



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**“Aplicación de pre-aireación en lixiviación con cianuro de sodio en el mineral de interés de la mina Cristhian David, Pasaje-El Oro”**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO EN MINAS**

**Autor:**

**BRYAN DANNY AGUILAR ALVARADO**

**Director:**

**FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA**

**CUENCA-ECUADOR**

**2021**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>ii</b>
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS.....</b>	<b>ix</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>x</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>xi</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>xii</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Problemática .....	2
1.2. Objetivo .....	2
1.3 Estado del arte.....	2
Refractariedad del oro .....	4
Lixiviación .....	5
1.4. Antecedentes.....	6
<b>CAPÍTULO II. Marco Teórico.....</b>	<b>7</b>
2.1 El oro .....	7
2.2 Índices metalúrgicos .....	7
2.2.1 Tenor .....	8
2.2.2 Balance de masa en un concentrador en estado estacionario .....	8
2.2.3 Clasificación de los índices metalúrgicos .....	9
2.2.4 Relación entre la recuperación (R) y la razón de enriquecimiento (R.E) .....	12
2.2.5 Índices metalúrgicos ideales .....	12
2.3 La metalurgia extractiva .....	13
2.4 Hidrometalurgia .....	15

2.4.1 Principios físico-químicos de los procesos hidrometalúrgicos .....	16
2.4.2 Relación litósfera-hidrosfera-atmósfera.....	17
2.5 Procesos previos a la lixiviación.....	19
2.5.1 Preparación mecánica de menas.....	19
2.6 Lixiviación.....	25
2.6.1 Lixiviación estática o por percolación .....	26
2.6.2 Lixiviación dinámica o con agitación .....	26
2.7 Parámetros que influyen en la lixiviación .....	27
2.7.1 Aeración .....	27
2.7.2 Temperatura .....	27
2.7.3 Efecto de la velocidad de agitación.....	28
2.7.4 Efecto de la densidad de pulpa.....	28
2.7.5 Granulometría .....	29
2.7.6 Tiempo de lixiviación .....	29
2.8 Aplicación del pre-tratamiento de oxidación con oxígeno del aire. ....	30
2.9.1 Consideraciones termodinámicas.....	31
2.10 Modelo cinético de lixiviación de oro .....	32
2.11 Potencial de oxidación.....	33
2.12 Lixiviación cianurante de minerales de oro.....	33
2.13 Cianuración.....	34
2.14 Cinética de la Cianuración.....	34
2.15 Maquinaria a utilizarse .....	37
2.15.1 Trituradoras .....	37
2.15.2. Agitadores .....	41

<b>CAPÍTULO III. Diseño experimental, análisis de composición y estructura del mineral .....</b>	<b>43</b>
3.1 Modelo experimental.....	43
3.1.1. Tipología de los Diseños Experimentales .....	43

3.1.2. Tipos de experimentos .....	44
3.1.3. Diseño utilizado .....	45
3.2 Mineral.....	46
3.3 Caracterización fisicoquímica del material .....	46
3.3.1 Determinación de la densidad real por desplazamiento de volumen. ...	46
3.3.2 Determinación del pH natural. ....	46
3.3.3 Gravedad específica .....	46
3.3.4 Porcentajes de sólidos .....	46
3.3.5. Concentración de cianuro.....	47
3.4. Equipos utilizados.....	<b>47</b>
3.4.1 Trituración.....	47
3.4.2. Agitación .....	49
3.4.3 Inyección de aire y su control. ....	50
3.5 Reactivos químicos a utilizar.....	51
3.5.1 Hidróxido de Sodio – Na (OH).....	51
3.5.2 Cianuro de sodio .....	51
3.5.3. Indicadores de pH .....	52
3.6 Caracterización metalúrgica .....	52
3.7 Condiciones de las pruebas.....	52
3.8. Montaje del laboratorio para desarrollo de la lixiviación por agitación .....	53
3.9 Metodología.....	54
3.10 Pre-tratamiento del mineral para la lixiviación.....	54
3.10.1 Trituración primaria .....	55
3.10.2 Trituración secundaria.....	55
3.10.3 Molienda .....	55
3.10.4 Separación y selección .....	55
3.11 Preparación de la solución lixiviante.....	56
3.12 Condiciones de operación en la lixiviación .....	57
3.13 Resultados de la lixiviación. ....	57

<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>60</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>62</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Gráfico de concentrador .....	9
Ilustración 2. Relación reuperación-razón de enriquecimiento.....	12
Ilustración 3. Relaciones entre procesos de tres estados.....	17
Ilustración 4. Distribución Schuhmann.....	24
Ilustración 5. Distribución Rosin Rammler .....	25
Ilustración 6. Tipos de impulsores .....	28
Ilustración 7. Curva típica de tiempo vs % de recuperación.....	30
Ilustración 8. Diferentes tipos de comportamiento de partículas sólidas.....	33
Ilustración 9. Representación esquemática de las etapas en una reacción química heterogénea .....	34
Ilustración 10. Reacción sólido – líquido de la disolución de oro en una solución de cianuro.....	35
Ilustración 11. Concentración de Na CN <sub>2</sub> mol/l vs velocidad de disolución ml/cm <sup>2</sup> /h.....	35
Ilustración 12. Trituradora de Mandíbulas.....	38
Ilustración 13. Trituradora de cono.....	39
Ilustración 14. Trituradora de martillos. ....	41
Ilustración 15. Tipos de agitación .....	42
Ilustración 16. Diseño de muestra.....	44
Ilustración 17. Trituradora de mandíbula tipo pivote elevador.....	48
Ilustración 18. Triturador de rodillos .....	48
Ilustración 19. Molino de bolas.....	49
Ilustración 20. Descripción de Ilustración 19 .....	49
Ilustración 21. Flotador Denver .....	50
Ilustración 22. Compresor de aire comprimido.....	50
Ilustración 23. Medición de velocidad de flujo de aire.....	51
Ilustración 24. Balanza eléctrica con cianuro de sodio .....	51
Ilustración 25. Medidor de pH .....	52
Ilustración 26. Sistema completo .....	53
Ilustración 27. Diagrama del proceso.....	54
Ilustración 28. Cuarteo del mineral.....	55

Ilustración 29. Material final.....	567
Ilustración 30. Acondicionamiento .....	567
Ilustración 31. Resultados prueba al fuego .....	58
Ilustración 32. Recuperación mineral – caudal de aire insuflado .....	590

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Métodos de aplicación en vía seca o húmeda .....	14
Tabla 2. Aplicación de hidrometalurgia.....	16
Tabla 3. Diseño ejemplificar de caso .....	45
Tabla 4. Valores a las incógnitas de cuadros .....	45
Tabla 5. Valores utilizados en ensayo 1 .....	57

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Trituración R22 .....	66
Anexo 2. Trituración de rodillos .....	66
Anexo 3. Molienda.....	67
Anexo 4. Zaranda .....	67

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo va dedicado a todas las personas que formaron parte durante todo mi proceso académico.*

## **AGRADECIMIENTO**

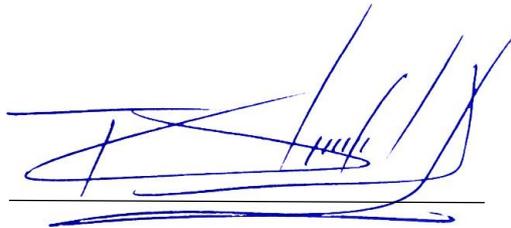
*Estoy muy agradecido con todas y cada una de las personas que fueron parte de mi vida académica y especialmente a mis padres quienes me brindaron su apoyo incondicional.*

**“APLICACIÓN DE PRE-AIREACIÓN EN LIXIVIACIÓN CON CIANURO DE SODIO EN EL MINERAL DE INTERÉS DE LA MINA CRISTHIAN DAVID, PASAJE - EL ORO”**

**RESUMEN**

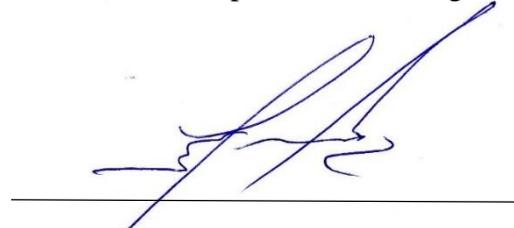
El presente trabajo fue realizado a escala de laboratorio, con el objetivo de estudiar los procesos de cianuración, para analizar la incidencia que tiene la inyección de aire dentro de la pulpa a través del proceso denominado lixiviación dinámica, enfocada en la recuperación de metales valiosos como el oro. Los resultados determinaron que, a medida que incrementa la concentración de oxígeno por aire insuflado en la solución, aumenta la recuperación de oro. Para obtener este resultado se realizaron ocho pruebas distintas variando el caudal de aire inyectado a la pulpa, repitiéndose cada una de estas pruebas tres veces. Los resultados obtenidos mostraron cambios en la recuperación del oro, lo que permitiría mejorar notablemente los procesos convencionales, debido a que se logró observar un aumento en la recuperación metalúrgica de Au con 0.14 m<sup>3</sup>/h de aire insuflado correspondiente a 27.056%, en disparidad al no haberse inyectado aire obteniendo una recuperación de 23.052%.

**Palabras clave:** Aireación, cianuración, insuflar, oro, recuperación metalúrgica.



Ing. Fernando Valencia Guaricela

**Director del Trabajo de Titulación**



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**Coordinador de Escuela**



---

Bryan Danny Aguilar Alvarado

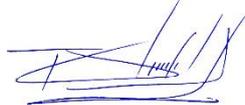
**Autor**

**"APPLICATION OF PRE-AERATION IN SODIUM CYANIDE LEACHING IN THE ORE OF INTEREST AT THE CRISTHIAN DAVID MINE, PASAJE - EL ORO".**

**ABSTRACT**

The research was carried out at a laboratory scale, with the objective of studying cyanidation processes, to analyze the incidence of air injection into the pulp through a process called dynamic leaching, which focused on the recovery of valuable metals such as gold. The results determined that, as the concentration of oxygen by air blown into the solution increases, gold recovery increases too. To obtain this result, eight different tests were carried out, varying the flow rate of air injected into the pulp, repeating each of these tests three times. The results obtained showed changes in gold recovery, which would significantly improve conventional processes, because it was possible to observe an increase in the metallurgical recovery of Au with 0.14 m<sup>3</sup>/h of blown air corresponding to 27.056%, in disparity to not having injected air obtaining a recovery of 23.052%.

**Keywords:** Aeration, cyanidation, insufflation, gold, metallurgical recovery.



---

Ing. Fernando Valencia Guaricela

**Director of the Degree Project**



---

Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**School director**



---

Bryan Danny Aguilar Alvarado

**Author**

Translated by



Bryan Aguilar

Bryan Danny Aguilar Alvarado

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Marzo, 2021

**“APLICACIÓN DE PRE-AIREACIÓN EN LIXIVIACIÓN CON CIANURO DE SODIO EN EL MINERAL DE INTERÉS DE LA MINA CRISTHIAN DAVID, PASAJE - EL ORO”**

**INTRODUCCIÓN**

La actividad minero-metalúrgica se viene realizando durante muchos años en el Ecuador y está basada en métodos internacionales con miras al desarrollo y crecimiento económico del país. Para la extracción aurífera, las plantas de beneficio existentes tratan en su mayoría el mineral con el proceso de Carbón en Pulpa (CIP), el cual, es afectado por diversos factores operativos en la solubilidad del oro como son: tamaño de partícula, concentración de oxígeno, concentración de cianuro, alcalinidad, efecto de la agitación, densidad de la pulpa, temperatura, y la naturaleza constituyente de la mena.

En consecuencia, la lixiviación con cianuro de sodio es un proceso minero metalúrgico utilizado por muchos años en la industria, siendo imprescindible optimizar su aplicación en la recuperación metalúrgica y la reducción de los costos finales.

Así, la recuperación de oro mediante lixiviación con agitación abarca ciertos parámetros operacionales como: agitación, pH, tiempo, cantidad de oxígeno disuelto, etc. Por ello, la mejora de estos parámetros influye significativamente en mayores o menores porcentajes de liberación de este metal precioso; siendo el aire ingresado al proceso de agitación un factor clave para la obtención de resultados ventajosos.

Asimismo, la insuflación de aire a la pulpa previamente acondicionada y con parámetros constantes en diferentes ensayos, busca un considerable aprovechamiento del

oxígeno en las reacciones de intercambio iónico que se suscitan durante la agitación; recuperándose finalmente la mayor cantidad del metal deseado.

### **1.1. Problemática**

Existe principalmente un método de beneficio del oro en la pequeña minería: lixiviación con cianuro de sodio. La lixiviación resulta más económica, segura y presenta un corto tiempo de recuperación del mineral de interés; con lo cual, es necesario evaluar y optimizar este proceso de beneficio mineral.

Además, existe una elevada demanda de insumos químicos en el proceso de beneficio de los minerales con interés económico en el campo minero del Ecuador; siendo importante buscar la mayor rentabilidad en las distintas minas, sean de oro, plata o cobre. Por ello, se puede postular que una mayor recuperación mediante la lixiviación con cianuro de sodio en el mineral, disminuiría considerablemente el consumo de ciertos químicos y los costos de tratamiento mineral; mejorando notablemente la producción.

### **1.2. Objetivo**

La necesidad de obtener la mayor recuperación metalúrgica posible de oro en un proceso de lixiviación con cianuro, incluyendo un sistema de pre-aireación en la celda; permite buscar alternativas como la pre-aireación en lixiviación con cianuro de sodio en el mineral de interés, dentro de la mina “Cristhian David”, del cantón Pasaje, provincia de El Oro. Consecuentemente, para obtener mayores beneficios se realiza una caracterización del mineral, para luego diseñar ensayos que constatan la validez del proceso con características innatas del yacimiento; pudiéndose establecer finalmente las alternativas correspondientes en caso de ser necesario.

### **1.3 Estado del arte**

En la minería, la variedad en la naturaleza de los yacimientos permite buscar alternativas con la intención de mejorar la recuperación. En el caso del oro pirítico se puede observar la presencia de partículas de oro, incluso en la pirita, con tamaños menores a 200 nanómetros. También se observan partículas de telururo de oro y plata entrelazadas

con el electrum, cuyos tamaños son menores a 2 micras. Estas características hacen que el concentrado sea refractario al tratamiento convencional por el proceso de cianuración, convirtiéndose en un serio problema por el elevado consumo de cianuro de sodio y recuperaciones limitadas. El presente trabajo de investigación está orientado a estudiar nuevos esquemas de pretratamiento como la pre aireación con cal, basada en un proceso previo a la cianuración. El modelo matemático obtenido para el proceso de pre aireación mediante un diseño hexagonal, indica que la variable que tiene mayor influencia es el pH, seguida del tiempo y su interacción correspondiente; manteniéndose constante la concentración de oxígeno, granulometría del concentrado y la dilución de la pulpa ante su poca incidencia en el proceso. Los resultados son una recuperación aceptable en el proceso de cianuración, la que resulta ampliamente beneficiosa respecto a la cianuración convencional. En resumen, la cianuración reduce el consumo de cianuro de sodio en un 55 % y mejora la recuperación en un 10. 57 %, para este tipo de concentrados; convirtiéndose así en su principal ventaja (Pirítico et al., 2003).

En complemento, las condiciones óptimas para la utilización del cianuro de sodio se pueden encontrar en variaciones entre el 0.1 % y 0.4 % de NaCN, aunque experimentaciones con aireación confirman que las mejores condiciones de lixiviación son: 4000 g/cm<sup>3</sup> de NaCN, con aireación artificial, en un tiempo de 98 horas. De este modo, es posible obtener la mayor extracción de metales preciosos con una recuperación de 90. 4 % Au y un 45. 6% de Ag del contenido residual de las colas gravitacionales (Avances en Ingeniería, 2014).

