.2mV, mientras que para el caso de 10 % es de 0.3 mV y para la adición de 15 % (w/w) el valor es de 0.4 mV; de lo anterior, a medida que el valor del ORP disminuye significa que en el sistema acuoso predominan las reacciones de oxidación.

En la Figura 4.11, en la curva de concentración de Dezo al 5% (w/w) en el rango de 150 a 80 mV de la curva del ORP se observa el incremento de concentración de oro a partir del minuto 30 hasta finalizar la experimentación, el comportamiento de la curva de ORP va en decremento. Sin embargo, en la Figura 4.12 correspondiente a la adición de Dezo al 10% (w/w) el decremento del ORP se da en 160 – 100 mV observando que la concentración de oro se incrementa a partir del minuto 15 para mantenerse constante, a esta concentración la velocidad de reacción es alta con respecto a las otras dos concentraciones de agente lixivante.

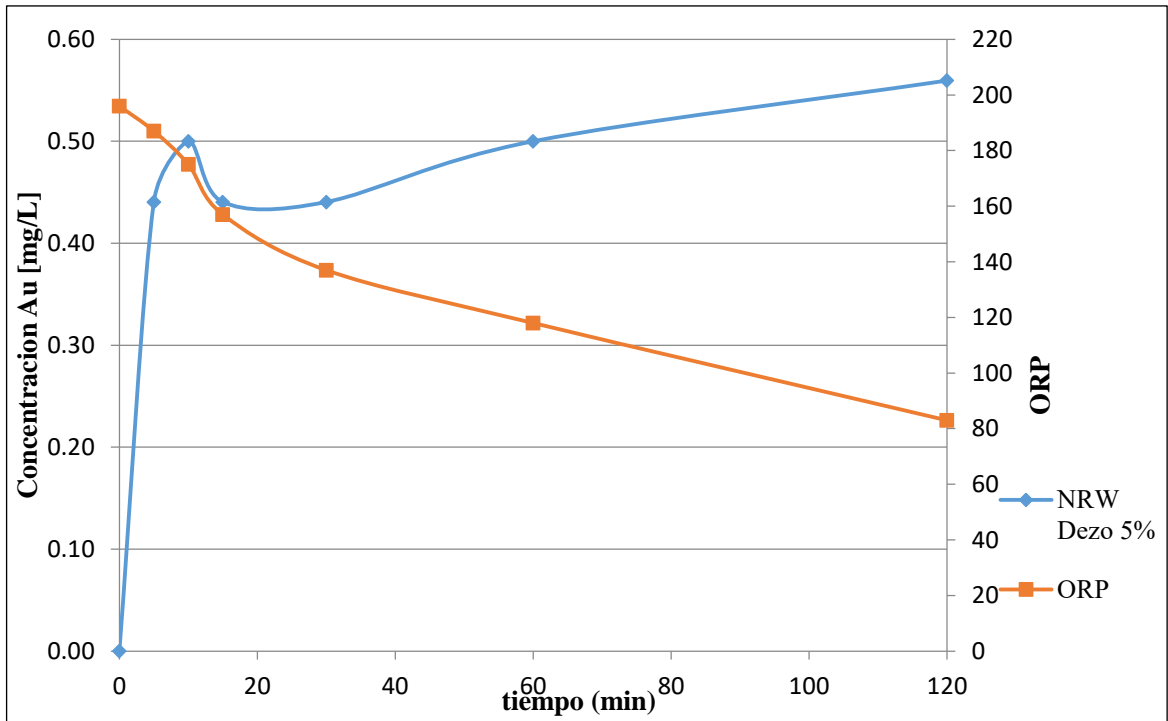


Figura 4.11 Compartimento del potencial óxido reducción con respecto al tiempo y la concentración de oro. Adición de 5% (w/w) de reactivo lixiviante.

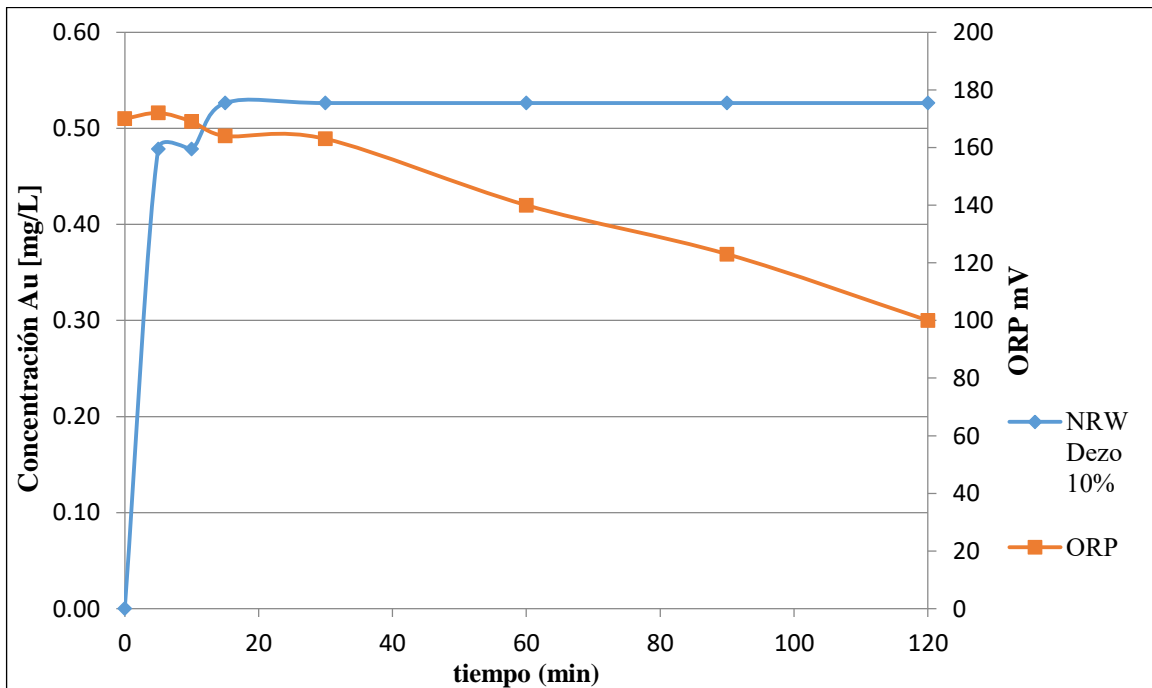


Figura 4.12 Compartimento del potencial óxido reducción con respecto al tiempo y la concentración de oro a concentración del 10% (w/w) del reactivo lixiviante.

En la Figura 4.13 que corresponde a la adición de Dezo al 15% (w/w) se observa el mismo comportamiento de los dos casos anteriores, donde el ORP oscila de 140 a 90 mV.

