



UNIVERSIDAD  
PRIVADA  
DEL NORTE

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“EFECTO DE LA TEMPERATURA Y GRANULOMETRÍA EN LA OXIDACIÓN DEL AZUFRE CON BACTERIAS EN UN MINERAL DE ORO REFRACTARIO PIRÍTICO DE LA ZONA DE ALGAMARCA, 2021”

Tesis para optar el título profesional de:  
INGENIERO DE MINAS

Autores:

Edixon Ramos Jambo

Luis Enrique Rimaicuna Valderrama

Asesor:

Ing. Víctor Eduardo Alvarez León

Cajamarca - Perú

2022

## **DEDICATORIA**

Principalmente a mis queridos padres, quienes me apoyaron moral y económicamente para cumplir mi objetivo de ser profesional; también se lo dedico a mis hermanos que siempre estuvieron presentes durante todo este proceso de mi carrera.

**Edixon**

A mis padres por darme todas las facilidades para poder superarme y por ser mi sustento en toda la etapa de mi formación profesional, personal y moral; ya que gracias a los principios y valores que me inculcaron he podido salir adelante.

**Luis Enrique**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por darme la vida y la salud, a mi familia para poder cumplir mis sueños, a la Universidad Privada del Norte, y a todos los docentes en especial al ingeniero Víctor Eduardo Alvarez León por el apoyo durante el desarrollo de esta tesis.

**Edixon**

Agradecer a Dios por darme la vida, la salud y sabiduría para poder cumplir con este gran paso para cumplir las metas y sueños que trace en mi vida, mis padres, mis hermanos, gracias por estar siempre para mí, sin su apoyo incondicional no hubiera podido lograr, a la Universidad Privada del Norte y a todos los ingenieros por su enseñanza cada día y poder llegar a terminar mi carrera, en especial al ingeniero Víctor Eduardo Alvarez León por apoyarnos en la realización de esta investigación.

**Luis Enrique**

## ÍNDICE

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>3</b>
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	6
<b>RESUMEN .....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
1.1. Realidad problemática .....	8
1.2. Formulación del problema.....	16
1.3. Objetivos.....	16
1.3.1. <i>Objetivo general</i> .....	16
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	16
1.4. Hipótesis .....	17
1.4.1. <i>Hipótesis general</i> .....	17
1.4.2. <i>Hipótesis específicas</i> .....	17
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA .....</b>	<b>18</b>
2.1. Tipo de investigación .....	18
2.2. Población y muestra.....	18
2.2.1 <i>Población:</i> .....	18
2.2.2 <i>Muestra:</i> .....	18
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos .....	19
2.4. Procedimiento .....	20
2.5. Aspectos Éticos .....	24
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS .....</b>	<b>25</b>
3.1. Caracterización química del mineral en estudio (1% = 10000 ppm) .....	25
3.2. Evaluación de la temperatura en la oxidación del azufre con bacterias en el mineral refractario de oro pirítico.....	26
3.3. Análisis de la granulometría del mineral en la oxidación del azufre con bacterias en el mineral refractario de oro pirítico .....	31
<b>CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>33</b>
4.1 Discusión.....	33
4.2 Conclusión.....	34
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>35</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>36</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 .....	25
Tabla 2 .....	31

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> .....	27
<b>Figura 2</b> .....	28
<b>Figura 3</b> .....	29
<b>Figura 4</b> .....	30
<b>Figura 5</b> .....	31
<b>Figura 6</b> .....	32

## RESUMEN

En la tesis que se presenta a continuación, el objetivo general fue determinar el efecto de la temperatura y granulometría en la oxidación del azufre con bacterias en un mineral de oro refractario pirítico de la zona de Algamarca, 2021; la investigación fue aplicada, experimental a nivel laboratorio, se cargaron 8 columnas de mineral de 25,4 cm de diámetro interno y 1.7 m de altura. Se trabajó con una muestra triturada aproximadamente de 5.000 kg de mineral de oro refractario pirítico a menos de 12.7 mm, se realizó la preparación mecánica del mineral para obtener 25 montones de 200 kg cada una. Cada montón se almacenó en un balde forrado con una bolsa de plástico y se cerró herméticamente hasta su posterior utilización. Además de pirita, marcasita, arsenopirita y calcopirita, la detección por DRX de cuarzo, moscovita y caolinita confirmó los elevados niveles de potasio, aluminio y sílice. La biooxidación del mineral de oro se realizó mediante lixiviación por columnas, las cuales fueron sometidas a diferentes temperaturas (25°C, 45°C y 65°C) y granulometría (3.1mm y 12.5 mm). Se concluye que la temperatura óptima trabajada fue la de 45°C para la oxidación del azufre a un 80% y la granulometría más eficiente fue la de 3.1 mm.

**Palabras clave:** Biooxidación, Bacterias, Inoculo, cepas, mesófilas, termófilas, pH.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática

Chilón y Mejía (2016) menciona que en el país existen muchos relaves de tipo refractario con la presencia significativa de metales preciosos que no son explotados por las características del material, por lo que se hace difícil su recuperación; generalmente algunos estudios realizados presentan bajas recuperaciones causando que estos minerales sigan abandonados, por no tener un proceso metalúrgico apropiado y económicamente no sean rentables. El proceso convencional de lixiviación no es aplicable directamente a este tipo de minerales, porque los resultados metalúrgicos no son alentadores por la presencia de minerales contaminantes como la pirrotita y arsenopirita, debido a que dentro de su estructura cristalina atrapan al metal precioso y lo hace imposible de liberarse por medios mecánicos y su recuperación no es económicamente rentable (p21).

Arias, Falcon, Puente y Lovera (2005), en su investigación indican que, una cantidad significativa de oro puede estar íntimamente asociada con sulfuros y/o arseniuros, por lo cual recibe el nombre de mineral refractario. La mayoría de las veces, la cianuración de estos minerales requiere largos periodos de lixiviación y, desafortunadamente, bajas recuperaciones de oro. Los concentrados refractarios de oro también son sometidos a tratamientos piroquímicos de tostación, calcinación y fusión para lograr la oxidación y reducción de sus componentes, acarreando problemas de baja recuperación, prolongados periodos de tratamiento, contaminación al medio ambiente, alto consumo de reactivos, alto costo operativo; entre otros. El conocimiento del uso de otras tecnologías para el tratamiento de los llamados concentrados refractarios nos ayudará a



reducir y/o a minimizar dichos problemas. Dentro de las tecnologías que se pueden usar como pretratamientos a la cianuración y fundición, encontramos la tostación, la lixiviación ácida básica, disolución en autoclave, electro oxidación, ultrasonido y la biolixiviación. Dichas tecnologías de una u otra manera facilitan la conversión de los compuestos presentes que acompaña al oro en las especies refractarias, de manera que faciliten la liberación de las partículas metálicas de oro; para luego, entrar en contacto íntimo con la solución cianurada y/o ser colectado en un lecho de fusión (p.5).