Desde otra perspectiva, la aplicación de la pre-aireación a nivel industrial incide en la reducción de costos, aumenta la producción de oro y disminuye la contaminación ambiental (Pirítico et al., 2003). Entretanto, la cianuración es un proceso en el cual intervienen un sinnúmero de parámetros y condiciones que afectan directa o indirectamente el proceso, por lo cual es necesario conocer la siguiente definición:

- El cianuro es un elemento químico conformado por dos elementos de la tabla periódica muy conocidos: carbono e hidrógeno. Para el presente estudio, el cianuro de sodio es utilizado en el proceso.
- El término “cianuro” sirve para designar a una familia de compuestos químicos inorgánicos que se caracterizan por la presencia de un átomo de carbono enlazado a un átomo de nitrógeno mediante un enlace triple. Algunos autores han descrito al cianuro como un pseudo halógeno

(Chatwin, 1990). Sin embargo, esta analogía no siempre es adecuada, especialmente en términos de formación de complejos metálicos (Cotton y Wilkinson, 1972).

- Debido a sus propiedades químicas, el cianuro es importante tanto para la industria como para el medio ambiente. Su interés industrial deriva en que constituye un fuerte agente *ligate* en forma iónica, capaz de formar compuestos metálicos estables con casi cualquier metal pesado en bajas concentraciones.
- La minería es una actividad industrial que utiliza actualmente una cantidad significativa de cianuro, aproximadamente un 20% de la producción total, según porción de la producción mundial de cianuro utilizado en minería (Mudder, 1999).
- Aunque el cianuro es ampliamente usado en la extracción de metales preciosos, constituye un aspecto de preocupación ambiental. Igualmente, el empleo de novedosas tecnologías como la biodegradación o la fitorremediación de cianuro aparecen como una alternativa para el control de la contaminación en la industria minera (Guerrero, 2013).
- Los parámetros principales que influyen en la cianuración del oro antes y durante la lixiviación, tienen como principales variables de las menas auríferas las siguientes:
  - ❖ La concentración de cianuro
  - ❖ Concentración de  $O_2$ .
  - ❖ El pH o alcalinidad.
  - ❖ Tiempo de cianuración.
  - ❖ Tamaño de partícula.
  - ❖ Otros compuestos y/o constituyentes.

### ***Refractariedad del oro***

El estudio de este aspecto analiza los efectos en el encapsulamiento del oro en una matriz de sulfuros, el recubrimiento de partículas de oro y la presencia de minerales que consumen oxígeno o cianuro en el proceso. Asimismo, el control de la disolución de oro de una forma efectiva se basa en la extracción previa del metal de interés según los diferentes tipos de yacimientos (Gaviria et al., 2006).

### *Lixiviación*

Este proceso mineralúrgico es trascendental en el desarrollo de la actividad minera, goza de altas tasas de aceptación económica y metalúrgica; con lo cual, es posible detallar algunas características:

- El temprano desarrollo del proceso se atribuye a Scotchman, John Stewart, Mac Arthur, en colaboración con los hermanos Forrest. El método fue introducido en Sudáfrica en 1890, extendiéndose a Australia, Estados Unidos y México; siendo en la actualidad utilizado en las principales operaciones mineras de oro a escala global (Misari, 2010; Josué y Leyva, 2019).
- El proceso de disolución de metales se conoce como lixiviación, específicamente como la disolución de oro en una solución acuosa; la cual, debe estar formada por un compuesto que tenga un anión en capacidad de unirse con un átomo de oro para formar un complejo estable, sumado a la presencia de un oxidante; permitiéndose así el proceso de extracción de oro. (Logsdon, Hagelstein, y Mudder, 2001; Luna, 2016).
- El cianuro de sodio disuelto en agua bajo condiciones ligeramente oxidantes disuelve a su vez el oro contenido en el mineral. Así, la solución resultante que contiene el oro se conoce como solución cargada o licor. Posteriormente, se agrega zinc o carbón activado para la extracción del oro y su cementación (Logsdon, Hagelstein, y Mudder, 2001).
- La cinética de lixiviación de minerales es el proceso de la determinación de la velocidad y los mecanismos de disolución de los metales de interés económico; con el objeto de obtener información que permita determinar condiciones de operación, mecanismos y etapas controladas involucradas, y la predicción de la velocidad de extracción del oro bajo diversas condiciones de temperatura, concentración, tamaño de partícula, tiempo de agitación, aireación, etc.

#### 1.4. Antecedentes

Algunos estudios como García (2008): “Optimización del proceso de cianuración de un mineral aurífero”, sirven de base para determinar el rendimiento de la aplicación del proceso de cianuración por agitación sobre un mineral aurífero proveniente de la zona sur del país, tomando como factores de mérito la extracción de oro soluble y los consumos de reactivos en el proceso (Collazos y Mendoza, 2019).

Por otro lado, con base en el estudio de Ralston (s.f.): “Acción de aire sobre una pulpa pirítica”, los autores Con et al. (s.f.) formaron sulfuros solubles, tiosulfatos y una menor cantidad de azufre coloidal, pudieron comprobar que el oxígeno disuelto reacciona con los sulfuros solubles para producir tiosulfato y no sulfato en presencia de pirita, concluyendo que el oxígeno disuelto oxida el tiosulfato a ion tiosulfato. De igual manera, se pudo determinar que una oxidación prolongada de pirita fina suspendida en una solución con cal, muestra que la alcalinidad de la solución decrece rápidamente al inicio del experimento y más lentamente durante la consecución de la prueba.

En el estudio de Afenya (1991), el proceso CIP (*Carbon In Pulp*) desarrollado en Sudáfrica en la década de 1970; es considerado el avance tecnológico más significativo de los últimos tiempos en cuanto a métodos aplicados a la recuperación de oro. La cianuración por agitación es el método que requiere de la máxima liberación del mineral para obtener buenas recuperaciones de oro. Concordantemente, si el oro es expuesto en mayor proporción a soluciones cianuradas, mayor será su disolución; por lo cual, se propone la recuperación del oro mediante soluciones “ricas” por el método del carbón activado (CIP).

## CAPÍTULO II

### 2. Marco teórico

#### 2.1 El oro

Etimológicamente tiene dos concepciones provenientes del latín: *aurum* u oro, y *aura* o brillo. Constituye un metal amarillo brillante, de láminas muy delgadas, de color azul o verde, de raya amarillo dorado. En estado natural se denomina oro puro de 24 quilates, es sumamente maleable y se presenta demasiado blando para su uso en joyería y acuñación de moneda; por lo que debe aliarse con plata y cobre para aumentar su dureza. Históricamente ha sido utilizado desde hace miles de años por sus características ornamentales, en especial por su brillo, color permanente y como medida de valor (Vargas, 1995).

El oro puro es un metal de color amarillo y brillante cuando tiene la superficie pulida e inalterable ante los agentes corrosivos habituales. Ocupa el lugar más elevado dentro de la serie galvánica ( $E_0 = - 1.5 \text{ V}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), siendo así el metal más noble. Sus propiedades mecánicas más representativas son: blandura, ductilidad y maleabilidad (Montero y Rovira, 2018).

#### 2.2 Índices metalúrgicos

Los índices metalúrgicos son números adimensionales que precisan la calidad de la separación efectuada en una o varias etapas de concentración, además proporcionan información para el escalamiento en el dimensionamiento de equipos y/o plantas de concentración.

Es necesario que la determinación de los índices esté basada en un balance de masa durante el proceso de separación, para evitar la generación de valores absurdos e incoherentes que desorientan las decisiones y análisis de los circuitos de concentración. Se asume en todos los casos que la separación y los muestreos se realizan en estado estacionario, es decir, cuando las propiedades del sistema son invariantes con el tiempo (Bustamante et al., 2008).

### 2.2.1 Tenor

El concepto de tenor se usa principalmente en la minería metálica, pero se puede hacer una extrapolación para su uso en minería de minerales industriales, asociándose al porcentaje *grade* de mineral útil respecto a toda la masa mineral extraída; facilitando el desarrollo de los objetivos que se pretenden alcanzar en la concentración de minerales.

Además, se puede definir el tenor de un mineral como la relación que existe entre la cantidad másica de mineral de interés o útil respecto a la cantidad másica o volumétrica en la mena. Por lo tanto, el tenor se puede expresar en gramos de mineral útil por tonelada de material total (g/ton), en porcentaje (%), en miligramos por metro cúbico de material total (mg/m<sup>3</sup>), entre otras magnitudes (Bustamante et al., 2008).

### 2.2.2 Balance de masa en un concentrador en estado estacionario

La Ilustración 1 muestra un concentrador con dos productos: concentrados y colas. Los flujos másicos sobre una base seca de cada una de las corrientes se representan con letras mayúsculas, mientras los tenores con letras minúsculas (Bustamante et al., 2008).

Si se realiza un balance macroscópico de masa se puede tener que:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Flujo másico de} \\ \text{mineral que entra} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Flujo másico de} \\ \text{mineral que sale} \end{array} \right]$$

Por lo tanto, surge la fórmula (1):

$$A = C + T \quad (1)$$

Con dicho criterio, al hacer un balance microscópico se tiene que:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Mineral de interés} \\ \text{que entra} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Mineral de interés} \\ \text{que sale} \end{array} \right]$$

Al expresarse un modelo que contemple las variables usadas, es posible obtener la fórmula (2):

$$A \cdot t_a = C \cdot t_c + T \cdot t_t \quad (2)$$

Debe notarse que el balance microscópico de la ecuación (2) está referido en términos del mineral de interés, por lo tanto, el segundo término estará asociado a las

pérdidas en el proceso, es decir, al mineral de interés que abandona el proceso o las máquinas de concentración por las colas (Ilustración 1).

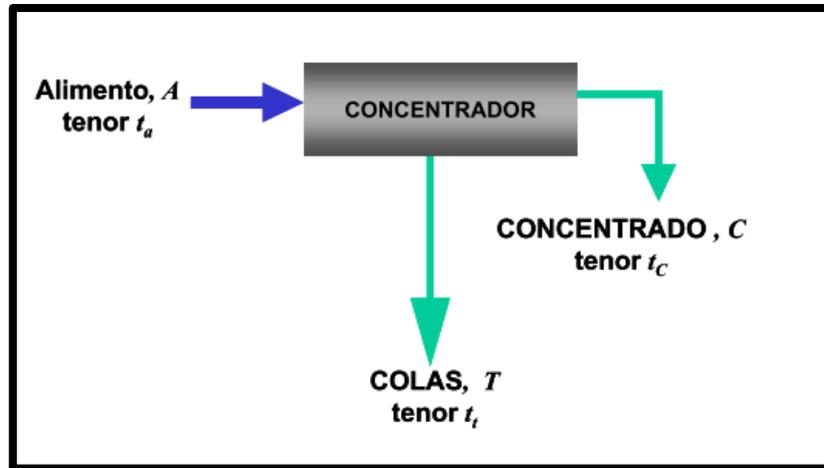


Ilustración 1. Esquema de un concentrador con dos productos

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.3 Clasificación de los índices metalúrgicos

Los índices metalúrgicos pueden dividirse en dos tipos: índices que relacionan la calidad de la concentración e índices relacionados que engloba la capacidad del circuito de concentración, principalmente para los usos de escalamiento.

#### 2.2.3.1 Índices que relacionan calidad

Proporcionan información acerca de la calidad de los productos obtenidos durante la etapa de concentración o globalmente en la planta.

- Recuperación (R): Es la relación que existe en una operación de concentración entre el peso del material útil o de interés con respecto a la cantidad de ese mismo mineral en la alimentación, o que ingresó durante la operación.

$$R = \frac{\text{Peso de mineral de interés en concentrado}}{\text{Peso de mineral de interés en alimento}}$$

De acuerdo al balance microscópico de la ecuación, se puede obtener que:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Peso de mineral} \\ \text{de interés en} \\ \text{Concentrado} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Peso de} \\ \text{Concentrado} \end{array} \right] * \left( \begin{array}{l} \text{Tenor de} \\ \text{Concentrado} \end{array} \right) = C \cdot t_c$$

De la misma manera, se puede calcular el peso de mineral útil en la corriente de alimento mediante:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Peso de mineral} \\ \text{de interés en} \\ \text{Alimento} \end{array} \right] = A \cdot t_a$$

Como resultado, se puede obtener la fórmula (3):

$$R = \frac{C \cdot t_c}{A \cdot t_a} \quad (3)$$

Con base en el anterior modelo, por ejemplo, una recuperación 0.80 para un proceso determinado, sugiere que el 80% del mineral de interés se recupera en la corriente de concentrado y el restante 20% sale del equipo o circuito por la corriente de colas.

- Razón de enriquecimiento (RE): Se define como la relación que existe entre el tenor (o porcentaje) de mineral útil en el concentrado respecto al tenor (porcentaje) del mismo mineral en la alimentación, según la fórmula (4):

$$R_E = \frac{t_c}{t_a} \quad (4)$$

Si se considera la desigualdad planteada, el valor de la razón de concentración RE en una operación de concentración, debería ser siempre mayor que la unidad.

En el caso de que RE se iguale a la unidad, no se produce concentración dado que  $t_c$  sería igual a  $t_a$ , oponiéndose a dicha operación unitaria. Por otro lado, mientras más lejano esté de la unidad en escala mayor, mejor será la concentración; lo que significa que se está enriqueciendo aún más el concentrado respecto al tenor de alimento.

- Índice de Selectividad (I.S): Este índice metalúrgico compara la calidad de separación entre dos especies (A) y (B) que se desean separar en el proceso de concentración.

### 2.2.3.2 Índices que relacionan capacidad

Estos índices están basados en la información necesaria para el escalamiento, dimensionamiento y selección de equipos de concentración.

- Razón de concentración (RC): Se define como la razón entre el flujo másico de sólidos en la alimentación A con respecto al flujo de sólidos en el concentrado C (fórmula 5, ver Ilustración 4).

$$RC = \frac{A}{C} \quad (5)$$

De este modo, dicho índice no da información de calidad, sino de capacidad, es decir, sobre los flujos que entraron y salieron del separador para calcular índices como el número de toneladas a alimentar para producir una tonelada de concentrado.

- Rendimiento de Concentración (V): Se define como la relación entre flujo másico en el concentrado respecto al flujo másico de sólidos en la alimentación (fórmula 6, ver Ilustración 4).

$$V = \frac{C}{A} = \frac{1}{RC} \quad (6)$$

De igual modo, en este modelo se distingue el inverso de la razón de concentración.

Eficiencia de la Separación (E): Es un índice que combina la información obtenida en los anteriores modelos matemáticos y está definido por la fórmula (7):

$$E = \frac{R - V}{1 - V_{IDEAL}} \quad (7)$$

De dicha fórmula,  $V_{ideal}$  es el rendimiento ideal.

### 2.2.4 Relación entre la recuperación (R) y la razón de enriquecimiento (R.E.)

Normalmente en una operación de concentración los índices de Recuperación (R) y Razón de Enriquecimiento (R.E.) son completamente antagónicos, tal como se muestra en la Ilustración 2.

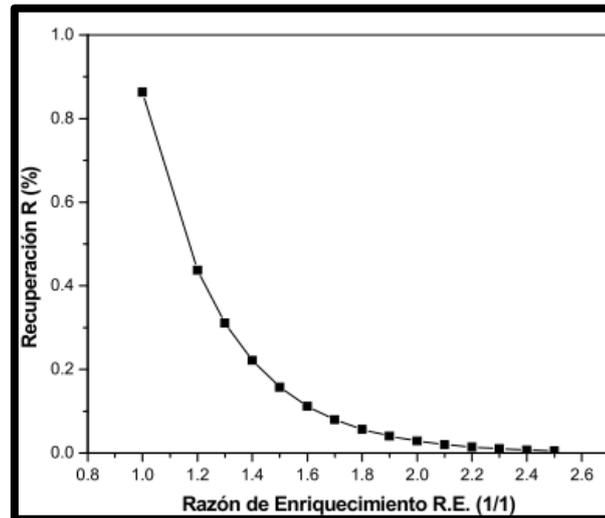


Ilustración 2. Relación recuperación-razón de enriquecimiento

Fuente: Elaboración propia

De este modo, la Ilustración 2 permite visualizar que, si la operación de concentración ocurre en una única etapa, no es recomendable que se exija valores altos de ambos índices metalúrgicos. Esto se resume en la posibilidad de alcanzar una recuperación alta y una razón de enriquecimiento alta, si la separación se efectúa por etapas. Además, es prácticamente imposible en una única etapa alcanzar ambos objetivos.

