

Biooxidación de minerales sulfurados argentíferos como pretratamiento para la recuperación de plata

Biooxidation of refractory silver minerals as pretreatment for silver recovery

Vladimir Alejandro Arias Arce^{1,a}, Pilar Angélica Avilés Mera^{1,b}, Marco Antonio Surichaqui Hidalgo^{2,c}, Carlos Alberto Malpartida Dominguez^{3,d}, Ismael Molina Pereyra^{3,e}

Recibido: 03/09/2023 - Aprobado: 29/10/2023 – Publicado: 15/12/2023

RESUMEN

La demanda mundial de plata está aumentando debido al desarrollo tecnológico en diferentes áreas, especialmente por los requerimientos en la producción de energías renovables; por lo tanto, para el tratamiento de minerales refractarios por procesos convencionales, es necesario estudiar mecanismos para identificar la viabilidad de su procesamiento y la factibilidad de su recuperación, asegurando la rentabilidad. El oro y la plata presentes en la matriz de los minerales de sulfuros de metales base no se recuperan de forma adecuada por el método convencional de lixiviación en solución de cianuro de sodio. Por lo tanto, deben someterse a un pretratamiento de oxidación o conversión de los sulfuros en compuestos simples que permitan la recuperación de los metales preciosos. Los métodos de oxidación de los minerales considerados refractarios se realizan por métodos hidro y pirometalúrgicos, buscando la disolución del azufre, hierro, arsénico y otros elementos presentes. Es importante identificar y considerar la estructura mineralógica, variedad microbiológica, características fisicoquímicas, tipos de reactores, interacciones bacterianas, entre otros factores. La elección de la biooxidación como proceso preferido en proyectos de recuperación de oro, plata, cobre u otros metales, en la mayoría de los casos se basa en la ventaja económica, en comparación con los procesos convencionales de tostación, lixiviación química y lixiviación presurizada. La biooxidación de minerales argentíferos refractarios ha sido ampliamente estudiada en los últimos años, concluyéndose que su aplicación es factible, principalmente por ser amigable con el medio ambiente.

Palabras claves: Biooxidación, plata, minerales refractarios, biohidrometalurgia, minerales sulfurados.

ABSTRACT

The worldwide demand for silver is increasing due to the technological development in different areas, especially for the requirements in the production of renewable energies; therefore, for the treatment of refractory minerals by conventional processes, it is necessary to study mechanisms to identify the viability of their processing and the feasibility of their recovery, ensuring profitability. Gold and silver present in the matrix of sulfide-based ores are not affordably recovered by the conventional method involving leaching in sodium cyanide solution. Therefore, it must be subjected to oxidation pretreatment or conversion of the sulfides to simple compounds that allow recovery of the precious metals. The methods of oxidation of minerals considered refractory are carried out by hydro and pyrometallurgical methods, seeking the dissolution of sulfur, iron, arsenic and other elements present. It is important to identify and consider the mineralogical structure, microbiological variety, physicochemical characteristics, types of reactors, bacterial interactions, among other factors. The choice of biooxidation as the preferred process in projects for the recovery of gold, silver, copper or other metals, in most cases is based on the economic advantage, compared to the conventional processes of roasting, chemical leaching and pressurized leaching. The biooxidation of refractory argentiferous ores has been extensively studied in recent years, concluding that its application is feasible, mainly because it is environmentally friendly.

Keywords: Biooxidation, silver, refractory minerals, biohydrometallurgy, sulfide minerals.

1. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Lima, Perú.

2. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Pasco, Perú.

3. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Unidad de Posgrado, Geometalurgia. Lima, Perú.

a. Docente. E-mail: variasa@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7053-9656>

b. Docente. E-mail: pavilesm@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3135-789X>

c. Docente. E-mail: msurichaquih@undac.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6692-8061>

d. Tesista. E-mail: carmalido1790@gmail.com - ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1291-6854>

e. Tesista. E-mail: ismael.molina@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8608-2291>

I. INTRODUCCIÓN

Los minerales refractarios de oro y/o plata, son aquellos que sometidos a cianuración directa presentan bajas recuperaciones; originando la necesidad de implementar un procesamiento o pretratamiento previo con la capacidad de contribuir a la prevención, detección y remediación de la contaminación ambiental y degradación de residuos, es una forma sostenible de desarrollar procesos y productos limpios. (Singh R., 2017). Los minerales sulfurados refractarios (RSM) de oro y plata se han sometido generalmente a procesos como la tostación, la flotación y la lixiviación, con resultados insatisfactorios. A lo largo del tiempo, el creciente consumo de metales y aleaciones por parte de la humanidad ha impulsado la búsqueda y desarrollo de tecnologías para el beneficio de yacimientos minerales difíciles de tratar o complejos (Sánchez-Yañez, 2006). Actualmente, se utilizan cuatro procesos industriales para recuperar metales preciosos a partir de minerales sulfurados: oxidación a presión, tostación, biooxidación y cianuración.

La biolixiviación es una técnica económica, eficiente y una alternativa amigable con el medio ambiente, utilizada para la extracción de minerales valiosos a partir de menas de baja ley (Gahan et al., 2012; Erüst et al., 2013), que involucra una suspensión bifásica de partículas sólidas en un medio líquido (Srichandan et al, 2019), donde las bacterias quimiolitotróficas participan indirectamente en la oxidación del ion ferroso (Fe^{2+}) a ion férrico (Fe^{3+}). Un ejemplo de este grupo son las bacterias del género *Acidithiobacillus* presentes en yacimientos minerales (Fowler et al, 1999).

El tratamiento en modalidades continuas y discontinuas, las variables que generalmente se someten a consideración y estudio son la densidad de pulpa, concentración de Fe^{2+} , pH, población bacteriana, sulfuros, arseniuros, entre otros. La lixiviación bacteriana o biolixiviación mediante bacterias quimiolitotróficas es una alternativa debido a su capacidad para oxidar el azufre y el hierro contenidos en los sulfuros minerales, facilitando la disolución de metales y/o la liberación de otros. En consecuencia, se incrementan las tasas de recuperación (Asamoah et al, 2018).