Zaldaña y Zavaleta (2016) en su tema de investigación titulado “Influencia de la temperatura y de la granulometría en el pre- tratamiento por lixiviación alcalina ( $\text{Na}_2\text{S}$  y  $\text{NaOH}$ ) de un mineral refractario con contenido de arsénico(As) procedente de Sayapullo, para incrementar la recuperación de oro mediante cianuración” nos menciona que, los minerales refractarios no pueden ser satisfactoriamente tratados por cianuración convencional, constituyendo un serio problema, debido a los elevados consumos de cianuro y las recuperaciones limitadas. El proceso de lixiviación alcalina se presenta como una alternativa para minerales con arsénico, y hay amplios estudios para concentrados de enargita, lo que conduce a investigar estos esquemas de pretratamiento aplicado a minerales auríferos con presencia de arsenopirita, que permitan disminuir el consumo de cianuro y se incremente la recuperación de oro (p.11).

López y Martínez (2017) en su investigación titulada “Efecto de la granulometría de un concentrado de pirita aurífera y de la temperatura durante la biooxidación como pretratamiento para incrementar el grado de recuperación de oro por cianuración de un mineral refractario de la empresa minera Rio Chicama” nos comenta que, el proceso de

biooxidación busca liberar las partículas de oro, oxidando y a la vez formando complejos con otros minerales como calcopirita, arsenopirita y pirita que se encuentran alrededor del oro encapsulado, de esta manera se incrementaría el área de contacto, y se disminuye los minerales que podrían consumir el cianuro.

Chilón y Mejía (2018) en su tema de investigación en la Universidad Mayor de San Marcos titulada “Tratamiento de relaves de cianuración de concentrados refractarios para la recuperación de oro y plata en la zona de Calpa – Arequipa” tuvo como objetivo Recuperar oro y plata de relaves de cianuración de concentrados refractarios en la zona de Calpa – Arequipa, mediante procesos metalúrgicos de flotación - biolixiviación y cianuración, el cual tuvo como resultado la caracterización de la muestra del mineral estudiado indicó un tipo de oro refractario que no pudo ser observado al igual que la plata, así mismo se observó la presencia de especies mineralógicas como: calcopirita. Covelita, esfalerita, ilmenita, pirita, hematita, pirrotita, pirolusita, psilomelano goethita y gangas.

Coaguila y Lázaro (2018) en su investigación en la Universidad Nacional de san Agustín de Arequipa titulada “Pretratamiento de la lixiviación de un mineral refractario de oro y plata asociado a sulfuros con la adición de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio” el cual nos menciona que se estableció como método alternativo el pre tratamiento con la adición de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio, previo a la lixiviación convencional de un mineral refractario, se determinó un incremento en el porcentaje de extracción de oro y plata esto debido a la remoción de antimonio del 70.25% debido a que el análisis mineralógico reveló que el oro ocurre como aleación con plata y principalmente

asociado con andorita ( $Sb_3PbAgS_6$ ) que es la fase de plata antimonial más importante, Al realizar las pruebas comparativas la cianuración del mineral refractario sin pre tratamiento nos arrojó una extracción de oro de 62% y plata de 41% mientras que en la lixiviación luego del pre tratamiento se obtuvo una extracción de oro de 85.73% y plata de 88.12%, Los valores óptimos con los cuales se obtuvo una recuperación más alta de oro y plata fue cuando se trabajó bajo los siguientes valores concentración de sulfuro de sodio de 4.1g/mol, hidróxido de sodio una concentración de 3.75g/mol, en un tiempo de 2.5 horas y un porcentaje de solidos de 25%.

A continuación, se aborda el sustento teórico relacionado a las variables del presente estudio de investigación, identificadas a partir de fuentes confiables como: Refseek, Scielo, Base, Google Académico, Redalyc, etc.

Reyes, López, Alvarado y Valencia (2016) en su investigación “Biolixiviación de Minerales Auríferos Refractarios de la Compañía Minera Sayapullo S.A.” utilizó el diseño experimental en el cual presenta dos mecanismos de biolixiviación o lixiviación bacteriana: directa, donde las bacterias ferrooxidans pueden lixiviar sulfuros metálicos directamente sin participación del sulfato férrico producido biológicamente y la indirecta, donde el sulfato férrico es un oxidante fuerte capaz de degradar y disolver una amplia variedad de minerales sulfurados, es decir depende de la regeneración biológica del sulfato férrico, es por ello que se aplica el método indirecto. En el desarrollo del experimento presenta las siguientes etapas: cianuración y/o thioureación directa; y Biooxidación-lixiviación férrica seguido de cianuración y/o thioureación. En la parte Bioquímica presenta 2 biorreactores de lecho empacado air lift con una bomba de aire para el suministro del mismo en forma continua para cada una. En la lixiviación férrica,

cianuración y/o thioureación se utilizó un sistema de agitación constituido por 2 agitadores. Se extrajo 10 muestras de 1 litro cada una de diferentes puntos de la Compañía Minera Sayapullo, se cultivó la muestra utilizando el medio 9k con 20% de muestra y 80% medio más sulfato ferroso de esta manera se podrá evaluar la oxidación del ferroso y la presencia de microorganismos. Se concluyó que las más altas extracciones de oro y plata se da cuando el mineral de cabeza es molido a 81% -m200 y con biooxidación tratado posteriormente por cianuración teniendo 65% y 73.22% de extracción respectivamente. Finalmente, la Biolixiviación o lixiviación bacteriana indirecta es factible aplicar a minerales auríferos refractarios, por lo que se propone una alternativa viable para el procesamiento de dichos minerales.

En los videos de YouTube que se encuentran en el internet sobre la minería del oro, se menciona que existen ventajas y desventajas al utilizar método de lixiviación convencionales. Dentro de las ventajas se tienen: Alta extracción del elemento a recuperar, Facilidad para tratar menas alteradas, Tiempos cortos en el proceso de recuperación, Proceso continuo que permite una gran automatización. Dentro de las desventajas se tienen: Mayor costo de inversión en la operación, en el análisis de nuestras variables en estudio, para la definición y optimización del proceso, debe necesariamente hacer confluir aspectos técnicos, operacionales y económicos.

Encontramos el oro frecuentemente entrelazado o cubierto de pirita o de minerales sulfurosos, y para extraer el oro de este tipo de mena refractaria, existe una práctica usual que consiste en moler o tostar la mena con la finalidad de oxidar a los sulfuros. Mientras que Zaldaña y Zavaleta (2016) nos comentan que, infortunadamente las operaciones de tostación, usualmente convierten en insoluble a una porción del oro. La

oxidación acuosa bajo presión ofrece un método alternativo al de tostación para descomponer los sulfuros y deja un residuo a partir del cual el oro puede removerse más fácilmente mediante un tratamiento posterior con solución de cianuro.