### 2.2.5 Índices metalúrgicos ideales

Una separación ideal es aquella en la cual se cumplen conjuntamente dos condiciones en la concentración:

a) Primera condición: el tenor de mineral de interés en las colas debe ser cero, según la fórmula (8):

$$t_t = 0 \quad (14) \quad (8)$$

b) Segunda condición. No debe existir mineral de ganga o estéril en el concentrado, según la fórmula (9):

$$t_a = 1.0 \quad (15) \quad (9)$$

En caso de no cumplirse cualquiera de las dos condiciones, la concentración deja de ser ideal. En complemento, satisfacer una condición no implica necesariamente que se genere la otra, debido a que son completamente independientes.

### **2.3 La metalurgia extractiva**

La metalurgia extractiva es la rama de la metalurgia que partiendo de las menas minerales o de los minerales reciclados (sus materias primas), estudia la manera de transformarlos en metales (productos finales, Ballester et al., 1980). Por este motivo, se puede definir como la parte de la metalurgia que estudia los métodos químicos necesarios para tratar una mena de mineral o un material que se va a reciclar de tal forma que se pueda obtener, a partir de cualquiera de ellos, el metal (con cierto grado de pureza) o alguno de sus compuestos.

La metalurgia extractiva posee variadas ramas entre las que se encuentra la hidrometalurgia, encargada de extraer los metales desde los materiales que los contienen a través de métodos fisicoquímicos de fase líquida. Este proceso es utilizado en la extracción de uranio, oro, vanadio, cobre, plata, entre otros. Asimismo, se recibe el mineral para su posterior proceso tal como llega desde la mina, por lo cual debe ser tratado para diferenciar las fases valiosas (mena) de las no valiosas (ganga). Con este afán, se realizan una serie de operaciones conocidas como preparación mineral y en otros casos, la mineralurgia. Dichas operaciones implican la reducción del tamaño conforme procesos de trituración y molienda para originar una separación sencilla en sus diferentes fases mineralógicas (Ballester et al., 1980).

En efecto, se puede continuar con una o varias operaciones para clasificar y concentrar, es decir, diferenciar y separar las partículas minerales valiosas del resto de las partículas, fundamentándose en alguna de sus propiedades físicas: carga eléctrica o energía superficial, magnetismo o densidad. Cuando se trata de la carga eléctrica, se busca modificar el comportamiento superficial del sólido mediante la operación denominada flotación, aplicada comúnmente en la concentración de minerales. Las operaciones de concentración se aplican según la extracción y están orientadas al material metálico a través de pirometalurgia o hidrometalurgia.

La pirometalurgia son las operaciones realizadas por vía seca con calentamiento generalmente a altas temperaturas. Se llevan a cabo operaciones en las cuales el mineral no se funde (calcineración y tostación). Dentro de otra operación, el mineral es totalmente fundido y posteriormente separado entre dos o más líquidos, entre los cuales uno es el que incluye el metal de valor, así hasta llegar finalmente a obtener el metal conocidamente llamado fino (fusión, Ballester et al., 1980).

La hidrometalurgia (analizada en este estudio), es la operación realizada vía húmeda y contempla una secuencia de etapas: la lixiviación del metal de interés a partir de mineral utilizando reactivo acuoso, la purificación y/o concentración de la disolución y la precipitación del metal mediante métodos químicos o electroquímicos. Se continúa con el afino o refino en el cual se busca el ajuste con la concentración de impurezas.

Existe una división metalúrgica dependiendo la naturaleza y características físicas o químicas del mineral, según la Tabla 1:

Tabla 1: Métodos de aplicación en vía seca o húmeda

Vía seca o pirometalurgia	Vía húmeda o hidrometalurgia
_ Calcineración	_ Lixiviación
_ Tostación	* Ácida
* Oxidante	* Básica
* Sulfurante	* Neutra
* Clorurante	_ Purificación y/o concentración
* Aglomerante	* Métodos químicos convencionales
* Otras	* Cementación
_ Fusión	* Resinas de cambio de ion
* Reductora	* Extracción con disolventes
* Ultra reductora	_ Precipitación
* Neutra	* Electrólisis
* Oxidante	* Cementación
_ Volatilización	* Métodos químicos
* Reductora	
* Oxidante	
* De haluros	
* De carbonilos	
_ Electrólisis ígneo	
_ Metalotermia	

Luego de los métodos vía seca y húmeda, es necesario conocer factores determinantes en la elección de un proceso de extracción:

- La mena y su naturaleza, además de su concentración en mayor o menor volumen, de fácil o complejo acceso, su ubicación con respecto a la proximidad a recursos energéticos, y si sus impurezas son beneficiosas o perjudiciales, etc.
- La escala en que se necesite el material metálico.
- Factores económicos que están presentes y son decisivos.
- Pureza del producto, tanto para procesos que deriven directamente en un producto de pureza u otro para su afinado.
- El desarrollo de nuevas técnicas conforme la vanguardia de procesos de optimización en la aplicación de la extracción metalúrgica.
- La explotación de propiedades específicas, debido a que en muchos procesos se forman soluciones muy estables como sucede con el oro y la plata con el cianuro; a su vez muy volátiles como el níquel.

En este caso, resulta necesario un estudio a detalle de la hidrometalurgia.

## **2.4 Hidrometalurgia**

Es el tratamiento de minerales, concentrados y otros materiales metálicos a través de métodos húmedos que producen la disolución de alguno de sus componentes y su posterior recuperación a partir de la disolución (Ballester et al., 1980). Este concepto permite definir que la hidrometalurgia es la rama de la metalurgia extractiva que utiliza disoluciones acuosas para la obtención de los metales, normalmente bajo rangos de temperatura ambiente entre 25 °C y 250 °C, a presiones muy bajas (casi al vacío), aunque en ciertos casos bajo condiciones que alcancen los 500 kPa.

La ventaja de este proceso es que puede darse en condiciones adaptables a gran escala y poder tratar minerales muy pobres en concentración, e incluso marginales sin necesidad de transformar la gran cantidad de ganga inerte en la cual se pueden encontrar. De ahí que es necesario conocer los tipos de minerales y metales que se pueden extraer por este método, tal como lo indica la Tabla 2.

Tabla 2: Aplicación de hidrometalurgia

Tipo de materia prima	Ejemplo
Metales	Metales preciosos, metales nucleares, metales al estado reducido; cobre, níquel, cobalto, etc.
Óxidos e hidróxidos	Bauxitas, lateritas, minerales de uranio, minerales y calcinadas de zinc, minerales y nódulos de manganeso, rutilo, minerales oxidados de cobre
Óxidos complejos	Cromita, tantalita - niobita, ilmenita, wolframita, Scheelita, magnetitas titaníferas
Sulfuros	Sulfuros de metales primarios como cobre, níquel, plomo o zinc; molibdenita
Fosfatos	Rocas fosfatadas, arenas con monacitas
Silicatos	Berilo, espodumena, caolinita serpentina, zircón
Seleniuros y telurios	Barros anódicos de la electrólisis del cobre
Catalizadores	Níquel, molibdeno, vanadio
Escorias y lodos	Escorias de la conversión de matas de cobre, lodos con vanadio, escorias de la producción de ferroaleaciones.

Fuente: (Bustamante Rúa et al., 2008)

#### ***2.4.1 Principios físico-químicos de los procesos hidrometalúrgicos***

Las notorias diferencias entre los procesos que conllevan la pirometalurgia y la hidrometalurgia pueden ser analizadas bajo caracteres del orden termodinámico y/o cinético. Aunque en realidad la termodinámica es de análisis básico para cualquier proceso, la hidrometalurgia es utilizada principalmente para comprobar las posibles limitaciones del proceso y a su vez en la selección, planificación y evaluación de este. De igual manera, a este nivel de operación la exactitud en los cálculos puede dejar de ser completamente necesaria, según el trabajo ante temperaturas mínimas, constituyéndose en un aspecto limitante.

Los campos en los cuales la termodinámica es una herramienta de máxima utilidad pueden ser:

1) el cálculo de la solubilidad de gases y sales, simples y complejos, incluyendo los límites de saturación en los licores de lixiviación;

- 2) la estimación de las presiones de vapor de los componentes volátiles;
- 3) determinación de la extensión de una determinada reacción bajo distintas condiciones de temperatura, presión y concentración;
- 4) cálculo de los coeficientes de distribución para un proceso de cambio de ion.

La termodinámica además es importante para definir las condiciones de precipitación de los metales a partir de los licores de lixiviación e incluso para explicar otros ámbitos de los materiales metálicos como su mineralización geológica y su corrosión. En estos casos, los parámetros más importantes son el voltaje (relacionado con la energía libre), y el pH.

#### 2.4.2 Relación litósfera-hidrosfera-atmósfera

Esta relación se esquematiza en la Ilustración 3 y consiste en reacciones homogéneas o heterogéneas dependiendo de su ocurrencia en fase simple o en la interfase entre dos fases inmiscibles entre sí. La hidrosfera representa la porción líquida de la tierra, la litósfera la porción de la corteza terrestre y la atmósfera la envoltura gaseosa alrededor y dentro de la Tierra.

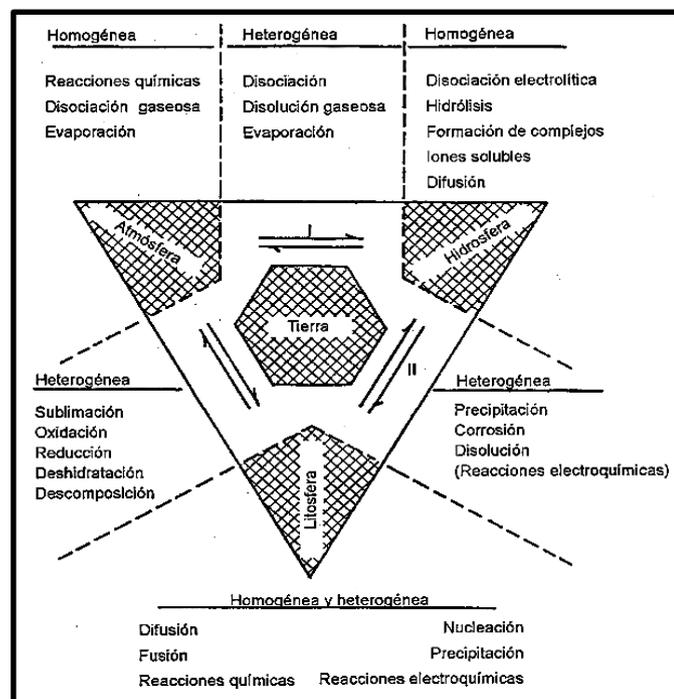
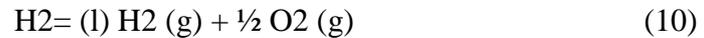


Ilustración 3. Relaciones entre procesos de tres estados

Fuente: ( Bustamante Rua et al., 2008).

- Las reacciones hidrósfera-atmósfera residen en que, los equilibrios establecen el potencial oxidante-reductor de la fase acuosa. Un tipo de reacción de equilibrio a considerar es la disolución del agua en sus componentes gaseosos, hidrógeno y oxígeno (Fórmula 10).



- Las reacciones hidrósfera-litósfera consisten en disoluciones acuosas y sólidas bajo distintas reacciones heterogéneas. Por ejemplo, si la concentración de especies solubles aumenta, puede generarse una saturación que origine la precipitación de compuestos sólidos (Fórmula 11).



La hidrometalurgia requiere de las siguientes etapas: chancado, molienda, aglomeración, lixiviación, extracción por solventes y electro obtención; sin embargo, es importante considerar el proceso de lixiviación. Cabe destacar que este proceso contempla la realización de tres etapas principalmente, sin olvidar que puede ser necesaria la aplicación de un proceso de preparación física o química de la mena.

- Lixiviación. - Operación en la que tiene lugar el ataque químico en fase acuosa, del metal valioso contenido en una mena mineral. La condición de ácido, básico o neutro depende del carácter del reactivo químico utilizado, que a su vez trabaja en función de la ganga del mineral; por lo cual, el uso de un reactivo depende de forma directa de la naturaleza de la ganga debido a que se podría consumir primero el químico, derivando un proceso no viable económicamente (Ballester, 2003).
- Purificación y/o concentración. - En esta etapa con la disolución obtenida de la anterior etapa, surge la necesidad de proceder a separar determinadas impurezas de la disolución antes sometida a precipitación. La intensidad con la que se lleve a cabo este proceso depende del metal valioso en disolución y del método químico de precipitación.
- Precipitación. - Se aplica en su mayoría para separar el metal valioso de la disolución, aunque en mínimos casos puede aplicarse de forma oxidada. Normalmente, se realiza el paso de una corriente eléctrica entre dos

electrodos, es decir, por electrólisis. Como ejemplo, en las disoluciones cianuradas de oro se utiliza la cementación o finalmente cualquier método convencional de la química ( Ballester, 2003).

## **2.5 Procesos previos a la lixiviación**

### ***2.5.1 Preparación mecánica de menas***

La preparación mecánica de menas consiste en operaciones de reducción de tamaño y separación de partículas (trituration – tamizado y rangos gruesos y molienda – clasificación en rangos finos), para liberar los minerales valiosos de los estériles y preparar en un rango de tamaños adecuados (Malla, 2000; Quimi Net, 2006).

Luego de la extracción de la mena de los depósitos con ciertas características físicas del mineral tales como color, brillo, aspecto de fractura, bajo diferentes métodos (barreta manual y neumática, perforadas de barrera y explosivos); son trasladados en bandas transportadoras, carretillas mecánicas, transportadoras de carga, grúas viajeras, palas mecánicas o trascabos; hasta la planta de beneficio para la recuperación del concentrado de material útil. Para ello, son requeridos cinco procesos:

#### **2.5.1.1 Trituración**

La trituración es la primera etapa mecánica en el proceso de conminución en la cual, el principal objetivo es la liberación de los minerales valiosos de la ganga (Technology Mineral Processing, 2014). Generalmente, la trituración es una operación en seco y se realiza en dos o tres etapas. Los trozos de mena extraídos de la mina pueden ser tan grandes como 1.5 m y éstos son reducidos en la etapa de trituración primaria hasta un diámetro de entre 10-20 cm en máquinas trituradoras de trabajo pesado.

La trituración secundaria incluye todas las operaciones para aprovechar el producto de la trituración primaria desde el almacenamiento de la mena hasta la disposición del producto final de la trituradora, con un diámetro entre 0.5 cm-2 cm.

Para separar la mena al tamaño adecuado que permita su paso al siguiente proceso, se utilizan cribas vibratorias que son colocadas delante de las trituradoras secundarias

para remover el material fino o limpiar la alimentación y aumentar así la capacidad de la etapa de trituración secundaria.

En el circuito de trituración convencional, generalmente se suele instalar en circuito cerrado con una criba o zaranda vibratoria. Según Metso (2002), se pueden clasificar las trituradoras en dos grupos principales:

- Trituradoras por compresión: comprime el material hasta su rompimiento, destacando las trituradoras de mandíbulas, de cono, giratorias y de rodillos.
- Trituradoras por impactos: usan el principio de impactos rápidos para triturar el material y son: trituradoras de impactos y los molinos de martillos.

La trituración tendrá diferentes etapas o procesos de acuerdo al volumen requerido de reducción, siendo importante indicar que no siempre es eficiente una sola trituradora.

