



Epistemus (Sonora)

ISSN: 2007-8196

Universidad de Sonora, División de Ingeniería

Rodriguez-Rodriguez, Carolina; Salas-Puente, Gabriela; Baltazar-Vera, Juan Carlos; Valtierra-Olivares, Joel Everardo; Alonso-Gonzalez, Omero  
Consumo de cianuro de concentrado de pirita aurífera, empleando ozono como pretratamiento  
Epistemus (Sonora), vol. 15, núm. 31, 2021, Julio-Diciembre, pp. 38-43  
Universidad de Sonora, División de Ingeniería

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i31.194>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=726276430005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc  
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso  
abierto

# CONSUMO DE CIANURO DE CONCENTRADO DE PIRITA AURIFERA, EMPLEANDO OZONO COMO PRETRATAMIENTO

*Flotation behavior and interaction mechanisms between  
anglesite and hydroxamates*

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Carolina Rodríguez-Rodríguez <sup>1\*</sup>

Gabriela Salas-Puente <sup>2</sup>

Juan Carlos Baltazar-Vera <sup>3</sup>

Joel Everardo Valtierra-Olivares <sup>4</sup>

Omero Alonso-Gonzalez <sup>5</sup>

Recibido: 21 / 10 / 2021

Aceptado: 25 / 03 / 2022

Publicado: 01 / 04 / 2022

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i31.194>

Autor de Correspondencia:

Carolina Rodríguez-Rodríguez

Correo: [carolina.rodriguez@ugto.mx](mailto:carolina.rodriguez@ugto.mx)

## Resumen

La pirita (FeS<sub>2</sub>) es el segundo mineral huésped más común de las especies de oro. Esta asociación presenta una complejidad diversa, ya que el oro puede encontrarse finamente diseminado o incluido a tamaño muy fino (0.1 a 1.0 µm), por lo que requieren condiciones de trituration extremas y/u oxidación para liberar el oro. En este trabajo se evaluó el consumo de cianuro cuando un concentrado de pirita aurífero es sometido a un pretratamiento con ozono antes de la cianuración. Se realizaron pruebas de cianuración a 1000 y 3000 ppm de CN<sup>-</sup> para un concentrado de pirita con una ley de 67.44% de FeS<sub>2</sub>, observándose una reducción en el consumo de cianuro del 54% y 69% para dichas concentraciones de cianuro, cuando el mineral se somete a un pre-tratamiento con ozono. Estos resultados sugieren que el uso del ozono, además de incrementar la recuperación de plata, genera un impacto ambiental significativo.

**Palabras clave:** pirita aurífera, minerales refractarios, cianuración, ozono.

## Abstract

Pyrite (FeS<sub>2</sub>), is the second most common host mineral for gold species. This association presents a great complexity, due to the gold can be finely disseminated or included at very fine size (0.1 to 1.0 µm), which requires extreme crushing conditions and strong oxidation in order to, liberate the gold, in a subsequent cyanidation step. In this work, cyanide consumption was evaluated, when a gold-bearing pyrite concentrate is submitted to a pretreatment with ozone prior to the conventional cyanidation. Tests were carried out at two different cyanide concentrations (1000 and 3000 ppm of CN<sup>-</sup>), for a gold pyrite concentrate (67.44% of FeS<sub>2</sub>), where a significant decrease in cyanide consumption of 54% and 69% was found, when the mineral is submitted to an ozone treatment before cyanidation. These findings suggest that the use of ozone increases silver recovery and generates significant environmental impact.

**Keywords:** Gold-bearing pyrite, refractory ores, cyanidation, ozone.

<sup>1</sup> Doctora en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica, Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Guanajuato, México, [carolina.rodriguez@ugto.mx](mailto:carolina.rodriguez@ugto.mx)

<sup>2</sup> Ingeniera Metalúrgica, Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Guanajuato, México, [g.salaspuente@ugto.mx](mailto:g.salaspuente@ugto.mx)

<sup>3</sup> Doctor en Ingeniería Química, Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Guanajuato, México, [jc.baltazarvera@ugto.mx](mailto:jc.baltazarvera@ugto.mx)

<sup>4</sup> Doctor en Ingeniería Industrial, Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Guanajuato, México, [valtierra.je@ugto.mx](mailto:valtierra.je@ugto.mx)

<sup>5</sup> Doctor en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica, Unidad Académica de Ingeniería I, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, Zacatecas, México, [omero.alonso@uaz.edu.mx](mailto:omero.alonso@uaz.edu.mx)

## INTRODUCCIÓN

México es un país mundialmente reconocido por la producción de metales preciosos como son el oro y la plata, por lo que se encuentra posicionado como el mayor productor de plata a nivel mundial y en cuanto a la producción de oro se encuentra escalonado en noveno lugar a nivel mundial [1].