La oxidación a presión se ha convertido en la mejor alternativa para la oxidación en los minerales refractarios, con muchas ventajas en relación al proceso de tostación. Así nos dice Zaldaña y Zavaleta (2016) en su investigación, que este proceso se puede llevar a cabo tanto en medio alcalino como en medio ácido; sin embargo, este último ha sido más desarrollado para aplicaciones comerciales y la temperatura a la cual se lleva a cabo esta entre 170 y 225 °C, mientras que en el medio alcalino se emplea menores temperaturas de oxidación.

El grado de molienda debe ser lo suficiente óptimo, por lo menos parcialmente, la superficie del mineral valioso a la acción de la solución lixivante. Mismo que nos expone Zaldaña y Zavaleta (2016) que, depende del tipo de mineral y de sus características mineralógicas. Deberá considerarse un tamaño tal que no contenga un exceso de gruesos (> 2 mm) que produzca problemas en la agitación (embancamiento, aumento de la potencia del agitador) y que, por otra parte, no contenga un exceso de finos (menos de 40% <75 micrones), que dificulten la separación sólido-líquido posterior de la pulpa lixiviada.

Sabiendo que los minerales refractarios, son aquellos que dan extracciones bajas de oro y plata. Tenemos algunos problemas que se derivan del oro refractario. Los minerales de oro y plata se clasifican como refractarios cuando un montón significativo de estos metales no se puede extraer eficientemente usando los métodos convencionales que se usan usualmente.

López y Martínez (2017) nos expresa en su investigación que, Los depósitos de minerales refractarios se clasifican geoquímicamente como minerales sedimentarios, los que tienen oro libre incluido, y minerales hidrotérmicos, en los que el oro está asociado con sulfuros carbonosos y compuestos de sílice. Ambos depósitos se consideran de difícil recuperación. El término refractario define también a los minerales de oro y plata cuya recuperación por el proceso de cianuración convencional es baja (< 80 %). La causa más común de la refractabilidad es la oclusión o diseminación de finas partículas submicroscópicas de oro (< 1  $\mu\text{m}$ ) encapsuladas en los minerales de sulfuros, como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), la arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), y el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), que son matrices insolubles y difíciles de penetrar con soluciones de cianuro en la lixiviación convencional. Otras posibles causas de la refractabilidad son las siguientes:

- Insolubilidad de minerales auríferos, como teluros, auroestibnitas y maldonitas, así como de compuestos formados durante la tostación reductora de minerales de plomo, antimonio y arsénico.
- Formación de capas de óxido y de compuestos de hierro, plomo, arsénico y antimonio alrededor de las partículas de oro y plata durante algunos procesos de extracción. Estas capas o películas inhiben la disolución de metales preciosos en soluciones de cianuro.
- Descomposición de minerales asociados, tales como pirrotita, covelita y calcocita, en compuestos complejos que consumen cianuro y que disminuyen la acción de disolución del oro por el cianuro al consumir el oxígeno durante la descomposición de dichos minerales (el proceso de cianuración requiere del oxígeno para llevar a cabo la disolución).

El proceso de biolixiviación se produce por la catálisis que los microorganismos ejercen durante la disolución de algunas menas minerales.

López y Martínez (2017) señalan que existen ventajas y desventajas en los procesos de biooxidación. Dentro de las ventajas podemos mencionar: Tienen lugar en condiciones cercanas a las ambientales, los compuestos utilizados no son ajenos a los ciclos biogeoquímicos y, por lo tanto, los productos y subproductos que se forman son más compatibles medioambientalmente. No se producen emisiones de  $\text{SO}_2$  como en los procesos pirometalúrgicos, con lo que se evita la contaminación ambiental provocada por las emisiones de este gas (lluvia ácida). Tampoco se produce contaminación por anhídrido sulfúrico, lo cual es frecuente en algunos procesos hidrometalúrgicos. Se reduce el consumo energético, puesto que no es preciso secar los minerales, como ocurre en los procesos pirometalúrgicos, ni alcanzar temperaturas elevadas (cercanas a  $1500^\circ\text{C}$ ), ya que estos procesos tienen lugar generalmente a temperaturas próximas al ambiente y en algunas ocasiones a temperaturas cercanas a  $70^\circ\text{C}$ .

También se tiene como ventajas, el bajo consumo de reactivos, ya que en las reacciones biológicas se regeneran tanto el agente de lixiviación (ion férrico), como el ácido sulfúrico necesario para conseguir la acidez adecuada. - Bajo costes de instalación y operación, ya que se requieren instalaciones más sencillas y económicas; por ejemplo, en el caso del cobre los costes pueden llegar a ser la mitad de los necesarios para obtener por vía pirometalúrgica. La Flexibilidad en las instalaciones, que permite hacerlas rentables incluso trabajando a escalas reducidas. - Posibilidad de tratamiento de productos residuales y menas pobres que no son económicamente rentables, tratadas a través de procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos convencionales.

Con respecto a los procesos hidrometalúrgicos de ataque químico convencionales, presenta la ventaja de que la acción química y biológica del medio permite la disolución de metales que, por encontrarse en una matriz muy poco porosa, no serían accesibles al reactivo utilizado a menos que se realizara una molienda a tamaños de partículas muy reducidos. Las bacterias, al disgregar la matriz, solucionan este problema.

Con respecto a las desventajas, se tienen: Velocidades de reacción lentas. A pesar de que las bacterias catalizan las reacciones de oxidación, la duración de los procesos es todavía muy larga. Obtención de soluciones demasiado diluidas para obtener el metal directamente a partir de ellas. Las aguas ácidas que se generan en estos procesos deben ser tratadas antes de su vertido, aunque generalmente se trabaja en ciclo cerrado y se recirculan al proceso.

## **1.2. Formulación del problema**

¿Cuál es el efecto de la temperatura y granulometría en la oxidación del azufre con bacterias en un mineral de oro refractario pirítico de la zona de Algamarca, 2021?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar el efecto de la temperatura y granulometría en la oxidación del azufre con bacterias en un mineral de oro refractario pirítico de la zona de Algamarca, 2021

### **1.3.2. Objetivos específicos**

Caracterizar químicamente al mineral en estudio

Evaluar la temperatura en la oxidación del azufre con bacterias en un mineral de oro refractario pirítico.



Analizar la granulometría en la oxidación del azufre con bacterias en un mineral de oro refractario pirítico.

#### **1.4. Hipótesis**

##### **1.4.1. Hipótesis general**

La temperatura y granulometría tiene un efecto significativo en la oxidación del azufre con bacterias en un mineral de oro refractario pirítico de Algamarca,

##### **1.4.2. Hipótesis específicas**

Al caracterizar químicamente al mineral en estudio, se conocerá los constituyentes y las concentraciones de los metales que están en la muestra.

Al evaluar la oxidación del azufre con bacterias en un mineral de oro refractario pirítico a temperaturas de 22°C, 45°C y 65°C; se determinará la temperatura más óptima para la oxidación del azufre.

El análisis de la granulometría en la oxidación del azufre con bacterias en un mineral de oro refractario pirítico es de 3.1mm y 12.5mm.