### ***Tipos de trituración***

En la operación de reducción del tamaño de las rocas no existe una máquina capaz de realizar una trituración completa, con lo cual, se requiere una trituración primaria, secundaria y terciaria (incluso existen casos en lo que es necesario una cuarta etapa de trituración); empleándose para cada caso distintas trituradoras. En un proceso de chancado pueden haber 2 o 3 etapas, dependiendo del tipo de material a fragmentar y del tamaño que se determine. Debido a esto, la trituración se hace progresivamente en diferentes etapas (Calvino, 2017).

#### **▪ Trituración Primaria**

La trituración primaria reduce normalmente el tamaño de los trozos de mineral a un valor comprendido entre 8 pulgadas a 6 pulgadas. A continuación, los productos obtenidos se criban en un tamiz vibrante con objeto de separar aquellas partículas cuyo tamaño ya es lo suficientemente fino, con el consiguiente aumento en la capacidad de las quebrantadoras secundarias. La trituración primaria se lleva a cabo normalmente en trituradoras de mandíbulas o en trituradoras giratorias.

- **Trituración Secundaria**

En la trituración secundaria, el tamaño de las partículas se reduce a un valor comprendido entre 3 pulgadas y 2 pulgadas, garantizando las operaciones de molturación o concentración preliminar. Las quebrantadoras utilizadas en esta fase son por lo general de tipo giratorio o cónico. Estas quebrantadoras son similares a las utilizadas en la trituración primaria, diferenciándose solamente por su trabajo a velocidades relativamente altas (aproximadamente 500 r.p.m.) y en que la abertura de salida de los productos triturados es mucho menor.

- **Trituración terciaria o cuaternaria**

Aunque similar a los procesos anteriores, se diferencia en que el producto final lo constituye arenas o polvillo.

### **2.5.1.2 Molienda**

Es la última etapa del proceso de conminución de las partículas minerales y en esta etapa se reduce el tamaño de las partículas por una combinación de mecanismos de quebrado de impacto y abrasión, sea en seco o en suspensión en agua. Fundamentalmente este proceso radica en la diferencia de dureza que ofrecen los distintos minerales y las gangas presentes. Esto se realiza en recipientes cilíndricos rotatorios de acero que se conocen como molinos de rodamiento de carga, los que contienen una carga suelta de cuerpos de trituración, el medio de molienda libre para moverse dentro del molino y pulverizar las partículas de mena. El medio de molienda puede ser de bolas o barras de acero, roca dura y en algunos casos, la misma mena (molienda autógena). En el proceso de molienda, las partículas entre 5 mm y 250 mm se reducen de tamaño entre 10  $\mu\text{m}$  y 300  $\mu\text{m}$ .

### **2.5.1.3 Cribado o tamizado**

Fundamentalmente este proceso consiste en seleccionar y clasificar los minerales para medir el índice de finura obtenida durante la molienda. Esta operación separa por diferencia de tamaño los materiales útiles de las gangas y es necesario utilizar telas o láminas perforadas conocidas como tamices y cribas. Los tamices para su manejo generalmente se clasifican por el número de mallas o agujeros que existen en una distancia de pulgada lineal. Este proceso consiste en utilizar un agujero, un juego de

tamices colocados verticalmente en orden creciente de superior a inferior; dichos conjuntos pueden estar accionados por dispositivos que produzcan sacudidas, vibraciones, sarapes, oscilaciones o trepidaciones. Durante el tamizado los granos más gruesos son detenidos en los tamices colocados en la parte superior.

- ***Clasificación***

El principio fundamental de este proceso radica en la diferencia de velocidad de la caída del grano, de los minerales puestos en contacto con una solución acuosa más densa que el agua. La diferencia de velocidad de caída de los granos de los minerales se debe a la diferencia de densidades de los mismos. Los clasificadores son construcciones cilíndricas verticales cuya base tiene forma de cono truncado; la solución que se emplea se vuelve a utilizar limpiando con una prensa de un filtro y el tiempo de reposo es variable según del mineral de que se trate.

- ***Concentración***

Existen de dos tipos esencialmente en estos procesos:

- ❖ **Concentración por gravedad.**

Por la diferencia de densidad se aplica perfectamente en lugares oxidados (facilidad de empaparse). El principio básico es la diferencia de densidad que se genera al introducir tamices o mallas (4x5) dentro de un recipiente que contiene una solución acuosa. A dichos tamices se les aplica algún movimiento para hacer que el material se agite, permaneciendo los más densos en la parte inferior para inmediatamente, dejar reposar en las capas del mineral que se separa magnéticamente. Otra forma consiste en una masa que tiene un movimiento rápido con el cual el mineral menos pesado sigue en movimiento lento y permite que el mineral más pesado quede en el lado opuesto.

- ❖ **Concentración por flotación.**

Se aplica particularmente para minerales sulfurados, ofrece resistencia al empapamiento en un mineral más finamente dividido. Existe mayor dificultad para su empapado y fundamentalmente este proceso consiste en incrementar la tensión superficial de los minerales molidos. Después de que el mineral sale del proceso de clasificación se

le añade una sustancia llamada espumante, por ejemplo, aceite de pino; el cual permite que el mineral tenga mayor tensión superficial. Posteriormente, este mineral se lleva a un recipiente rectangular y se le añade agua hasta que cubra el mineral, se inyecta aire formándose una espuma con la cual se van los sulfuros (mineral sulfurado). Enseguida se añade más espumante y se inyecta aire para eliminar sus sulfuros y así sucesivamente. La flotación selectiva se realiza cuando el mineral está muy revuelto, es decir, hay la presencia de diferentes minerales; por lo cual, se requiere aprovechar la flotación selectiva añadiendo los aditivos adecuados.

#### ▪ *Granulometría*

Por granulometría o análisis granulométrico de un agregado se entenderá todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se puedan 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 (Cañas, 2014).

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). Para el llenado de la tabla de análisis granulométrico se utilizaron las siguientes relaciones y fórmulas.

Porcentaje retenido (Fórmula 12):

$$f_i (\%) = \frac{m_i}{\Sigma m} \cdot 100 \quad (12)$$

Acumulado bajo tamaño (Fórmula 13):

$$Fu_i (\%) = Fu_{i-1} - f_i \quad (13)$$

### Distribución Schuhmann

Esta distribución de tamaño es la más utilizada por su simpleza y permite representar sistemas particulados en el campo de la mineralurgia (Fórmula 14; Morales, 2012).

$$Fu\ G - S(x) = \left(\frac{x}{K}\right)^m \quad (14)$$

Donde:

K: Módulo del tamaño. Corresponde al tamaño máximo

m: Módulo de la distribución. Indicativo de la amplitud de la distribución (pendiente).

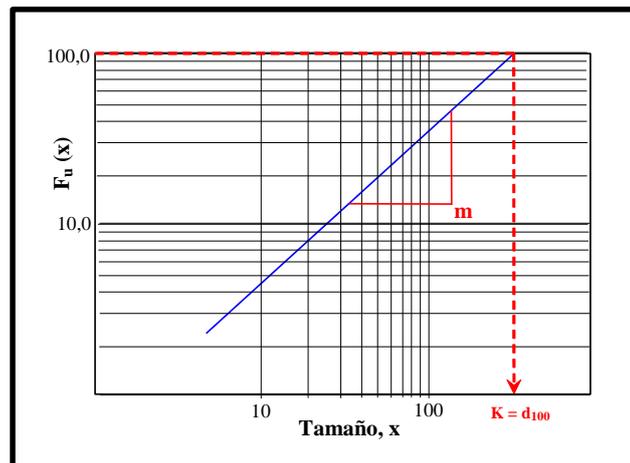


Ilustración 4. Distribución Schuhmann

Fuente: Elaboración propia

### Distribución Rosin Rammler

Esta distribución de tamaño sigue una línea recta en un gráfico del doble logaritmo del inverso de  $F_0(x)$ , versus el logaritmo del tamaño (Fórmula 15; Ilustración 5; Morales, 2012).

$$Fu\ R - R(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{x_0}\right)^n\right) \quad (15)$$

Donde:

$x_0$ : Tamaño característico y tiene unidad de longitud ( $x_0 = d_{63,2}$ ).

N: Módulo de la distribución. Indicativo de la amplitud de la distribución (pendiente).

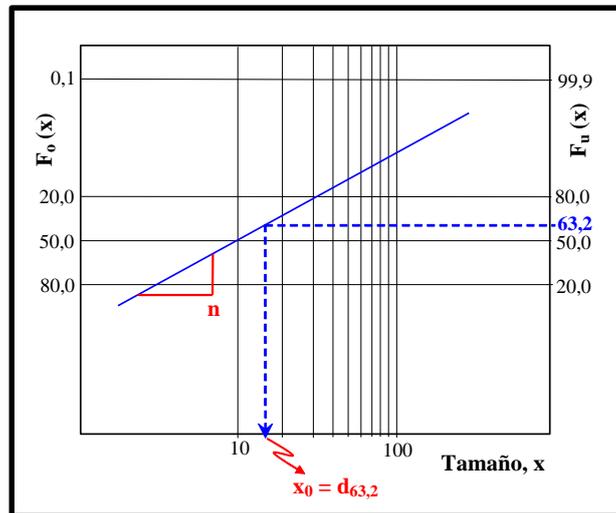


Ilustración 5. Distribución Rosin Rammler

Fuente: Elaboración propia

## 2.6 Lixiviación

Es la primera etapa de cualquier proceso hidrometalúrgico. Este término es aplicado a la recuperación o disolución química de un metal a partir de un mineral utilizando el disolvente adecuado. En general, se aplica a los minerales que no pueden ser tratados con un beneficio económico equivalente con métodos convencionales más desarrollados a escala comercial como la concentración.

Cabe destacar que los factores que afectan la velocidad de lixiviación del oro de un mineral son: temperatura, concentración de reactivos, ocurrencia de precipitación, etc. Por otra parte, la velocidad de lixiviación, depende de las propiedades del mineral tales como: porosidad, tamaño de partícula, asociaciones mineralógicas, composición, etc. Así, este proceso sería el ataque químico de un mineral que solo se puede realizar mediante cualquiera de las tres acciones siguientes: *ácido- base*, *redox* y *complejante*.

### ***2.6.1 Lixiviación estática o por percolación***

Esta se caracteriza porque no existe un movimiento relativo entre el sólido y la disolución de lixiviación. El sólido permanece estático y la disolución lo atraviesa, es decir, percola a su través. En estos casos, para que el líquido pase a través del sólido, normalmente el tamaño de la partícula no debe ser muy reducido, caso contrario, el lixivante no se podría mover a través del mineral. Un tamaño grande tiene implicaciones importantes, ya que su rendimiento no puede ser elevado debido a que el agente lixivante no puede penetrar toda la partícula de sólido para disolver rápida y completamente. En este proceso de lixiviación estática a nivel se desarrollan tres modalidades distintas: lixiviación in situ, lixiviación en montones o eras y lixiviación en estanques.

- a) Lixiviación in situ. - En este método de lixiviación se solubilizan las especies mineralógicas valiosas existentes en un yacimiento sin necesidad de mover el mineral del lugar donde se encuentra. Todo esto conlleva una serie de requisitos y parámetros para su desarrollo.
- b) Lixiviación en montones.- El mineral es previamente triturado hasta el tamaño adecuado, e inclusive sin triturarse tal cual sale de la mina; se apila en montones, denominados eras o pilas, formando un lecho estático a través del cual se hace percollar la disolución lixivante que se añade al mineral de forma discontinua, alternándose los periodos de riego con los de sequedad (Ballester et al., 1980).
- c) Lixiviación en estanques. - Usada en instalaciones de obtención de cobre, para lo cual, el mineral generalmente oxidado (1%- 2% de Cu) se ataca con disoluciones concentradas de ácido sulfúrico para producir una disolución rica adecuada para la electro-obtención del metal.

### ***2.6.2 Lixiviación dinámica o con agitación***

La lixiviación por agitación se utiliza en los minerales de leyes altas, cuando los minerales generan un alto contenido de finos en la etapa de chancado, o cuando el mineral deseado está también diseminado que es necesario molerlo para liberar su parte valiosa y exponerlos a la solución lixivante. También se utiliza para lixiviar calcinas de tostación y concentrados.

Se recurre a la agitación mediante burbujeo o agitación mecánica para mantener la pulpa en suspensión hasta que se logra la disolución completa, siendo el tiempo de

contacto de los sólidos con la solución del orden de horas comparado con el proceso de lixiviación en pilas que requieren meses. Los agitadores mecánicos son simplemente impulsores colocados en el interior del tanque, mientras que tanques agitados con aire son a menudo tanques de tipo “Pachuca”.

## **2.7 Parámetros que influyen en la lixiviación**

Los dos parámetros fundamentales que pueden utilizarse para controlar el comportamiento de los metales en disolución acuosa son el pH y el potencial de oxidación de la disolución; los cuales están relacionados respectivamente con dos acciones: el ácido –base y el redox. Es decir, el comportamiento termodinámico de un sistema acuoso viene determinado por estos dos factores junto con la concentración-actividad de las especies disueltas. El pH de la disolución, que marca el carácter ácido –base de la misma, es el factor principal en la solubilidad y un gran número de procesos hidrometalúrgicos dependen de forma crítica del control de este parámetro.

### **2.7.1 Aeración**

Como ya se ha mencionado, el oxígeno es esencial para la disolución del oro en soluciones de cianuro. El aire atmosférico es el agente oxidante más comúnmente empleado en la cianuración, siendo la concentración de equilibrio del oxígeno, en condiciones ideales de aireación y agitación, de 8.2 ppm (Kuzmin, s.f.). Para concentraciones de cianuro por encima de 0.1%; la tasa de disolución es directamente proporcional a la presión parcial de oxígeno. Para concentraciones inferiores y presiones elevadas de oxígeno, la tasa de las reacciones de disolución depende solamente de la concentración de cianuro. Existe una relación entre las concentraciones de iones  $\text{CN}^-$  y de  $\text{O}_2$  en solución, en la cual la tasa de la disolución alcanza un máximo. Esta razón está entre 4.6 y 7.6 (Kakovskii, 1964; Collazos y Mendoza, 2019).

### **2.7.2 Temperatura**

El aumento de la temperatura eleva la tasa de las reacciones de disolución, pero disminuye la solubilidad del oxígeno en la solución. Por lo tanto, existe un rango de temperatura óptima que equilibra estas tendencias. Julian y Smart (1922) encontraron en

sus estudios el valor de 85 °C, pero hay registros indicando 80 °C. Encima de 110 °C la descomposición del cianuro se vuelve relevante (Collazos y Mendoza, 2019).

### ***2.7.3 Efecto de la velocidad de agitación***

Al aumentar la velocidad de agitación, disminuye la capa límite de fluido que rodea a las partículas, reduciéndose el espacio que deben recorrer los iones cianuro y el oxígeno para alcanzar la superficie del metal, aumentando además la disolución.

La velocidad de agitación debe ser lo suficientemente alta para mantener los sólidos en suspensión para que no decante. Una velocidad de agitación alta tiende a favorecer la cinética de la reacción, pero tiene un costo energético apreciable. Favorece también la disolución de gases en la solución. Existen varios diseños de agitadores (Ilustración 6, Rubén y Calli, 2016).

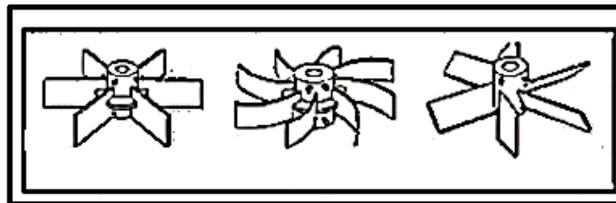


Ilustración 6. Tipos de impulsores

Fuente: (Rubén y Calli, 2016)

### ***2.7.4 Efecto de la densidad de pulpa***

Es la mezcla matemática de una porción constituida por sólidos de una granulometría casi uniforme y otra constituida por un líquido, generalmente el agua. La pulpa tiene características propias tales como gravedad específica, peso y volumen, que generalmente son referidos en porcentajes de peso o volumen de los constituyentes. La densidad de pulpa y el peso de la unidad de volumen que generalmente se denomina en kilogramos por litro o gramos por litro, puesto que la pulpa se comporta como un líquido o fluido. El porcentaje de sólidos debe ser en la mayoría de los casos lo más alto posible para alcanzar una alta concentración del ion metálico en la solución de lixiviación, minimizar los costos de inversión en el circuito de lixiviación por menor capacidad volumétrica y reducir el tamaño y costo subsecuente de espesamiento y filtración. El porcentaje de sólidos en la pulpa varía entre 35% y 60% (Rubén y Calli, 2016).