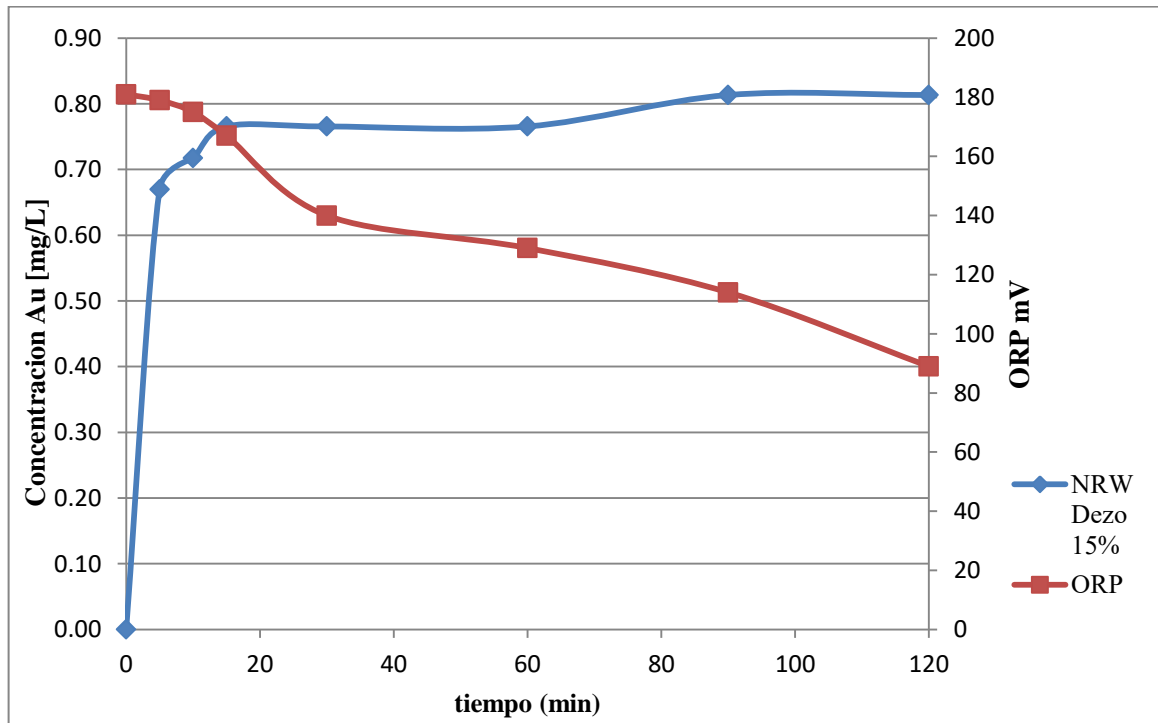


Figura 4.13 Compartimento del potencial óxido reducción con respecto al tiempo y la concentración de oro a concentración del 15% (w/w) NRW Dezo.

De acuerdo al comportamiento de las curvas de ORP con respecto a la concentración de oro y el tiempo con el agente NRW Dezo adicionado a diferentes concentraciones, se observa un comportamiento inversamente proporcional en las curvas durante la recuperación de oro, esto indica que durante el tratamiento el agente lixiviante necesita de un medio oxidante para formar los complejos de oro, buscando y alcanzando el equilibrio termodinámico al proveerse el sistema del oxígeno atmosférico y el NaOH para activar el sistema y estabilizarlo durante el tratamiento; a mayores valores de ORP las recuperaciones de oro son bajas, sin embargo en los rangos de ORP de 160 a 85 mV las recuperaciones se incrementan de acuerdo a la información de las curvas en los gráficos obtenidos hasta lograr un comportamiento estable.

Con respecto a los resultados obtenidos y con respecto a la caracterización del agente lixivante, el grupo funcional propuesto para formar un complejo con el oro es el cianato $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$. De acuerdo a la información obtenida en los difractogramas de infrarrojo del agente lixivante Dezo, aparecen también grupos funcionales como el Tiocianato el cual requiere de un sistema ácido para efectuar la lixiviación y el cianuro que de acuerdo a las afirmaciones del fabricante y proveedor este agente no lo contiene, se observa además un grupo funcional tiosulfato el cual requiere de sistemas alcalinos para su máximo rendimiento, además de requerir para la lixiviación de oro del oxígeno atmosférico como agente oxidante en conjunto con el hidróxido de sodio.

El agente lixivante NRW Dezo tiene cierta afinidad al cobre, a continuación, se presentan los resultados obtenidos de recuperación de cobre durante la lixiviación de oro.

4.7.3.1 Diagramas de Pourbaix propuestos para la extracción de oro.

En las Figuras 4.14 y 4.15 se muestran los diagramas de Pourbaix de oro y cobre obtenidos a diferentes concentraciones del agente lixivante NRW Dezo de oro y cobre representando también las especies formadas de acuerdo a los mecanismos de reacción propuestos.

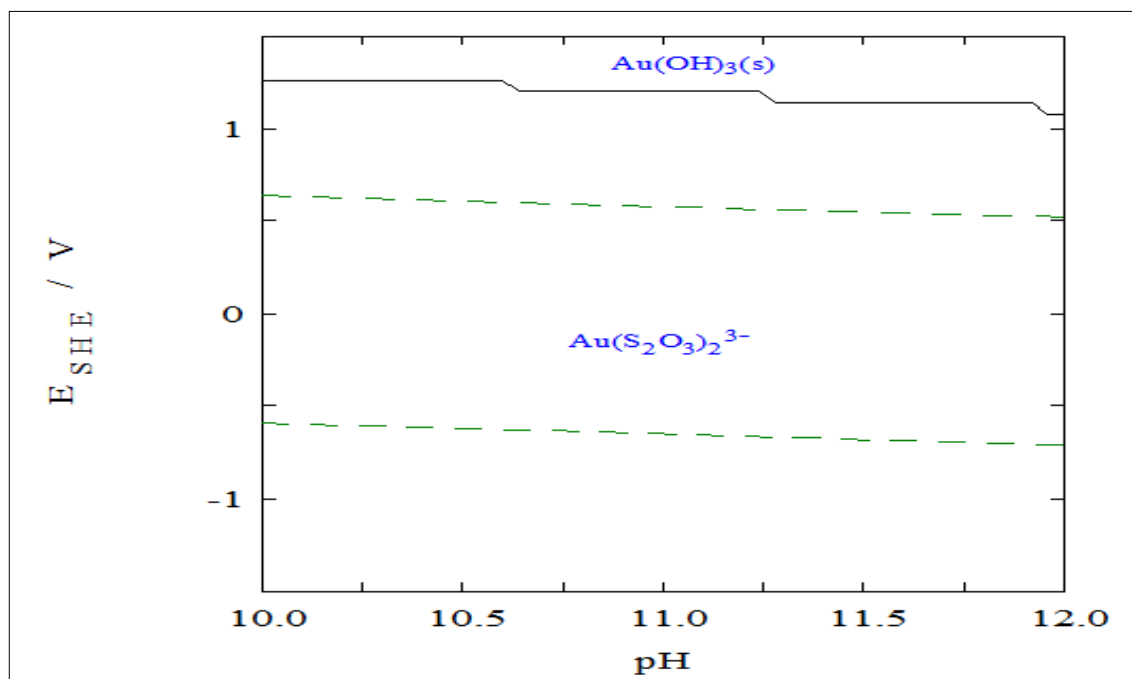


Figura 4.14 Diagrama Pourbaix de oro con el agente lixivante NRW Dezo acuerdo al programa termodinámico Hydra Medusa Chemical Software.

3.1. De acuerdo a lo que se menciona en párrafos anteriores, de acuerdo a los resultados de caracterización el agente lixivante NRW Dezo tiene como componente principal el tiosulfato, el cual se consideró para la elaboración de los diagramas de Pourbaix ingresando las cargas voltaicas obtenidas durante la experimentación y las concentraciones conocidas de reactivos. De la Figura 4.13, la formación del complejo de tiosulfato de oro se encuentra dentro de la zona de estabilidad que comprende los valores de ORP y pH. Se observa que en el área de oxidación se presenta el complejo de hidróxido de oro.