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

### 2.1. Tipo de investigación

(Sampieri, Fernández, & Baptista, 2014) indica que “la investigación puede cumplir dos propósitos fundamentales: a) producir conocimiento y teorías (investigación básica) y b) resolver problemas prácticos (investigación aplicada)”. Por lo tanto, el tipo de investigación es aplicada por lo que nos centramos en el análisis y solución del problema de varias índoles de la vida real; asimismo, requiere obligatoriamente de un marco teórico, sobre el cual se basó para generar una solución al problema específico que se quería resolver.

El tipo de investigación es experimental, cuantitativa con el propósito de obtener información sobre el problema planteado, y en variables tenemos la variable independiente (oxidación del azufre con bacterias en un mineral de oro refractario pirítico), para evaluar las consecuencias sobre la variable dependiente (Efecto de la temperatura, granulometría y tasa de riego).

### 2.2. Población y muestra

#### 2.2.1 Población:

5000 kilos de mineral de oro refractario pirítico de la zona de Algamarca.

#### 2.2.2 Muestra:

25 montones de 250 kilos cada uno de mineral refractario pirítico de la zona de Algamarca.

### **2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos**

Las técnicas utilizadas para la recolección de datos fueron la observación, el análisis documental y la experimentación.

Con la observación se pudo visualizar las bacterias que se utilizaron en las pruebas en columna de laboratorio, las características de las bacterias y los factores influyentes en ellas.

En el análisis documental se recolectó información de los tipos de bacterias asociadas a la biooxidación de minerales sulfurados con la propiedad de refractariedad, en este caso de nuestro material de estudio, el oro, también se buscó información del tamaño del mineral para facilitar la biooxidación, así como también de los tipos de reactivos y equipos para las pruebas de experimentación en el laboratorio y por último se hizo la búsqueda y recolección de investigaciones antecesoras a esta, que presenten los mismos factores de estudio que se están tratando, para de esta forma darle sustento y respaldo a la investigación realizada.

Con la experimentación se monitoreó las pruebas en columnas, los efectos del caudal de la solución, la aglomeración del mineral, el tamaño de partícula, la aireación, el enriquecimiento de dióxido de carbono, el modo de inoculación y la temperatura. Para la realización de las pruebas de laboratorio se utilizaron los siguientes equipos, instrumentos y materiales:

#### **a) Equipos**

- Balanza Analítica
- Recipiente
- Trituradora.

### **b) Instrumentos**

- Columnas de lixiviación
- bomba de aire
- Material de laboratorio común.

### **c) Materiales**

- Para la recuperación del mineral se utilizaron como reactivos el cianuro.
- agua desionizada

## **2.4. Procedimiento**

### **Preparación de los cultivos**

Los cultivos puros de ATCC 29047 *Leptospirillum ferrooxidans*, ATCC 19859 *Thiobacillus ferrooxidans* y ATCC 15494 *Thiobacillus thiooxidans* se cultivaron a 30°C en los medios recomendados por ATCC complementados con mineral pirítico finamente molido. Tras modificar la composición del medio, los cultivos se mezclaron en el mismo recipiente para producir grandes volúmenes de inóculo mesófilo. Los inóculos de termófilos moderados (45°C) y extremos (68°C) se obtuvieron de Little Bear Laboratories (Golden, CO) y se adaptaron al mismo mineral antes de su uso.

### **Preparación del mineral, aglomeración y carga**

Se trituraron aproximadamente 5.000 kg de mineral de oro refractario pirítico a menos de 12,7 mm (Fig. 1), se rifaron y se descuartizaron para producir 25 pilas de 200 kg cada una. Cada pila se almacenó en un tambor forrado con una bolsa de plástico y se cerró herméticamente hasta su posterior utilización. Además de pirita, marcasita, arsenopirita y calcopirita, la detección por DRX de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), moscovita ( $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{AbO}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y caolinita ( $\text{AbO}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) confirmó los elevados niveles de potasio, aluminio y sílice.

A continuación, el contenido de un tambor se añadió por lotes junto con el medio de aglomeración en un recipiente de plástico insertado en una mezcladora de cemento de 9 pies<sup>3</sup>. Los aglomerados se produjeron haciendo girar el recipiente a 30 rpm durante 10 a 20 minutos. Dependiendo de las condiciones meteorológicas, el contenido de humedad varió entre 4,2 y 8,5 kg de solución/100 kg de mineral seco. Se tomaron dos muestras de 15 g de aglomerados húmedos, se pesaron con precisión y se conservaron a 4°C con 10 mL de medio mesófilo sin hierro y filtrado con 0,2 µm para determinar el número inicial de células adheridas. Los aglomerados así producidos se cargaron en las columnas A a E y H.

Para estudiar la influencia del tamaño de las partículas del mineral antes de la aglomeración, el contenido de un tambor se hizo pasar por una trituradora rotativa para producir una muestra homogénea con partículas menores de 3,35 mm. Se produjeron aglomerados bastante esféricos de 8 a 14 mm de tamaño y se tomaron muestras como se ha descrito anteriormente. Los aglomerados cargados en las ocho columnas I y J se produjeron en conjunto utilizando sólo 50 kg de mineral añadidos por lotes en un recipiente de plástico de 3 L en rodillos de botella (30 rpm, 10- 20 min de rotación). Se tomaron cuatro muestras de 1 kg de aglomerados húmedos antes de la carga, se secaron y se pulverizaron para los ensayos de cabeza.

Los aglomerados húmedos (o las partículas secas de mineral para la columna F) se cargaron suavemente en las columnas para evitar que se rompieran en la descarga. La superficie superior del lecho de aglomerado se cubrió con una fina capa de lana de vidrio y bolas de polietileno para mejorar la distribución de la solución. Unas semanas después de la puesta en marcha, los lechos de las columnas A a E y H se habían desplomado hasta aproximadamente el 84% de su altura inicial, mientras que el lecho de la columna G se

había desplomado aún más, hasta el 78%. Por otro lado, la columna F, cargada con partículas no aglomeradas, sólo experimentó un desplome del 1,1%. El mineral seco y el líquido estancado ocupaban aproximadamente el 56 y el 15%, respectivamente, del volumen total de la columna. Las columnas cargadas con partículas no aglomeradas (columna F) o con partículas finas aglomeradas (columna G) retuvieron aún más solución (22,8 - 24,1 vol%).

### **Puesta en marcha, control y muestreo**

**Columnas A y C a G** - El inóculo mesófilo libre de sólidos se bombeó a la velocidad preestablecida (Tabla 1) durante la primera semana, tras lo cual el lixiviado recogido se mezcló con 21 L de agua del grifo en la que se disolvieron 0,5 g/L de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , 0,5 g/L de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y 0,3 g/L de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Después de añadir el volumen necesario de inóculo libre de sólidos para obtener un volumen total de 75 L, el pH de la solución se ajustó a 1,7 con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  de grado reactivo. Esta solución se hizo recircular de forma continua hasta la parada. Si el pH del depósito superaba los 2,0 durante el experimento, se añadía  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para acercarlo a 1,7. Las pérdidas por evaporación se compensaban periódicamente añadiendo agua del grifo.

