



**Ministerio de Educación Superior  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
Facultad Metalurgia y Electromecánica  
Departamento Metalurgia - Química**

# **INFLUENCIA DE PARÁMETROS TECNOLÓGICOS EN LA EXTRACCIÓN DE ORO EN LA MINA “ORO BARITA” SANTIAGO DE CUBA**

**TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERA EN  
METALURGIA Y MATERIALES.**

**Diplomante: Rachel Armela Moreno**

**Moa, 2018**





Ministerio de Educación Superior  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
Facultad de Metalurgia Electromecánica  
Departamento de Metalurgia Química

# INFLUENCIA DE PARÁMETROS TECNOLÓGICOS EN LA EXTRACCIÓN DE ORO EN LA MINA “ORO BARITA” SANTIAGO DE CUBA

**Tesis en opción al título de Ingeniería en  
Metalurgia y Materiales**

**Autora:** Rachel Armela Moreno

Firma.....

**Tutores:** Ms. C. Evangelia García Peña

Firma.....

Ing. Yosvani Naranjo Alarcón

Firma.....

Moa, 2018



## *Agradecimientos*

*Antes de todo quiero agradecerle a Dios por darme la fuerza para resistir y mantenerme en pie.*

*A mis padres Jorge y Jaquelin por creer en mí y darme su cariño, comprensión y paciencia.*

*A toda mi familia que de una forma u otra me brindaron su amor y ayuda. En especial A mi hermana, mis abuelos y mis tías.*

*A todas las personas que directa o indirectamente dieron su apoyo para que este trabajo se hiciera realidad.*

*A mis amigos en general, pero en lo particular a:*

*Aylen, Anabell, Katia, Wuendí, Las mellizas, Lizandra, Mairelys.*

*A mis tutores la Ms. C. Evangelia García Peña y el Ing. Yosvani Naranjo Alarcón por la paciencia y el apoyo. Y un especial agradecimiento a la Lic. Yudeiki Matos Sánchez.*

*A todos muchas gracias por ayudar a ser realidad mi sueño.*

## **RESUMEN**

El objetivo del trabajo consistió en evaluar la influencia del contenido de azufre, la concentración de reactivo, el tiempo de lixiviación y el tipo de muestra en la extracción de oro en la mina "Oro Barita" de Santiago de Cuba. Para ello se desarrolló la experimentación utilizando un diseño de experimento factorial completo  $2^4$ . El mineral utilizado se tomó del yacimiento de esta mina y el mismo se sometió a un proceso de trituración y homogeneización. Posteriormente se realiza un análisis del pH y se llevan las muestras a pH superior a 11 para luego someterlas al proceso de lixiviación con cianuro de sodio y análisis mediante el equipo de espectrofotometría de absorción atómica. Se obtuvo como resultados que, según el diagrama de Pareto, tanto para la muestra uno como para la dos, todos los factores tienen influencia en la extracción de oro, el cianuro de sodio y el tiempo de lixiviación influyen de forma positiva y la concentración de azufre influye de forma negativa. El mejor resultado de extracción de oro fue de 76 % en la muestra uno, para las condiciones de 1 g/L de cianuro de sodio, un tiempo de lixiviación de 8 horas y un contenido de azufre de 1,86 g/t.

## **ABSTRACT**

The objective of work involves evaluating the influence of the contents of sulphur, the concentration of reactant, the lixiviation time and the kind of sample in the gold extraction in the mine "Oro Barita" of Santiago of Cuba. Therefore, it was developed the experimentation by using a  $2^4$  complete factorial experiment design. The mineral used was taken from the deposit of this mine and it was submitted to a process of trituration and homogenization. After that, a pH's analysis was developed and the samples are taken to a pH superior to 11, for being, later on, submitted to the lixiviation process with sodium cyanide and to the analysis through the spectrophotometry of atomic absorption device. As a result, it was obtained that, according to Pareto's diagram, for the sample number one, as well as for the number two, all factors have influence in the extraction of gold: the sodium cyanide and the lixiviation time have a positive influence and, the concentration of sulphur has a negative influence. The best gold extraction result was of 76 % in the sample number one, for the conditions of 1 g/L sodium cyanide, 8 hours of lixiviation time and a sulphur content of 1.86 g/ t.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
<b>1 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 Elementos teóricos .....</b>	<b>4</b>
1.1.1 Generalidades del oro .....	4
1.1.2 Propiedades del oro .....	4
1.1.3 Aplicaciones del oro .....	5
1.2 Lixiviación .....	5
1.3 Cianuración de menas de oro .....	7
1.3.1 Factores que afectan la cianuración del oro .....	8
1.4 Proceso de extracción del oro en la mina Oro Barita .....	8
1.5 Antecedentes .....	9
Conclusiones del capítulo I.....	13
<b>2 MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Materiales y equipos empleados en la experimentación .....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Materiales utilizados en el desarrollo de la experimentación .....	15
2.1.2 Equipos utilizados durante el desarrollo de la experimentación .....	15
2.1.3 Reactivos empleados .....	18
<b>2.2 Metodologías empleadas en la experimentación .....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Metodología de toma y preparación de las muestras iniciales ...	19
2.2.2 Método factorial para el desarrollo de la experimentación .....	21
2.2.3 Métodos de análisis químico .....	23
2.2.4 Método del cloruro de bario para la determinación gravimétrica de azufre total .....	26
2.2.5 Metodología de análisis de los resultados mediante STATGRAPHICS.....	27

Conclusiones del capítulo II .....	28
<b>1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>29</b>
3.1 Resultados de los experimentos realizados.....	29
3.2 Análisis de la influencia de los diferentes parámetros en la extracción de oro utilizando el programa informático STATGRAPHICS .....	31
3.3 Resultados comparativos de las muestras uno y dos.....	33
3.4 ANÁLISIS ECONÓMICO .....	34
3.5 VALORACIÓN ECOLÓGICA DEL PROCESO .....	35
Conclusiones del capítulo III .....	36
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>37</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>39</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>40</b>

## INTRODUCCIÓN

La presencia del oro nativo, así como las características de la mineralización cuarzo – sulfurosa, sugieren la existencia de una estrecha relación genética entre ambos, probablemente con cierto desplazamiento en el tiempo.

En la mina Barita, el oro es el elemento principal y para el único que se han calculado los recursos geológicos, ya que la plata tiene contenidos muy bajos, al igual que el zinc, el plomo y el cobre. Esta zona mineralizada es pobre en oro, donde se utiliza como ley de corte 0,5 g/t y el valor medio de los recursos geológicos calculados es de 1,65 g/t. En el depósito existen dos tipos de menas de acuerdo con su grado de alteración, la primera mena y la más alterada es oxidada y la segunda, menos alterada es sulfurosa. Para la mena uno el contenido medio de oro es 1,47 g/t y éstas constituyen el 21 % de los recursos totales calculado; la mena dos con contenido medio de oro de 1,70 g/t constituye el 79 % de los recursos calculados (Luna, 2001).

Para el procesamiento de este mineral de oro – plata de baja ley que se encuentra en Barita, se utiliza la tecnología de lixiviación en pilas con cianuro de sodio, siendo este el proceso más usado en la recuperación de minerales con oro diseminado y de baja ley (Manrique Martínez, 2006).

La lixiviación en pilas tiene la ventaja de bajos costos de capital y operación comparados con los de la lixiviación en tanques agitados, sin embargo, la recuperación es más baja (Tremolada Payano, 2011). El éxito de este proceso radica en el tipo de mineral, el clima, las técnicas eficaces de aglomeración y la innovación de los operadores de las plantas de lixiviación en pilas (Dorey, Van Zly, & Overview, 1988).

Cuando el oro es lixiviado con soluciones de cianuro se forma un complejo de cianuro y oro por el efecto del oxidante. Estos complejos son muy estables y la cantidad de cianuro necesaria es mínima. En la práctica, la cantidad de cianuro

utilizada depende de la presencia de otros consumidores de este reactivo y de la necesidad de lograr niveles de lixiviación adecuados. Es por eso que, la recuperación de oro de los minerales que contienen sulfuros es poco exitosa, porque el cianuro tiende a lixiviar esos minerales en lugar del oro, además dicho cianuro es absorbido o consumido por la formación de tiocianato (SCN)<sup>-</sup> (J. Logsdon, Hagelstein, & I. Mudder, 2001).

En la empresa Oro Barita, entre 1996 y 2000 se realizaron estudios tecnológicos donde se comprobó que el yacimiento responde de forma satisfactoria al proceso de lixiviación por el método de cianuración. También se determinó que la mayor recuperación se obtiene en la zona oxidada por la disminución de los valores de los elementos cianicidas fundamentalmente el azufre. Por tanto, el aumento del contenido de azufre implica una extracción de oro más baja y un aumento en el consumo de cianuro, con lo cual se llegó a la conclusión de que para disminuir dicho consumo se debe mantener el pH alto (superior a 11), para lo que se le añade cal al mineral antes de lixiviarlo (Luna, 2001).

Actualmente en Oro Barita el mineral a procesar contiene altos contenidos de azufre y aunque se le añade cal y se aumenta el pH, el consumo de reactivo se ha elevado, al igual que el tiempo de lixiviación, mientras que la recuperación de oro sigue siendo baja. Es por esto que se necesita realizar un estudio para ver el efecto del contenido de azufre, la concentración de reactivo y el tiempo de lixiviación en la recuperación de oro en la mina Oro Barita de Santiago de Cuba, constituyendo esto la situación problemática de la investigación.

Como **Problema de la investigación** se plantea el insuficiente conocimiento sobre la influencia de los parámetros concentración de azufre, concentración de reactivo, tiempo de lixiviación y tipo de muestra en la extracción de oro en la mina Oro Barita de Santiago de Cuba.

#### **El Objeto de estudio**

La mena de oro de "Oro Barita".

#### **Objetivo general**

Evaluar la influencia del contenido de azufre, la concentración de reactivo, el tiempo de lixiviación y el tipo de muestra en la extracción de oro en la mina "Oro Barita" de Santiago de Cuba.

Como **Objetivos específicos** se proponen:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica sobre el tema de estudio.
2. Experimentar en las condiciones establecidas.
3. Analizar el efecto de la concentración de cianuro, el tiempo de lixiviación, el contenido de azufre y el tipo de muestra en la extracción del oro en la mina "Oro Barita"
4. Obtener el modelo estadístico de la influencia de los diferentes parámetros utilizando el programa STATGRAPHICS.