### **2.7.5 Granulometría**

Para exponer parcialmente la superficie del mineral valioso a la acción del lixivante, depende del tipo del mineral y de sus características mineralógicas. Por lo cual, se considera un tamaño que no contenga un exceso de gruesos mayor a 2 mm y por otro lado, que no contenga un exceso de finos; es decir, el 40% del mineral no debe de ser menor que 75 micrones puesto que se puede dificultar el proceso de lixiviación por agitación (Josué y Leyva, 2019)

Cuando el tamaño de grano es mayor a 2 mm puede producir problemas en la agitación, y cuando es menor a 75 micrones trae dificultades en la separación de sólido-líquido de la pulpa lixiviada. Debido a las dificultades anteriores, así como para disminuir el consumo de energía por el concepto de molienda y los costos de filtración y decantación; la agitación se debe realizar en los tamaños que la operación lo permita (Misari, 2010).

### **2.7.6 Tiempo de lixiviación**

En la Ilustración 7 se muestra una curva típica entre el porcentaje de extracción y el tiempo de lixiviación. Al inicio, una extracción rápida decrece hasta un límite obtenible para un tamaño dado de partícula. Dichas curvas se obtienen de pruebas de lixiviación en botella de laboratorio. La lixiviación se realiza a temperatura ambiente o en autoclaves. La concentración de reactivos debe ser optimizada según el tipo de operación. El porcentaje de los sólidos debe ser en la mayoría lo más alto posible para alcanzar una alta concentración del ion metálico en la solución de lixiviación. Los porcentajes de sólido en la pulpa varían de 20% a 50 % y la velocidad de agitación debe de ser suficiente como para mantener los sólidos en suspensión y no en decantación. Una velocidad de agitación alta suele favorecer la recuperación en la lixiviación por agitación (Josué y Leyva, 2019).

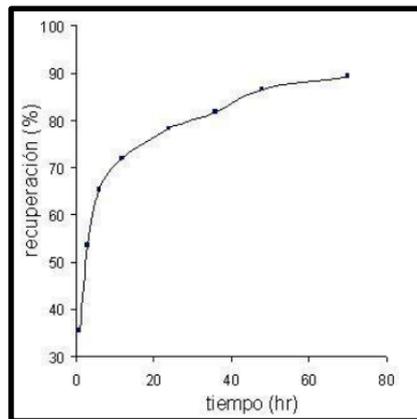


Ilustración 7. Curva típica de tiempo vs % de recuperación

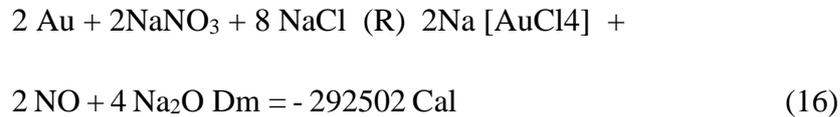
Fuente: Universidad de Atacama (s.f.).

## 2.8 Aplicación del pre-tratamiento de oxidación con oxígeno del aire

En la solución, el oxígeno disuelto a cierta concentración es capaz de oxidar a los sulfuros y ofrecer buenas condiciones ambientales de tratamiento. Esto se puede hacer inyectando aire u oxígeno como paso previo antes de la lixiviación con cianuro para oxidar y/o apaciguar las superficies más reactivas, y reducir el consumo de reactivos que consumen los sulfuros de hierro como la pirrotita. Este tratamiento generalmente oxida la superficie de los sulfuros aptos para el tratamiento de minerales, donde el oro está íntimamente relacionado con estos compuestos. La oxidación de los sulfuros produce iones ferrosos a iones férricos, con un precipitado de hidróxido férrico, ocasionando la neutralización de la superficie de los sulfuros de hierro. Como resultado, el éxito de la pre oxidación elimina una parte importante de los consumidores de cianuro y oxígeno para la posterior etapa de cianuración. La mayoría de los sulfuros se descomponen muy lentamente en solución acuosa en un amplio rango de pH y bajo las condiciones atmosféricas en la ausencia de un oxidante, y son estables para todos los fines prácticos. Pueden descomponerse rápidamente al aumentar el potencial de oxidación de la solución, lo que puede lograrse mediante la adición de un oxidante adecuado, tal como oxígeno, aire o mediante la elevación de la temperatura y la presión. Bajo condiciones de Eh – pH pueden ser completamente oxidados en cuestión de 22 horas, e incluso minutos (Marsden y House, 2006; Yamashiro, 2012; Josué y Leyva, 2019).

## 2.9 Termodinámica de lixiviación del oro

La termodinámica permite definir el estado de equilibrio que se deberá producir en una reacción de lixiviación bajo condiciones específicas, aunque de manera real no sea alcanzado el equilibrio. De este modo, se pueden obtener la fórmula (16):

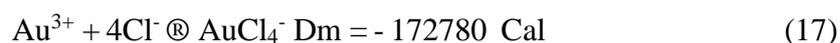


Esta reacción es aplicable por la espontaneidad de la energía libre, sin ser necesaria la intervención de energía externa para su consolidación. En consecuencia, se deben generar diagramas de estabilidad (E-pH) para representar el comportamiento termodinámico del sistema en torno a las zonas de estabilidad de los elementos y compuestos, conforme niveles de pH y el potencial del proceso de oxidación y reducción; variables de suma importancia para indicar la extensión de las reacciones (Palacios, 2002).

Otro factor a considerar es que, si bien los diagramas muestran datos aproximados en exactitud, no se considera la cinética de los procesos; sin embargo, se convierten en herramientas importantes para el análisis de los procesos de lixiviación y el conocimiento de las especies intervinientes.

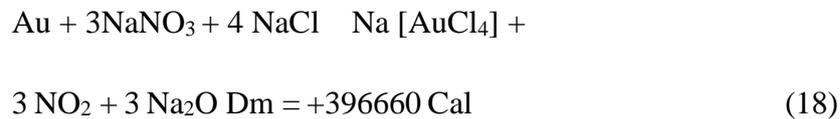
### 2.9.1 Consideraciones termodinámicas

Al aplicar una primera evaluación termodinámica, se puede notar que la disolución del oro mediante sales oxidantes a temperatura ambiente, es un proceso de atracción, tal como lo muestra la fórmula (17):



Esta reacción debe respetar el orden izquierda-derecha, con lo cual se garantiza la estabilidad del complejo para su extensión en el medio (Palacios, 2002).

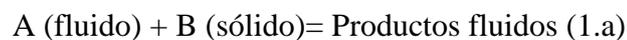
De este modo, el mismo autor Palacios (2002) expone que para que esta reacción ocurra en medio ácido, en presencia de sales oxidantes; deben adicionarse correctamente las concentraciones de las sales de nitrato y cloruro de sodio en el medio ácido, en la que los iones cloro controlan el proceso; además que el excesivo nitrato generará gas NO<sub>2</sub>, un contaminante para el medio ambiente (Fórmula 18).



## 2.10 Modelo cinético de lixiviación de oro

Para describir la velocidad de una reacción heterogénea se utilizan varios modelos mecánicos. Entre ellos, se tiene los modelos de núcleo recesivo con y sin formación de cenizas, siendo son los más estudiados en el análisis de experiencias cinéticas (Orbegoso, 2013).

Las reacciones heterogéneas en las que un sólido se pone en contacto con un líquido o gas, pueden representarse por:



Como se muestra en la Ilustración 8, las partículas sólidas no cambian de tamaño durante la reacción cuando esta contiene gran cantidad de impurezas que permanecen como cenizas (material completamente convertido y sólido inerte), o si estas impurezas forman un producto material consolidado, de acuerdo con las reacciones correspondientes en los enunciados (1.b) y (1.c). Las partículas disminuyen de tamaño durante la reacción cuando se forma ceniza no adherente o un producto material no bien consolidado, al aplicarse la sustancia B pura, en la reacción de la ecuación (1.a). Las reacciones sólido-fluido son numerosas y de gran importancia industrial (Orbegoso, 2013).

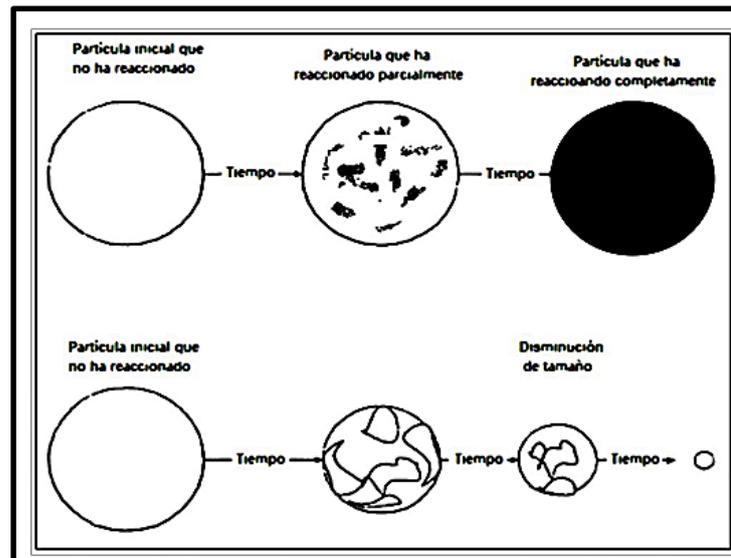


Ilustración 8. Diferentes tipos de comportamiento de partículas sólidas.

Fuente: (Universidad de Antofagasta, s.f.)

## 2.11 Potencial de oxidación

En un sistema acuoso priman las valencias o estados de oxidación de las especies metálicas y de los ligandos, lo cual determina a su vez, la solubilidad de las especies. La mayoría de metales y aleaciones, así como la mayoría de los sulfuros, deben ser oxidados para que luego se solubilicen, precisándose un oxidante para un número muy importante de reacciones de lixiviación.

## 2.12 Lixiviación cianurante de minerales de oro

El oro se disuelve fácilmente en disoluciones diluidas del ion cianuro, condición conocida ya hace dos siglos; aunque el fundamento de este ataque ha permanecido sin aclararse hasta hace poco tiempo. Por ejemplo, no se sabía la causa por la cual los metales nobles se lixivaban sin dificultad en cianuro diluido y por qué las velocidades de lixiviación eran dependientes de la concentración del lixivante hasta una determinada concentración crítica. En 1846, Elsner propuso por primera vez que el oro se disolvía en una disolución de cianuro, solo si era en presencia de oxígeno (Fórmula 19).



### 2.13 Cianuración

La cianuración utiliza la propiedad del oro para disolverse en soluciones alcalinas diluidas de cianuro de sodio y potasio, en presencia de oxígeno, de manera preferencial sobre otros minerales. Sin embargo, industrialmente se prefiere usar el cianuro de sodio (NaCN) por su mayor contenido de  $\text{CN}^-$  activo por unidad de peso: 53%, versus 40% en el caso del KCN, lo que influye en los precios de comercialización y transporte. El cianuro de calcio:  $\text{Ca}(\text{CN})_2$ , no es tan utilizado a pesar de presentar un buen porcentaje de ion  $\text{CN}^-$  activo: 56.5%; dado que suele comercializarse con un mayor contenido de impurezas que en los otros dos casos.

### 2.14 Cinética de la cianuración

La disolución del oro en solución alcalina de cianuro es una reacción heterogénea que ocurre en la interfase sólido – líquido (Ilustración 9).

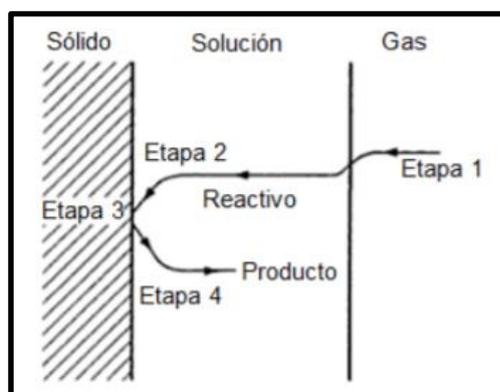


Ilustración 9. Representación esquemática de las etapas en una reacción química heterogénea

Fuente: (Marsden y House, 2006).

La velocidad de transferencia de masa de reactantes desde la fase líquida a la interfaz, y de los productos de reacción de la interfaz de la fase líquida; pueden tener un efecto importante sobre la cinética total de cianuración del oro. Según los estudios realizados, se ha demostrado que la disolución del oro está controlada por la difusión (transferencia de masa) del oxígeno disuelto y de los iones cianuro a través de la capa límite de la interfaz sólido-líquido, tal como muestra la Ilustración 10.

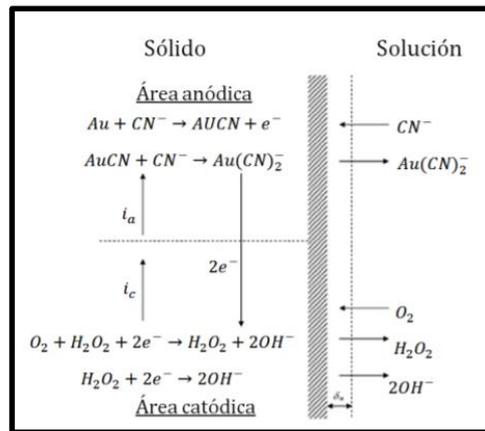


Ilustración 10. Reacción sólido – líquido de la disolución de oro en una solución de cianuro

Fuente: (Marsden y House, 2006).

La velocidad de disolución incrementa con la concentración de oxígeno. Sin embargo, cuando la concentración de oxígeno y la agitación se incrementan más allá de ciertos niveles, el oro puede llegar a pasivarse y a disminuir su velocidad de disolución a un nivel bajo, en casos extremos de estos parámetros.

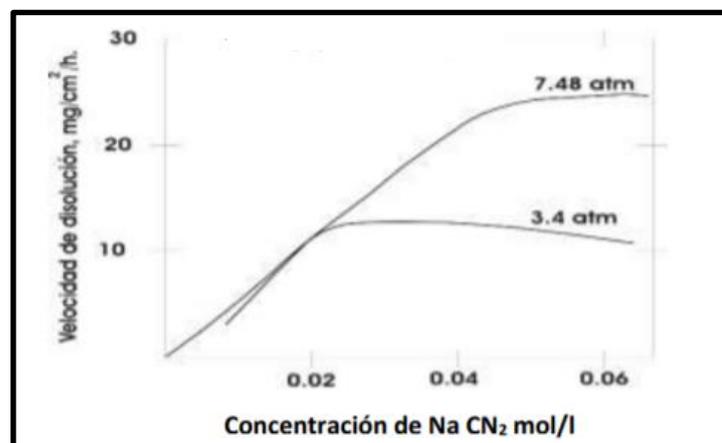
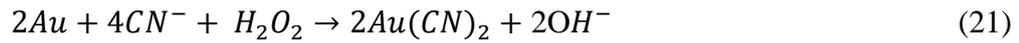


Ilustración 11. Concentración de  $NaCN_2$  mol/l vs. velocidad de disolución  $ml/cm^2/h$

Fuente: (Rovira, 2017)

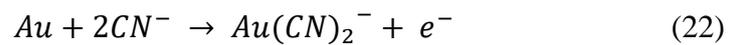
Finalmente, Budlander señaló que detrás de todas estas reacciones hay un mecanismo electroquímico de disolución con las correspondientes etapas de oxidación (anódica) y de reducción (catódica). Se presenta la siguiente reacción en la cual se observa cómo transcurren dos etapas (Fórmula 20 y Fórmula 21).