Se recogieron semanalmente muestras líquidas del depósito y del puerto de drenaje de las secciones superior e inferior para medir el pH, el potencial, las concentraciones de metales, el número de células en suspensión, la densidad y la masa de lixiviado. Se recogieron periódicamente unos 1.000 g de aglomerados húmedos de la superficie del lecho de mineral de cada sección para analizar el número de células adheridas, 31 elementos por ICP, el conjunto de azufre y el contenido de humedad.

**Columna B** - La solución estéril sobrante utilizada para la aglomeración se bombeó a la columna B durante la primera semana. Al final del séptimo día, se siguió el mismo procedimiento para completar el volumen total hasta 75 L, salvo que el inóculo se sustituyó por la misma solución de FfcSCL. No sólo se ajustó el pH a 1,7, sino que también se ajustó con precisión el potencial de la solución en el depósito a 650 mV con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30% p/v. No se añadió Eb02 durante los primeros 48 días, después de los cuales se controló diariamente el potencial del depósito y se reajustó a > 650 mV con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> siempre que fue necesario. Además de la dosis inicial de timol disuelta en la solución de lixiviación, no se realizó ninguna otra adición. Las muestras líquidas y sólidas se recogieron y analizaron de la misma manera que se ha descrito anteriormente.

**Columnas H, I y J** - Durante la primera semana de funcionamiento, las columnas H, I y J se regaron con su solución de alimentación habitual (Tabla 1), mantenida a temperatura ambiente, para bajar el pH al rango de 1,5-2,0. Durante los tres días siguientes, la solución de alimentación de las columnas I y J se sustituyó temporalmente por 95-100 mL cada uno de inóculos mesófilos, moderados y termófilos extremos sin sólidos. La misma serie de ensayos, excepto para las muestras sólidas, se realizó al menos una vez a la semana. La temperatura en el centro de los lechos de mineral corto se midió periódicamente con un termopar tipo K, y siempre resultó ser de 1 a 2 grados inferior a la temperatura del baño.

### **Procedimiento de apagado**

El residuo lixiviado en las columnas altas se extrajo en 8 a 10 estratos, cuyos espesores se midieron con precisión. Los aglomerados de las columnas pequeñas se dejaron caer en un recipiente previamente pesado tras desatornillar los tornillos que sujetaban la placa de drenaje a la brida inferior. El peso de cada lote de aglomerados húmedos se anotó inmediatamente para calcular el contenido de humedad. Se recogieron una o dos muestras

de 15 g después de haber mezclado bien todo el contenido de cada lote hasta que tuviera una consistencia y un color uniformes. Todos los sólidos adheridos a las paredes de la columna, a los tubos y a los utensilios se lavaron en los recipientes, que se introdujeron en una estufa a 45°C hasta que se secaron. Después de registrar el peso en seco, cada lote de residuos se hizo pasar por una trituradora rotativa, seguida de una molienda con disco de anillo. Después de rifar tres veces cada muestra pulverizada, se descartó una de las mitades. La misma serie de pasos se repitió con la segunda mitad para obtener una muestra representativa que se analizó para 31 elementos y el conjunto de azufre.

### **Procesamiento de la información de las pruebas en laboratorio**

De los resultados obtenidos, los datos fueron procesados construyendo tablas y luego gráficos estadísticos empleando el Microsoft Excel para una mejor interpretación de resultados. Luego se procedió hacer el informe final de la tesis con los antecedentes encontrados en revistas científicas, y repositorio de las universidades.

### **2.5. Aspectos Éticos**

En el trabajo de investigación se tuvo en cuenta la normativa APA que sugiere la Universidad Privada del Norte, con el único fin académico y hacer una mejor investigación en el lugar de Algamarca sobre la oxidación de bacterias en un mineral de oro refractario pirítico



### CAPÍTULO III. RESULTADOS

De las pruebas experimentales realizadas en laboratorio, se tienen los siguientes resultados:

#### 3.1. Caracterización química del mineral en estudio (1% = 10000 ppm)

Con la lupa del geólogo, se pudo identificar en el mineral en estudio, las siguientes asociaciones de minerales: Pirita, marcasita, arsenopirita y calcopirita, cuarzo, moscovita y caolinita.

**Tabla 1**

*Caracterización química del mineral.*

Elemento	Contenido del ensayo	Concentración
Sulfuro		2,54 ± 0,42 %
Azufre total		0,17 ± 0,06%
Azufre elemental		< 0,01%
Hierro		2,75 ± 0,24%
Cobre		348 ± 55 ppm
Arsénico		432 ± 94 ppm
Inorgánicos		0,04 ± 0,03%
Carbón Orgánico		<0,01%
Grafito		0,15 ± 0,03%
Alumina		8.70 ± 0.49%
SiO <sub>2</sub>		77,37 ± 1,40%

Fuente: Laboratorio de la mina en estudio.

En la tabla se puede observar elevados niveles de aluminio y sílice, debido a la presencia de cuarzo (SiO<sub>2</sub>), moscovita (KAl<sub>2</sub>(AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>2</sub>) y caolinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>).

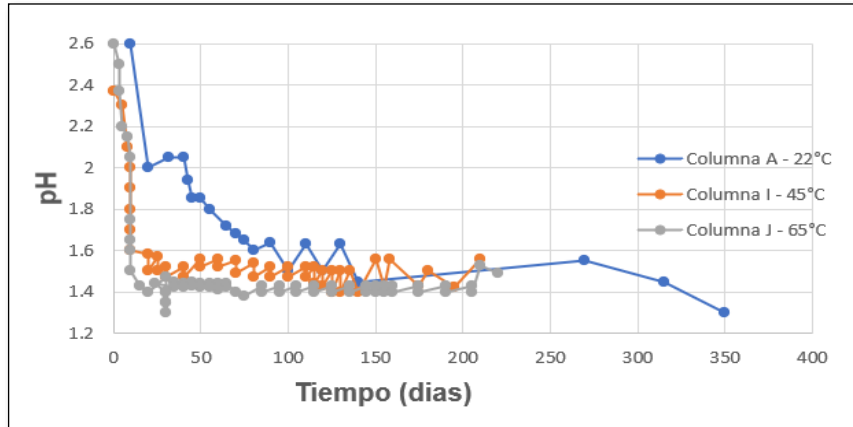
### **3.2. Evaluación de la temperatura en la oxidación del azufre con bacterias en el mineral refractario de oro pirítico.**

Se estudiaron todos los factores a temperatura ambiente en 8 columnas de 25,4 cm de diámetro interno y 1,7 m de altura. Cada columna estaba compuesta por dos secciones de 1,52 m de largo, cada una equipada con una placa perforada que descansaba sobre una placa de drenaje. Dos columnas se hicieron funcionar a temperatura ambiente en las condiciones estándar, mientras que sólo una condición de funcionamiento difería de su valor estándar en cada una de las seis columnas restantes.