La aplicación de tecnologías tradicionales tiene relativa eficiencia, alto costo y lamentablemente daño ambiental; por ello, el uso de alternativas biotecnológicas como la lixiviación bacteriana para oxidar azufre y hierro de minerales sulfurados facilitan la extracción de metales de valor comercial, a bajo costo, de manera amigable con el medio ambiente y sin contaminar el entorno (Maluckov, 2017). Los métodos de biominería son asequibles, no tóxicos, eficaces y también respetuosos con el medio ambiente (Mahajan et al, 2017).

1.1. ¿Existe interés por los procesos biohidrometalúrgicos?

Existen numerosos métodos biohidrometalúrgicos que han permitido la recuperación de cobre y la liberación de oro; principalmente mediante la acción de bacterias *acidithiobacillus chemolithotrophic* y otras bacterias reductoras de sulfuros para extraer metales de menas, concentrados, relaves y residuos. La biohidrometalurgia

ha contribuido a paliar los problemas relacionados con el agotamiento de los recursos minerales de alta ley, transformando los recursos minerales secundarios o marginales en reservas. Las técnicas de procesamiento van desde la lixiviación en reactores, estanques, pilas y vertederos. La atención se centra actualmente en el tratamiento de minerales o concentrados de alta ley.

Para oxidar el concentrado de oro refractario con alto contenido en azufre y arsénico, está previsto un proceso químico-biológico. La oxidación química a alta temperatura incluye la tostación y la lixiviación a presión, y la oxidación biológica o microbiológica.

Los costes de capital en la aplicación de bioprocesos mineros se reducen debido a la simplicidad de las plantas de biooxidación, que constan de menos procesos unitarios en comparación con las plantas de fundición convencionales, que generalmente requieren una serie de operaciones secuenciales. Mediante el uso de una combinación de procesos de biooxidación y biocianuración, los costes totales de capital podrían reducirse potencialmente en gran medida siempre que se disponga del diseño óptimo del sistema y de los microorganismos potenciales (Karthikeyan et al, 2015).

Los impedimentos o dificultades en la extracción de oro y plata de sus fuentes, que determina la refractariedad son principalmente: baja cinética de disolución debido a la presencia de sulfuros y sulfosales asociados al hierro, adsorción de lixivios debido a la presencia de material carbonoso, alto consumo de reactivos debido a la existencia de compuestos cianurados y a la abundancia de metales base como sulfuros de cobre, zinc, níquel y otros.

En el caso de la presencia de sulfuros es común realizar pretratamientos de oxidación para eliminarlos y/o transformarlos total o parcialmente. Procesos considerados como estrategias orientadas a mejorar la disolución a través de la cianuración (Larrabure & Rodríguez, 2021). Cuando el mineral contiene material carbonoso, durante la cianuración se produce retención de oro debido a la afinidad del $AuCN_2^-$ en la superficie del material. Buscando la remoción del carbono, el material puede sufrir combustión y la consecuente formación de CO_2 , SO_2 y As_2O_3 , causando contaminación ambiental. Por lo tanto, la biohidrometalurgia es una biotecnología en rápida evolución que ya ha aportado soluciones afianzadas a viejos problemas asociados a la recuperación de metales mediante pirometalurgia convencional o metalurgia química (Gahan et al., 2012; Erüst et al., 2013). Su aplicación a minerales sulfurados auríferos de baja ley permite reducir el consumo de cianuro (Rodrigues et al, 2021).

1.2. Oxidación biológica como pretratamiento.

El proceso de oxidación biológica o BIOX consiste en la utilización de una población bacteriana mixta compuesta por: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*. Estas bacterias son capaces de oxidar minerales y concentrados de sulfuros auríferos en condiciones controladas. Por lo tanto, ofrecen una alternativa a las técnicas convencionales de tostación u oxidación a presión para recuperar Au y Ag a partir de minerales sulfurados y concentrados (Groza et al, 2008).

La biooxidación como pretratamiento aplicado a menas de oro sulfídicas refractarias permite mejorar la recuperación y reducir el consumo de cianuro durante la lixiviación. Por lo tanto, es importante tener en cuenta la concentración de la población bacteriana, que es directamente proporcional al aumento de la oxidación de la pirita (Cheng et al, 2021). La presencia de una comunidad mixta de bacterias y arqueas acidófilas, oxidantes de hierro y azufre, facilita la recuperación de metales preciosos. Los cambios en la comunidad durante el periodo de oxidación pueden ayudar a crear condiciones que permitan la formación de un consorcio bacteriano para lograr la biooxidación y optimizar la recuperación de los valores metálicos (Smart et al, 2017).

Los aspectos críticos para la selección del proceso BIOX para el tratamiento de un mineral refractario son: susceptibilidad a la biooxidación, diseño del proceso, evaluación económica e implicación medioambiental (Van Niekerk, 2015). La eficacia de cultivos puros y mixtos de tres cepas bacterianas moderadamente termófilas y extremadamente acidófilas (*Acidimicrobium ferrooxidans*, *Sulfobacillus sibiricus*, *Acidithiobacillus caldus*), fue evaluada por Tanaka et al (2015), en la biooxidación de concentrados de mineral altamente refractario, con resultados muy satisfactorios en la recuperación de Au y Ag. La disolución oxidativa con presencia de microorganismos es una necesidad en la industria minera, asociada al tratamiento de minerales sulfurados refractarios que contienen metales preciosos (Lv et al, 2020), y en otros metales de interés comercial.

1.3. ¿Cuál es el papel catalizador del *Acidithiobacillus Ferrooxidans* en la recuperación de metales preciosos?

La bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* existe de forma natural en las minas, participa en los procesos geoquímicos oxidando los minerales sulfurados y provocando la formación de aguas ácidas de mina. Su uso en el pretratamiento de minerales refractarios se remonta a la década de 1980 (Gilbert et al. 1988). La comunidad bacteriana que constituye el grupo de bacterias oxidantes de azufre y hierro de minerales sulfurados, está formada por los géneros *Acidithiobacillus*, *Acidiferrobacter*, *Acidiphilium*, *Leptospirillum* y *Ferroplasma* y dentro de ellos, las cepas *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Acidiphilium multivorum*, *Leptospirillum ferriphilum*, *Sulfobacillus thermotolerans*, *Ferroplasma acidarmanus* y *Ferroplasma acidiphilum* (Bulaev et al, 2017). La capacidad de oxidar minerales se debe a su condición de quimiolitótrofos; es decir, obtienen su fuente de energía de la oxidación de sustancias inorgánicas (Nordstrom y Southam, 1997).