Como **Hipótesis** se plantea que, si se determina la influencia del contenido de azufre, la concentración del reactivo, el tiempo de lixiviación y el tipo de muestra en la extracción de oro de la mina "Oro Barita" de Santiago de Cuba, entonces se podrá determinar la eficiencia del proceso en dicha empresa.

El **Campo de acción** lo constituyen las transformaciones físicas y químicas que ocurren durante la lixiviación del oro.

# **1 MARCO TEÓRICO**

En el capítulo se exponen los elementos teóricos relacionados con el tema de investigación y los antecedentes que permiten fundamentar la realización del mismo.

## **1.1 Elementos teóricos**

### **1.1.1 Generalidades del oro**

El oro probablemente fue el primer metal que llamó la atención del hombre, ya que es uno de los pocos que se encuentran en la naturaleza en un estado relativamente puro y resiste la acción del fuego sin ennegrecerse o experimentar ningún daño. Por otra parte, como en el estado nativo suele tener una gran belleza, ello atrajo poderosamente la atención del hombre primitivo; a esta cualidad hay que añadir que, al revés de lo que aconteció con los otros metales, el oro no pierde su brillo en presencia del aire, es relativamente blando y puede trabajarse fácilmente con martillo, propiedad que permitió hacer adornos, brazaletes, anillos y collares.

### **1.1.2 Propiedades del oro**

El oro es un elemento químico de número atómico 79, que está ubicado en el grupo once de la tabla periódica. Es un metal precioso. Su símbolo es Au que proviene del latín aurum que significaría brillante amanecer (Compta D. F., 2015). Es un metal de transición blando, brillante, amarillo, pesado, maleable y dúctil que se encuentra normalmente en estado puro en forma de pepitas y depósitos aluviales.

El oro es sumamente inactivo, no reacciona con el oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, carbono y no es atacado por los ácidos minerales. Es inalterable por el aire, el calor, la humedad y la mayoría de los agentes químicos, aunque se disuelve en mezclas que contienen cloruros, bromuros o yoduro, también se

disuelve en otras mezclas oxidantes, en cianuros alcalinos y en agua regia, una mezcla de ácido nítrico y clorhídrico.

Los cloruros y los cianuros de oro son los compuestos importantes de este metal, además, es un buen conductor del calor y de la electricidad, no le afecta el aire ni la mayoría de los agentes químicos.

El oro tiene una alta resistencia a la alteración química, a la humedad y a la mayoría de los agentes corrosivos. Es un metal muy denso, con un alto punto de fusión y una alta afinidad electrónica. Sus estados de oxidación más importantes son 1+ y 3+. También se encuentra en estados de oxidación superiores, pero es menos frecuente. El ión dicianoaurato  $[\text{Au}(\text{CN})_2]$ , de gran importancia metalúrgica, se forma con facilidad cuando se hace reaccionar oro con disoluciones de cianuros en presencia de aire o agua oxigenada.

### **1.1.3 Aplicaciones del oro**

El oro es uno de los metales tradicionalmente empleados para acuñar monedas. Se utiliza en la joyería, la industria y la electrónica por su resistencia a la corrosión; se ha empleado como símbolo de pureza, valor, realeza, etc. El principal objetivo de los alquimistas era producir oro partiendo de otras sustancias como el plomo. Actualmente los países emplean reservas de oro puro en lingotes que dan cuenta de su riqueza.

El uso del oro en dispositivos electrónicos es cada vez mayor debido a su elevada conductividad eléctrica combinada con su ductilidad y maleabilidad. En medicina, se usa en forma de sales para elaborar medicamentos para tratar la artritis reumatoide y en algunos casos el cáncer (Posso & Gandarillas, 2009)

## **1.2 Lixiviación**

En diversas minas del mundo, el oro se obtiene de minerales que contienen entre 0,5 y 13,7 g de oro por tonelada de roca, de los cuales se recupera por métodos físicos y químicos. La mayoría de las minas de oro, donde el metal puede obtenerse por procesos típicos de la minería, están agotadas en la actualidad. La lixiviación con cianuro, no puede considerarse un procedimiento minero típico, sino más bien un proceso propio de la industria. El proceso de disolución de metales se denomina lixiviación (Pariagua, 2001).

La lixiviación se utiliza con el propósito de recuperar metales o especies a partir de un mineral determinado, para llevar a cabo dicho proceso es necesario que las fases sólida y líquida estén en íntimo contacto, de esta manera, la especie

de interés se solubiliza, transportándose de una fase hacia otra y se separa del material original, esta separación se complementa posteriormente a través del proceso de filtración de la solución que contiene el compuesto de interés (Posso & Gandarillas, 2009).

En el proceso de lixiviación del oro, el cianuro de sodio se disuelve en agua donde en condiciones ligeramente oxidantes, se disuelve el oro contenido en el mineral. La solución resultante que contiene oro se denomina solución cargada, luego se agrega zinc o carbón activado a dicha solución cargada para recuperar el oro, extrayéndolo de la misma. La solución residual o estéril puede recircularse para extraer más oro o enviarse a una instalación para el tratamiento de residuos.

Existen dos enfoques generales para la lixiviación del oro de un mineral mediante el cianuro: en tanques agitados y en pila (por percolación) (Pariagua, 2001).

La lixiviación en tanques agitados es el método convencional por el cual, el mineral aurífero se tritura y se muele hasta reducirlo a menos de un milímetro de diámetro. El mineral finamente molido, se lixivia directamente para disolver el oro en una solución de cianuro, el objetivo de este tipo de operación es mantener la pulpa en agitación para de esta forma acelerar el proceso de disolución y exposición de las partículas metálicas a la acción del agente disolvente, algo así como la agitación que se le suele dar al azúcar en una taza de agua con el fin de que se disuelva. (Lara, 2005).

La lixiviación en montón (Heap Leaching) es un proceso muy económico para tratar metalúrgicamente minerales con baja ley en metales preciosos, este método de tratamiento recibe un fuerte impulso a mediados de la década del 70 del siglo anterior, cuando el oro alcanza cotizaciones de hasta 600 US/onza.

En la lixiviación en pila el mineral no es sometido a movimiento, es decir que durante el proceso, el mineral o relave se mantiene quieto. En este tipo de operaciones el costo operativo suele ser bajo dado que no hay gasto de energía, además son los típicos procesos de bajos costos de capital, o sea inversión relativamente baja en función de la planta según el tonelaje (Lara, 2005).

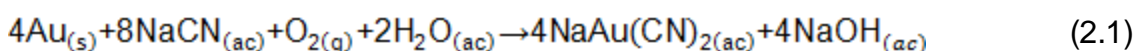
### 1.3 Cianuración de menas de oro

Para lixiviar menas que contienen oro, se requiere de un oxidante y de un agente formador de complejos. Los agentes formadores de complejos más utilizados industrialmente son las sales de cianuro, por lo cual este proceso es conocido como cianuración (Posso & Gandarillas, 2009).

El proceso de cianuración para extraer el oro y la plata a partir de sus menas, fue desarrollado por J. S. MacArthur, R. V. Forrest y W. Forrest en 1887. La disolución del oro por cianuración, es un proceso de corrosión electroquímico con reacción heterogénea, ocurrido en la interface del área anódica y catódica. La corriente anódica está limitada por la difusión del  $\text{CN}^-$  a la superficie mientras que la corriente catódica está limitada por la velocidad de difusión del oxígeno, donde la velocidad de difusión del oxígeno y del ión cianuro es directamente proporcional a la concentración de ellos en la solución.

Es decir, que la velocidad de disolución del oro es directamente proporcional a la corriente de corrosión o densidad de corriente. Se puede afirmar que la velocidad de disolución del oro puede estar controlada por: la velocidad de difusión del oxígeno por capa límite, por la velocidad de difusión del cianuro o por la pasivación de la superficie del oro.

Las reacciones que se generan dentro de la celda electroquímica en el proceso de disolución del oro por el cianuro y el oxígeno fue descrito por Habashi en 1966, quien propuso la reacción global siguiente (Tremolada Payano, 2011):



El cual procede de acuerdo al mecanismo siguiente:

Reacción anódica:



Reacción catódica:



### 1.3.1 Factores que afectan la cianuración del oro

- **Tamaño de grano del mineral** a ser tratado, que en algunos casos tiene que ser triturado hasta un tamaño económicamente factible para aumentar la superficie de contacto entre el cianuro y el mineral, y consecuentemente la velocidad de disolución.
- **Ausencia de arcillas:** En los procesos de Heap Leaching es muy importante tener un lecho de mineral que permita la percolación de la solución cianurada a través de toda la cama de mineral, (porosidad del lecho de mineral) ésta por supuesto tiene que estar exenta de material arcilloso o finos que impide la percolación natural de la solución, ocasionando en determinados momentos la formación de encharcamiento o anegamientos en la superficie de la pila (Hiskey, 1985).
- **pH:** Lo más conveniente es trabajar con valores elevados de pH (10, 11) para evitar la volatilización y generación de cianuro de hidrógeno, lo cual se favorece a valores de pH menores de 8. (Posso & Gandarillas, 2009).
- **Calidad del mineral:** Es la ley de oro total y oro soluble en una solución diluida de cianuro de sodio y los elementos contaminantes que acompañan al mineral tales como: el material carbonáceo, orgánicos, arcillas, elementos como el cobre y el azufre cuya presencia perjudica el proceso de lixiviación (Tremolada Payano, 2011).

En el caso del azufre, este elemento es perjudicial por el hecho de que cantidades tan pequeñas como 0,5 mg de azufre, retarda la disolución, al formarse una película de sulfuro – auroso insoluble sobre el oro, que lo protege de la disolución (García, 1990).

### 1.4 Proceso de extracción del oro en la mina Oro Barita

La explotación del yacimiento se realiza a cielo abierto, por bloques seleccionados de acuerdo a lo establecido por niveles, en el proyecto de explotación minero. La recuperación de oro de las menas oxidadas, se realiza con el empleo de la tecnología de lixiviación por percolación en pilas. Desde el yacimiento hasta el consumo, la materia prima mineral transita por varias operaciones tecnológicas complejas como: laboreo minero, beneficio y los procesos metalúrgicos. La sucesividad de estas operaciones o procesos no siempre es obligatoria.

## 1.5 Antecedentes

En el 2004, Salinas y Rivera realizaron un estudio para mejorar el proceso de cianuración de oro y plata mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono. Para esto se realizaron pruebas las cuales fueron: la oxidación del mineral con ozono, las pruebas de cianuración convencional sobre el mineral sulfuroso pre oxidado con ozono y por último el estudio comparativo con relación al grado de disolución de oro y plata. Este estudio dio como resultado que la oxidación con ozono de un mineral de oro y plata alteró favorablemente la estructura del mismo consiguiendo una mayor disolución de oro y plata en comparación al obtenido durante el proceso de cianuración convencional sin preoxidación. Para el desarrollo de este trabajo se contó con un mineral proporcionado por la Compañía Real del Monte y Pachuca.