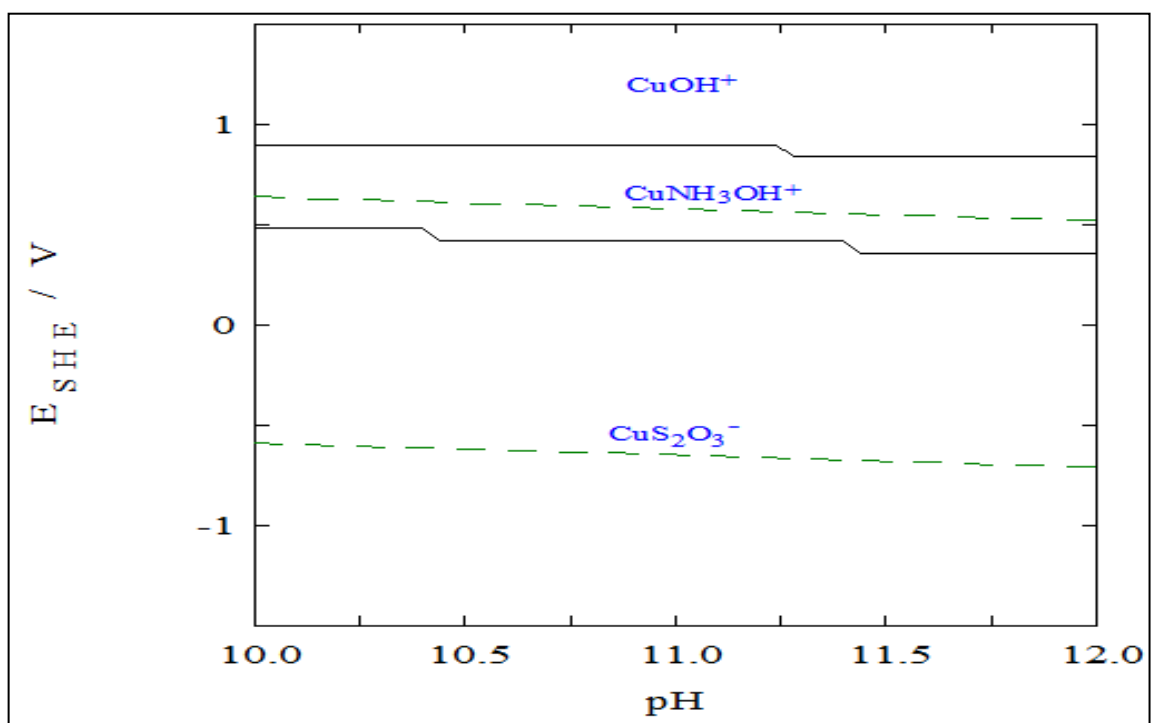


Figura 4.15 Diagrama Pourbaix de cobre con el agente lixivante NRW Dezo acuerdo al programa termodinámico Hydra Medusa Chemical Software.

De acuerdo a la Figura 4.15, dentro de la zona de estabilidad de la fase acuosa se encuentra el complejo del tiosulfato de cobre tendiendo a la zona de reducción ya que de acuerdo a las lecturas voltaicas antes mencionadas su comportamiento fue positivo y no negativo como se representa en el diagrama de Pourbaix, se observan complejos de cobre

amoniaco y de hidróxido de cobre en la zona oxidante, el cobre amoniacal hidratado se encuentra dentro del rango de las lecturas de energía.

4.8 Comportamiento en la recuperación de cobre durante la lixiviación de los relaves.

En la Figura 4.16 se presentan las curvas de concentración de cobre en la solución preñada, con respecto al tiempo.

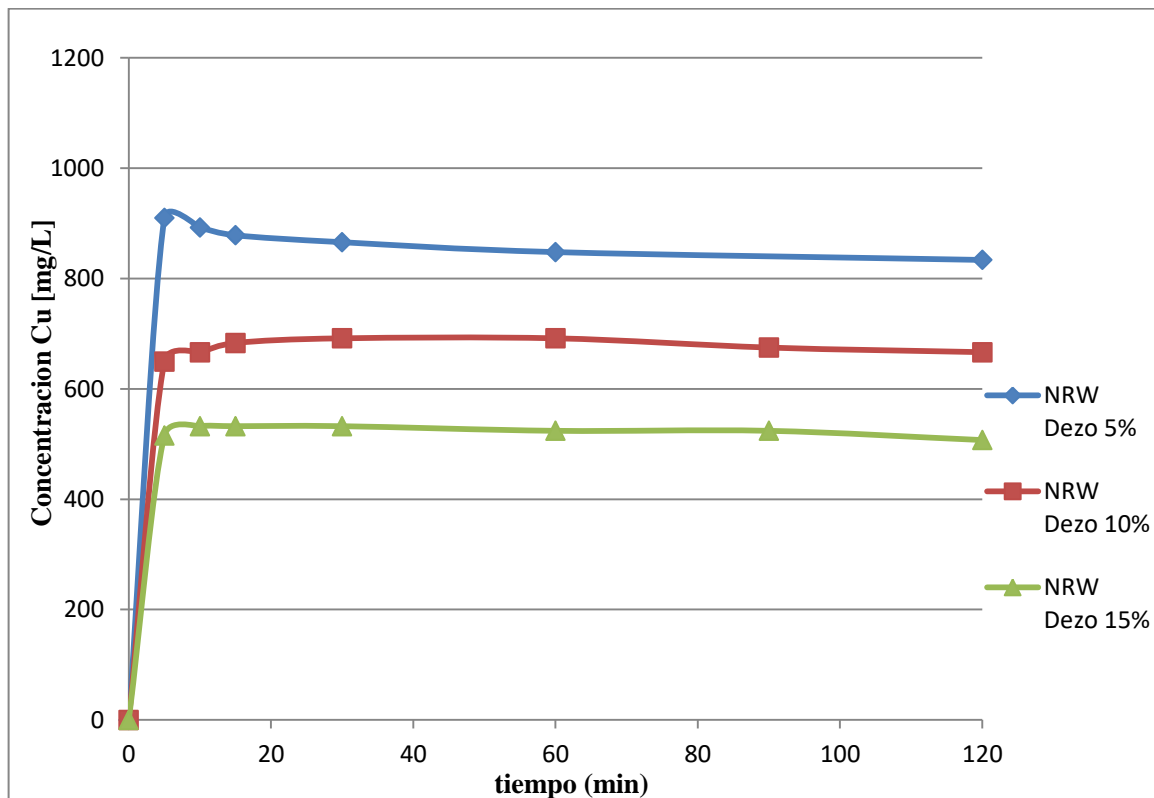


Figura 4.16 Concentración de cobre en la solución preñada. Lixiviación de oro en los relaves con el agente lixivante NRW Dezo.

En la Figura 4.16 se observa que las especies de cobre reaccionaron, reportándose en la solución preñada cuando el pH de medio disminuye tal y como se aprecia dentro de las curvas; sin embargo, si el pH se controla mantiene entre 11 y 11.5 el agente lixivante NRW Dezo ataca preferentemente a las especies auríferas. En las Figuras 4.17 a y 4.17 b se presentan las curvas del comportamiento de concentración de cobre con respecto al pH y el tiempo, a concentraciones del 10 y 15% (w/w) respectivamente, observando que al disminuir el pH la concentración de cobre aumenta, hasta determinado valor a partir

del cual la concentración de cobre se mantiene estable. Este comportamiento es atribuible a la presencia de oxígeno disuelto presente lo cual provoca que estos puedan seguir reaccionando con las disminuciones de pH [39], es importante mantener el pH en un valor de 11.5 para favorecer la hidroxalización de cobre, los cuales fueron identificados en pequeñas partículas mediante el microscopio electrónico de barrido. Esta última información se presenta en siguientes apartados.