La adición de ciertos cationes como Ag^+ y Fe^{2+} y aminoácidos, así como cisteína y otras moléculas precursoras del metabolismo bacteriano, contribuyen por tanto a la oxidación de los sulfuros metálicos presentes en los recursos minero-metalúrgicos, así como el control de la temperatura, pH, O_2 , nutrientes y otros factores fisicoquímicos y biológicos. Utilizando un cultivo mixto de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*, como pretratamiento a la cianuración, fue posible mejorar las

extracciones de oro y plata con respecto a la cianuración directa (McNeice et al, 2021).

El principal mecanismo catalítico de la bacteria consiste en la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} para mantener una adecuada relación Fe^{3+}/Fe^{2+} y permitir la oxidación de sulfuros a sulfitos, sulfatos, tionatos y tetratonatos. El ácido sulfúrico generado disminuye el pH y el ion férrico se convierte en ion ferroso para mantener el ciclo de acidez, junto con el ciclo de oxidación-reducción para generar moléculas de ATP dentro del metabolismo bacteriano.

1.4. Antecedentes

El desarrollo de la biotecnología ha permitido incursionar en las actividades mineras, es así que aproximadamente desde finales de los años 80 la biooxidación se ha convertido en una alternativa para el tratamiento hidrometalúrgico de minerales y concentrados refractarios de metales preciosos (Torma et al, 1992). A partir de un concentrado refractario de oro con alto contenido de azufre y arsénico, Wang (2018), analiza la oxidación química y luego la oxidación biológica, mediante esta última logra mejorar el nivel de recuperación del oro.

Se ha investigado la fisiología de géneros y especies bacterianas tolerantes a la acidez extrema, así como las concentraciones subletales de Ag, como es el caso de los géneros *Leptospirillum* y *Thiobacillus*, que mantienen la capacidad de oxidación en acidez extrema, clave en la biohidrometalurgia para la recuperación eficiente de metales preciosos como: Au y Ag (Sánchez-Yáñez, 2006; Sand et al, 2001). Asimismo, se ha estudiado la tasa de detención y producción de sustancias poliméricas extracelulares de cepas de *At. ferrooxidans*, *At. thiooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*, abriendo nuevas perspectivas para la industria minera, buscando mejorar el proceso de biolixiviación (Ruiz et al, 2008).

Mediante el proceso BIOX, se puso en marcha una planta piloto de 50 kg/día para tratar un concentrado de arsenopirita que contenía oro, utilizando un cultivo bacteriano nativo aislado de drenaje ácido de mina (Ly & Van Niekerk, 2006). También, en concentrados de flotación, para reducir el comportamiento refractario del material, favorecer la recuperación de valores metálicos y contribuir a preservar el medio ambiente (Marchevsky et al, 2017). En estudios a escala piloto, con concentrados con altos contenidos de pirita y arsenopirita, en proceso continuo y batch, se evaluó la degradación de sulfuros y la dinámica de la población bacteriana (Hu et al, 2017).

En estudios de oxidación por etapas. El tratamiento de los residuos mineros con valores de cobre, zinc y oro en tres etapas: (1) lixiviación sulfúrica ácida para eliminar las formas solubles de cobre y zinc, (2) lixiviación biogénica de hierro férrico para la oxidación de los sulfuros de cobre, zinc y pirita aurífera, y (3) oxidación bacteriana de los sulfuros restantes. Biooxidación para una oxidación más completa de la pirita, con la consiguiente liberación del oro asociado. Logrando recuperaciones muy satisfactorias (Muravyov & Fomchenko, 2018). En el trabajo de Wang et al. (2018), el pretratamiento en dos etapas: oxidación química y oxidación biológica, permitió aumentar la

solubilidad del Fe, As y S; en consecuencia, se mejoró la recuperación de oro.

En un proceso comercial, utilizando la bacteria *Leptospirillum ferriphilum*, se identificó la capacidad de adherirse a los minerales sulfurados y realizar la acción de oxidación. Siendo importante considerar la temperatura, pH y características de la capa pasiva del mineral para lograr la lixiviación por contacto del mineral (Liu et al, 2017). El estudio de las propiedades microestructurales y reológicas de pulpas durante un proceso de biolixiviación revela atrición de minerales (tamaño de partícula), presencia de exopolisacárido bacteriano excretado, cambio de pH y cambios en la viscosidad del medio; dando lugar a fenómenos de flujo como tixotropía, límite elástico y reopexia (Núñez et al, 2018).

II. METODOLOGÍA

La presente investigación tiene un enfoque cualitativo de tipo aplicado y diseño no experimental de revisión documentada. Los artículos revisados se refieren a trabajos prácticos realizados en relación con el tema de investigación "Biooxidación de minerales sulfurados argentíferos como pretratamiento para la recuperación de plata" y son evidencia de su aplicación.

Para la recolección de la información se utilizaron varios tipos de documentos, como artículos y revisiones de revistas indexadas en las bases de datos Scopus y Web of Science a partir de 1988 y en idioma inglés y español.

Una vez obtenidos los resultados de la búsqueda, se realizó una clasificación mediante la lectura de títulos y resúmenes. Se utilizaron los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

- Inclusión:

- Tratamientos y pretratamientos de minerales y concentrados con aplicación a oro y plata.

- Utilización de diversos tipos de microorganismos.

- Exclusión:

- Tratamientos y pretratamientos de biolixiviación en pilas y columnas.

- Minerales y concentrados de cobre y uranio.