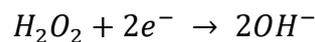
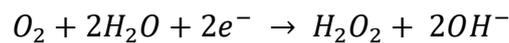
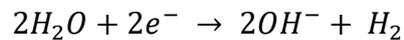


Se puede afirmar que la cinética de la cianuración del oro es de naturaleza electroquímica, ya que mientras se llevan a cabo estas reacciones, se produce un mecanismo electroquímico de disolución con etapas de oxidación (anódica, Fórmula 22) y de reducción (catódica, Fórmula 23):

#### Anódica



#### Catódica



De este modo, se puede demostrar que en ausencia de ion cianuro, se forma una fase insoluble de  $Au_2O$  siempre que el pH sea superior a 12. 3. El potencial de equilibrio entre el Au y el ion Au es de 0. 446 V.

En el caso de que la pulpa esté muy ácida, existiría pérdida de cianuro por hidrólisis y su composición de  $CO_2$  según estas reacciones sería la planteada en las fórmulas (24) y (25):



Sin embargo, no es recomendable mantener un pH alto porque la velocidad de lixiviación disminuye bruscamente al formarse sobre la superficie del oro una película de óxidos que retardan el ataque. El uso de concentraciones altas de cianuro tampoco es recomendable porque influye en el pH de la disolución. La velocidad de reacción mejora aumentando la temperatura, pero al mismo tiempo disminuye la solubilidad de oxígeno; por ello, el óptimo grado de temperatura está alrededor de los 80°C como máximo.

### ***2.14.1 Concentración de oxígeno***

La concentración de cianuro es relativamente fácil de controlar, no obstante, la del oxígeno debido a su escasa solubilidad en agua en condiciones atmosféricas, a nivel del mar y a 25°C, en solución 8. 2mg  $O_2$ /litro; resulta difícil de controlar ante la cantidad de oxígeno disuelto en soluciones diluidas de cianuro. De tal manera, depende de cuatro factores:

1. La altitud y presión barométrica.
2. La temperatura de la solución.
3. El tipo o intensidad de la agitación.
4. La fuerza iónica de la solución.

A bajas concentraciones de cianuro, la presión de oxígeno no tiene efecto sobre la velocidad de disolución del oro, sin embargo, a elevadas concentraciones de cianuro, la velocidad depende de la presión de oxígeno.

## **2.15 Maquinaria a utilizarse**

La maquinaria empleada depende totalmente de los procesos a realizar y del dimensionamiento necesario para el presente experimento, para lo cual, en cada una de las etapas existieron algunos tipos de maquinaria preseleccionadas según su factibilidad; además, en el caso de procesos a escala de laboratorio es posible tomar guías que se pueden adecuar conforme las necesidades.

### ***2.15.1 Trituradoras***

Es la primera etapa y básicamente se pueden clasificar dos grupos principales:

- Trituradoras por compresión como trituradoras de mandíbulas, cono, giratorias y de rodillos (Metso, 2002).
- Trituradoras de impactos y molinos de martillos (Metso, 2002).

En consecuencia, la trituración tendrá diferentes etapas o procesos de acuerdo a la cantidad deseada de reducción del material en cuestión. Específicamente, las trituradoras empleadas son:

## Trituradora de Mandíbulas

También conocida como trituradora de quijada, se emplea en la trituración llamada de primer nivel, donde los productos obtenidos no son tan finos. El campo de mayor aplicación es el de la producción mineral e industrial. Estos procesos requieren de una trituración media o gruesa y se aplican a materiales de hasta 320 MPa de compresión (Ilustración 12; QuimiNet, 2011).

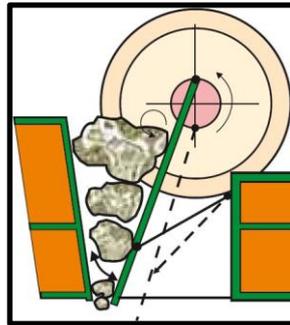


Ilustración 12. Trituradora de Mandíbulas.

Fuente: (Metso, 2002)

Por consiguiente, la trituradora de mandíbula se puede ubicar en cualquiera de los siguientes modelos de oscilación:

- Oscilación sencilla
- Oscilación media
- Oscilación compleja

## Funcionamiento de la trituradora de mandíbulas

La trituradora de mandíbula recibe su nombre del movimiento que realiza su placa de trituración, similar a una mandíbula al masticar. El motor de la trituradora produce un movimiento oscilatorio en la placa de trituración, misma que está colocada de manera diagonal. El mineral es introducido por la parte superior de la trituradora, que tiene una cavidad amplia que se va reduciendo a medida que el mineral entra en la trituradora. El movimiento oscilatorio y la presión que la placa de trituración ejerce sobre los minerales al hacerlos chocar con la pared interna de la trituradora, genera que las piedras se fragmenten hasta la trituración (QuimiNet, 2011).

Algunas de las características de este tipo son:

- Alto rendimiento para triturar.
- Uniformidad en la granulometría.
- Estructura sencilla.
- Fácil reparación y mantenimiento.
- Fácil control y operación.
- Reducidos costos de operación.
- Puertos de alimentación y descarga ajustables.
- Aplicaciones en minería, construcción, extracción entre otras.

### **Trituradora de cono**

Los trituradores de cono pueden considerarse una modificación de una trituradora giratoria, presentan un esquema similar de funcionamiento; aunque se utilizan únicamente para la trituración secundaria o terciaria. En este tipo, los conos secundarios dan granulometrías entre 150 mm y 40 mm, utilizándose como primarios en graveras y secundarios en canteras. Los conos terciarios dan granulometrías entre 10 mm y 40 mm, siendo los gravilladores por excelencia, con productos con coeficientes de forma excelentes. Los trituradores de cono de ultra finos se usan cuando se necesitan grandes cantidades de arena y sus granulometrías suelen estar entre los 5 mm y 20 mm. Estas máquinas permiten buenas relaciones de reducción, en proporciones de 6 a 8 en la trituración secundaria clásica y de 2 a 3 en las moliendas gruesas, con formas de grano adecuadas muchas veces en cuanto a su forma no lajosa (Ilustración 13; Yepes, 2014).

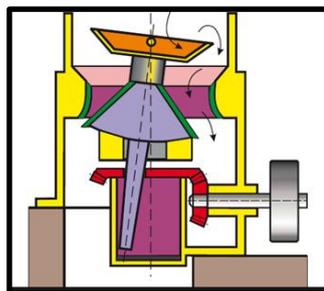


Ilustración 13. Trituradora de cono

Fuente: (Metso, 2002).

Con el fin de asegurar el control sobre el tamaño del producto, estos trituradores se caracterizan porque presentan una sección paralela entre los revestimientos de trituración a la salida de la descarga. Los revestimientos de las partes internas están fabricados en acero al manganeso, con gran resistencia al desgaste y alta tenacidad.

Dependiendo de la posición del eje respecto al cono, pueden ser suspendidas o apoyadas:

- Las suspendidas precisan de un crucero para apoyar al eje de forma similar a las trituradoras giratorias. En este caso, los esfuerzos de trituración son prácticamente horizontales, lo cual permite una pendiente importante que disminuye la fricción con las piezas de trituración y favorece el paso de los materiales.
- Las apoyadas son también denominadas Symons, donde el eje reposa sobre unos cojinetes semiesféricos a través del cuerpo tronco cónico móvil. El ensanchamiento del tazón permite un ángulo del cono más abierto (90°-125°), proporcionando una mayor capacidad de trituración.

La trituradora de esta serie es adecuada para minerales o rocas semi duras y duras. Presenta la ventaja de una construcción fiable, de alta productividad, ajustable y con menores costos de operación. El sistema de liberación de resorte de la trituradora y un sistema de protección de sobrecarga permiten pasar por la cámara de trituración sin dañar a la trituradora. Se emplea aceite seco, agua, dos tipos de formación, sellado de piedra de yeso y aceite para motores separados, asegurando un rendimiento fiable. El tipo de cámara de trituración depende del tamaño de la alimentación y la finura del producto triturado; el tipo estándar se aplica a trituración media, el tipo mediano se aplica a trituración media o fina y la de tipo cabeza pequeña se aplica a trituración fina (Yepes, 2014).

### **Trituradora de martillos**

Este tipo se utiliza en plantas de minería, de material refractario, de cemento y de vidrio; dentro de un proceso en seco y en húmedo para los materiales frágiles. Para ser húmedo, los materiales se Trituran con agua; mientras que en seco, se prohíbe combinar

con agua. Entre sus ventajas destacan su alta capacidad, una finura media, costos bajos, estructura simple y fácil mantenimiento (Ilustración 14; Vipeak Group, 2019).

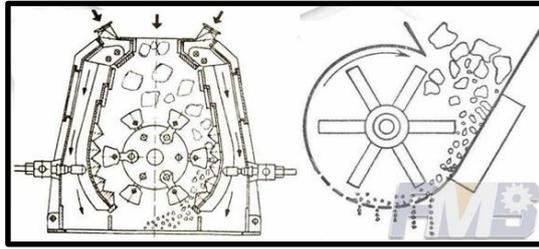


Ilustración 14. Trituradora de martillos.

Fuente: (Formats Construction Machinery, 2018)

### 2.15.2. Agitadores

En primera instancia es necesario reconocer los tipos de agitación que se realizan en los procesos de lixiviación de oro, para así, encontrar el más factible.

#### **Agitación mecánica**

En el proceso de la lixiviación de un mineral, es totalmente necesario que exista un contacto entre la disolución cianurante y el sólido. Por efecto de la gravedad, el mineral ingresado tiene la tendencia a depositarse en el fondo del reactor, siendo necesario mantenerlo en suspensión. Generalmente, la forma más efectiva es proyectar en el líquido un movimiento que pueda superar la velocidad de caída de las partículas libres, logrando que estas se unan al líquido, a la vez que se impide el descenso o sedimentación.

En este caso, los reactores utilizan un mecanismo en el cual se busca generar turbulencia en el interior de una vasija cilíndrica con un dispositivo adecuado. Este artefacto consiste en un sistema motriz que conforme condiciones adecuadas de velocidad, y mediante un eje en el extremo inferior con paletas; produce la turbulencia deseada para la pulpa. El sistema antes mencionado consta de un motor eléctrico y un sistema de poleas para reducir la velocidad, donde las características del proceso restringen en cierta medida la variedad en la selección de las hélices (marina y de turbina).

Las ventajas en la selección de las paletas son notorias para este caso dada la diferencia de operación de cada yacimiento, por lo cual, las hélices planas verticales presentan un menor consumo en la potencia del equipo.

## Agitación neumática

Esta aplicación se presenta en los tanques Pachuca, donde se aprovecha la energía en la inyección de aire comprimido a la pulpa, puesto que esta produce el movimiento debido a la expansión que se realiza en su vértice inferior. En un proceso ideal, toda la energía adiabática utilizada para comprimir el aire debería liberarse como energía de agitación; sin embargo, cualquier pérdida de calor desde el aire eyectado o dirigido a la pulpa no es funcional. La Ilustración 15 indica los tipos de agitación: a) agitación mecánica, b) agitación neumática.

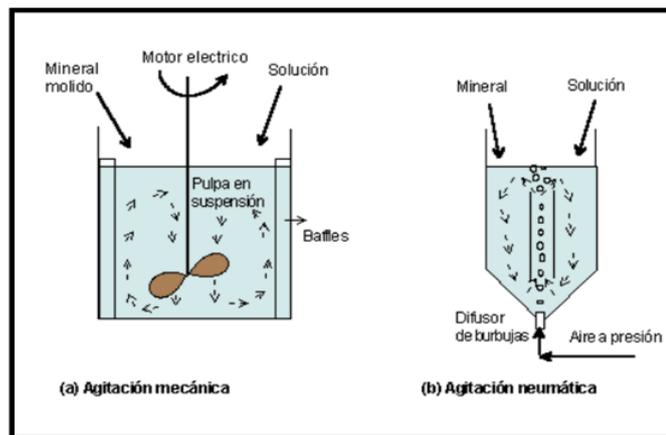


Ilustración 15. Tipos de agitación: (a) Agitación mecánica, (b) agitación neumática

Fuente: (Universidad de Atacama, s.f.)

## Ventajas comparativas con otros métodos de lixiviación

- Alta extracción del elemento a recuperar.
- Tiempos cortos de procesamiento (horas).
- Proceso continuo que permite una gran automatización.
- Facilidad para tratar menas alteradas o generadores de finos.

## Desventajas

- Mayores costos de inversión y operación
- Necesita una etapa de molienda y una etapa de separación sólido (espesamiento y filtración).

## CAPÍTULO III

### 3. Diseño experimental, análisis de composición y estructura del mineral

#### 3.1 Modelo experimental

Las investigaciones y en particular los diseños experimentales intentan establecer las relaciones causa-efecto; es decir, para definir la manera en que una variable independiente (causa) modifica una variable dependiente (efecto). De este modo, se pueden definir algunos conceptos fundamentales:

Experimento.- Es un estudio de investigación en el que se manipula deliberadamente una o más variables independientes para analizar las consecuencias que dicha manipulación tiene sobre una o más variables dependientes; dentro de una situación de control para el investigador (Ramón, 2014).

Variable independiente. - Representa los tratamientos, factores o condiciones que el investigador controla para probar los efectos sobre la variable dependiente.

Variable dependiente. - Refleja los resultados de un estudio de investigación.

Variable contaminadora o extraña. – Cuando se presenta en un diseño experimental es la variable interviniente, un tipo de variables independientes que si no se controlan, pueden alterar el resultado de la investigación.

#### 3.1.1. Tipología de los diseños experimentales

Según Campbell y Stanley (1966), se pueden escoger los siguientes son criterios para la nominación de los diseños experimentales:

R = Para asignación al azar o aleatorización.

G = Para determinar el número o grupo de sujetos (G1 = grupo 1;?).

X = Para la presencia de un tratamiento, estímulo, o condición experimental; las cuales pueden ser varias, por lo que pueden tener subíndices (X1, X2, ..., Xn)

O = Una medición a los sujetos de un grupo. Puede tener subíndices para determinar el número de mediciones (O1, O2, ..., On)

- = Ausencia de un estímulo, indica que se trata de un grupo control.

Según estos criterios, se pueden presentar los tipos de experimentos indicados en la Ilustración 16:

1°	RG <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>	X	O <sub>2</sub>
2°	RG <sub>1</sub>	X	0	
	RG <sub>2</sub>	-	0	
3°	G	O <sub>1</sub>	X	O <sub>2</sub>
4°	RG <sub>1</sub>	X <sub>1</sub>	O <sub>1</sub>	
	RG <sub>2</sub>	X <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
	RG <sub>3</sub>	X <sub>3</sub>	O <sub>3</sub>	
	RG <sub>k</sub>	X <sub>k</sub>	O <sub>k</sub>	

Ilustración 16. Diseño de muestra

Fuente: (Ramón, 2014)

### 3.1.2. Tipos de experimentos

Diseño experimental puro. - En este tipo se manipulan una o varias variables independientes para observar sus efectos sobre una o varias variables dependientes, todo dentro de una situación de control. Este experimento debe reunir las siguientes condiciones:

1. Manipulación intencional de una o más variables independientes.
2. Se debe medir el efecto que la variable independiente tiene en la variable dependiente.
3. Buen control o validez interna de la situación experimental.

Manipulación intencional de una o más variables independientes. - En un experimento verdadero, se parte de la hipótesis de que la variable independiente producirá modificaciones en la variable dependiente al variarse la primera.

Medición del efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente. - Para ello se debe considerar que la medición asigna valores numéricos a los resultados dentro de los diseños experimentales. En consecuencia, es necesario establecer un error que puede categorizarse como:

- a) de razonamiento: debido a errores en la deducción o a lógicas indebidas;
- b) de percepción: originado en los engaños que se producen en los órganos de los sentidos o en el proceso de percepción;

c) de apreciación: derivado de una visión intelectual parcial y subjetiva de la realidad;

d) de planificación: por concepciones equivocadas de las operaciones o fases de la investigación;

e) muestra: es un error aleatorio de tipo estadístico que tiene lugar cuando se utilizan y seleccionan las muestras;

f) sistemático: es el que se comete de manera constante dentro de un proceso de medición.