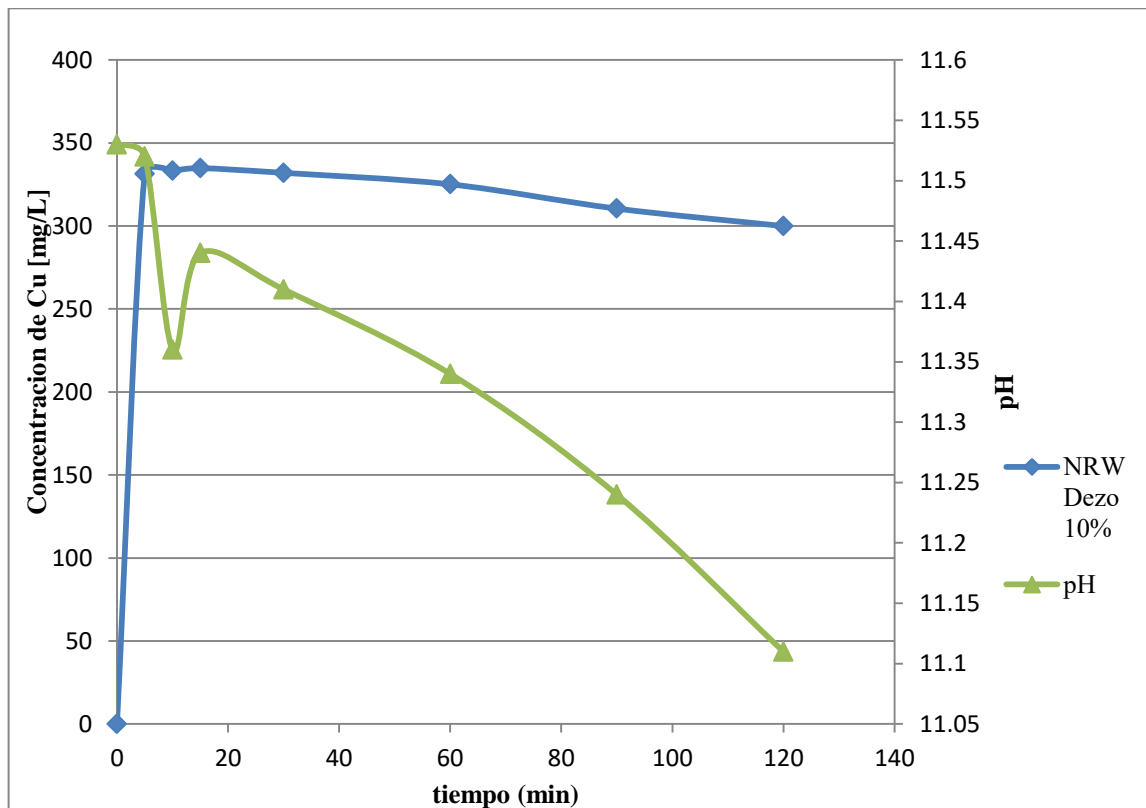


Figura 4.17 a Comportamiento de la concentración de cobre con respecto al pH a concentración del 10% (w/w) del agente lixivante NRW Dezo.

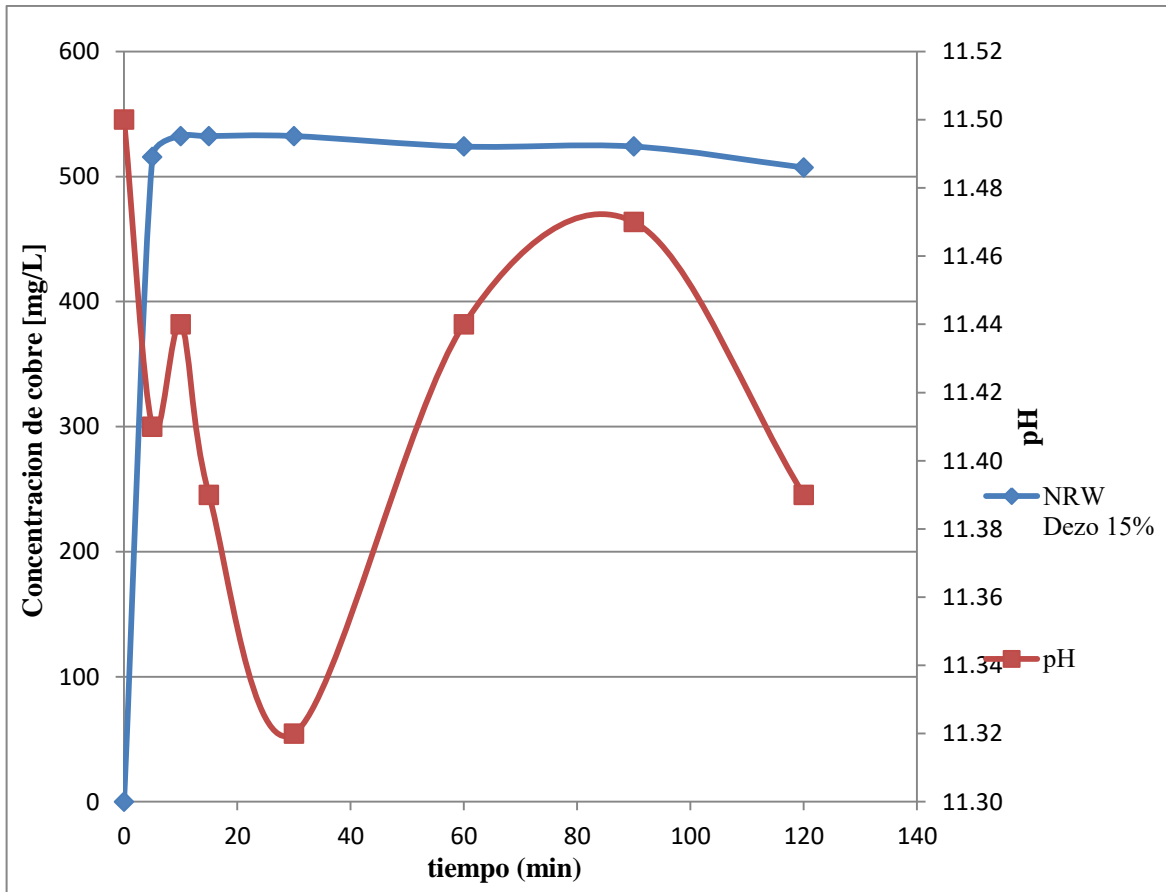


Figura 4.17 b Comportamiento de la concentración de cobre con respecto al pH a concentración del 15% (w/w) del agente lixiviante NRW Dezo.

4.9 Porcentajes de recuperación de oro y cobre.

En la Tabla 4.8 se muestran los resultados de los cálculos de los porcentajes de oro y cobre recuperados durante la lixiviación con el agente NRW Dezo, después de 120 minutos de lixiviación. Se obtuvo una recuperación de oro de 71.23% a concentraciones de lixivante del 10 y 15% (w/w), mientras que la recuperación de cobre disminuyó con la adición del lixivante, desde 65 hasta 62%. Para el contenido de NRW Dezo del 5%, la recuperación de oro es menor y mayor la concentración de cobre, el comportamiento del pH y del ORP confirma la precipitación de hidróxidos de cobre, así como los diagramas de Pourbaix.

Tabla 4.8 Recuperación de oro y cobre lixiviado en porcentaje. Oro inicial en el relave = 0.6538 mg/L. Cu inicial = 17.50 mg/L.

Concentración NRW Dezo	% Au Lixiviado	% Cu Lixiviado
5%	45.54	65.02
10%	71.00	62.59
15%	71.23	56.64

4.9.1 Masa mineral de relaves, lixiviada con los agentes lixiviantes GoldMax y NRW

Dezo.

En la Figura 4.18 se representan los porcentajes de masa mineral lixiviada, obtenidos durante la experimentación a diferentes concentraciones del agente NRW Dezo; 5, 10 y 15% (w/w), obteniendo una mayor disolución de relaves con esta última concentración, logrando la mejor recuperación de oro con un 29.43%.