III. ESTADO DEL ARTE

Los estudios realizados en los últimos 5 años demuestran los beneficios de la oxidación bacteriana, habiéndose realizado varios estudios para conseguir la oxidación de sulfuros. Actualmente, la tostación y la oxidación a presión tienen como alternativa el tratamiento con microorganismos (Ahn J., 2019). Partículas de oro y plata atrapadas en matrices de pirita, calcopirita y arsenopirita son liberadas por la acción de bacterias oxidantes de hierro, determinándose que una mayor concentración de inóculo bacteriano condujo a un aumento en la cantidad de metales biolixiviados (Brinza et al, 2021).

Durante el tratamiento de dos menas de oro refractarias. Sometidos a flotación, se obtuvieron concentrados que

contenían principalmente apatita y dolomita, los productos de la biooxidación generaron jarosita y carbono grafitico, respectivamente. Los resultados de la cianuración se vieron empañados, el primero por la acción encapsulante de la jarosita y el segundo por el efecto pregelificante del carbono, en ambos casos se redujo la extracción de oro (Asamoah et al, 2021). Del mismo modo, la presencia de yeso, jarosita y carbono grafitico afecta negativamente a la cianuración (Ofori-Sarpong et al., 2020).

La aplicación de la biolixiviación multietapa de la pirita mediante la detención del crecimiento de la población bacteriana permite determinar la velocidad de disolución de la pirita, la rugosidad de la superficie y la intensidad de la corrosión (Yin et al., 2020; Arias-Arce et al., 2023). En el tratamiento de minerales con alto contenido de pirita, es importante identificar la fuente y la dosificación del carbono; así como, la temperatura del medio de procesamiento. Los estudios realizados por Bulaev et al. (2021), determinan que a 50°C se obtienen mayores beneficios.

En minerales auríferos doblemente refractarios, debido al contenido de oro a niveles de ppt y a la considerable cantidad de materia carbonosa, el tratamiento secuencial buscando primero la destrucción de los sulfuros de hierro y luego la descomposición de la materia carbonosa mediante enzimas producidas por el hongo *phanerochaete chrysosporium* con capacidad de degradar lignito, mejoró la recuperación del oro (Sasaki & Konadu, 2021). Por otro lado, se han identificado microorganismos fúngicos quimioorganotróficos capaces de disolver manganeso y plata en estériles mineros (Huerta-Rosas et al., 2020).

Se considera que los procesos a los que se someten los concentrados refractarios de flotación tienen una activación mecanoquímica por cambios físicos y químicos, desde la reducción de tamaño con aumento de superficie, aumento de la tensión de las partículas, consumo de reactivos y eficiencia de extracción de oro (Asamoah et al., 2018a). La activación mecanoquímica por la acción de la biooxidación ayudó a superar la refractariedad del mineral sulfurado, logrando una importante recuperación de oro (Asamoah, R.K., 2021). Asimismo, el comportamiento electroquímico de la arsenopirita en medio de cultivo 9 K libre de hierro en presencia de Ag^+ mejoró significativamente la disolución de la arsenopirita. La formación de Ag_2S en la superficie pasiva impide la disolución de los sulfuros. El mecanismo electroquímico-catalítico permite comprender el papel de la Ag^+ como catalizador e inhibidor del proceso (Zhang et al, 2021a).

Sin embargo, también hay casos en los que la biooxidación no se considera para el procesamiento de minerales refractarios. Estos, sometidos a tostación y cianuración, permiten obtener altas recuperaciones de oro en menor tiempo y con mínimo consumo de cianuro (Lin et al, 2022; Yoğurtcuoğlu & Ibrahim, 2023). Para concentrados de pirita con oro y plata, mediante la tostación entre 500 y 600 °C, permite mejorar significativamente la recuperación de oro y plata (Zhang et al, 2021). También, existe la tecnología de tostación con cloración mejorada mediante la adición de pirita para promover la oxidación del cloruro de calcio y producir cloro gas, y el proceso logró la recuperación de oro y plata

de manera eficiente y amigable con el medio ambiente (Qin et al, 2020).

3.1. Procesos alternativos a la cianuración

Una alternativa al proceso de cianuración es la tiosulfatación, este proceso requiere la presencia de sulfato de cobre y amoníaco, como agente lixivante y estabilizador de iones de cobre, respectivamente; y proporciona un modelo ecológico, no tóxico y de costo relativamente bajo para la lixiviación de oro y plata a partir de minerales refractarios o concentrados (Chen et al., 2022). Asimismo, mediante la mezcla de sulfato-tartrato-tiosulfato de cobre, Chen et al. (2023), consiguen la disolución del sulfuro de plata. En un estudio de Zhao et al. (2020), la biooxidación de concentrado de oro, seguida de lixiviación con tiosulfato, obtuvo buenos resultados. La aplicación de ultrasonidos a mineral de plata refractario, seguida de cianuración, así como el control de otras variables y mediante un diseño experimental estadístico, permitió un aumento significativo de la recuperación de plata (Cilek et al., 2020).

Los estudios sobre la interacción bacteria-mineral identifican la formación de biopelículas, que dependen en gran medida de las características químicas de la superficie mineral. La adhesión de *Leptospirillum* sp. a piritita modificada y meteorizada superficialmente mediante una técnica electroquímica no invasiva como la espectroscopia de impedancia electroquímica reveló cambios significativos a bajas frecuencias, alcanzando diferentes grados de adhesión bacteriana, evaluados mediante recuento celular con cámara de Neubauer (Saavedra et al, 2021).

También, en investigaciones para extraer oro de minerales utilizando bacterias oxidantes de yoduro, cianogénicas y excretoras de aminoácidos, se han desarrollado diagramas de flujo para diferentes escenarios para lograr la disolución de oro a partir de minerales refractarios y no refractarios (Jorjani, 2021).