Dos bancos de cuatro columnas idénticas de 10 cm internos de diámetro y 0,53 m de altura se construyeron y ensamblaron cada uno dentro de un baño de agua de 100 L para evaluar los efectos de aumentar la temperatura a 45°C y 65°C. Todas las cuatro columnas eran réplicas entre sí y se desmontaron en diferentes intervalos de tiempo. Aparte de la temperatura, ambos bancos de cuatro columnas se operaron en condiciones idénticas.

**Figura 1**

*Perfiles del tiempo de oxidación del azufre vs pH del mineral oxidado con las bacterias a temperatura de 22°C, 45°C y 65°C.*



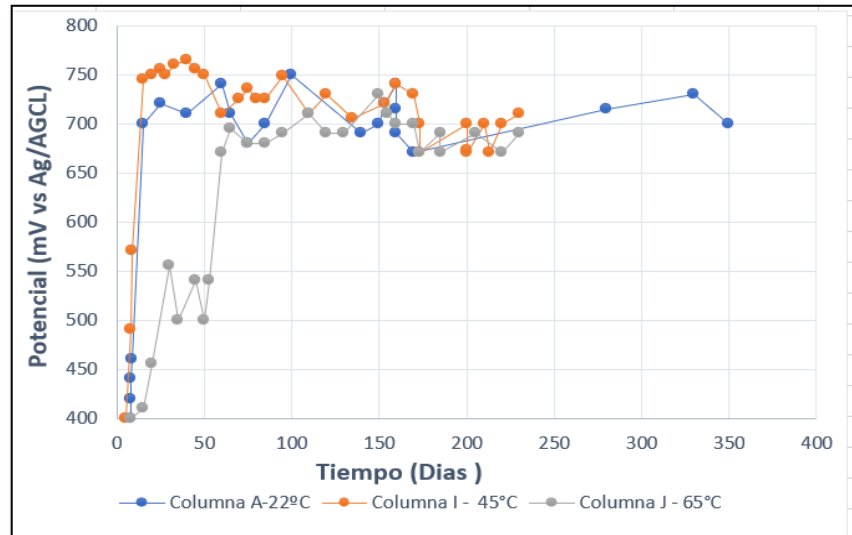
Fuente: Datos del experimento

*Nota:* En la figura se puede observar el comportamiento del pH del mineral oxidado con las bacterias a temperatura de 22°C, 45°C y 65°C.

A medida que pasa el tiempo, el PH del mineral a baja temperatura va disminuyendo lentamente en los primeros 25 días el ph del mineral a temperaturas de 45 y 65 °C baja de 2.6 a 1.3 y dentro de los 200 días el ph del mineral a temperaturas de 45 y 65 °C se mantiene entre 1.4 y 1.6

**Figura 2**

*Perfiles del tiempo de oxidación del azufre vs potencial del mineral oxidado con las bacterias a temperatura de 22°C, 45°C y 65°C.*



Fuente: Datos del experimento

*Nota:* En la figura se observan los Perfiles temporales del potencial de lixiviación a 22°C, 45°C y 65°C en lechos de mineral aireados y aglomerados.

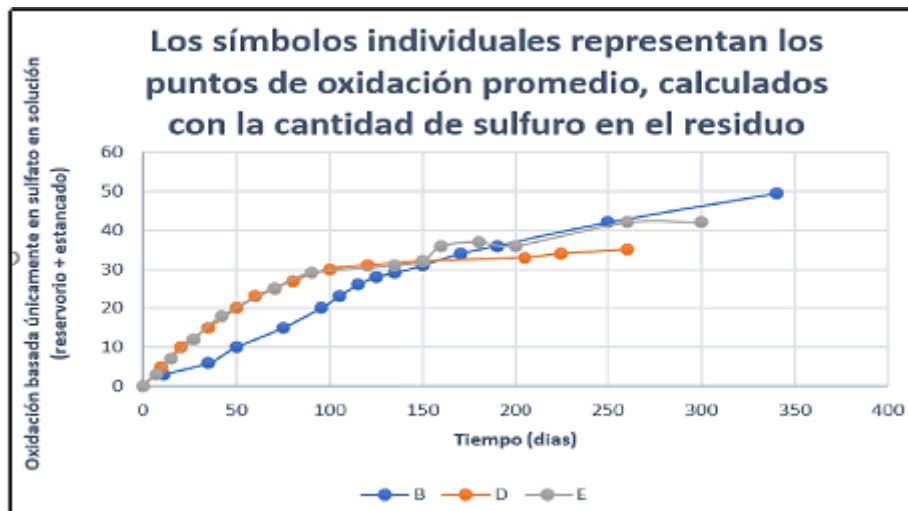
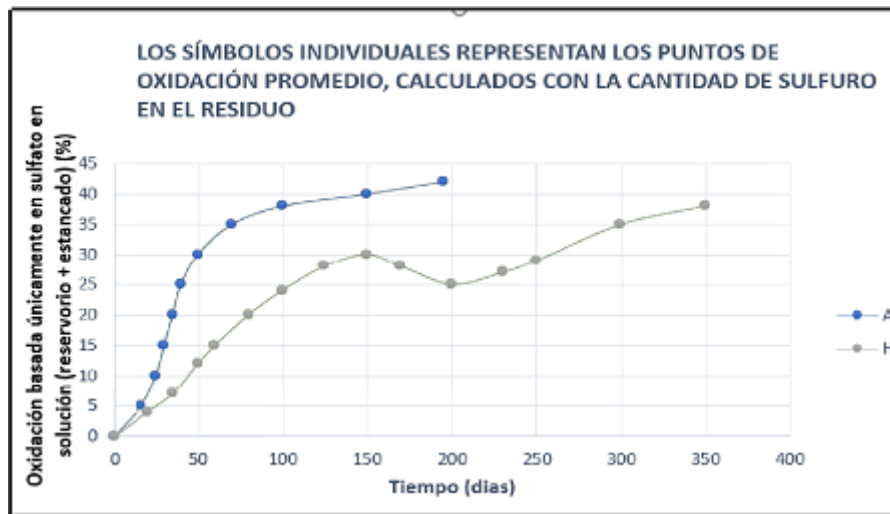
El potencial es muy significativo en las bacterias que trabajan a altas temperaturas, por lo tanto, la temperatura influye significativamente en el potencial.