En el 2011, Tremolada Payano, en su tesis de doctorado realiza la caracterización, influencia y tratamiento de arcillas en procesos de cianuración en pila, para lo cual se realiza la lixiviación en columnas a escala de laboratorio y evalúa el efecto de las arcillas en el proceso de lixiviación en pila dando como resultado, que se recupera mejor el oro en los minerales que presentan menor contenido de arcillas. Para este trabajo se utiliza el mineral proveniente de la compañía minera aurífera Santa Rosa S. A. ( Comarsa), que se encuentra en la Sierra Norte del Perú.

Fernández Compta en el 2015, desarrolló un trabajo acerca de la influencia de la lixiviación en la recuperación de oro en la Mina Oro Barita de Santiago de Cuba, para lo cual se tomaron muestras de los licores de las picinas de lixiviación, de la entrada y salida de los filtros dando como resultados que el factor que más afecta el proceso es la calidad del mineral que presenta altos contenidos de cobre y elementos cianicidas que afectan considerablemente el proceso, causando un sobreconsumo de cianuro.

Posso y Gandarillas (2009) estudiaron la recuperación de oro de soluciones post lixiviación con cianuro de sodio mediante cementación con cinc y adsorción en carbón activado, donde se investiga la cinética y la capacidad de recuperación de oro disuelto en soluciones de cianuro, proveniente de una mena específica, considerando los métodos de cementación con cinc y adsorción en carbón activado. Para la experimentación se realizan estudios a escala de laboratorio en procesos por lotes utilizando una solución de oro y

empleando virutas de cinc y carbón activado granular. Dando como resultado que para la solución utilizada, el cinc, en comparación con el carbón activado, ofrece un mejor comportamiento en cuanto a la eficiencia de recuperación y simplicidad de operación, aunque su estabilidad a largo plazo es discutible.

En Rojas Garrido (2010), se analiza el efecto de arcillas y finos en el proceso de lixiviación de Radomiro Tomic, donde se relacionan las características del mineral, para identificar el efecto de la presencia de arcillas y finos en el mineral del proceso de lixiviación. Para lograrlo se identifican la presencia de arcillas, la granulometría, leyes de cobre total y cobre soluble, consumo de ácido, conductividad hidráulica y recuperación de cobre en diferentes mezclas minerales. Obteniéndose como resultado que no se debe ingresar una mezcla de 100 % de sulfuro a las pilas para poder alcanzar una mayor recuperación, la granulometría debe ser lo más uniforme posible y la solución lixiviante rinden más al atacar óxidos superiores o a las mezclas que presentan esta unidad.

En el 2008 Hidalgo y Ledesma evalúan la recuperación del oro y plata a partir de minerales sulfurados en una matriz de cuarzo. En el mineral proveniente de la mina Koricoqui S. A. C. se observa la presencia de esfalerita, calcopirita, pirita, electrum, marcasita, arsenopirita, goetita, calcosita, tetraedrita y ganga. Este mineral es sometido a varias pruebas de flotación obteniéndose los mejores resultados en la segunda etapa incrementándose en 30 y 5 % para el Au y Ag respectivamente.

En el 2001, Vargas Paniagua realizó un estudio ambiental y la optimización en la extracción del oro utilizando el cianuro, para lo cual se realizaron pruebas mediante lixiviación por agitación y por montón, dando como resultado que en la lixiviación en montón se logra extraer el 50 % de oro en la segunda semana de tratamiento y casi todo el consumo de energía se produce en la etapa de trituración y aglomeración.

Ortiz y Jara (2004) estudiaron la lixiviación en montón para mejorar el proceso, donde se controlan las diferentes variables que afectan al proceso de aglomeración como son el porcentaje de humedad y el tiempo de asentamiento obteniéndose que para minerales que no presentan contenidos importantes de finos, la lixiviación en montón se puede realizar sin aglomeración previa y los mejores aglomerantes son la cal y el cemento portland.

En el 2014 López Roselló estudió el efecto de la densidad de pulpa y de la concentración de cianuro de sodio en la lixiviación por agitación para la recuperación de oro en la planta de beneficio Doble D – Arequipa. En este trabajo se realizan pruebas de cianuración por agitación al conglomerado de minerales obteniéndose como resultado que para el proceso de lixiviación por agitación la densidad de la pulpa tiene mayor influencia que la concentración de cianuro de sodio en la recuperación del oro.

Anticoi Sudzuki en el 2011 analizó el procesamiento sostenible del oro en San Cristóbal al sur del Perú con el objetivo de caracterizar los materiales de este yacimiento, estudiar el procesamiento del mineral, evaluar su rendimiento y proponer mejoras y probar mediante ensayos de laboratorio alguna de las técnicas propuestas, con tal de verificar la idoneidad de estos métodos con respecto a los materiales encontrados. Para lo cual, se realizó un muestreo de los materiales que intervienen en estos procesos, luego se realizaron ensayos granulométricos y análisis químicos de las muestras obtenidas. Donde, después de estudiar diversos métodos para mejorar los usados actualmente, se obtiene como resultado que, el método de cloración resulta más efectivo para lixiviar otros elementos como el cobre que para recuperar oro, por lo cual se recomienda una reestructuración del actual sistema de procesamiento utilizado para conjugar la eficiencia de la recuperación del oro, neutralización de residuos generados y un mayor lucro de la actividad. Sin embargo, esta reestructuración implica también un cambio en la estructura organizativa del poblado, lo que llevaría también a una reforma social importante.

En el 2009 Rivera Briceño estudió la recuperación de oro refractario aplicando lixiviación con tiosulfato y resina en pulpa en la UEA Condestable con el objetivo de recuperar adecuadamente el oro a partir de un mineral refractario empleando el tiosulfato como agente lixivante en un proceso de resina en pulpa. Para esto se realiza un análisis teórico del proceso de lixiviación empleando el tiosulfato como agente disolvente y la aplicación subsiguiente del proceso de resina en pulpa para la recuperación hidrometalúrgica del oro. Compara el método convencional del carbón en lixiviación empleando cianuro y el de resina en pulpa empleando tiosulfato. Estudiar el efecto de la presencia de otros metales como el cobre en el proceso propuesto. Obteniéndose como resultado que la lixiviación con thiosulfato seguido por la extracción de oro de la

pulpa con resina para tratar minerales carbonáceos pregrobbing, probaron ser fácilmente tratados con tiosulfato bajo condiciones moderadas. Donde el oro se lixivia rápidamente como el complejo tiosulfato de oro, el cual, debido a su afinidad por el carbón grafitico, no sufre el fenómeno del pregrobbing que es un aspecto de estos minerales en circuitos de lixiviación con cianuro. Las condiciones moderadas de lixiviación son también compatibles con un proceso de recuperación de oro incluyendo la recuperación directa de la pulpa de lixiviación por adsorción en resinas de intercambio aniónico en base fuerte. Finalmente, un proceso nuevo de elusión/regeneración fue desarrollado para extraer con solventes el oro desde la resina, recuperar el oro del eluido y restituir la resina para reciclar al circuito de adsorción.

En el 2015 Castañeda Mendoza y de la Cruz Castillo, estudiaron el aumento de la recuperación de oro en la compañía refinadora del pacifico S.A.C. Con el objetivo de proponer como innovación al proceso la utilización del método de carbón en pulpa, para aumentar el porcentaje de recuperación de oro, para lo cual se determina que, existe diferencia significativa en el nivel del porcentaje de oro en el proceso normal y el proceso propuesto. Se obtuvo como resultado, que el mineral sulfuroso proveniente de la mina, en condiciones normales y con los parámetros actuales del proceso tiene un consumo en exceso de reactivos y una recuperación mínima del 70 %. Esto nos indica que esta planta no está preparada ni diseñada tanto en molienda como en tiempo de agitación, para tratar minerales sulfurosos.

Figueredo Frías; et al en el 2010, elaboró un proyecto para el CIPPIMM donde fue utilizada en Cuba por primera vez la tecnología de lavado ácido en la empresa Oro Descanso ubicada en placetas provincia de Villa Clara, Cuba, donde se realiza el proyecto. Este proceso se utilizaba posterior a la lixiviación y adsorción del oro en los tanques agitadores mediante el método de carbón en lixiviación o método CIL. El proceso de lavado ácido del carbón se realiza para eliminar las sales de sulfato y carbonato de calcio que se depositan sobre la superficie del carbón ocupando sus sitios activos disponibles, limitando así su capacidad y cinética de adsorción (eficiencia de carga) en cada ciclo.

En el 2014 el ingeniero químico Junior Alfredo Lapo Alverca realiza un estudio utilizando reactivos químicos del carbón activado del tipo calgón americano 6 x

12 utilizando ácido nítrico, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio con el fin de realizar lavados ácidos al carbón activado para la eliminación de cianidas que actúan como impurezas, interrumpiendo la adsorción del oro. Los resultados que se obtuvieron de la investigación, la cual tenía como objetivo principal reactivar químicamente el carbón activado del tipo calgón americano 6 x 12, utilizado en la sociedad minea promine para la adsorción de metales preciosos, les indicaron que tenían una mejor reactivación química con el uso del ácido clorhídrico a una concentración del 5 %, un tiempo de agitación de 3 horas, se observó también que al incrementar al doble el tiempo de agitación y la concentración aumenta en lo mínimo la reactivación química del material carbonáceo, aumentado así el costo de este proceso. Los demás resultados aplicados con los mismos parámetros los ácidos nítricos, sulfúrico y bases con hidróxido de sodio no dan una buena reactivación química.

En el 2001 Luna Medina realizó un estudio, donde se tomaron muestras de la zona oxidada y de la sulfurosa del yacimiento. Estas muestras se prepararon utilizando un sistema de trituración, homogeneización y cuarteo del mineral para el posterior análisis químico, todas las muestras fueron procesadas en la misma planta de beneficio, variando solamente las características del mineral. Se obtuvo como resultado que la recuperación de oro varió entre 69,14 y 83,07 % en las muestras de la zona oxidada, mientras que en la zona sulfurosa la recuperación de oro fue de un 60 %. Por lo que se puede decir que, la mayor recuperación se presenta en la zona oxidada por la disminución de los valores de los elementos cianidas fundamentalmente el azufre. Por tanto, el aumento del contenido de azufre implica una extracción más baja y un aumento del consumo de cianuro.