IV. RESULTADOS

En el trabajo "Lixiviación bacteriana de un mineral sulfurado refractario argentífero", los Minerales Sulfurados y Concentrados de Plata Refractarios (SMRS) son tratados por diversos métodos como: tostación, lixiviación con agentes quelantes químicos, oxidación a presión y oxidación química. Estos métodos tienen una eficiencia relativa, altos costos de inversión y operación y, desafortunadamente, en algunos casos daños al medio ambiente; por ello, se han desarrollado alternativas como la biolixiviación (BL) o lixiviación bacteriana, que es un proceso natural en el que bacterias quimiolitotróficas oxidan el azufre y/o hierro de los minerales, facilitando así la extracción de metales de valor comercial a bajo costo y sin contaminar el medio ambiente, aunque tiene la limitante de que la plata en la solución de lixiviación inhibe el crecimiento de los microorganismos que participan en el proceso, por lo que se buscó incrementar la resistencia de estas bacterias a la plata. Los objetivos de este trabajo fueron: 1) Aislar y seleccionar bacterias que lixivien SMRS, 2) Adaptar estos microorganismos a altas concentraciones de plata. Para ello se prepararon erlenmeyers con medio de cultivo 9K modificado mezclado con SMRS como

f fuente de energía para los microorganismos existentes en el mineral. La capacidad se midió por la concentración de SO_4^{2-} (sulfato) generado por la oxidación del azufre del SMRS, por las bacterias quimiolitotróficas, el aislado con la máxima actividad de lixiviación del mineral, se adaptó a concentraciones crecientes de plata, que de nuevo se midió por la producción de SO_4^{2-} en presencia de una concentración elevada de nitrato de plata. Los resultados indican que los SMRS contienen bacterias quimiolitotróficas que lixivian ese mineral para extraer la plata. Uno de estos aislados bacterianos estaba adaptado a una elevada concentración de plata. Con base en el tipo de actividad de lixiviación y características fisiológicas de la bacteria, se clasificó como una especie del género *Thiobacillus* sp. Se concluye que la lixiviación es una alternativa económicamente viable para la extracción de metales preciosos de SMRSs y no causa daño ambiental (Sánchez-Yáñez et al, 2006).

En el trabajo "Proceso de biolixiviación para la recuperación de plata: Estudios estructurales y reológicos", se caracterizan las propiedades microestructurales y reológicas de pulpas minerales de plata manganeso durante un proceso de biolixiviación en un reactor continuo de tanque agitado (CSTR). El análisis de la cinética de disolución del manganeso en la pulpa durante el proceso de biolixiviación revela un nivel de disolución del 20-23% durante 36-48 h. Este porcentaje permite la extracción de grandes porcentajes de plata (Ag) durante el proceso de cianuración, obteniéndose así un 64 wt% de Ag. El valor máximo de viscosidad alcanzado en el medio (especialmente entre 48 y 72 h) es un parámetro importante, ya que puede provocar contratiempos en el proceso, como agitación no homogénea y aumento de la energía de transporte. Varios factores contribuyen al cambio continuo de la viscosidad en el medio, como el desgaste mineral, la presencia del exopolisacárido bacteriano (EPS) excretado, los cambios de pH, las modificaciones del tamaño de las partículas debidas al desgaste mineral (además de la corrosión) y los cambios en la densidad del medio. Por esta razón, es de gran importancia monitorizar el comportamiento reológico de la pulpa mineral durante los procesos de biolixiviación y cianuración. La pulpa mineral se comporta como un gel débil como se ha reportado en mediciones viscoelásticas lineales (Núñez-Rámirez et al, 2018).

V. DISCUSIÓN

Las tasas de remoción de hierro, azufre, arsénico, entre otros, pueden ser expresadas mediante una ecuación matemática, así como la cinética de la reacción química o reacción biológica. La cinética favorable de remoción de azufre y hierro en el proceso de biooxidación estudiado por Huang & Yang (2021), correspondió al incremento gradual de la población bacteriana, en consecuencia, se favoreció la recuperación de oro por cianuración.

Los minerales de sulfuro de alta ley o los concentrados de sulfuro pueden ser procesados por procesos de tostación u oxidación a presión. Para minerales de baja ley, es posible identificar la factibilidad y viabilidad mediante procesos biohidrometalúrgicos debido a que requieren bajos costos de capital y producción (Ahn et al, 2019). También es

mencionado por Purmomo et al. (2019), por bacterias oxidantes de azufre y hierro y, en medios que contienen sulfato ferroso.

La oxidación a alta temperatura podría ser rentable en algunos casos en los que se disponga de la infraestructura necesaria para el tratamiento de los gases generados y el debido respeto al medio ambiente. Existe el caso de la tostación de cloruros para producir cloruros solubles en etapas posteriores del proceso. La capacidad de cloración se potencia con la pirita, debido a su capacidad para reducir el cloruro cálcico y producir cloro gas (Qin et al, 2020).

La evaluación de la diversidad microbiológica presente en el sistema de procesamiento y la caracterización de las estructuras mineralógicas y fisicoquímicas del mineral pueden influir significativamente en la identificación de la biooxidación en los diferentes biorreactores (pilas de biolixiviación, tanques agitados y/o biorreactores templados). El procesamiento de datos mediante inteligencia artificial permitirá obtener nuevas y mejores tasas de disolución de los compuestos presentes en los recursos minerales (Darvanjoghi et al., 2022).

VI. CONCLUSIONES

Si las partículas submicroscópicas de oro y plata presentes en la matriz de los minerales sulfurados no se recuperan de forma asequible por el método convencional que implica la lixiviación en solución de cianuro sódico, el mineral debe someterse a un pretratamiento de oxidación o conversión de los sulfuros en compuestos simples que permitan o no dificulten la recuperación de los metales preciosos.

Los métodos de oxidación son los principales fundamentos en la determinación cinética del proceso y la relación de la disolución de azufre, hierro, arsénico y otros elementos presentes en los minerales considerados refractarios. Además, pueden ser representados por diversos modelos matemáticos lineales y no lineales, de acuerdo con el manejo de las variables y las condiciones del medio.

La selección de la biooxidación como proceso preferido en proyectos de recuperación de oro, plata, cobre u otros metales, en la mayoría de los casos se basa en la ventaja económica, en comparación con los procesos de tostación, lixiviación química y lixiviación presurizada.

La variedad de estructuras mineralógicas, microbiológicas y fisicoquímicas de los minerales sulfurados, los tipos de reactores, las interacciones bacterianas, entre otros factores, influyen significativamente en las reacciones de biooxidación. Así como la caracterización microbiana (Kaksonen et al, 2018).