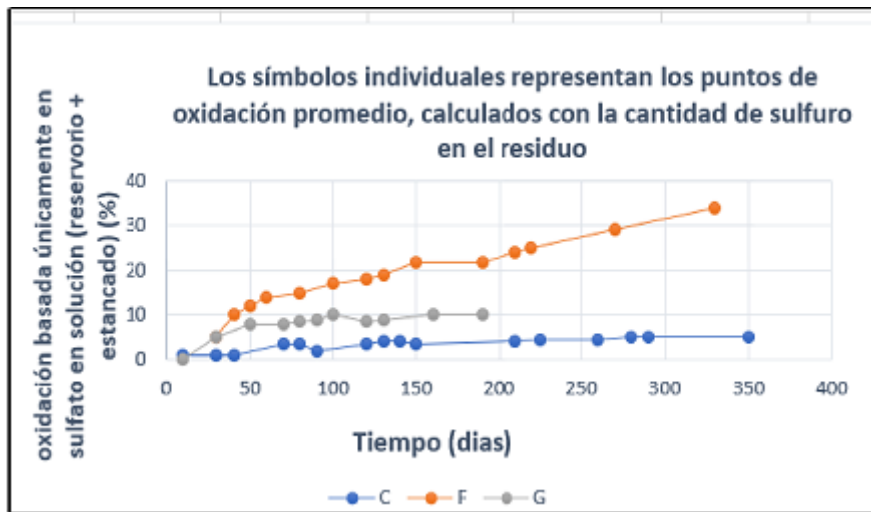
La primera columna fue desmantelada después de 222 días y mostraba una profundidad uniforme de sulfato (0,53% en peso), azufre elemental (0,20%), hierro (1,67%) y sulfuro (1,01%). Una gran parte del sulfato producido por la oxidación del 60% del sulfuro de azufre precipitó como jarosita, como se confirmó por XRD. La cantidad de jarosita precipitada, que aquí se supone que es jarosita de hidronio (no es posible la confirmación por DRX) se calculó como el producto del grado de sulfato en el residuo y la masa del residuo. Este valor se corrigió por

la cantidad de sulfato disuelto en la solución estancada que se dejó secar con el mineral húmedo. La jarosita de potasio ascendió a 2,70 wt%.

**Figura 3**

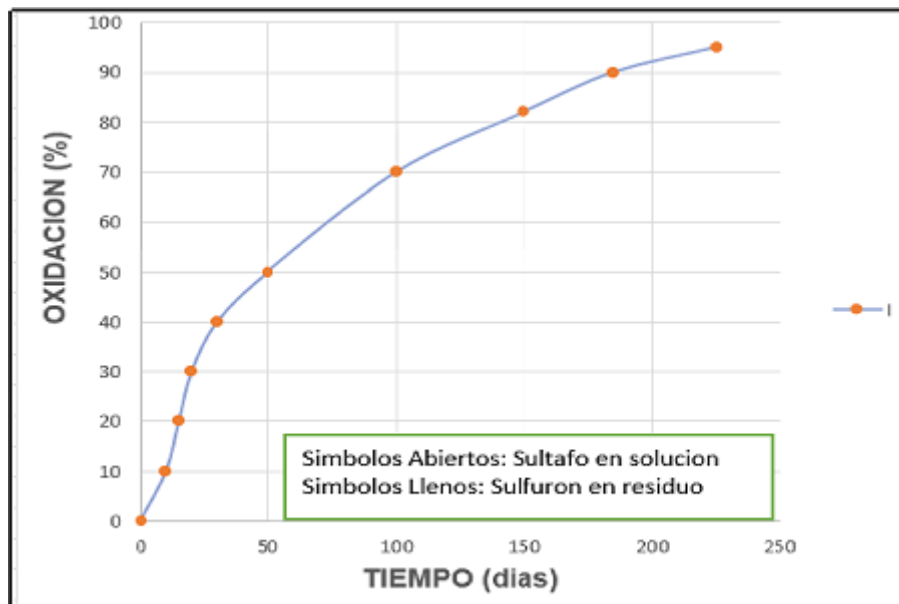
*Perfiles de oxidación basado en sulfato y sulfuros de las pruebas de la gran columna a temperaturas de 22 °C*





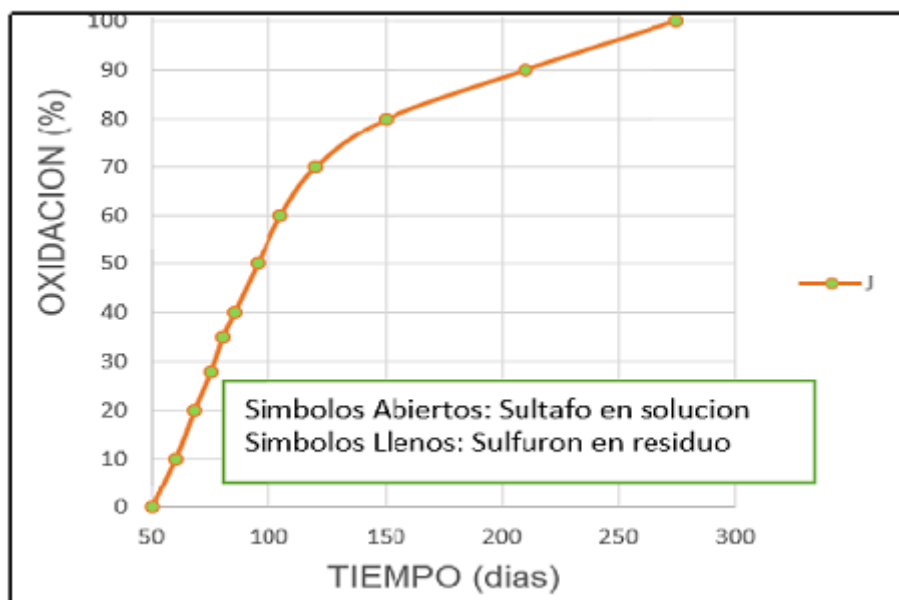
**Figura 4**

*Perfiles de oxidación basado en sulfato y sulfuros de las pruebas de la gran columna a temperaturas de 45 °C*



**Figura 5**

*Perfiles de oxidación basado en sulfato y sulfuros de las pruebas de la gran columna a temperaturas de 65 °C*



### 3.3. Análisis de la granulometría del mineral en la oxidación del azufre con bacterias en el mineral refractario de oro pirítico

**Tabla 2**

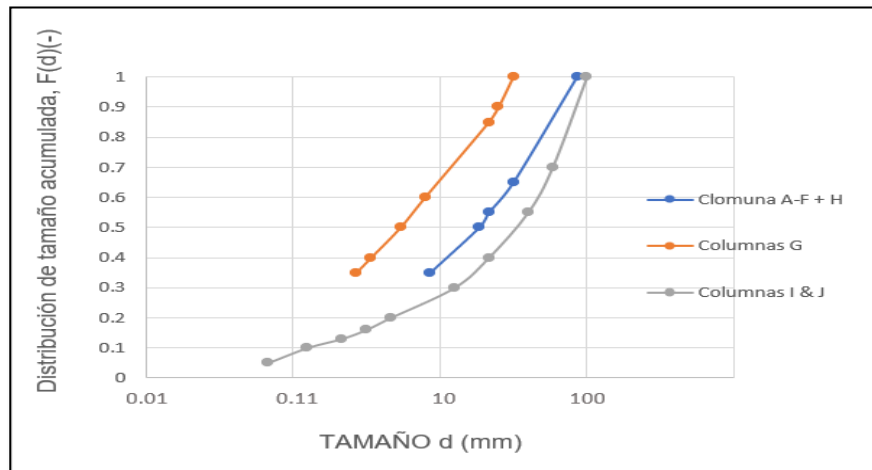
*Diseño experimental y condiciones de funcionamiento.*