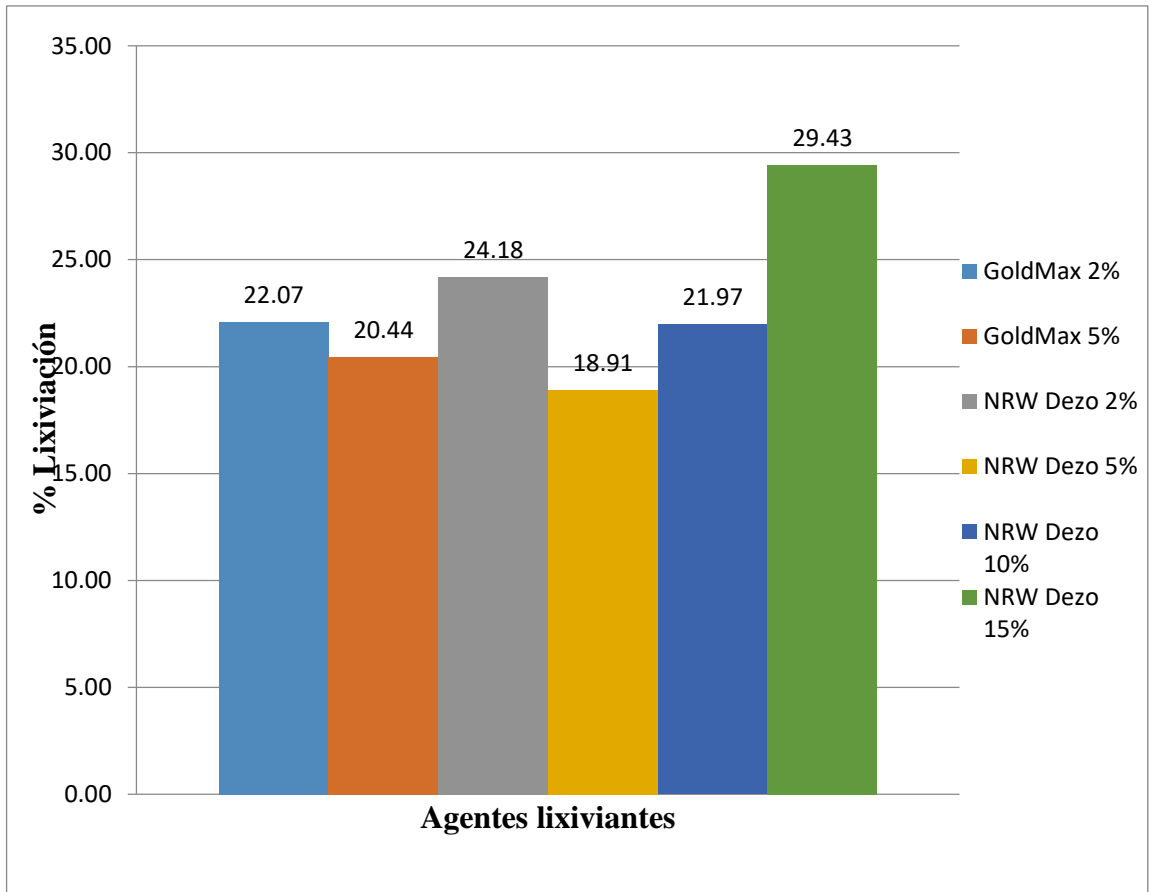


Figura 4.18 Porcentajes de masa mineral lixiviada de los agentes NRW Dezo y GoldMax en relaves.

4.10 Caracterización de relaves residuales de la lixiviación

4.10.1 Análisis químico cualitativo por difracción de rayos X.

En las Figuras 4.12 y 4.13 se muestran los difractogramas de los residuos de los relaves después de la lixiviación con el agente NRW Dezo. En el caso de la adición del lixivante con la concentración de 10%(w/w), se identifican las especies de malaquita y azurita ($\text{Cu}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$), mientras que en los relaves lixiviados con el 15%(w/w) del agente lixivante, aparecen grupos feldespatos, teluritas Si_6 (TeO_3), y albita ($\text{Na Al Si}_3\text{O}_8$), urea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) e hidróxidos de cobre.

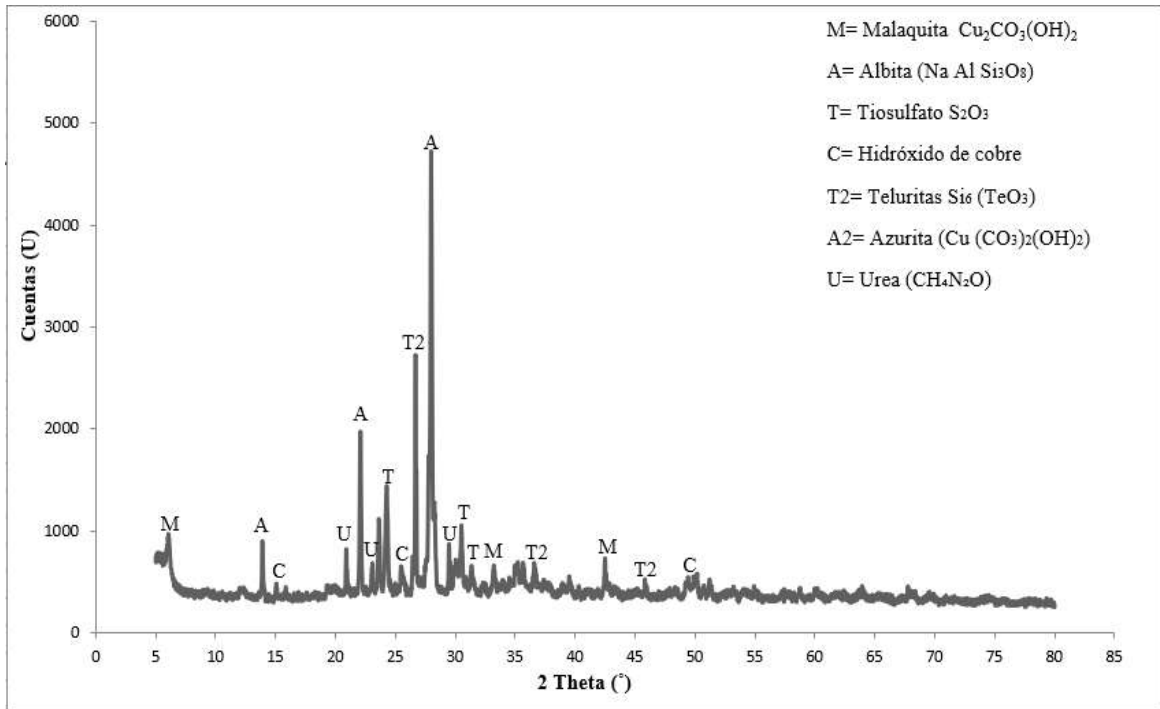


Figura 4.19 Difractograma de los relaves residuales, obtenidos de las pruebas de lixiviación con el agente lixivante NRW Dezo al 10% (w/w).