Las características elementales, mineralógicas y texturales deben entenderse cuidadosamente para identificar soluciones potenciales, como las descritas en la presente revisión, pero estas soluciones potenciales deben evaluarse a través de proyectos de investigación y desarrollo (I + D). La identificación de los tipos de mineralización de oro y plata en yacimientos de sulfuros es necesaria para

desarrollar y mejorar esquemas racionales de extracción (Palyanova, 2020).

VII. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, que a través del Vicerrectorado de Investigación y Posgrado financió el proyecto de grupo de investigación No. C23160791 y a cada uno de los integrantes del grupo de investigación Biometalurgia.

VIII. REFERENCIAS

- Ahn, J., Wu, J., Ahn, J., & Lee, J. (2019). Comparative investigations on sulfidic gold ore processing: A novel biooxidation process option. *Minerals Engineering*, 140, 105864. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105864>
- Arias-Arce V., Lovera-Dávila D., Guerrero-Rojas J., Blas-Rodríguez F. and Molina-Pereyra I. (2023). Analysis of the Oxidation-Reduction Potential and Bacterial Population of Acidithiobacillus ferrooxidans during the Bioleaching Study of Sulfide Ores. IntechOpen Ltd., Books, Bioremediation for Global Environmental Conservation. Edit. N. Shiomi, V. Zambare & M. Md Din. DOI: 10.5772/intechopen.111815
- Asamoah, R. K. (2021). Specific refractory gold flotation and bio-oxidation products: Research overview. *Minerals*, 11(1), 93. <https://doi.org/10.3390/min11010093>
- Asamoah, R. K., Skinner, W., & Addai-Mensah, J. (2018). Alkaline cyanide leaching of refractory gold flotation concentrates and bio-oxidised products: The effect of process variables. *Hydrometallurgy*, 179, 79-93. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.05.010>
- Asamoah, R. K., Skinner, W., & Addai-Mensah, J. (2018a). Leaching behaviour of mechano-chemically activated bio-oxidised refractory flotation gold concentrates. *Powder Technology*, 331, 258-269. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.040>
- Asamoah, R. K., Zanin, M., Gascooke, J., Skinner, W., & Addai-Mensah, J. (2021). Refractory gold ores and concentrates part 1: mineralogical and physico-chemical characteristics. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 130(3), 240-252. <https://doi.org/10.1080/25726641.2019.1626659>
- Brinza, L., Ahmed, I., Cismasiu, C. M., Ardelean, I., Breaban, I. G., Doroftei, F., ... & Neamtu, M. (2021). Geochemical investigations of noble metal-bearing ores: Synchrotron-based micro-analyses and microcosm bioleaching studies. *Chemosphere*, 270, 129388. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129388>
- Bulaev, A., Belyi, A., Panyushkina, A., Solopova, N., & Pivovarova, T. (2017). Microbial population of industrial biooxidation reactors. *Solid State Phenomena*, 262, 48-52. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.262.48>
- Bulaev, A., Nechaeva, A., Elkina, Y., & Melamud, V. (2021). Effect of carbon sources on pyrite-arsenopyrite concentrate bio-oxidation and growth of microbial population in stirred tank reactors. *Microorganisms*, 9(11), 2350. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112350>