### 3.1.3. Diseño utilizado

El diseño del presente estudio contempló la variación en una variable independiente y preservando otros parámetros. De este modo, mediante un proceso de tres repeticiones, se generaron ocho cambios de la variable independiente (Tabla 3 y Tabla 4).

Tabla 3: Diseño ejemplificar de caso

	<b>O1</b>	<b>O2</b>	<b>O3</b>
G1	X1	X1	X1
	X2	X2	X2
	X3	X3	X3
	X4	X4	X4
	X5	X5	X5
	X6	X6	X6
	X7	X7	X7
	X8	X8	X8
	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>
	<b>Sfn</b>		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Valores de las incógnitas de los cuadros

Gn	Número de grupos de prueba
On	Número de repeticiones de Gn
Xn	Factores constantes
Sn	Resultados de cada repetición
Sfn	Resultado promedio de prueba
8	Número de pruebas totales

Fuente: Elaboración propia

### **3.2 Mineral**

El mineral para el presente trabajo proviene de la mina “Cristhian David”, ubicada en la comunidad Huizho, perteneciente a la parroquia Casacay, del cantón Pasaje de la Provincia de El Oro, Ecuador.

Dicho mineral tiene un tenor de 9.24 gr/ton, según el ensayo de fuego realizado y se destaca por ser un cuarzo feldespático, con lo cual existe la probabilidad de que el oro no se encuentre liberado; para lo que se podría requerir de un posterior proceso hidrometalúrgico.

### **3.3 Caracterización físico - química del material**

#### ***3.3.1 Determinación de la densidad real por desplazamiento de volumen***

La masa de la muestra fue determinada en 20 g y colocada en una probeta graduada. A continuación, fueron vertidos 60 ml de agua a la probeta, determinándose una lectura de 68 ml, con un desplazamiento de 8 ml y calculando una densidad aparente de 2.5 g/cm<sup>3</sup>.

#### ***3.3.2 Determinación del pH natural***

Fue preparada una muestra al 20% de sólidos y se procedió a su agitación manual. Previamente se tomó 100 ml de agua destilada y se midió el pH, determinando un valor de 7; en tanto que la muestra preparada arrojó un pH de 6.

#### ***3.3.3 Gravedad específica***

La gravedad específica del mineral se determinó utilizando el método de la Fiola, donde se obtuvo el valor:  $> G.e 2.8$ .

#### ***3.3.4 Porcentaje de sólidos***

Para obtener el porcentaje de un sólido distinto dentro de la densidad de pulpa, se debe aplicar la relación sólido-líquido expresado en la Fórmula 28:

$$\% \text{ Sólidos} = \frac{\rho_{Pulpa}-1}{G.e-1} * \frac{G.e}{\rho_{Pulpa}} * 100 \quad (28)$$

Donde:

% Sólidos: Porcentaje de mineral contenido en la pulpa.

G.e: Gravedad específica ya determinada.

$\rho_{Pulpa}$ : Densidad de pulpa.

### **3.3.5. Concentración de cianuro**

Para este parámetro se consideró como valor base el indicado en el siguiente enunciado, considerado como óptimo para el correcto funcionamiento:

0.40 %CN

## **3.4. Equipos utilizados**

Dentro de cada una de las distintas etapas fueron utilizados distintos equipos detallados a continuación:

### **3.4.1 Trituración**

En este caso fueron requeridas tres etapas de trituración, en concordancia, tres trituradoras de diferentes capacidades hasta conseguir un tamaño óptimo.

#### **3.4.1.1 Etapa 1: Trituración primaria**

Debido a que el material a procesar presentó una dureza 6 y se requería que la voladura de rocas origine tamaños menores a 400 mm; fue empleada una trituradora de mandíbulas (trituración primaria) para obtener tamaños menores a 100 mm. Como lo indica la Ilustración 17, la trituradora de mandíbulas tipo pivote elevador es la más adecuada al permitir la admisión y descarga del material de forma regulable.

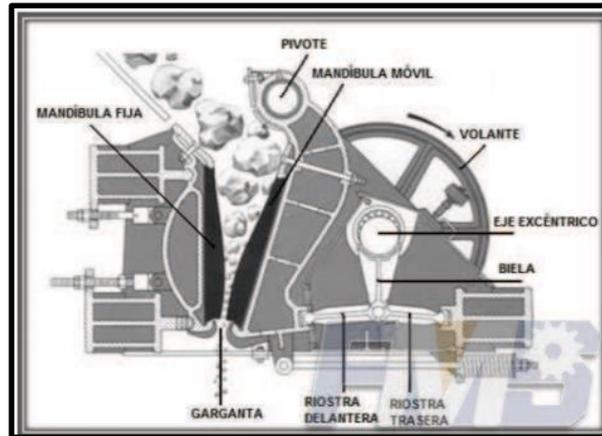


Ilustración 17. Trituradora de mandíbula tipo pivote elevador

Fuente: (Formats Construction Machinery, 2018)

### 3.4.1.2 Etapa 2: Trituración secundaria

Una vez obtenidos minerales menores a 100 mm, fue necesario reducir el mineral hasta tamaños menores a 16 mm, siendo necesaria una trituradora de rodillos lisos, la que realiza una función de aplastamiento a través de una compresión lenta y continúa (Ilustración 18).

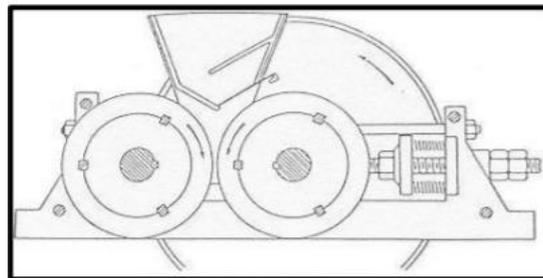


Ilustración 18. Triturador de rodillos

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.1.3. Etapa 3: Trituración final

La última fase consistió en la obtención del producto deseado, es decir, un material con tamaño menor a 0.1 mm. De este modo, fue requerida una trituradora de martillos previa la selección de un molino determinado con base en criterios teóricos. En consecuencia, a través de un eje horizontal sobre el que reposan cuerpos molidores conocidos como medios de molienda que pueden ser: barras de acero, bolas de acero fragmentos duros de roca y material de la mena (Ilustración 19 e Ilustración 20).

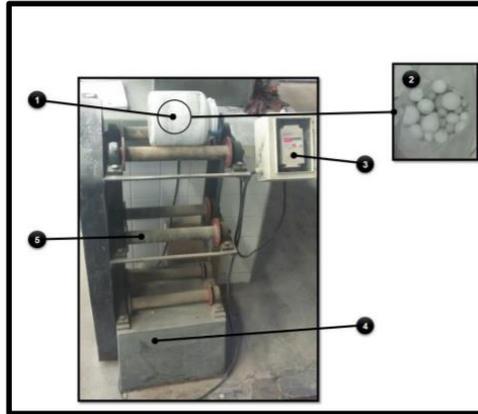


Ilustración 19. Molino de bolas

Fuente:(Luna Méndez, 2016)

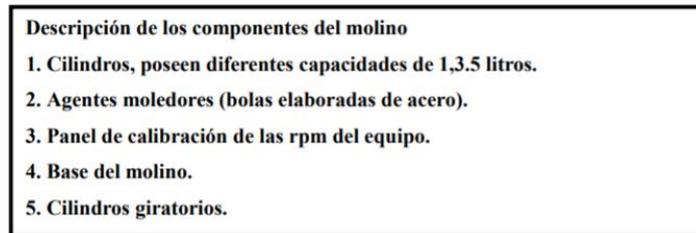


Ilustración 20. Descripción de Ilustración 19

Fuente:(Luna Méndez, 2016)

### **3.4.2. Agitación**

Al considerar las condiciones del ensayo, resultó ideal utilizar un flotador Denver, disponible en el laboratorio y el cual satisfacía las expectativas técnicas para una agitación controlada; todo dentro de una escala de ensayo de laboratorio (Ilustración 21).



Ilustración 21. Flotador Denver

Fuente: (machine.com; s.f).

### ***3.4.3 Inyección de aire y su control***

En la eyección de aire a la pulpa deben considerarse varios parámetros para un adecuado control que cumpla las necesidades del ensayo; siendo requerido un compresor eléctrico.

#### **Compresor de aire**

La inyección del aire a la pulpa se realizó mediante un compresor marca SCHULZ, modelo Msi 5.2ML (Ilustración 22); el cual permitió mantener el caudal constante y regulable requerido en el proceso durante un tiempo determinado.



Ilustración 22. Compresor de aire comprimido.

Fuente: Elaboración propia.

#### **Anemómetro**

Este equipo permite medir la velocidad de salida de aire del compresor para el cálculo respectivo del caudal en cada ensayo (Ilustración 23).



Ilustración 23. Medición de velocidad de flujo de aire.

Fuente: Elaboración propia

### 3.5 Reactivos químicos a utilizar

Luego de seguir el procedimiento para la lixiviación con cianuro de sodio, fueron empleados reactivos químicos que debían garantizar requerimientos técnicos y operativos; los cuales son detallados a continuación:

#### 3.5.1 Hidróxido de Sodio – Na (OH)

El hidróxido de sodio al 10% fue utilizado en pequeñas cantidades para alcalinizar la solución, manteniendo una estabilidad para la adición del cianuro de sodio.

#### 3.5.2 Cianuro de sodio

Este químico fue utilizado para la lixiviación del oro por su efectividad y costo favorable (Ilustración 24).



Ilustración 24. Balanza eléctrica con cianuro de sodio

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3. Indicadores de pH

Disponen de tiras reactivas de pH-Fix de alta calidad, las cuales están químicamente ligadas a las fibras de celulosa formando una almohadilla para medir el pH en la solución (Ilustración 25).



Ilustración 25. Medidor de pH

Fuente: Elaboración propia

### 3.6 Caracterización metalúrgica

Para diseñar el proceso de lixiviación se requirió:

- 1) Elección del agente lixivante: cianuro de sodio.
- 2) Tipo de proceso químico usado: lixiviación alcalina.
- 3) Tipo de operación física empleada: lixiviación con agitación.
- 4) Elección del equipo de lixiviación de laboratorio: agitadores de hélices y bomba de inyección de aire.
- 5) Cálculo de recuperación: pruebas metalúrgicas al fuego con la solución.

### 3.7 Condiciones de las pruebas

A continuación, se detallan las condiciones establecidas para el estudio:

- Número de pruebas: 24 pruebas
- Equipo de agitación: Flotador Denver
- Granulometría: 100% - 200 mallas
- Alcalinidad: 12

- Concentración de cianuro: 0.4%
- Tiempo: 4.5 horas
- Densidad de la pulpa: 1.25 g/cm<sup>3</sup>
- Control de cianuro libre: 1 hora
- Control de alcalinidad: 1 hora
- Ley de cabeza: 6 g/tn
- Temperatura: Temperatura ambiente.
- Oxígeno: Aire inyectado mediante compresor.

### 3.8. Montaje del laboratorio para desarrollo de la lixiviación por agitación

Las partes que componen el agitador para proceso de lixiviación de oro se expresan en la Ilustración 26 y fueron:

- Una celda con capacidad 1 200 ml.
- Un agitador con rpm regulables.
- Un compresor para inyectar aire a la pulpa.



Ilustración 26. Sistema completo

Fuente: Elaboración propia

### 3.9 Metodología

La Ilustración 27 resume la metodología fundamentada en seis etapas, donde inicialmente se realizó un pretratamiento al mineral de interés, un proceso de molienda primaria, secundaria y terciaria para obtener a un tamaño óptimo, caracterización química inicial con una prueba al fuego para determinar la cantidad de oro y pruebas de lixiviación con agitación en condiciones constantes, variando la inyección de aire en la pulpa; es decir, controlando la cantidad de oxígeno en cada ensayo.

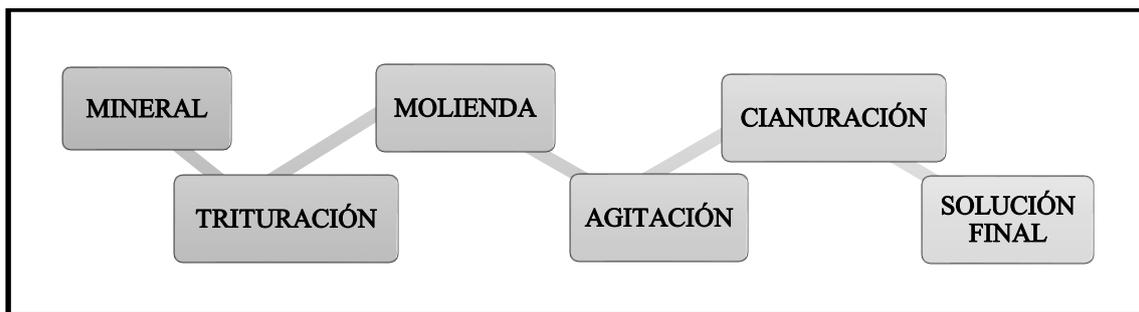


Ilustración 27. Diagrama del proceso

Fuente: Elaboración propia

### 3.10 Pre-tratamiento del mineral para la lixiviación

El mineral para lixiviar no precisa un pre-tratamiento, sino sólo cumplir con un tamaño óptimo, el cual fue trabajado en malla 200. La cantidad necesaria para realizar cada ensayo fue de 200 gr.

*Cuarteo del mineral.* - Esta etapa es muy necesaria en el proceso previo a la trituración puesto que provee homogeneidad y una selección al azar. De este modo, en una superficie limpia se depositó el mineral ampliamente seco para proceder a una división en cuatro partes (Ilustración 28).



Ilustración 28. Cuarteo del mineral

Fuente: Elaboración propia

### ***3.10.1 Trituración primaria***

Luego del cuarteo, el tratamiento inicial consistió en ingresar manualmente el mineral en una trituradora de mandíbulas R22, tal como se indica en el Anexo 1.

### ***3.10.2 Trituración secundaria***

En esta etapa el mineral obtenido de la trituración previa fue pesado en su totalidad. Del mismo modo, el ingreso de material al equipo se dio de forma manual en el triturador de rodillos, tal como se indica en el (Anexo 2).

### ***3.10.3 Molienda***

La última etapa del proceso buscaba garantizar los parámetros técnicos antes definidos. Por ello, mediante una molienda en un molino de bolas, fueron obtenidas las condiciones necesarias para el proceso de lixiviación (Anexo 3).

### ***3.10.4 Separación y selección***

El producto final de los procesos de combinación fue clasificado mediante su paso a través de mallas número 200 (#200), mediante vibración; a pesar de haberse aplicado previamente las condiciones óptimas (Anexo 4).

### 3.11 Preparación de la solución lixiviante

Esta fase fue ejecutada conforme la secuencia detallada a continuación:

1. Al requerirse condiciones constantes en cada ensayo, se lixivia 200 gr de mineral (Ilustración 33).



Ilustración 29. Material final

Fuente: Elaboración propia

2. Fueron agregados 800 ml de agua desionizada, conformando una pulpa al 20% de fracción de sólidos.

3. Posteriormente, fueron agregadas 50 gotas de hidróxido de sodio al 10% para regular la pulpa hasta obtener un pH de 12. A continuación, se acondicionó la pulpa a temperatura ambiente (25°C) y se procedió a la agregación del cianuro de sodio a precisión (500 ppm) de acuerdo a la pulpa (Ilustración 34); para así proceder a la lixiviación.