### **Conclusiones del capítulo I**

- Se realizó una revisión bibliográfica de los aspectos teóricos fundamentales relacionados con la lixiviación de oro, empleando el cianuro como reactivo lixivante y el tiempo como uno de los elementos que influye en dicho proceso.
- Para la lixiviación del oro con cianuro, hay dos métodos generales, la lixiviación en pila y la lixiviación en tanque de agitación, siendo la

primera la más utilizada para tratar minerales de baja ley de oro, por ser el costo operativo relativamente bajo.

- Aunque existen varios factores que afectan el proceso de cianuración del oro, uno de los que más impacto tiene es la presencia de elementos cianicidas como el azufre, ya que este elemento retarda la disolución del oro al formarse una película de sulfuro – auroso insoluble sobre el oro que lo protege e impide su lixiviación.

## **2 MATERIALES Y MÉTODOS**

En toda investigación se requiere de la utilización de un instrumento metodológico para la obtención de resultados confiables. Para la certificación de los resultados es necesario seleccionar correctamente los métodos y materiales a emplear es por eso que, se describen los métodos, metodologías y materiales empleados en la evaluación del contenido de azufre, la concentración de reactivo y el tiempo de lixiviación en la extracción del oro en la mina “Oro Barita” de Santiago de Cuba.

### **2.1 Materiales y equipos empleados en la experimentación**

En este acápite se describen brevemente los materiales, equipos y reactivos que se emplean durante el desarrollo de la investigación.

#### **2.1.1 Materiales utilizados en el desarrollo de la experimentación**

Los materiales a utilizar durante la experimentación son:

1. Beaker de 250 mL.
2. Vidrio reloj 80 mm.
3. Volumétrico de 100 mL.
4. Varilla de vidrio.
5. Vaso precipitado de 5mL.
6. Papel de filtro.
7. Bolso de nylon.
8. Cuarteador metálico en forma de cruceta.
9. Embudo de vástago fino.

#### **2.1.2 Equipos utilizados durante el desarrollo de la experimentación**

El medidor de pH: ISE Benchtop. ORION 4 STAR EE.UU, fabricante: Thermo Fisher Scientific Inc. 2001 SN B 18329 con soluciones patrones Buffer. Este equipo se utiliza para la medición del pH de la pulpa de mineral inicial y se presenta en la figura 2.1.



Figura 2.1 pH metro

La Balanza Analítica Digital Sartorius ACCULAB ATL-224-1 se utiliza para el pesaje de los reactivos cal y cianuro, la misma se presenta en la figura 2.2.



Figura 2.2 Balanza analítica

El equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica: VARIAN AA 240 2001, Atomic Absorption Spectrometers, Pinted in Australia que se presenta en la figura 2.3; utiliza lámparas de cátodo hueco LCH con corriente de la lámpara de 4,0 mA para la determinación de los diferentes elementos, el flujo de aire es de 3,50 L/min y el flujo de acetileno de 1,50 L/min. En la tabla 2.1 se muestran los parámetros del espectrofotómetro para el oro y el cobre.

Tabla 2.1 Parámetros del espectrofotómetro de absorción atómica para el oro y el cobre.

	oro	cobre
Longitud de onda ( $\lambda$ )	242,8 nm	324,8 nm
Soluciones Standar	Blanco 0;0,2;0,5;0,75;1,0 y 2,0 (ppm)	Blanco 0;1,0;3,0 y 5,0 ppm



Figura 2.3 Espectrofotómetro de Absorción Atómica CONTRAA 240

Los agitadores que se presentan en la figura 2.4 se utilizan para la mezcla del mineral sólido y la solución de cianuro permitiendo la lixiviación del mineral, este equipo tiene una velocidad de rotación que va desde 200 a 2000 rpm.



Figura 2.4 Agitadores

En la figura 2.5 se muestra el reactor donde se realiza la experimentación.

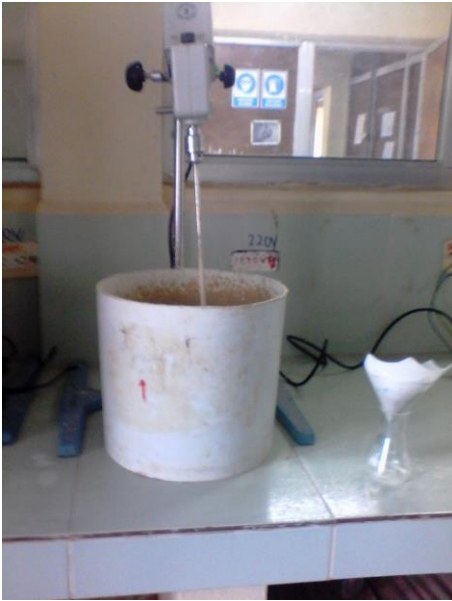


Figura 2.5 Instalación empleada en la experimentación

La trituradora de mandíbula que se muestra en la figura 2.6 se utiliza para disminuir la granulometría de las muestras.



Figura 2.6 Trituradora de mandíbula

### **2.1.3 Reactivos empleados**

Los reactivos utilizados durante el desarrollo de los experimentos son los siguientes:

- Cianuro de sodio sólido con concentraciones de 0,2 y 1,0 g/L.
- Hidrato de cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).
- Cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ).
- Cromato de potasio ( $\text{KCrO}_4$ ).
- Nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ).

## 2.2 Metodologías empleadas en la experimentación

Se muestran las metodologías a seguir para la realización de los experimentos.

### 2.2.1 Metodología de toma y preparación de las muestras iniciales

Para la toma de la muestra se debe tener en cuenta que la misma debe reflejar adecuadamente las propiedades que interesan del lote del que provienen, es por eso que la muestra final debe ser similar a la población global a analizar, poseer sus características esenciales y ser representativa (Batista, 2016).

En la figura 2.7 se muestra el esquema utilizado en la investigación.

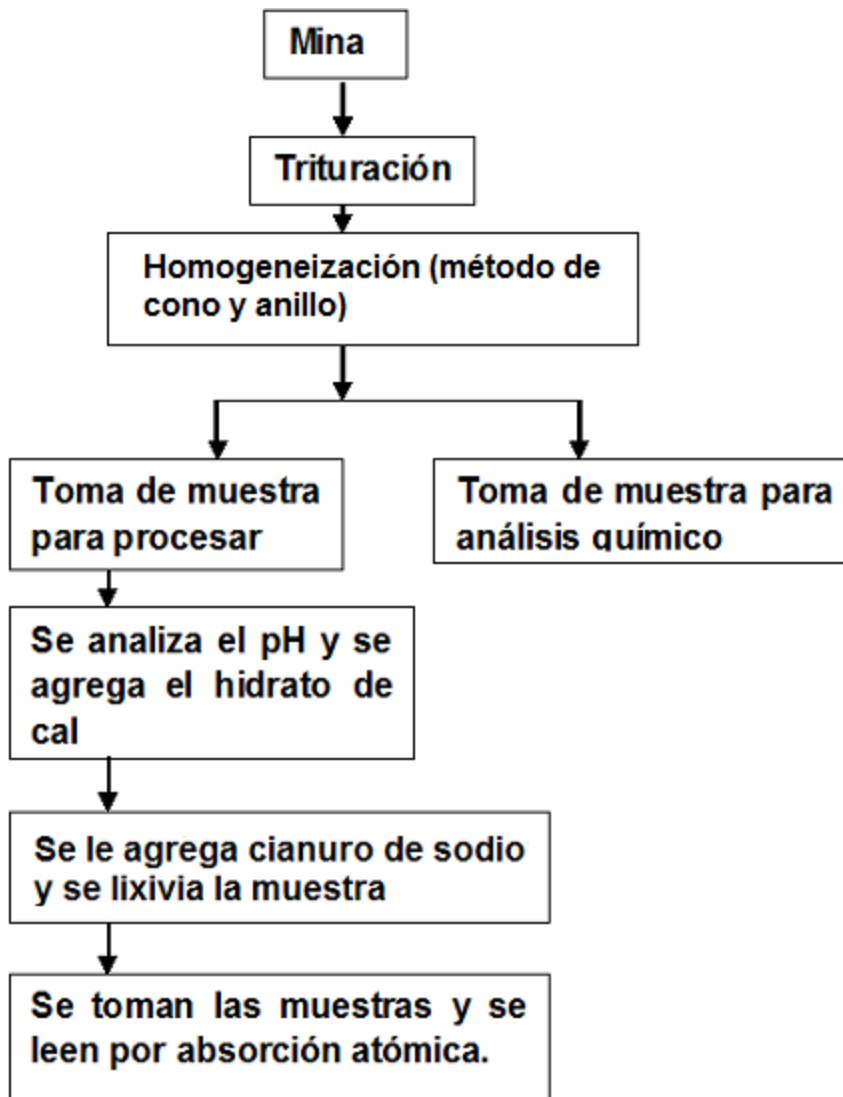


Figura 2.7 Esquema de trabajo a utilizar en la toma y preparación de las muestras y en el análisis químico

#### 2.2.1.1 Características de la materia prima

Para la experimentación se utiliza el mineral de la mina "Oro Barita", específicamente el correspondiente a menas sulfurosas o mena primaria del

yacimiento. En estas menas la roca es arcillosa cuya composición varía de ácida a media con coloración gris blancosa, tonalidades amarillentas y presencia de abundantes sulfuros (calcopirita, pirita y esfalerita). La concentración de los principales metales presente en las muestras iniciales, se muestran en la tabla 2.2. Donde, el valor del contenido de oro en la muestra uno no difiere demasiado del de la muestra dos, no así para el contenido de los otros metales.

Tabla 2.2 Contenido de los principales metales en las muestras, en g/t.

<b>Muestras</b>	<b>Au</b>	<b>Ag</b>	<b>S</b>
Muestra 1	1,28	1,77	1,86
Muestra 2	1,27	2,31	3,34

### **2.2.1.2 Toma y preparación de las muestras**

Las muestras se tomaron con una retroexcavadora marca Hyundai realizándose una trinchera en dirección Norte – Sur en dicha trinchera se realizó el muestreo de forma puntual y fragmentada. El mineral rocoso se recoge cada 3 a 5 cm y se depositan en un bolso de nylon. Posteriormente estas muestras pasan al proceso de reducción de tamaño para lo cual se utiliza una trituradora de mandíbula llevando el mineral a una fracción de – 6 a – 12 mm.