- Chen, J. N., Xie, F., Wang, W., Fu, Y., Wang, J., & Xu, B. (2023). Leaching of silver sulfide with copper sulfate-tartrate-thiosulfate solutions. *Journal of Central South University*, 30(3), 677-690. <https://doi.org/10.1007/s11771-023-5272-1>
- Chen, J., Xie, F., Wang, W., Fu, Y., & Wang, J. (2022). Leaching of gold and silver from a complex sulfide concentrate in copper-tartrate-thiosulfate solutions. *Metals*, 12(7), 1152. <https://doi.org/10.3390/met12071152>
- Cheng, K. Y., Acuña, C. C. R., Boxall, N. J., Li, J., Collinson, D., Morris, C., ... & Kaksonen, A. H. (2021). Effect of initial cell concentration on bio-oxidation of pyrite before gold cyanidation. *Minerals*, 11(8), 834. <https://doi.org/10.3390/min11080834>
- Cilek, E. C., Ciftci, H., Karagoz, S. G., & Tuzci, G. (2020). Extraction of silver from a refractory silver ore by sono-cyanidation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 63, 104965. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.104965>
- Darvanjooghi, M. H. K., Magdouli, S., Brar, S. K., Abdollahi, H., & Zolfaghari, M. (2022). Bio-oxidation of gold from refractory sulfide ores: a journey ahead. *Geomicrobiology Journal*, 39(3-5), 399-415. <https://doi.org/10.1080/01490451.2021.1977431>
- Erüst, C., Akcil, A., Gahan, C. S., Tuncuk, A., & Deveci, H. (2013). Biohydrometallurgy of secondary metal resources: a potential alternative approach for metal recovery. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 88(12), 2115-2132. <https://doi.org/10.1002/jctb.4164>
- Fowler, T. A., Holmes, P. R., & Crundwell, F. K. (1999). Mechanism of pyrite dissolution in the presence of *Thiobacillus ferrooxidans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(7), 2987-2993. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.7.2987-2993.1999>
- Gahan, C. S., Srichandan, H., Kim, A. A., & Akcil, A. (2012). Biohydrometallurgy and biomaterial processing technology: a review on its past, present and future. *Res J Recent Sci*, 2277, 2502. <http://www.isca.me/rjrs/archive/v1/i10/15.ISCA-RJRS-2012-329.pdf>
- Gilbert, S. R., Bounds, C. O., & Ice, R. R. (1988). Comparative economics of bacterial oxidation and roasting as a pre-treatment step for gold recovery from an auriferous pyrite concentrate. *Can. Min. Metall. Bull.*, 81(910), 89-94. <https://store.cim.org/en/comparative-economics-of-bacterial-oxidation-and-roasting-as-a-pre-treatment-step-for-gold-recovery-from-an-auriferous-pyrite-concentrate>
- Groza, N., Filcenco-Olteanu, A., Pañțuru, E., Rădulescu, R., & Aurelian, F. (2008). Application of the BIOX process to the pretreatment of refractory sulphide gold ores and concentrates in order to increase Au and Ag recovery rate in hydrometallurgical extraction process. <https://dspace.upt.ro/xmlui/handle/123456789/1668>. Visualizado 30/09/2023
- Hu, J., Huang, H., Xie, H., Gan, L., Liu, J., & Long, M. (2017). A scaled-up continuous process for biooxidation as pre-treatment of refractory pyrite-arsenopyrite gold-bearing concentrates. *Biochemical Engineering Journal*, 128, 228-234. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2017.10.001>
- Huang, Z. S., & Yang, T. Z. (2021). Comparative Study on Refractory Gold Concentrate Kinetics and Mechanisms by Pilot Scale Batch and Continuous Bio-Oxidation. *Minerals*, 11(12), 1343. <https://doi.org/10.3390/min11121343>
- Huerta-Rosas, B., Cano-Rodríguez, I., Gamiño-Arroyo, Z., Gómez-Castro, F. I., Carrillo-Pedroza, F. R., Romo-Rodríguez, P., & Gutiérrez-Corona, J. F. (2020). Aerobic processes for bioleaching manganese and silver using microorganisms indigenous to mine tailings. *World Journal of Microbiology and Biotech.*, 36, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02902-6>
- Jorjani, Esmail (2021). Likely scenarios in the microbial leaching of gold from refractory and non-refractory ores. *Minerals Engineering*, 170, 107048. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107048>
- Kaksonen, A. H., Boxall, N. J., Gumulya, Y., Khaleque, H. N., Morris, C., Bohu, T., ... & Lakaniemi, A. M. (2018). Recent progress in biohydrometallurgy and microbial characterisation. *Hydrometallurgy*, 180, 7-25. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.06.018>
- Karthikeyan, O. P., Rajasekar, A., & Balasubramanian, R. (2015). Bio-oxidation and biocyanidation of refractory mineral ores for gold extraction: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(15), 1611-1643. <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.966423>
- Larrabure, G., & Rodríguez-Reyes, J. C. F. (2021). A review on the negative impact of different elements during cyanidation of gold and silver from refractory ores and strategies to optimize the leaching process. *Minerals Engineering*, 173, 107194. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107194>
- Lin, Y., Hu, X., Zi, F., Chen, Y., Chen, S., Li, X., ... & Zhang, Y. (2022). Rapid gold cyanidation from a sulfur-high and arsenic-high micro-fine concentrate via facile two-stage roasting pre-treatment. *Minerals Engineering*, 190, 107938. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107938>
- Liu, J., Wu, W., Zhang, X., Zhu, M., & Tan, W. (2017). Adhesion properties of and factors influencing *Leptospirillum ferriphilum* in the biooxidation of refractory gold-bearing pyrite. *International Journal of Mineral Processing*, 160, 39-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2017.01.001>
- Lv, X., Zhao, H., Zhang, Y., Meng, X., Wang, J., and Qiu, G. (2020). Review on the Bio-oxidation of Pyrite: Implications for the Mining Industry. In *Minerals, Metals and Materials Series*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36296-6_121
- Ly Arrascue, M.E. & Van Niekerk, J. (2006). Biooxidation of arsenopyrite concentrate using BIOX® process: Industrial experience in Tamboraque, Peru. *Hydrometallurgy*, Volume 83, Issues 1-4, Pages 90-96, ISSN 0304-386X, <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.050>
- Mahajan S, Gupta A, Sharma R (2017) Bioleaching and biomining. In: Singh RL (ed) Principles and applications of environmental biotechnology for a sustainable future. Springer, Singapore, pp 393-423. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1866-4_13
- Maluckov, B. S. (2017). The catalytic role of *Acidithiobacillus ferrooxidans* for metals extraction from mining-metallurgical resource. *Biodiversity International Journal*, 1(3), 1-12. <https://doi.org/10.15406/bij.2017.01.00017>
- Marchevsky, N., Quiroga, M. B., Giaveno, A., & Donati, E. (2017). Microbial oxidation of refractory gold sulfide concentrate by a native consortium. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(5), 1143-1149. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60133-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60133-X)