Ilustración 30. Acondicionamiento

Fuente: Elaboración propia

### 3.12 Condiciones de operación en la lixiviación

La pulpa con una fracción de sólidos al 20% fue lixiviada con un pH de 12, durante un tiempo de 4 horas y 30 minutos (4h30min) por cada vez. De este modo, fueron realizados 24 ensayos, en 8 etapas con 3 repeticiones de cada una; variándose la cantidad de oxígeno disuelto insuflado para cada repetición.

Además, se pudo conocer la variación de oxígeno mediante la eyección de aire comprimido a la pulpa mediante ocho valores diferentes con tres repeticiones por cada etapa. El modelo que se expresa en la Tabla 5 fue aplicado en todos los ensayos.

Tabla 5: Valores utilizados en ensayo 1

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
	Densidad pulpa	2,5	X1
	pH	12	X2
	ppm cianuro	400	X3
G1	Tiempo	4,5	X4
Qa (m <sup>3</sup> /h) de aire insuflado	Volumen pulpa	880	X5
0	% de sólidos	20	X6
	Masa de pulpa	1 000	X7
	ppm en Au en cabeza	9, 34	X8
	<b>2, 04</b>	<b>2, 25</b>	<b>2, 19</b>
		<b>2, 16</b>	

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para el presente estudio.

### 3.13 Resultados de la lixiviación

El proceso de lixiviación con pre-aireación fue realizado en los laboratorios de la Universidad del Azuay, con base en los parámetros establecidos de acuerdo a la base teórica y los insumos existentes. El análisis inicial de la muestra expresado en la Ilustración 35 permitió conocer la cantidad de oro en ppm o g/t.


**SERVICIO DE ACREDITACIÓN ECUATORIANO**  
 Acreditación N° SAE LEN 19-007  
 LABORATORIO DE ENSAYOS


**Albexu**  
 laboratorio metalúrgico

## INFORME DE ENSAYO

N°. 9823

**RESULTADOS**

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA	Comp.	Cod.	Au
	N°	Alb.	g/t
Sulfuro de Oro	1	71364	0.24

Comp. N°: Número de muestras que conforman el compuesto // Cod. Alb.: Código Albexus  
 Los resultados solo están relacionados con los ítems de ensayo.  
 Las muestras fueron proporcionadas por el cliente

**MÉTODOS:**

1. Au, Ag: ALB-MET-01. Determinación de Au y Ag por ensayo al fuego.
2. Cu, Pb, Zn, As, Fe: ALB-MET-02. Determinación de Metales por Digestión con HNO<sub>3</sub> (cc) por Absorción Atómica.

**COMENTARIOS:**



Ilustración 35. Resultados prueba al fuego

Fuente: (Albexu, s.f).

Una vez determinada la concentración de oro, se procedió a la realización del proceso de lixiviación. Los resultados obtenidos en la lixiviación con cianuro de sodio con diferentes cantidades de aire insuflado, muestran una recuperación baja de oro. Se destaca un notorio aumento en la recuperación al emplear bajos caudales de aire, aunque dicha recuperación decrece paulatinamente con el incremento de aire inyectado. Además, se puede manifestar que, en los valores con una mayor recuperación, su disminución inicial puede deberse al elevado número de Reynolds; una determinación que resulta necesaria en ensayos con este tipo de características.

Para conocer las cantidades precisas en la recuperación se realizaron ensayos de absorción atómica en las muestras finales luego del proceso de lixiviación; obteniéndose los resultados de la Ilustración 36.

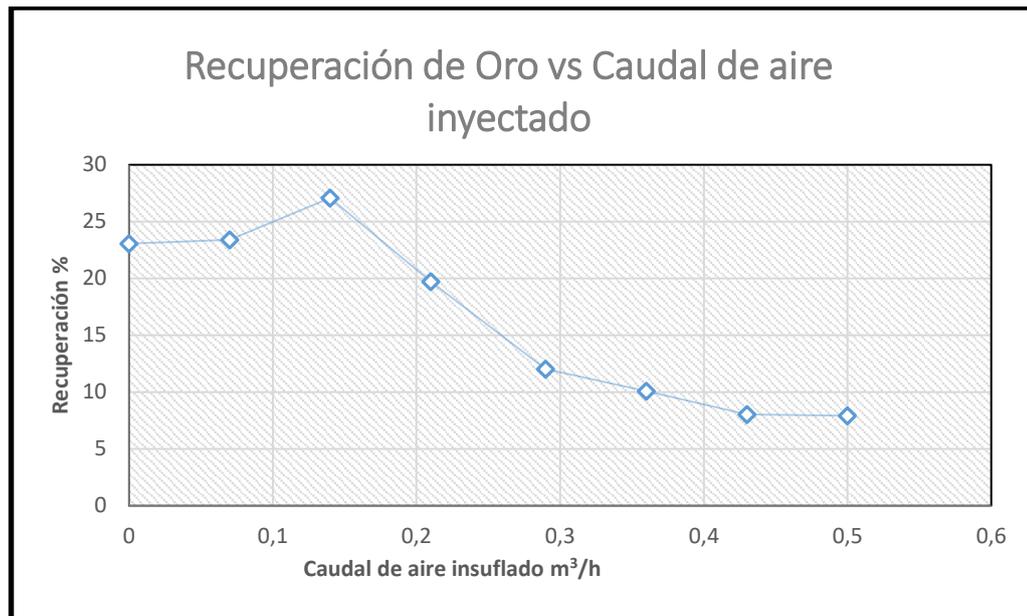


Ilustración 36. Recuperación mineral – caudal de aire insuflado

Fuente: Elaboración propia

La aplicación de la prueba en el mineral de interés demuestra que se obtiene una mayor recuperación metalúrgica entre 0. 14 m<sup>3</sup>/h de aire inyectando directamente a la pulpa, cabe destacar que se realizó contraste positivo a partir de la recuperación de oro obtenido sin haber insuflado aire durante el proceso metalúrgico. Además, este resultado refleja una similitud con los resultados obtenidos en la investigación de Collazos y Mendoza (2019), en la cual se corrobora un incremento del 14. 40 % al aumentarse la oxidación de la pulpa, ya que en nuestro ensayo en su punto más elevado se obtuvo 4. 037% de aumento en la recuperación del oro.

Entretanto, la curva de la Ilustración 36 indica claramente un efecto secundario debido al incremento en el caudal de aire inyectado, con una notable afectación en la recuperación metalúrgica del oro.

## CONCLUSIONES

Esta investigación tuvo como propósito analizar la incidencia del aire en el proceso de lixiviación con cianuro de sodio en el mineral de interés de la mina “Cristhian David”, del cantón Pasaje, provincia de El Oro. De este modo, fue demostrado el grado de recuperación metalúrgica con diferentes caudales de aire inyectados directamente a la pulpa en la etapa de agitación. Esta acción permitió un mayor intercambio iónico, mejorando el proceso electroquímico de disolución con las correspondientes etapas de oxidación (anódica) y de reducción (catódica).

La utilización de aire insuflado en el presente estudio permitió demostrar un notable incremento en la cinética de la cianuración, con un aumento significativo de la disolución de oro durante las primeras cuatro horas de agitación.

La insuflación fue realizada mediante un compresor que proporciona aire comprimido con un 21% de oxígeno, facilitando un mayor caudal de ingreso y el aprovechamiento de 1/5 de los valores requeridos para el proceso. Al realizar las pruebas respectivas, se ha demostrado que la insuflación de aire permite un notable incremento en la cinética de la cianuración, puesto que se presentaron altos niveles de disolución de oro durante las primeras cuatro horas de agitación. De la misma manera, una mayor cantidad de oxígeno insuflado mejora la recuperación, aunque simultáneamente incrementa el número de Reynolds en la pulpa; lo que incide directamente en una menor efectividad del proceso lixivante (variación en la curva de recuperación).

Los resultados nos permiten mostrar un aumento en la recuperación al momento que se insufla aire a la pulpa; aunque cabe aclarar que existe un incremento del número de Reynolds conforme aumenta la intensidad del caudal de aire que se inyecta a la pulpa.

En concordancia, al variar el caudal de aire inyectado, se pudo determinar que en caudales mayores a  $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$ , disminuye la recuperación metalúrgica del oro y se incrementa proporcionalmente el número de Reynolds. Por ello, al realizar una inyección controlada de aire manteniendo un caudal de  $0.14 \text{ m}^3/\text{h}$ , mejora notablemente el proceso; debido a la presencia de oxígeno en el aire que genera un equilibrio en las reacciones químicas producidas durante el proceso de recuperación del oro, volviéndose además un agente trascendental en el proceso metalúrgico.

Es posible una mejora en el proceso que sea significativa realizando una inyección controlada de aire a la pulpa, precisamente en este ensayo a un caudal de  $0.14 \text{ m}^3/\text{h}$  del mismo, se evidencia que existe una afectación directa en las reacciones químicas que se llevan a cabo durante el proceso de recuperación de oro, todo esto debido a la composición del aire el cual contiene oxígeno, ya que éste es esencial en el proceso metalúrgico que se realizó.

Consecuentemente, se determinó que las condiciones óptimas en el caudal de ingreso de aire aparecen con valores de  $0.14 \text{ m}^3/\text{h}$ , lo cual permite incrementar hasta un 4.004% la recuperación final del oro; caso que contrasta cuando no se ha inyectado caudal alguno, donde la recuperación es sumamente escasa. Por este motivo, la mena producto del análisis indica la afinidad existente entre el mineral con el proceso controlado de pre-aireación en la pulpa; convirtiéndose el presente estudio en una referencia científica validada para ser aplicada en la posterioridad en procesos industriales.

## **RECOMENDACIONES**

Se debe crear referencia científica para otro tipo de menas respecto al análisis de los procesos de pre-aireación y control de número de Reynolds en pulpa, analizando casos bajo condiciones diferentes (sin contenido de sulfuros).

Para obtener mayores réditos en el ámbito comercial, se recomienda realizar pruebas tipo planta piloto donde se examine el comportamiento del proceso de insuflación en grandes cantidades de mena.

Al existir un limitado equipamiento para analizar los parámetros de lixiviación, se puede determinar la factibilidad para la implementación de laboratorios en la carrera de Ingeniería en Minas; lo que permitiría contar con los equipos y la infraestructura adecuada para analizar todos los parámetros que influyen antes, durante y después del referido proceso. De este modo, se promoverían las herramientas necesarias para proceder óptimamente en la certificación o contraste de resultados logrados en otros laboratorios.

Dentro del desarrollo metodológico, resulta imprescindible una mayor socialización en el uso y manejo de los químicos utilizados en los procesos en los que se emplea cianuro de sodio, con la finalidad de generar una mayor agilidad.

Del mismo modo, se recomienda disponer de los insumos mineros y equipos necesarios para la realización de los ensayos dentro de los laboratorios de la Universidad del Azuay; garantizando así resultados completos y objetivos durante el análisis de las muestras.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Aguad, J.S., Jordan, H.D., Vargas, T..“*Lixiviación de minerales oxidados de cobre con soluciones ácidas de alta carga iónica*”, En: Tupper 2069, Santiago de Chile.
- Aramayo O., Jacinto N. “*Lixiviación de oro en medio clorurante-oxidante*”. *Primera Conferencia Nacional sobre Metalurgia del Oro y la Plata*. Oruro (Bolivia) 1993.
- Ballester, A., Verdeja, L. F., & Sancho, J. (1980). *Metalurgia Extractiva. Volumen I: Fundamentos* (p. 507).
- Ballester. (2003). *Metalurgia Extractiva Fundamenteos*.
- Bonan, J.M. Demarthe, H. Renon y F. Baratin. “Chalcopyrite Leaching by CuCl in Strong NaCl Solutions”, *Met.Trans.B* 12b(1981), 269-274.
- Bustamante Rua, M. O., Gaviria Cartagena, A. C., & Restrepo Baena, J. O. (2008). *Concentracion De Minerales*. 1–46. [http://minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial/cuadernos/download/24\\_5a1004a32dcbd619453c3eed562725f0](http://minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial/cuadernos/download/24_5a1004a32dcbd619453c3eed562725f0)
- Collazos Diaz, D. A., & Mendoza Beltrame, M. E. (2019). *Universidad Nacional San Agustin De Arequipa*. 0(0), 1–116. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8782>
- Con, A., Cianicidas, M., Lovera, D., Quiñones, J., Aramburú, V., Gagliuffi, P., & Puente, L. (n.d.). *Procesos De Tostación – Lixiviación De Minerales*. 44–51.
- Gaviria, Gonzalez, J., y Mora, H. (2006). Using Microwaves in Auriferous Refractory Menas and Their Effect in the Extraction of Gold. *Tostación, Empleando Microondas, En Menas Refractarias Auríferas y Su Efecto En La Extracción Del Oro*, 73(150), 29–37.
- Guerrero Rojas. (2013). Cianuro: Toxicidad y Destrucción. *El Ingeniero de Minas*, N° 25(August), 22–25.
- Hidalgo, Natalia. (2014). Mejora en la recuperación de Au y Ag mediante cianuración en escorias de fundición. (2014). *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 5(1), 23–29.
- Hirato, H. Majima and Y. Awakura, “*The Leaching of Chalcopyrite Cupric Chloride*, *Met.Trans.B* 18B(1987), 31-39.

- Josué, B., & Leyva, J. (2019). *Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica “Influencia del carburo de calcio y el tiempo de aireación en la recuperación de oro por cianuración en agitación de un Autores : Br . Robert Amilcar Arana Chávez ASESOR :*
- Luna Méndez, E. A. (2016). *Elaboración de guías prácticas de procesos metalúrgicos para el laboratorio de minas de la Universidad del Azuay.* 207.
- McDonald. T.J. Udovic, J.A.Dumesic y S. H. Langer, “*Equilibria Associated with Cupric Chloride Leaching of Chalcopyrite Concentrates*”, *Hydrometallurgy* 13(1984),125-135.
- Montero, I., & Rovira, S. (2018). El oro y sus aleaciones en la orfebrería prerromana. *Archivo Español de Arqueología*, 64(163–164), 7. <https://doi.org/10.3989/aespa.1991.v64.496>
- Orbegoso Rejas, L. A. (2013). *Proyecto de instalación de una planta metalúrgica para el procesamiento de minerales de cobre, oro y plata en la mina Canaura 1 de Palca-Región Tacna.* 1–184. [http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/2940/209\\_2013\\_orbegoso\\_rejas\\_la\\_fain\\_ingenieria\\_metalurgia.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/2940](http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/2940/209_2013_orbegoso_rejas_la_fain_ingenieria_metalurgia.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttp://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/2940)
- Palacios, Severo. (2002). Lixiviación de menas auríferas con sales oxidantes en medio ácido mediante el proceso severo. *Revista de Investigación Facultad de Geología y Minas.* Vol. 5. No.9. Perú.
- Pirítico, D. E. O. R. O., La, P., & Del, O. (2003). Modelo De La Preaireación En Concentrado De Oro Pirítico, Para La Optimización Del Proceso De Cianuración. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 6(12), 7–15. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v6i12.739>
- Ramón, G. (2014). Diseño experimentales. *Apuntes de Clase Del Curso Seminario Investigativo VI*, 38. [http://viref.udea.edu.co/contenido/menu\\_alterno/apuntes/ac37-diseno\\_experiment.pdf](http://viref.udea.edu.co/contenido/menu_alterno/apuntes/ac37-diseno_experiment.pdf)
- Rubén, F., & Calli, F. (2016). *Universidad Nacional Del Altiplano Área : Procesos industriales Tema : Investigación de nuevos procesos Línea : Ingeniería de procesos*

*Repositorio Institucional UNA-PUNO.*

Wilson y W.W. Fisher. "*Cupric Chloride Leaching of Chalcopyrite*", J.Met 2(1981), 52-57.

**ANEXO**  
**(REGISTRO FOTOGRÁFICO)**



Anexo 1. Trituración en R22

Fuente: Elaboración propia



Anexo 2. Trituración en rodillos.

Fuente: Elaboración propia



Anexo 3. Molienda

Fuente: Elaboración propia



Anexo 4. Zaranda

Fuente: Elaboración propia