Una vez obtenida la granulometría se procede a la homogeneización del mineral, para lo cual se colocan las muestras sobre una superficie plana, dura y limpia donde no puede haber pérdidas de mineral ni contaminación con materias extrañas. El mineral se homogeniza y se hace un cono.

Luego, por medio de la pala, se ejerce presión sobre el vértice de la pila hasta obtener un espesor y un diámetro uniforme. El diámetro obtenido deberá ser aproximadamente de cuatro a ocho veces el espesor del material, luego se divide la pila aplanada en cuatro partes iguales. Se separan y guardan como reserva dos de las partes diagonalmente opuestas. Se mezcla y homogeniza el material restante y se cuarteo nuevamente y dos de las partes diagonalmente opuestas se guardan para análisis químico del mineral inicial. Se realiza la

mezcla, cuarteo y separación del mineral varias veces hasta reducir la muestra a 1 kg de mineral, el cual se deposita en nylon y se lleva al laboratorio de la planta química para el posterior análisis.

En la figura 2.8 se muestra el procedimiento de cuarteo manual realizado al mineral sulfuroso.



Figura 2.8 Proceso de homogenización y cuarteo de las muestras

### **2.2.2 Método factorial para el desarrollo de la experimentación**

En el campo de la industria es frecuente hacer experimentos o pruebas con la intención de resolver un problema o comprobar una idea. Sin embargo, es común que estas pruebas o experimentos se hagan sobre la marcha, con base en el ensayo y error, apelando a la experiencia y a la intuición, en lugar de seguir un plan experimental adecuado que garantice una buena respuesta a las interrogantes planteadas. Aunque se logran mejoras utilizando este método hay situaciones de cierta complejidad, donde es mejor proceder de forma que se obtengan respuestas a las interrogantes planteadas en un periodo corto de tiempo y utilizando pocos recursos. El diseño de experimentos es precisamente la forma más eficaz de hacer pruebas (Gutierrez Pulido & De La Vara Salazar, 2008).

En este trabajo la experimentación se realiza utilizando el método factorial completo. El mismo presupone la combinación de todos los factores con un número de experimentos igual a  $N = O^K$  donde:

O: número de niveles

K: número de factores

N: número de ensayos

Durante la investigación se estudiaron tres factores y dos niveles por lo que la cantidad de ensayos sería  $N = 2^4 = 16$ , donde los factores a estudiar son  $X_1$ : concentración de cianuro de sodio,  $X_2$ : Concentración de azufre,  $X_3$ : tiempo de lixiviación y  $X_4$ : tipo de muestra. Los niveles serían, para cada uno de estos

factores un mínimo y un máximo. Donde, para  $X_1$ , el máximo sería 1 g/L y el mínimo 0,2 g/L; para  $X_2$ , el máximo sería de 3,34 g/t y el mínimo 1,86 g/t; para  $X_3$ : el máximo sería 8 horas y el mínimo 2 horas, para  $X_4$ : el máximo sería muestra 2 y el mínimo muestra 1. A partir de esto se elabora la matriz codificada que se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Matriz de experimentación codificada

<b>Ensayos</b>	<b><math>X_1</math></b>	<b><math>X_2</math></b>	<b><math>X_3</math></b>	<b><math>X_4</math></b>
1	+	+	+	-
2	-	+	+	+
3	+	-	+	-
4	-	-	+	+
5	+	+	-	-
6	-	+	-	+
7	+	-	-	-
8	+	+	-	+
9	-	+	+	-
10	+	-	+	+
11	-	-	+	-
12	+	+	+	+
13	-	+	-	-
14	+	-	-	+
15	-	-	-	-
16	+	-	-	+

La matriz descodificada, teniendo en cuenta los valores predeterminados para los niveles y factores se presenta en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Matriz descodificada

Experimentos	Concentración de cianuro de sodio, (g/L)	Concentración de azufre en el mineral inicial (g/t)	Tiempo de lixiviación (h)	Tipo de muestra
1	1	3,34	8	2
2	0,2	3,34	8	2
3	1	1,86	8	1
4	0,2	1,86	8	1
5	1	3,34	2	2
6	0,2	3,34	2	2
7	1	1,86	2	1
8	1	3,34	2	2
9	0,2	3,34	8	2
10	1	1,86	8	1
11	0,2	1,86	8	1
12	1	3,34	8	2
13	0,2	3,34	2	2
14	1	1,86	2	1
15	1	1,86	2	1
16	0,2	1,86	2	1

### 2.2.3 Métodos de análisis químico

La muestra con peso de 1 kg y granulometría de -12 a – 6 mm se deposita en una cubeta para la lixiviación del mineral utilizando los agitadores mecánicos. Primero se realiza la medición del pH inicial al mineral, es por esto que a continuación se describe brevemente la metodología a seguir para la determinación del pH utilizando el pH metro.

#### 2.2.4.1 Metodología para la determinación del pH.

El pH es el término que indica las concentraciones de iones de hidrógeno en una disolución, se trata de una medida de la acidez o de la alcalinidad, es menos logaritmo de la concentración de los iones de hidrógeno H<sup>+</sup>.

$$\text{pH} = -\log (\text{H}^+)$$

Donde (H<sup>+</sup>) es la concentración de hidrógeno en mol/L. El pH de una disolución puede medirse mediante una valoración que consiste en la neutralización del ácido o base con una cantidad determinada de base o ácido de concentración conocida en presencia de un indicador. La escala 0 – 7 ácido y 7 – 14 básico (Compta D. F., 2015).

Para la determinación del pH utilizando el pH metro se debe tener en cuenta el siguiente procedimiento:

- 1- Se conecta el equipo a la corriente revisando que esta coincida con la señalizada para su trabajo y luego se enciende. Cuando estabilice la pantalla si se encuentra parpadeando el icono pH y se muestran los puntos de la curva, es que el equipo está listo para efectuar mediciones de pH.
- 2- Se preparan las muestras a medir, lavar el electrodo y secarlo suavemente e introducirlo en la muestra, el equipo dará el resultado de pH, una vez que se estabilice el icono de pH que se muestra en la pantalla.
- 3- Una vez terminada la lectura de las muestras se lava y se seca cuidadosamente el electrodo y se introduce en agua destilada para próximas lecturas (Matos Sánchez, 2016).

Con este equipo se determina el pH de la muestra inicial que da ácida y se repite la lectura una vez se haya añadido los 12 g de hidrato de cal. En esta segunda lectura el pH debe ser mayor que 11.

#### **2.2.4.2 Metodología de toma de muestra en la lixiviación**

Cada dos horas se toman las muestras utilizando una jeringuilla y se filtra esta solución para lo cual, la solución se deposita en un embudo que tenga un papel de filtro y este sobre un erlenmeyer para que la solución se filtre. Este licor es enviado a análisis químico al laboratorio.

#### **2.2.4.3 Metodología para el uso del equipo de espectrofotometría de absorción atómica**

La producción de átomos libres a partir de un compuesto requiere una cierta cantidad de energía. El compuesto se evapora y seguidamente se disocia en una extensión determinada, produciendo los elementos constituyentes en el estado gaseoso. La energía radiante de una longitud de onda característica

absorbida por un átomo en su estado base para ser excitado a un nivel energético superior, es proporcional a la concentración del elemento en la muestra (Compta D. F., 2015).

Para realizar la lectura de las muestras mediante el equipo de absorción atómico es necesario tener en cuenta las condiciones instrumentales del método donde el flujo de aire en el compresor debe ser de 3,40 a 4,08 atm y comprobado en el flujómetro de la izquierda en el equipo, el rotámetro por encima de la línea roja. El flujo de acetileno está regulado en el manómetro izquierdo del balón de acetileno que debe estar en el rango de 0,65 a 0,86 atm y que se fija en 0,72 atm. El manómetro ubicado a la derecha del balón de acetileno marca la cantidad de producto que queda en el mismo. No se puede trabajar con un valor inferior a 5,44 atm. El botón negro ( $C_2H_2$ ) que está ubicado en el medidor de flujo del equipo tiene que permanecer cerrado. Abrir cuando se vaya a encender la llama y luego cerrar una vez apagada la llama. La velocidad de aspiración es mayor de 5 mL en 1 minuto y la longitud de onda depende del método editado. Una vez que estos parámetros estén controlados se procede como se muestra a continuación:

1. Se abre el balón de acetileno y se verifica la cantidad de acetileno en tanque teniendo que ser mayor que 5,44 atm para poder comenzar el trabajo, regular el manómetro de la izquierda hasta que marque 0,72 atm.
2. Se conecta el compresor a la corriente y se enciende. Se conecta el equipo y el monitor.
3. Se preparan las curvas a utilizar, los patrones y las muestras que serán leídas y acomodar en área de lectura y llenar con agua destilada, limpia y libre de partículas el recipiente donde se sumerge el capilar.
4. Una vez que el monitor está encendido se va a la hoja de trabajo y se etiquetan las muestras a leer. Luego se revisa en la puerta de las lámparas que la manigueta esté ubicada en dirección al elemento seleccionado en el método. Para el oro se debe mantener en la posición 3 y para el cobre en la posición 1.
5. Se enciende la llama y luego se procede a optimizar el alineamiento de lámpara de cátodo hueco y de la señal analítica para el elemento a ser

analizado. Luego se optimiza la señal, se da clip en cero instrumentales hasta que este marque cero y se da clip en empezar.

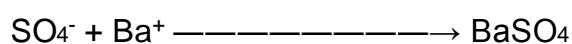
6. Una vez realizada la optimización se procede a calibrar la curva para lo cual se utilizan las sustancias patrón que permite introducir cada uno de los puntos de la curva, según el producto y el elemento a leer. Luego el equipo comenzará a leer la muestra indicada una vez finalizada la lectura se le da en OK. Se deja el equipo encendido con el capilar dentro del agua destilada unos 5 minutos, hasta que se limpie el sistema.
7. Se guardan los resultados obtenidos. Después de limpiar el sistema se apaga la llama, se cierra el balón del acetileno a la derecha y se apaga la extracción (Matos Sánchez, 2016).

#### **2.2.4 Método del cloruro de bario para la determinación gravimétrica de azufre total**

La porción de ensayo se trata con ácido clorhídrico y nítrico, los compuestos de azufre son oxidados por la acción el cloruro de potasio (KClO<sub>3</sub>) y el ácido nítrico.

El azufre oxidado a sulfato es precipitado cuantitativamente por la acción del cloruro de bario (BaCl<sub>2</sub>), el precipitado es calcinado y se determina gravimétricamente.