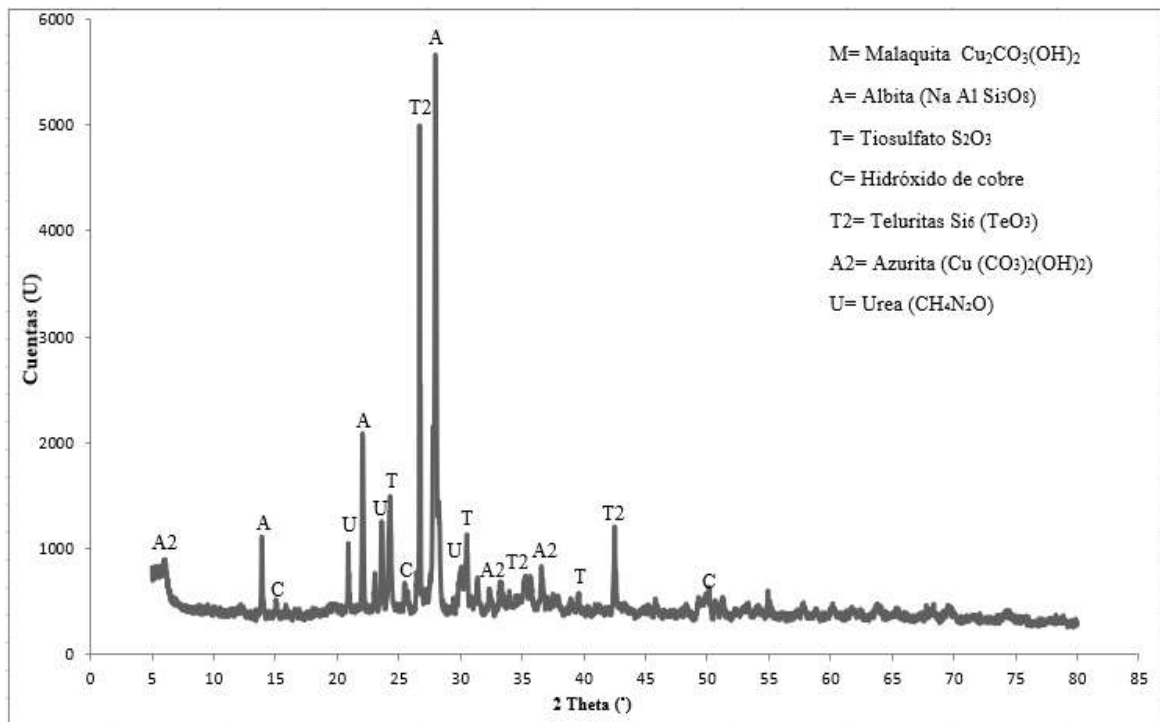


Figura 4.20 Difractograma de los relaves residuales obtenidos de las pruebas de lixiviación con el agente lixivante NRW Dezo al 15% (w/w).

4.10.2 Análisis químico cualitativo por microscopia de barrido (MEB).

En las Tablas 4.9 y 4.10 se presentan los resultados obtenidos en el análisis de EDS, se observan las especies elementales presentes en los relaves residuales de la prueba con el agente lixiviante NRW Dezo al 10% (w/w) y 15%(w/w), con contenidos de cobre, silicio, aluminio, calcio, magnesio, azufre, entre otros; como es de esperarse, en menor proporción a comparación de los relaves de origen.

Tabla 4.9 Elementos contenidos en los residuos de los relaves, información obtenida del análisis puntual por EDS. NRW Dezo del 10% (w/w).

Elemento	% W
Carbón	0.71
Oxígeno	39.62
Sodio	3.94
Magnesio	2.06
Silicio	21.05
Potasio	0.99
Titanio	1.18
Hierro	3.52
Cobre	1.00
Aluminio	5.88
Calcio	20.05

Tabla 4.10 Elementos contenidos en los residuos de los relaves por análisis puntual por EDS. NRW Dezo del 15% (w/w).

Elemento	% W
Carbón	0.57
Oxígeno	46.36
Sodio	5.68
Magnesio	2.62
Silicio	23.97
Potasio	0.95
Titanio	0.55
Hierro	6.55
Cobre	2.20
Aluminio	8.02
Calcio	2.53

A pesar de que el azufre no se reporta en los análisis de los relaves antes y después de la lixiviación, se puede establecer que el azufre interactúa con otros iones contenidos en la solución preñada, tal como lo confirman Orbay y Col. [26]; también se confirma la precipitación de los hidróxidos de cobre ya que se encuentran presentes en menor proporción a comparación de los relaves originales. Se observa un incremento de sodio y la baja de otros elementos como el calcio, magnesio y aluminio que de acuerdo a la literatura [34] los carbonatos son afines a sistemas ácidos y alcalinos, por su naturaleza tienden a disolverse en cuestión de minutos y vuelven a precipitarse con los cambios de pH. De acuerdo a los resultados obtenidos por el análisis de difracción de rayos X se confirma que aún se encuentran trazas de malaquita y azurita, así como los hidróxidos de cobre, feldspatos y albita, en este análisis puntual no se encontraron teluritas ni urea. En la Figuras 4.14 a, 4.14 b y 4.14 c, se muestran las micrografías tomadas a diferentes magnificaciones de 1000x, 2500x y 5000x en el microscopio electrónico de barrido para la detección de hidróxidos de cobre, los cuales se observan en las Figuras 4.14 b y 4.14 c.

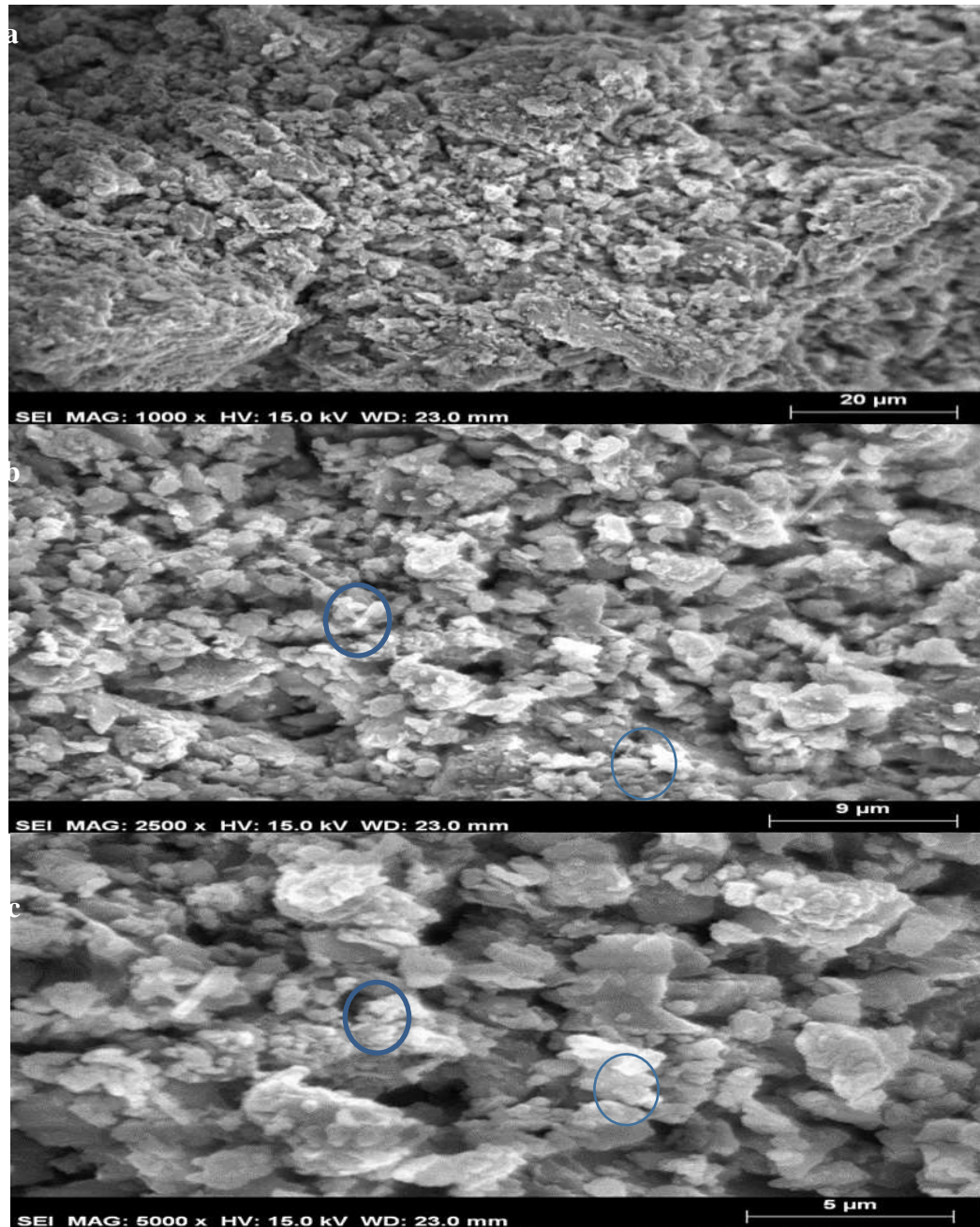


Figura 4.21 Micrografía de los residuos de relaves NRW Dezo al 15% de concentración, Figura a) con magnificación de 1000x, b) a 2500x y, c) a 5000X.