- McNeice, J., Marzoughi, O., Kim, R., & Ghahreman, A. (2021). Gold extraction from refractory sulfide gold concentrates: a comparison of bio-oxidation and neutral atmospheric pre-treatment and economic implications. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7(3), 1354-1367. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00427-2>
- Muravyov, M. I., & Fomchenko, N. V. (2018). Biohydrometallurgical treatment of old flotation tailings of sulfide ores containing non-ferrous metals and gold. *Minerals Engineering*, 122, 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.007>
- Newman, P. (2022). Demanda mundial de plata alcanzará máximo histórico en el 2022. *World Silver Survey 2022*. The Silver Institute. Gestión. Tiempo Minero. Publicado 20 abril, 2022
- Nordstrom, D. K., & Southam, G. (1997). Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation. https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/20604/Nord_97.pdf?sequence=1
- Núñez Ramírez D. N., Medina-Torres, L., Calderas, F., Lara, R. H., Roldán, H. M., & Manero, O. (2018). Bioleaching process for silver recovery: Structural and rheological studies. *Minerals Engineering*, 121, 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.019>
- Ofori-Sarpong, G., Adam, A. S., Asamoah, R. K., & Amankwah, R. K. (2020). Characterisation of biooxidation feed and products for improved understanding of biooxidation and gold extraction performance. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 5(2), 20. <https://doi.org/10.11648/j.ijmpem.20200502.11>
- Palyanova, G. A. (2020). Gold and silver minerals in sulfide ore. *Geology of Ore Deposits*, 62, 383-406. <https://doi.org/10.1134/S1075701520050050>
- Purnomo, I., Chaerun, S. K., & Mubarak, M. Z. (2019, February). Biooxidation pretreatment of low grade refractory gold tailings using a sulfur-oxidizing mixotrophic bacterium. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 478, No. 1, p. 012020). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/478/1/012020>
- Qin, H., Guo, X., Tian, Q., & Zhang, L. (2020). Pyrite enhanced chlorination roasting and its efficacy in gold and silver recovery from gold tailing. *Separation and Purification Technology*, 250, 117168. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117168>
- Rodrigues, M. L., Giardini, R. M., Pereira, I. J., & Leão, V. A. (2021). Recovering gold from mine tailings: a selection of reactors for bio-oxidation at high pulp densities. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 96(1), 217-226. <https://doi.org/10.1002/jctb.6530>
- Ruiz, L. M., Valenzuela, S., Castro, M., Gonzalez, A., Frezza, M., Soulére, L., ... & Guiliani, N. (2008). AHL communication is a widespread phenomenon in biomining bacteria and seems to be involved in mineral-adhesion efficiency. *Hydrometallurgy*, 94(1-4), 133-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.028>
- Saavedra, A., García-Meza, J. V., Corton, E., & González, I. (2021). Attachment of *Leptospirillum* sp. to chemically modified pyrite surfaces. Fast and simple electrochemical monitoring of bacterial-mineral interactions. *Hydrometallurgy*, 199, 105534. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105534>
- Sanchez-Yañez, Juan. (2006). Lixiviación bacteriana de un mineral sulfurado refractario argentífero. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. <https://www.researchgate.net/publication/339599777>
- Sand, W., Gehrke, T., Jozsa, P. G., & Schippers, A. (2001). (Bio) chemistry of bacterial leaching—direct vs. indirect bioleaching. *Hydrometallurgy*, 59(2-3), 159-175. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00180-8)
- Sasaki, K., & Konadu, K. T. (2021). Biotechnological Approaches to Facilitate Gold Recovery from Double Refractory Gold Ores. *Heavy Metals-Their Environmental Impacts and Mitigation*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94334>
- Singh, R. L. (Ed.). (2017). *Introduction to Environmental Biotechnology*. Book. Principles and applications of environmental biotechnology for a sustainable future. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1866-4>
- Smart, M., Huddy, R. J., Edward, C. J., Fourie, C., Shumba, T., Iron, J., & Harrison, S. T. (2017). Linking microbial community dynamics in BIOX® leaching tanks to process conditions: Integrating lab and commercial experience. *Solid State Phenomena*, 262, 38-42. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.262.38
- Srichandan H, Mohapatra RK, Parhi PK, Mishra S (2019) Bioleaching approach for extraction of metal values from secondary solid wastes: a critical review. *Hydrometallurgy* 189:105122. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105122>
- Suasnar Montoya, D. J. (1992). Diagnóstico y mejoramiento de la lixiviación clorurante de los minerales piriticos de Cerro de Pasco. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3264487>
- Tanaka, M., Yamaji, Y., Fukano, Y., Shimada, K., Ishibashi, J. I., Hirajima, T., ... & Okibe, N. (2015). Biooxidation of gold-, silver, and antimony-bearing highly refractory polymetallic sulfide concentrates, and its comparison with abiotic pretreatment techniques. *Geomicrobiology Journal*, 32(6), 538-548. <http://dx.doi.org/10.1080/01490451.2014.981645>
- Torma, A.E., and Oolman, T. (1992). Bioliberation of gold. *International Materials Reviews*. <https://doi.org/10.1179/imr.1992.37.1.187>
- Van Niekerk, J. (2015). Factors affecting the selection of BIOX® as the preferred technology for the treatment of a refractory gold concentrate. *Advanced Materials Research*, 1130, 191-196. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1130.191>
- Wang, G., Xie, S., Liu, X., Wu, Y., Liu, Y., & Zeng, T. (2018). Bio-oxidation of a high-sulfur and high-arsenic refractory gold concentrate using a two-stage process. *Minerals Engineering*, 120, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.013>
- Yin, L., Yang, H. Y., Lu, L. S., Sand, W., Tong, L. L., Chen, G. B., & Zhao, M. M. (2020). Interfacial alteration of pyrite caused by bioleaching. *Hydrometallurgy*, 195, 105356. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105356>
- Yoğurtcuoğlu Emine, and İbrahim Alp, (2023). The Effect of Roasting on the Mineralogical Structure and Cyanidation Performance of Gossan Type Oxidized Refractory Gold-

Silver Ores. Mining, Metallurgy & Exploration, 1-13.
<https://doi.org/10.1007/s42461-023-00832-z>

Zhang, Y., Li, Q., Sun, S., Liu, X., Jiang, T., Lyu, X., & He, Y. (2021a). Electrochemical behaviour of the oxidative dissolution of arsenopyrite catalysed by Ag⁺ in 9K culture medium. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 614, 126169. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126169>

Zhang, Y., Yang, K., Fang, Y., Cabrera, A. R., Peng, C., & López-Valdivieso, A. (2021). Roasting temperature effect on the recovery of refractory gold and silver in pyrite concentrates. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 57(2), 235-243. <https://doi.org/10.2298/JMMB200911019Z>

Zhao, H. F., Yang, H. Y., Tong, L. L., Zhang, Q., & Kong, Y. (2020). Biooxidation-thiosulfate leaching of refractory gold concentrate. *International Journal of minerals, metallurgy and materials*, 27, 1075-1082. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-1964-9>

Contribución de autoría

Conceptualización: (V.A., A. A. A.; P. A., A. M.; M. A., S.H.); Curación de datos: (V.A., A. A. A.; M. A., S.H.; I., M. P.); Análisis formal: (V.A., A. A. A.; P. A., A. M.); Adquisición de fondos: (V.A., A. A. A.; P. A., A. M.); Investigación: (V.A., A. A. A.; P. A., A. M.; M. A., S.H.; C. A., M. D.; I., M. P.); Metodología: (V.A., A. A. A.; I., M. P.); Gestión de proyectos: (V.A., A. A. A.; P. A., A. M.); Recursos: (V.A., A. A. A.; P. A., A. M.; M. A., S.H.); Programas informáticos: (C. A., M. D.; I., M. P.); Supervisión: (V. A., A. A. A.; P. A., A. M.; C. A., M. D.; I., M. P.); Validación: (V.A., A. A. A.; P. A., A. M.; M. A., S.H.); Visualización: (V.A., A. A. A.; P. A., A. M.; M. A., S.H.; C. A., M. D.; I., M. P.); Redacción - borrador original: (C. A., M. D.; I., M. P.); Redacción - corrección de pruebas y edición: (V. A., A. A.; P. A., A. M.; M. A., S. H.)

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.