La reacción fundamental es:



Se toma una alícuota de 10 mL de licor, previamente filtrada la muestra de ensayo y transfírela a un vaso de precipitado de 600 mL; añada  $\pm$  2g de KClO<sub>3</sub> sólido y 30 mL de ácido nítrico. Cubra con un vidrio reloj y caliente moderadamente sobre la plancha hasta total disolución de la muestra, lleve hasta sequedad.

Retire del calor y deje que la muestra se enfríe hasta temperatura ambiente. Adicione 25 mL de ácido clorhídrico, lleve al calor y evapore nuevamente hasta sequedad, retire del calor y enfríe hasta temperatura ambiente. Añada 25 mL de ácido clorhídrico y lleve cuidadosamente a sequedad.

Retire del calor y enfríe, añada 7 mL de ácido clorhídrico y 40 mL de agua, caliente suavemente hasta ebullición, permita que se enfríe y filtre a través de un papel de densidad media recibiendo el filtrado en un vaso de precipitados de

600 mL de capacidad. Lave el papel de filtro no menos de diez veces con un chorro fino de agua caliente.

Aumente el volumen del filtrado de 300 a 350 mL con agua. Caliente el filtrado hasta aproximadamente 80 °C, añada 25 mL de solución de cloruro de bario. Después de precipitar deje la solución en reposo a una temperatura de 70 °C + 10 °C durante 3 horas.

Filtre la solución a través de un papel de filtro denso sin ceniza, el cual deberá contener una pequeña cantidad de pulpa preparada del mismo papel. Transfiera cuantitativamente el precipitado con el auxilio de un chorro fino de agua y un policia.

Lave el precipitado con un chorro fino de agua caliente hasta que el efluente arroje resultado negativo a la prueba de cloruros con solución de nitrato de plata. Transfiera el papel con el precipitado a un crisol de porcelana previamente tarado. Lleve el crisol a un horno mufla y permita la carbonización del papel sin llama ( $\pm 400$  °C), incinere a  $825 \pm 25$  °C durante 1 hora, transfiera a una desecadora, enfríe y determine la masa (Pérez, 2017).

### **2.2.5 Metodología de análisis de los resultados mediante STATGRAPHICS**

Es una potente herramienta de análisis de datos que combina una amplia gama de procedimientos analíticos con extraordinarios gráficos interactivos para proporcionar un entorno integrado de análisis que puede ser aplicado en cada una de las fases de un proyecto, desde los protocolos de gestión Six Sigma hasta los procesos de control de calidad.

Incluye funciones estadísticas avanzadas, capaces de proporcionar rigurosos análisis propios de los profesionales estadísticos más exigentes y experimentados, y al mismo tiempo ofrece una interface muy intuitiva, con funciones de asistencia exclusivas, de tal forma que proporciona la simplicidad suficiente para permitir a un analista inexperto realizar procedimientos complejos (<https://www.statgraphics.net/>).

## **Conclusiones del capítulo II**

- Se muestran los principales materiales, reactivos, equipamientos y metodologías utilizados en la investigación.
- Las muestras utilizadas en la experimentación, tomadas en la mina Oro Barita se consideran representativas del yacimiento respecto al volumen total.
- Para la determinación de los diferentes elementos que se lixivian junto con el oro se utiliza la técnica de absorción atómica.
- Las técnicas analíticas utilizadas para la caracterización físico – químicas garantizan la confiabilidad de los resultados.

# 1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el capítulo se analizan los resultados experimentales, considerando el impacto económico y medioambiental del proceso minero en la región y en la economía del país.

## 3.1 Resultados de los experimentos realizados

En la tabla 3.1 se muestra los resultados de extracción de oro en función de las condiciones de experimentación.

Tabla 3.1 Resultados de la extracción de oro en las condiciones de experimentación

Muestra	Tiempo (horas)	Cont. (S)(g/t)	Conc. (CN)(g/L)	Extracción de oro (%)
1	8	1,86	0,2	36
1	2	1,86	0,2	16
2	8	3,34	0,2	25
2	8	3,34	1	29
2	2	3,34	1	17
1	8	1,86	1	68
1	2	1,86	1	28
2	2	3,34	0,2	7
2	2	3,34	1	15
1	2	1,86	1	48
2	2	3,34	0,2	6
1	8	1,86	0,2	35
1	2	1,86	0,2	15
2	8	3,34	0,2	20
2	8	3,34	1	33
1	8	1,86	1	76

Se observa que la mayor extracción de oro es de 76 %, la cual se obtiene con la muestra uno para las condiciones de 1 g/L de cianuro de sodio y un tiempo de lixiviación de 8 horas y un contenido de azufre de 1,86 g/t.

En la tabla 3.2 y 3.3 se muestran los valores promedios de oro, plata, cobre y azufre obtenidos durante la lixiviación de la muestra uno y la muestra dos respectivamente.

Tabla 3.2 Resultados de la lixiviación de la muestra uno

<b>c(CN)(g/L)</b>	<b>Tiempo de lixiviación (h)</b>	<b>c(Au)(g/L)</b>	<b>c(Ag)(g/L)</b>	<b>c(Cu)(g/L)</b>	<b>c(S)(g/L)</b>
0,2	2	0,005119	0,007492	0,289	1,367
0,2	8	0,008731	0,004747	0,745	1,010
1	2	0,005363	0,004571	0,399	0,846
1	8	0,009704	0,006094	0,606	0,330

Tabla 3.3 Resultados de la lixiviación de la muestra dos

<b>c(CN)(g/L)</b>	<b>Tiempo de lixiviación (h)</b>	<b>c(Au)(g/L)</b>	<b>c(Ag)(g/L)</b>	<b>c(Cu)(g/L)</b>	<b>c(S)(g/L)</b>
0,2	2	0,00275	0,00595	0,221	2,582
0,2	8	0,00533	0,00433	0,333	1,163
1	2	0,00399	0,00386	0,218	1,778
1	8	0,00710	0,00396	0,280	1,073

Durante la lixiviación de la muestra uno, el mayor promedio de concentración de oro obtenido es de 0,009704 g/L y el menor promedio de concentración de azufre es de 0,330 g/L, en las condiciones de 1 g/L de cianuro de sodio y tiempo de lixiviación de 8 horas. Mientras que en la muestra dos la mayor concentración promedio de oro obtenido es de 0,00710 y la menor concentración promedio de azufre es de 1,073 g/L, a las 8 horas de lixiviación y con 1 g/L de cianuro de sodio.

### 3.2 Análisis de la influencia de los diferentes parámetros en la extracción de oro utilizando el programa informático STATGRAPHICS

En la figura 3.1 muestra el efecto de las diferentes variables, así como las combinaciones de las mismas en la extracción de oro.

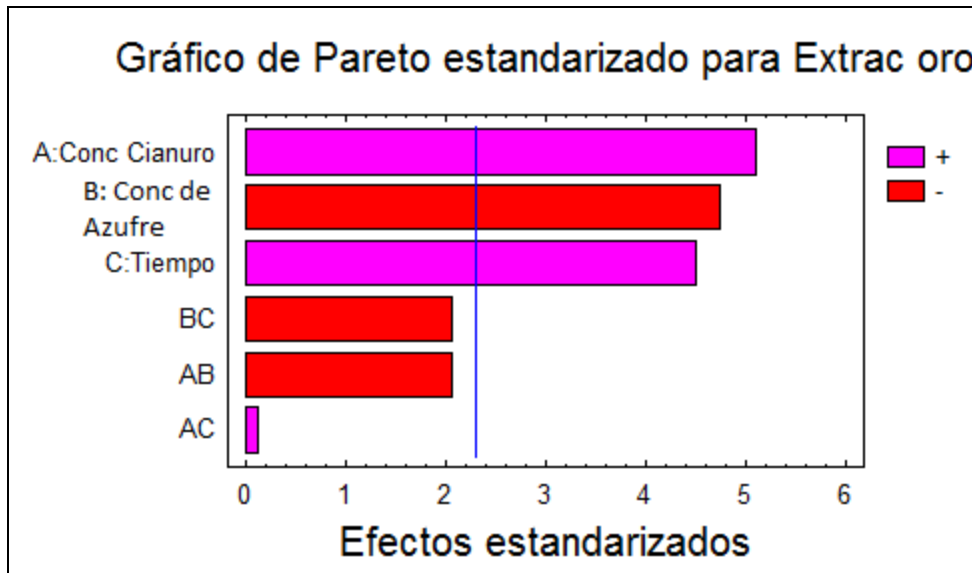


Figura 3.1 Gráfico de Pareto estandarizado para la extracción de oro

Según se puede observar, tanto para la muestra uno como para la dos, las variables independientes concentración de cianuro y tiempo de lixiviación tienen influencia positiva en la extracción de oro, mientras que la concentración de azufre tiene influencia, pero de forma negativa. También se puede ver que las interacciones entre las diferentes variables no tienen influencia en el proceso de extracción de oro.

En la figura 3.2 se muestran los efectos principales para la extracción de oro.

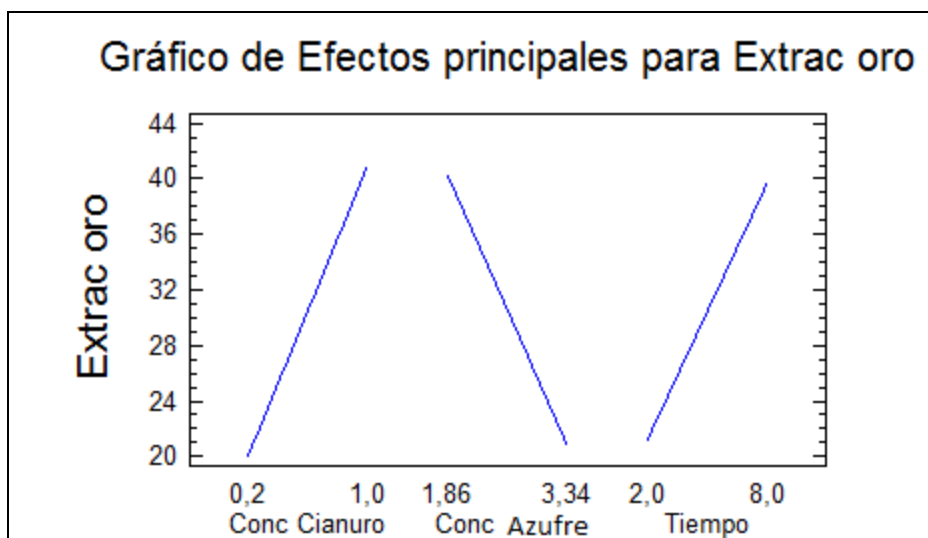


Figura 3.2 Comportamiento de las variables concentración de cianuro (g/L), contenido de azufre (g/t) y tiempo de lixiviación (h) que actúan sobre el porcentaje de extracción.