4.11. Caracterización de las soluciones preñadas por espectroscopia FTIR.

En la Figura 4.22 se observan los espectros de infrarrojo obtenidos de las alícuotas extraídas a los 120 minutos de transcurrido el experimento de lixiviación con concentraciones de 10%(w/w) y 15%(w/w) del agente lixivante NRW Dezo; esto, con la

finalidad de identificar los grupos funcionales en las soluciones preñadas. Los grupos funcionales identificados son los siguientes: Tiocianato (SCN^-) con una región de longitud de onda de 2250 cm^{-1} a 2000 cm^{-1} , tal como se muestra en ambos espectros, sin embargo se vuelven a repetir el grupo funcional (SCN^-) en las regiones de IR con longitud de onda 2085.63 cm^{-1} y 1306.11 cm^{-1} , 1216 cm^{-1} , 624 cm^{-1} respectivamente; se encontraron otros grupos funcionales como HPO_4^{2-} en la región de 1160 cm^{-1} así como H_2PO_4^- , en la región 3435 cm^{-1} se localiza el grupo OH y en la región de 1636 cm^{-1} se detecta el grupo funcional de tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) [35]. De acuerdo con la caracterización de los relaves en difracción de rayos X, en ellos aparecen especies de Tiocianato de sodio y tiosulfato de amonio.

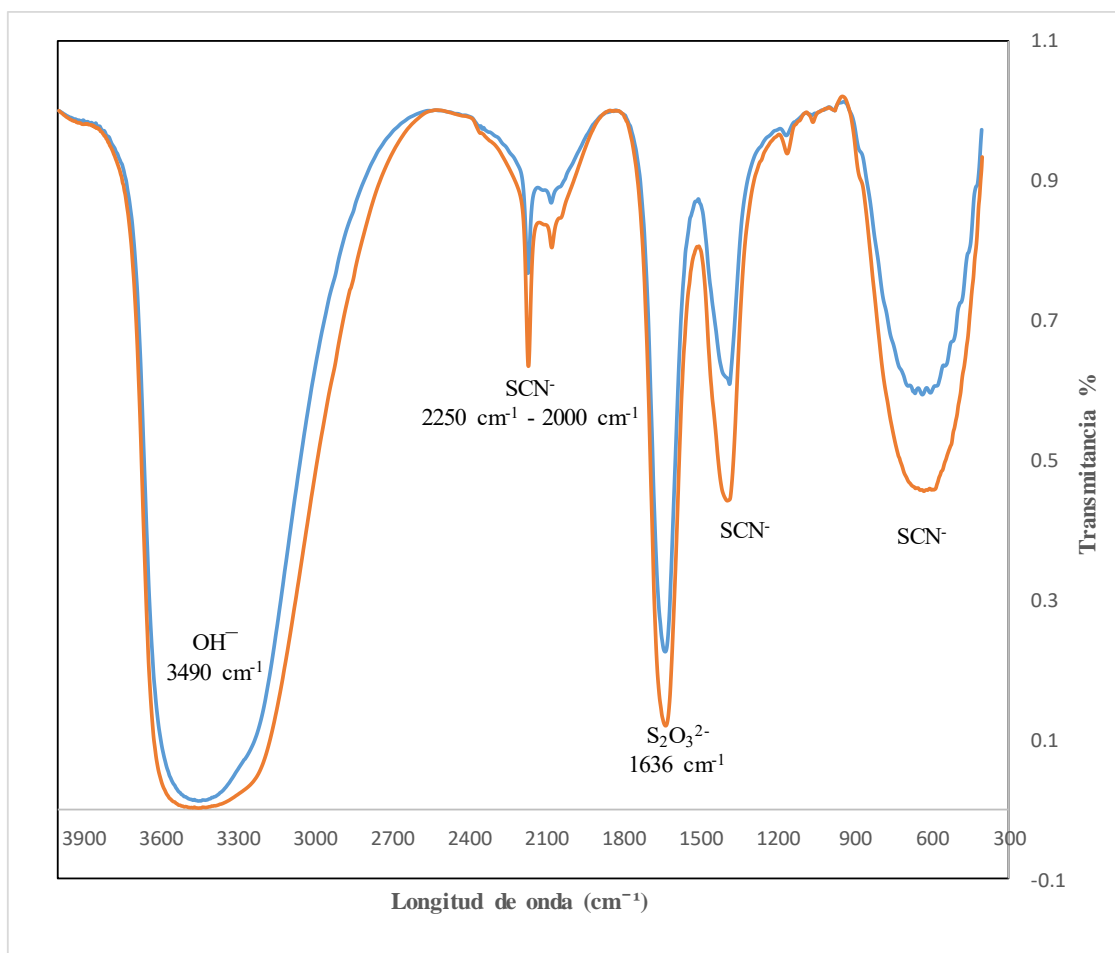


Figura 4.22

Figura 4.22 Espectro de infrarrojo de las soluciones preñadas al 10% (w/w) (línea azul) y 15% (w/w) (línea naranja) de concentración del agente lixivante NRW Dezo.

Cabe mencionar que se descarta el grupo funcional Tiocianato SCN^- ya que este trabaja en pH ácido y no alcalino tal como lo afirma Azizitorghabeh y Colaboradores [40].

4.12. Propuesta de variables operativas para la lixiviación de los relaves

De los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se proponen las variables operativas para la lixiviación de los relaves provenientes de la lixiviación de los minerales de cobre malaquita y azurita motivos de este estudio.

Tabla 4.11 Variables operativas para la lixiviación de relaves utilizando los reactivos GoldMax y NRW Dezo.

VARIABLE	VALOR O CARACTERÍSTICA
Sistema de lixiviación	Abierto a agitación constante o desde molienda.
Sistema de agitación	1200 rpm
Concentración NRW Dezo %(w/w)	10 a 15% (w/w)
Temperatura °C	Ambiente o entre 25 y 28 °C
pH	11 – 11.5
Modificador pH	CaOH
Tiempo de residencia (hr)	12 – 72
Granulometría	100% malla -10 (100 % tamaños menores a 2 mm)
Relación Sólido : Líquido	1 : 2

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.

Del trabajo de investigación para establecer las condiciones de lixiviación de los relaves de una labor minera para obtener oro a partir de los relaves procedentes de minerales de cabeza tales como la malaquita y azurita de un yacimiento de la región de Tiquicheo, Michoacán, se derivan las siguientes conclusiones:

1. Es factible la disolución del oro contenido en los relaves motivos de este estudio, mediante el uso de los reactivos lixiviantes GoldMax y NRW Dezo.
2. La lixiviación con el reactivo NRW Dezo resultó ser alrededor del 20% más eficiente que el agente lixiviante GoldMax.
3. Las condiciones de operación recomendadas para su aplicación en planta son: Sistema de lixiviación abierto; Concentración de lixiviante de 10 a 15 % (w/w); operación a temperatura ambiente; relación sólido: líquido de 1:2; tiempo de lixiviación de 12 a 72 horas; modificador de pH CaOH; tamaño de partícula del mineral 100% menor a 2 mm; pH de 11 a 11.5.
4. Mediante el uso del reactivo NRW Dezo el oro recuperado es del 71% con respecto al contenido original en el relave.
5. De la información de caracterización de los relaves y de la solución preñada, mediante el análisis termodinámico se proponen reacciones químicas de disolución del oro de los relaves, donde se muestra que los residuos no son dañinos al medio ambiente.