		COLUMNAS									
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Temperatura (°C)		Temperatura ambiente								45	65
Tamaño del mineral (mm)		< 12.5					< 3.1		< 12.5		

Fuente: laboratorio de la mina en estudio

### Figura 6

*Distribución del tamaño de las partículas de mineral antes de la aglomeración. La función Gates-Gaudin-Schuhmann se ajusta a las tres distribuciones experimentales.*



Fuente: datos del experimento

Desde el depósito de 4 litros relleno cada 3 días con medio fresco, la solución se bombeaba a la parte superior de las columnas de 45 y 65 °C, donde goteaba en el centro y se deslizaba por el lecho antes de drenar por el puerto inferior al contenedor de lixiviados. La configuración de las columnas grandes era prácticamente la misma, excepto por el depósito de alimentación de 75 litros, la bomba que redirige el lixiviado desde el fondo de la sección superior a la parte superior de la sección inferior, y el tubo que lleva el aire desde la sección inferior a la superior.

La recopilación de datos experimentales, incluyendo los balances de masas de sólidos, hierro y azufre, los perfiles dependientes de la profundidad y del tiempo de pH, potencial, concentración de sulfato, concentración de hierro, número de células adheridas y suspendidas, y los perfiles de profundidad del número de células adheridas, grado de azufre y grado de hierro en el momento de la parada, generaron gráficos y tabla.



## CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1 Discusión

Se estudió la caracterización de un mineral de oro refractario pirítico la cual encontramos que tiene un contenido de Sulfuro  $2,54 \pm 0,42$  %, Azufre total  $0,17 \pm 0,06$ %, Azufre elemental  $< 0,01$ %, Hierro  $2,75 \pm 0,24$ %, Cobre  $348 \pm 55$  ppm, Arsénico  $432 \pm 94$  ppm, Inorgánicos  $0,04 \pm 0,03$ %, Carbón Orgánico  $< 0,01$ %, Grafito  $0,15 \pm 0,03$ %, Alumina  $8,70 \pm 0,49$ %,  $\text{SiO}_2$   $77,37 \pm 1,40$ %

Mientras que en la investigación de Zaldaña y Zavaleta (2016) al realizar el análisis químico del mineral sulfurado con alto contenido de arsenico, obtuvieron las siguientes leyes: Au 25.2 g/TM, Ag 13.38 Oz/Tc, Cu 3.14%, Fe 26.07%, As 19.06 %, Zn 1.78 %, Sb 0.31%, Pb 0.46 %.

En nuestro estudio de investigación tenemos como resultado que la oxidación del azufre elemental fue más rápida a temperaturas elevadas ( $45^\circ\text{C}$  y  $65^\circ\text{C}$ ), siendo la temperatura de  $45^\circ\text{C}$  la más óptima para la oxidación, no contrastando así con la investigación de López y Martínez (2017) quien nos dice que, la temperatura durante el pretratamiento de biooxidación, no tiene efecto significativo sobre el porcentaje de recuperación de oro y se obtiene resultados favorables para el proceso trabajando a temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ); evitando costos en el consumo de energía al elevar la temperatura

En nuestro trabajo de investigación obtenemos como resultado que la granulometría más eficiente es la más fina (3,1 mm) Según López y Alvarado (2000) en su tesis de pregrado “Influencia de la biooxidación, condición del mineral y granulometría en la extracción de oro y plata del mineral aurífero refractario de la Cía. Minera Sayapullo S.A., tratado por cianuración y thioureación”, concluyen en que las más altas extracciones de oro y plata se da cuando el mineral de cabeza es molido a 81% -m200 y con biooxidación tratado posteriormente por cianuración teniendo 65% y 73.22% de extracción respectivamente.

## 4.2 Conclusión

De los resultados obtenidos se valida la hipótesis de investigación: la temperatura y granulometría tienen un efecto significativo en la oxidación del azufre con bacterias en un mineral de oro refractario pirítico de Algamarca.

Se caracterizó químicamente al mineral en estudio, concluyéndose que los constituyentes y las concentraciones de los metales que están en la muestra, fueron: Sulfuro, azufre, hierro, cobre, arsénico, inorgánicos, carbón orgánico, grafito, alúmina y óxido de silicio.

En la evaluación de la oxidación del azufre con bacterias en un mineral de oro refractario pirítico a temperaturas de 22°C, 45°C y 65°C; se concluye que la temperatura más óptima para la oxidación del azufre, por lo que la oxidación del azufre elemental fue más rápida a temperaturas elevadas y se discuten las razones por las que la cinética de oxidación del sulfuro en la columna de 65°C fue comparable a la prueba de 45°C y, por lo tanto, más lenta de lo predicho.

Se analizó la granulometría en la oxidación del azufre con bacterias en un mineral de oro refractario pirítico los cuales fueron de 3.1mm y 12.5mm, concluyendo que la granulometría más óptima fue la de 3.1 mm siendo la granulometría más fina trabajada en la investigación.

## REFERENCIAS

- Arias, Falcon, Puente, & Lovera. (2005). Refractariedad de concentrados auríferos . *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 1.
- Chilon, H. D., & Mejia, M. R. (2018). *Tratamiento de relaves de cianuración de concentrados refractarios para la recuperación de oro y plata en la zona de Calpa - Arequipa*.  
Obtenido de [https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/10260/Chilon\\_chh.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/10260/Chilon_chh.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Chilon, H., & Mejia, M. (2018). *Tratamiento de relaves de cianuración de concentrados refractarios para la recuperación de oro y plata en la zona de Calpa - Arequipa*.  
Arequipa. Obtenido de [https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/10260/Chilon\\_chh.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/10260/Chilon_chh.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Coaguila, & Lazaro. (2018). *Pretratamiento de la lixiviación de un mineral refractario de oro y plata asociado a sulfuros con la adición de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio*.  
Arequipa-Peru.
- Reyes, López, Alvaado, & Valencia, R. y. (2016). *Biolixiviación de Minerales Auríferos Refractarios de la compañía Minera Sayapullo S.A*. Trujillo .
- Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. d. (2014). *Metodología de la Investigación 6ta Edición*. McGraw-Hill Education.
- Sanchez, & Martinez. (2019). El beneficio del oro en minerales refractarios de la Faja Pirítica.  
*Instituto Geológico y Minero de España*.
- Santos. (2015). Evaluación de cuatro métodos para recuperación de oro a partir de un mineral refractario. *Centro de investigación en materiales avanzados, s,c*.

## ANEXOS

### Anexo n° 01: Galería de fotos



*Foto 1:* Primer punto de muestreo de mineral. Veta Ruth



*Foto 2:* Presencia de azufre en nuestro mineral en estudio



**Foto 3:** Caracterización del mineral en estudio con lupa de geólogo



**Foto 4:** Muestra del mineral en estudio