En la figura 3.2, se puede apreciar que los efectos principales para la extracción de oro muestran que a medida que aumenta la concentración de cianuro y el tiempo de lixiviación, la extracción de oro también aumenta. Todo lo contrario, ocurre con la concentración de azufre, ya que a medida que aumenta la misma, disminuye la extracción de oro.

La ecuación del modelo ajustado para la extracción de oro es:

$$\text{Extracción de oro} = 13,0709 + 62,5394 \cdot \text{Concentración de Cianuro} - 5,01126 \cdot \text{Concentración de Azufre} + 7,93581 \cdot \text{Tiempo}$$

Esta ecuación sirve para predecir la influencia de los parámetros, donde parámetro independiente tiene un valor de 13,0709 y cada uno de los coeficientes que se muestran en la ecuación indican el nivel de influencia que tiene ese parámetro en la extracción de oro, siendo la mayor influencia la concentración de cianuro de manera positiva.

### 3.3 Resultados comparativos de las muestras uno y dos

En la figura 3.3 se muestra el comportamiento de la extracción de oro en función de la concentración de cianuro de sodio de la muestra uno y de la muestra dos. Donde se observa que la extracción de la muestra uno es superior a la de la muestra dos para las concentraciones de cianuro de sodio de 0,2 y 1 g/L.

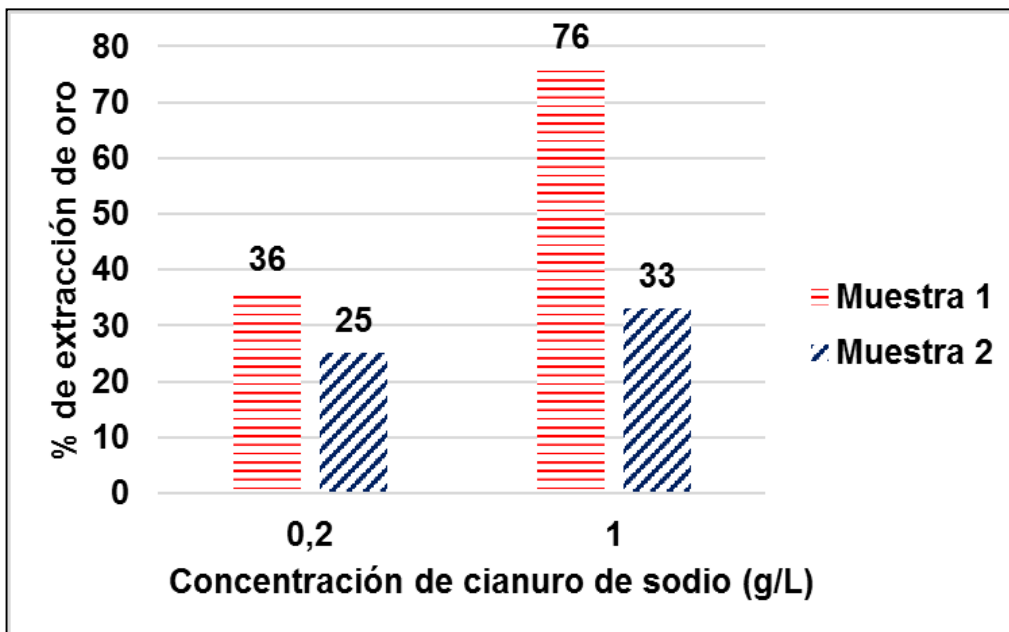


Figura 3.3 Extracción de oro en función de la concentración de cianuro de sodio (g/L)

En la figura 3.4 se muestra la extracción de oro en función al tiempo de lixiviación de la muestra uno y de la muestra dos, donde se puede apreciar que la muestra uno tiene mayor extracción que la muestra dos para ambos tiempos y las mayores extracciones se obtienen a las 8 horas de lixiviación.

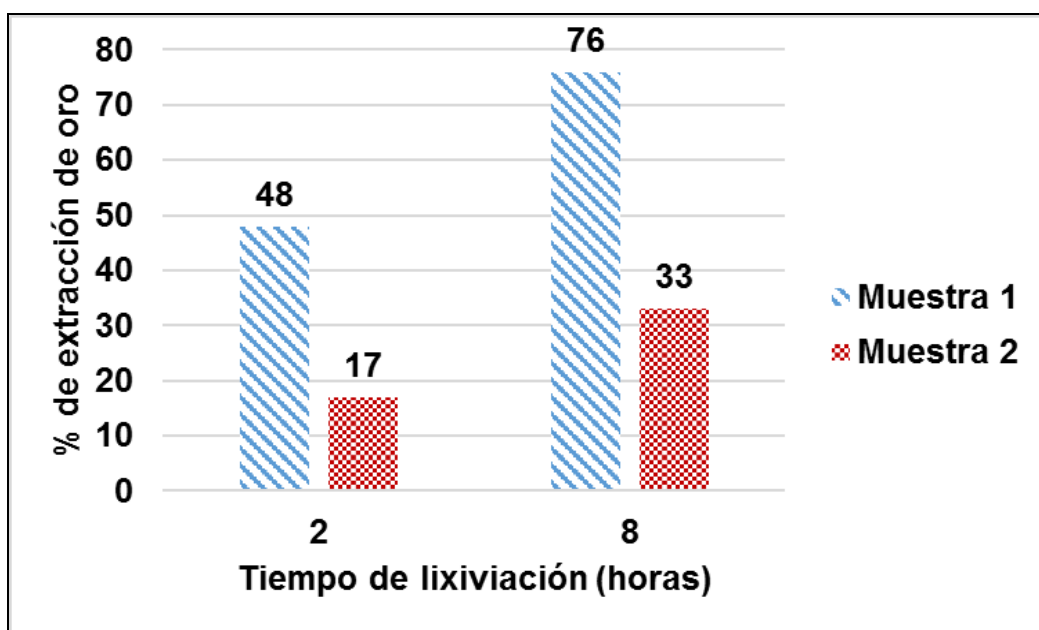


Figura 3.4 Extracción de oro en función del tiempo de lixiviación en horas.

### 3.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el análisis económico en la investigación se tuvieron en cuenta los valores de concentración de oro y azufre en el proceso de lixiviación, así como la concentración de cianuro donde se obtuvieron los mejores valores de oro y los menores valores de azufre. Teniendo en cuenta que el precio del oro en el mercado internacional el 18 de junio de 2018 es de 41,20 USD el gramo (<https://www.preciooro.com/cotizacion-oro.html>, 2018), entonces como en el proceso de lixiviación se obtuvo un valor de 0,009704 g de oro por un kg de mineral lixiviado en la muestra uno y en la muestra dos 0,00710 g de oro por un kg de mineral lixiviado entonces se incorporarían a la empresa con la muestra uno 0,40 USD por cada kg de mineral lixiviado y con la muestra dos 0,29 USD por cada kg de mineral lixiviado. Como con la muestra uno se obtienen los mejores resultados, se puede decir que el aporte económico estaría dado por los gramos de oro que se pueden extraer disminuyendo el contenido de azufre en el mineral.

### 3.5 VALORACIÓN ECOLÓGICA DEL PROCESO

El sector minero es considerado el sector industrial más contaminante de aguas superficiales y subterráneas, especialmente con cargas contaminantes de metales pesados; además que contribuye a la degradación de los suelos. A continuación se muestran los principales impactos ambientales de Oro Barita, o sea la alteración que se produce en el ambiente.

El análisis de los problemas ambientales se desarrollará en cada una de las áreas existentes en la industria:

Mina: Se conoce que la zona antes del asentamiento poblacional del Cobre y la minería formaba parte de un bosque tropical con una vitalidad y diversidad importante, en la actualidad los suelos son pobres y dan asiento solo a pastos y matorrales con aislados árboles y zonas estériles con afloramientos de rocas.

En esta zona por la explotación de los suelos para extraer el mineral se han perdido los sembrados de marañón, única fruta existente en estas áreas. Además de que existe un alto grado de polvo que puede tener efectos sobre las propiedades y comportamiento de la atmósfera frente a la radiación solar y efectos significativos en el clima; y ruido, producto de la barrenación, lo cual genera una contaminación puntual.

En los alrededores de la mina se encuentran las Escombreras que son conjuntos de sobrantes originados como consecuencia del laboreo minero y de la degradación del suelo.

Planta mecánica: En esta parte es donde se prepara el mineral para su procesamiento, como parte fundamental está la trituración del mismo, donde se esparcen grandes cantidades de polvo contaminando toda el área existente a su alrededor, o sea una contaminación parcial. Existe el exceso de sonido que altera las condiciones normales del ambiente provocando una contaminación acústica.

Lixiviación: Esta área genera un impacto negativo al medio ambiente de manera puntual pero que a su vez puede convertirse en extremo, pues el disolvente utilizado es cianuro de sodio. El cual es un potente inhibidor de la respiración, que actúa sobre el citocromo oxidasa mitocondrial y por lo tanto sobre el bloqueo del transporte de electrones. Esto resulta en una disminución del metabolismo oxidativo y en la utilización de oxígeno. La acidosis láctica se

produce entonces como consecuencia del metabolismo anaeróbico. Una dosificación oral tan pequeña como 200-300 mg puede ser fatal.

En condiciones normales de operación las plantas de la UEB Servicios Mineros trabajan en ciclo cerrado reutilizando las aguas residuales en las operaciones del proceso. En un evento de intensas lluvias se pueden alcanzar los niveles límites de las diferentes piscinas de licor pudiendo verse en la obligación de realizar vertimientos controlados, conociendo que estas aguas llegarían a la presa Parada, que actualmente se emplea como agua de consumo a la población, lo cual provocaría daños irreversibles si el residual no es neutralizado. Los impactos incluyen además, la degradación de la calidad del aire debido a las partículas que el viento arrastra de las pilas de lixiviación.