RECOMENDACIONES TRABAJOS A FUTURO.

Debido al corto tiempo de investigación se requiere profundizar algunos estudios los cuales son propuestas para investigación dentro del mismo programa de maestría y/o doctorado.

1. Extracción de cobre con el agente lixivante NRW Dezo estudiar los efectos al interactuar con él.
2. De acuerdo a los resultados obtenidos en esta tesis implementarlos en escalamiento en planta.
3. Optimizar la recuperación de oro apuntando a un rango de 85 a 90% estudiando a profundidad la complejidad de los relaves.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1]REYES A, RAMOS GÓMEZ M, GONZÁLEZ F, ARTURO L, MORA G, RODRIGUEZ F. Caracterización de Jales Mineros y Evaluación de su Peligrosidad con Base en su Potencial de Lixiviación. Conciencia Tecnológica. 2008.
- [2]BAHENA M D C O E Y J L R. Recuperacion de Metales Preciosos Provenientes de Presas de Jales. XIII Encuentro Sobre Procesamiento de Minerales. 2006.
- [3]SECRETARIA DE ECONOMIA - MINERIA [en línea] disponible en : <URL:<https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria> [Consultado en Septiembre 2019].
- [4]YGNACIO M S R H R P. Mi México es Minero. 3a. México. 2015.
- [5]MARTINEZ L. Sonora, Principal productor de oro en México: Inegi. 2019.
- [6]SERVICIO GEOLOGICO MEXICANO. Panorama minero del estado de Michoacan.
- [7]ANONIMO. Michoacán, Líder En Extracción De Metales. 10 de Abril 2018. 2018.
- [8]ANTONIO R. Recopilacion Sobre La Metalurgia del Oro. 2017.
- [9]DOMIC E. Hidrometalurgia: metalurgia, procesos y aplicaciones. 2001.
- [10] JOSÉ EVODIO MONTIEL E, PEDRO CORONA C, JUAN CARLOS SALINAS P. YACIMIENTOS DE ORO EN MICHOACÁN. Ciencia Nicolaita. 0(65), 2015.
- [11] L. B R. Rocas y Minerales: La guía visual definitiva. 1. Barcelona. 2008.
- [12] I M O H. The Chemistry of Gold Extraction. Second. 2006.
- [13] NAPIER-MUNN T W B A. Wills' Mineral Processing Technology. 2005.
- [14] BRAGIN V I, MAKAROV V A, USMANOVA N F, SAMORODSKII P N, LOBASTOV B M, VASHLAEV A I. Mineralogical Examination of Gold Processing Plant Tailings. Journal of Mining Science. 55(1), 149-156, 2019.
- [15] A.Z.M A. Mineral Processing Laboratory Manual. 1990.
- [16] CHIRANJIB K G. Chemical Metallurgy. 2003.
- [17] ATACAMA U D. Introduccion a la Metalurgia. 1-2,
- [18] NAZARI A M, GHAREMAN A, BELL S. A comparative study of gold refractoriness by the application of QEMSCAN and diagnostic leach process. International Journal of Mineral Processing. 169(35-46), 2017.

- [19] RITCEY G M. Tailings management in gold plants. *Hydrometallurgy*. 78(1), 3-20, 2005.
- [20] BOTZ M M, MUDDER T I, AKCIL A U. "Chapter 35 - Cyanide Treatment: Physical, Chemical, and Biological Processes." in *Gold Ore Processing (Second Edition)*. vol., M. D. Adams, Ed. Eds., ed: Elsevier, pp. 619-645, 2016.
- [21] SYED S. Recovery of gold from secondary sources—A review. *Hydrometallurgy*. 115-116(30-51), 2012.
- [22] J Y C. *The Extractive metallurgy of gold*. 1991.
- [23] Chemie NRW DTS
- [24] LIU X, XU B, YANG Y, LI Q, JIANG T, HE Y. Thermodynamic analysis of ammoniacal thiosulphate leaching of gold catalysed by Co(III)/Co(II) using Eh-pH and speciation diagrams. *Hydrometallurgy*. 178(240-249), 2018.
- [25] OYARZUN ROBERTO H P L J. *Mineria Ambiental. Una introduccion a los impactos y su remediacion* 2011.
- [26] ORABY E A, EKSTEEN J J. Gold dissolution and copper suppression during leaching of copper–gold gravity concentrates in caustic soda-low free cyanide solutions. *Minerals Engineering*. 87(10-17), 2016.
- [27] MUNIVE G T, ENCINAS M A, SALAZAR CAMPOY M M, ÁLVAREZ V E, VAZQUEZ V M, CHOQUE D C. Leaching Gold and Silver with an Alternative System: Glycine and Thiosulfate from Mineral Tailings. *JOM*. 72(2), 918-924, 2020.
- [28] ADOLFO M G. Caracterizacion Geometalúrgica de Minerales Auríferos. *Invest Apl Innov*. 1(2)(91 - 95), 2007.
- [29] MELGAREJO J C, PROENZA J A, GALÍ S, LLOVET X. Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 62(1), 1-23, 2010.
- [30] DOUGLAS A S, F H J, STANLEY R C. Principios de analisis intrumental 131- 140,
- [31] DE SANTIAGO BUEY C, GARCÍA M. Análisis del peso específico y porosidad de materiales porosos mediante picnometría de He *BOLETÍN DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERÍA GEOTÉCNICA*. 156(19-27), 2008.

- [32] SPOTTISWOOD E G K Y D J. *Introducción de Procesamiento de Minerales*. 1a. Mexico. 1994.
- [33] VIZCARRA T G, WIGHTMAN E M, JOHNSON N W, MANLAPIG E V. The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphide ores. *Minerals Engineering*. 23(5), 374-382, 2010.
- [34] TANDA B C, EKSTEEN J J, ORABY E A. An investigation into the leaching behaviour of copper oxide minerals in aqueous alkaline glycine solutions. *Hydrometallurgy*. 167(153-162), 2017.
- [35] GEORGE S. "Chapter 22 Inorganic compounds." in *Infrared and Raman Characteristic Group frequencies*. vol. 22, L. John Wiley and Sons, Ed.^Eds., Third ed, p.^pp. 283 - 226, 2001.
- [36] PARI A, "Lixiviación ecológica de minerales auríferos a partir del reactivo Gold Max para la pequeña minería.", Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/9339>, 2019.
- [37] SCHLESINGER M E, KING M J, SOLE K C, DAVENPORT W G. "Chapter 19 - Chemical Metallurgy of Copper Recycling." in *Extractive Metallurgy of Copper (Fifth Edition)*. vol., M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole and W. G. Davenport, Ed.^Eds., ed Oxford: Elsevier, p.^pp. 389-396, 2011.
- [38] SCHLESINGER M E, KING M J, SOLE K C, DAVENPORT W G. "Chapter 15 - Hydrometallurgical Copper Extraction: Introduction and Leaching." in *Extractive Metallurgy of Copper (Fifth Edition)*. vol., M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole and W. G. Davenport, Ed.^Eds., ed Oxford: Elsevier, p.^pp. 281-322, 2011.
- [39] RENATO A M M, "ESTUDIO Y DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS PARA LA LIXIVIACIÓN DE CONCENTRADOS DE MINERALES DE ORO EMPLEANDO EL TIOSULFATO DE SODIO COMO AGENTE LIXIVIANTE", UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA, 2018.

[40] AZIZITORGHABEH A, WANG J, RAMSAY J A, GHAHREMAN A. A review of thiocyanate gold leaching – Chemistry, thermodynamics, kinetics and processing. Minerals Engineering. 160(106689, 2021.

[41] ASTM D854. Determinación de la Gravedad Específica de Partículas. <https://es.scribd.com/document/357451081/Norma-ASTM-D854>.