### **Conclusiones del capítulo III**

- El modelo que se obtuvo de realizar el análisis estadístico es: Extracción de oro =  $13,0709 + 62,5394 * \text{Concentración de Cianuro} - 5,01126 * \text{Concentración de Azufre} + 7,93581 * \text{Tiempo}$ .
- Los mejores resultados de extracción para 1 kg de mineral en ambas muestras son en las condiciones de 1 g/L de cianuro de sodio y tiempo de lixiviación de 8 horas obteniéndose 0,009704 g de oro en la muestra uno y 0,00710 g de oro en la muestra dos lo que representa un aporte económico de 0,40 USD por cada kg de mineral lixiviado para la muestra uno y 0,29 USD por cada kg de mineral lixiviado para la muestra dos. Por lo que se puede decir que el aporte económico estaría dado por los gramos de oro que se pueden extraer disminuyendo el contenido de azufre en el mineral.
- En la mina Oro Barita el mayor problema ambiental se encuentra en la planta mecánica y en el área de lixiviación en la primera por la emisión de polvo y en la otra por la concentración de cianuro.

## CONCLUSIONES

- 1- Se evaluó la influencia de los parámetros: contenido de azufre, concentración de reactivo, tiempo de lixiviación y tipo de muestra en la extracción de oro en la mina “Oro Barita” de Santiago de Cuba, donde se obtiene que:
  - Según el diagrama de Pareto tanto para la muestra uno como para la dos, todos los factores tienen influencia en la extracción de oro, siendo la misma de la siguiente forma: la concentración de cianuro de sodio y tiempo de lixiviación influyen de forma positiva mientras la concentración de azufre influye, pero de forma negativa.
  - Según el diagrama de los efectos principales, a medida que aumenta el tiempo de lixiviación y la concentración de cianuro aumenta la extracción de oro y a medida que aumenta la concentración de azufre disminuye la extracción.
  - El mejor resultado de extracción de oro fue de 76 % en la muestra uno, para las condiciones de 1 g/L de cianuro de sodio, un tiempo de lixiviación de 8 horas y un contenido de azufre de 1,86 g/t.
- 2- Se obtiene el modelo estadístico de la influencia de los parámetros, el cual es:  $\text{Extracción de oro} = 13,0709 + 62,5394 \cdot \text{Concentración de Cianuro} - 5,01126 \cdot \text{Concentración de Azufre} + 7,93581 \cdot \text{Tiempo}$
- 3- Los mejores resultados de extracción para 1 kg de mineral en ambas muestras son en las condiciones de 1 g/L de cianuro de sodio y tiempo de lixiviación de 8 horas obteniéndose 0,009704 g de oro en la muestra uno y 0,00710 g de oro en la muestra dos lo que representa un aporte económico de 0,40 USD por cada kg de mineral lixiviado para la muestra uno y 0,29 USD por cada kg de mineral lixiviado para la muestra dos. Por lo que se puede decir que el aporte económico estaría dado por los

gramos de oro que se pueden extraer disminuyendo el contenido de azufre en el mineral.

- 4- En la mina Oro Barita el mayor problema ambiental se encuentra en la planta mecánica y en el área de lixiviación en la primera por la emisión de polvo y en la otra por la presencia de cianuro.

## RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio de la influencia de los otros elementos cianicidas que podrían estar presentes en el mineral.
- Realizar un estudio donde se mezcle el mineral de la zona oxidada con el mineral de la zona sulfurosa antes de pasarlo al proceso con el objetivo de disminuir el efecto del azufre. También se podría estudiar la posibilidad de añadir un aditivo al mineral, que permita disminuir el efecto del azufre. Otras opciones son tostar el mineral o realizar un pre oxidación del mismo, lo cual conllevaría a un aumento en el costo de operación.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Anticoi Sudzuki, H. 2011. Procesamiento sostenible del oro en San Cristobal, sur del Perú. Universidad Politécnica de cataluña. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa. Manresa, España.
2. Batista, R. D. 2016. Beneficio en mesa de concentración de las colas de la empresa Ernesto Che Guevara. Holguín, Moa, Cuba. Trabajo de diploma. ISMM, p.91.
3. Castañeda Mendoza, W. L. y De la Cruz Castillo, H. F. 2015. Aumento de la recuperación de oro en la compañía refinadora del pacífico S. A. C. Universidad Nacional "José Faustino Sánchez Carrión". Facultad de ingeniería química y metalúrgica. Escuela profesional de ingeniería metalúrgica. Huacho, Perú.
4. Chacin, D. F. 2000. Diseño y análisis de experimentos I. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. Impreso en los talleres de FEPUV – UCV, p. 388.
5. Compta, D. F. 2015. Tesis en opción al título de ingeniero químico "Influencia de la lixiviación en la recuperación de oro en la mina Oro Barita de Santiago de Cuba ", Santiago de Cuba: Universidad de Oriente, Instituto Superior Julio Antonio Mella, Facultad de química.
6. Compta, I. D. 2015. Procedimiento operacional de trituración, aglomeración y formación de pila. Universidad Nacional del Centro del

- Perú. Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. Huanacayo, Perú.
7. Dorey, R., Van Zly, D., & Overview, K. J. 1988. Overview of Heap Leaching Technology: Introduction to evaluation, design and operation of precious metal heap leaching projects. Hutchison, L. y Kiel, J. (eds.) SME.
  8. Figueredo Frías, Marcela; et al. 2010. Investigación a escala ampliada del yacimiento Oro Descanso. CIPPIMM. La Habana. Cuba.
  9. García, J. V. 1990. Procesamiento de minerales auríferos. Técnicas para la extracción aurífera en los procesos de cianuración y amalgamación. Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. Huanacayo, Perú.
  10. Gutierrez Pulido, H., & De La Vara Salazar, R. 2008. Análisis y Diseño de experimentos. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad de Guadalajara, México: editorial McGraw – Hill Interamericana, p. 564.
  11. Hidalgo, P, y Ledesma, R. 2008. Evaluación de la recuperación de oro y plata a partir de minerales sulfurados en una matriz de cuarzo. Minera Koricolqui. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.
  12. Hiskey, J. B. 1985. Gold and Silver Extraction. The application of Heap - Leaching Cyanidation. Arizona Bureau of Geology and Mineral Technology Fieldnotes, p. 1- 5.
  13. <http://spanish.alibaba.com/sodium-cyanide-price.html>. [18 de junio del 2018].
  14. <https://www.preciooro.com/cotizacion-oro.html>. [18 de junio del 2018].
  15. <https://www.statgraphics.net/>. [18 de junio del 2018].
  16. J. Logsdon, M., Hagelstein, K., & I. Mudder, T. 2001. The Management of Cyanide in Gold Extraction. International Council on Metals and the Environment, Abril 1999. <http://www.icmm.com/page/1616/> consultado el 7 de mayo 2018, Cyanide in industrial wastewaters and its removal: A

- review on biotreatment, Rajesh Roshan Dash, Abhinav Gaur, Chandrajit Balomajumder, Journal of Hazardous Material, 163, 2009, 1-11./ 27/ The Management of Cyanide in Gold Extraction, M. J. Logsdon et al. , op. cit, (supra n.2).
17. Lara, F. 2005. Proceso de cianuración. Editorial Piedra Santa. Quito, Ecuador.
  18. Lapo Alverca, J. A. 2014. Reactivación química del carbón activado del tipo calgón americano 6×12 utilizado en la sociedad minera “PROMINE” para el proceso de adsorción de metales preciosos. Machala. Ecuador.
  19. López, R. 2014. Efecto de la densidad de la pulpa y de la concentración de cianuro de sodio en la lixiviación por agitación para la recuperación de oro en la planta de beneficio Doble D – Arequipa. Universidad Nacional del Altiplano. Facultad de Ingeniería Geológica y Metalúrgica. Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. Puno, Perú.
  20. Luna, A. 2001. Centro de Investigaciones para la industria Minero Metalúrgica “Estudio del Procesamiento de las muestras Tecnológicas MT-1 y MT-2 del Mineral de Oro Barita”. Santiago de Cuba.
  21. Manrique, J. A. 2006. Manejo de Pilas de lixiviación de oro en Minera Yanacocha S.R.L. Quito, Ecuador, noviembre de 2018, [g/sites/en/why\\_gold/demand\\_and\\_supply/](http://g/sites/en/why_gold/demand_and_supply/).
  22. Matos, Y. 2016. Modo de operación de la Balanza analítica digital SARTORIUS ACCULAB ATL - 244 -1. Empresa Geominera Oriente, Santiago de Cuba.
  23. Matos, Y. 2016. Modo de operación del Equipo de Absorción Atómica (EAA). Empresa Geominera Oriente, Santiago de Cuba.
  24. Matos, Y. 2016. Preparación de reactivos y curvas de calibración. Empresa Geominera Oriente, Santiago de Cuba.
  25. Medina, J. L. 2015. Procedimiento operacional para la lixiviación en pilas. Empresa Geominera Oriente, Santiago de Cuba.

26. Millar, C. F. 1997. Lixiviación en montones, manual práctico.. editor Talamantes J. L. Reyes, traductor Medina B. Aurora. En los talleres gráfico de Granholit, Hermosillo Sonora, México.
27. Ortiz y Jara. 2004. Como mejorar la extracción de oro en lixiviación en montón. Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales. Huanacayo, Perú.
28. Pariagua, M. C. 2001. Estudio ambiental y optimización en la extracción del oro utilizando el cianuro. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de ingeniería. Escuela de ingeniería química, p. 36.
29. Pérez, I. S. 2017. Metodología de operación para la determinación del contenido de azufre utilizando cloruro de bario. Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, Moa, Holguín.
30. Posso, P. L., & Gandarillas, A. E. 2009. Recuperación de oro post - lixiviación con cianuro de sodio mediante concentración con cinc y adsorción en carbón activado. Universidad de San Francisco de Quito, p. 107.
31. Rivera, L. G. 2009. Recuperación de oro refractario aplicando lixiviación con tiosulfato y resina en pulpa en la UEA Condestable. Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de ingeniería metalúrgica y de materiales. Huancayo, Perú.
32. Rojas G., F. X. 2010. Análisis del efecto de arcillas y finos en el proceso de lixiviación de Radomiro Tomic. Pontificia Universidad de Valparaíso. Facultad de ingeniería química. Valparaíso, Chile, p. 153.
33. Salinas, E., & Rivera, I. 2004. Mejora del proceso de cianuración de oro y plata mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono. Centro de Investigaciones en Materiales y Metalurgia. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Facultad de Metalurgia. Universidad Autónoma de Coahuila, p. 315.
34. Sánchez, Y. M. 2016. Procedimiento para la determinación del pH. Modo de operación del pH metro. Empresa Geominera Oriente, Santiago de Cuba.

35. Tremolada, J. 2011. Caracterización, influencia y tratamiento de arcillas en procesos de cianuración en pilas. Universidad de Oviedo. Programa de doctorado: minería, obra civil y medio ambiente. Departamento de Explotación y Prospección de minas, p. 233.