El proceso de cianuración es ampliamente utilizado por la industria minera para la recuperación en solución de dichos metales preciosos, ya que este proceso resulta ser eficaz y de bajo costo, cuando las partículas de los metales están completamente libres o expuestas en asociaciones simples.

La pirita ha recibido una gran atención recientemente debido a que es el segundo mineral huésped más común de las especies de oro [2]. Esta asociación puede mostrar muy diversa complejidad, es decir, el oro puede encontrarse finamente diseminado sobre las piritas, pero expuesto, en otras puede encontrarse incluido a tamaño muy fino (0.10 a 1.0  $\mu\text{m}$ ) dentro de granos de pirita de entre 5 a 15 micras, o bien dentro de la red cristalina de la pirita (oro invisible). Sin embargo, tales asociaciones hacen que el metal no responda a la solución de cianuro [3] y se clasifique como refractario (recuperaciones por debajo al 80%), en este caso se debe de emplear tratamientos de oxidación o condiciones de trituración extremas complementarios a la cianuración, para poder romper la estructura del mineral y hacerlo más accesible a la cianuración [4]. Así que, es necesario implementar nuevas alternativas que ayuden a eficientar los procesos de concentración y/o extracción, para lograr altos porcentajes en la recuperación de los metales de interés.

Algunas de estas alternativas, consisten en aplicar pre-tratamientos de tostación, oxidación a presión, biolixiviación y molienda ultrafina, este último es el más empleado de manera industrial actualmente. Cada uno de estos pre-

tratamientos busca la manera de optimizar la extracción del oro en la etapa siguiente de cianuración. Cabe mencionar que, la generación de  $\text{SO}_2$ , los altos costos de operación y los tiempos largos de operación, hacen que estos métodos sean poco convenientes para su empleo. Actualmente, las investigaciones relacionadas con el tratamiento de pirita se enfocan principalmente a tratamientos de tostación [5], biolixiviación [6], remolienda [7], oxidación con ácido nítrico [8].

El uso del ozono en la metalurgia extractiva ha tomado un papel importante en los últimos años como agente oxidante en la lixiviación de metales y minerales, esto debido a su alto poder oxidante ( $E^\circ = 2.07 \text{ V}$ ) y el impacto mínimo al medio ambiente. Debido a su alto poder oxidante, puede oxidar a los minerales refractarios de tal manera que incrementa el potencial de oxidación del medio acuoso y disuelve a los minerales sulfurosos asociados con el oro y la plata [9]. Por estas razones, el uso del ozono se presenta como una alternativa interesante para el pretratamiento de minerales refractarios.

La presente investigación consiste en presentar el comportamiento del consumo de cianuro de un

concentrado de pirita aurífera proveniente de la etapa de flotación de una concentradora localizada en el estado de Zacatecas, cuando se propone aplicar un pretratamiento con ozono previo al proceso de cianuración convencional. De igual manera, se presenta el comportamiento en la disolución de la plata de dicho concentrado. Al aplicar un pre-tratamiento con ozono se busca liberar al oro y la plata disolviendo las especies minerales huésped de los minerales de valor, para lograr exponer las partículas de oro y plata a la solución lixivante de cianuro, y así alcanzar altos porcentajes de recuperación de dichos metales. Asimismo, se busca contribuir de manera positiva al cuidado del medio ambiente, al impactarlo de manera mínima, así como no elevar los costos de producción.





## MATERIALES Y METODOLOGÍAS

### Materiales

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se obtuvo una muestra de concentrado de pirita (5.6 kg) de una planta de concentración ubicada en el estado de Zacatecas. La preparación del mineral se realizó de la siguiente manera: la muestra se desgrumó y homogenizó, para enseguida obtener una muestra de 2 kg mediante el cuarteo.

Al concentrado de pirita se le determinó el tamaño de partícula mediante un análisis granulométrico en húmedo, en el cual, primero se deslamo por la malla 500 para retirar las partículas finas; la fracción gruesa se tamizó en seco utilizando las mallas 100, 200, 270, 325, 400 y 500. La Figura 1, muestra que el d80 del concentrado de estudio es de 45.70  $\mu\text{m}$ .

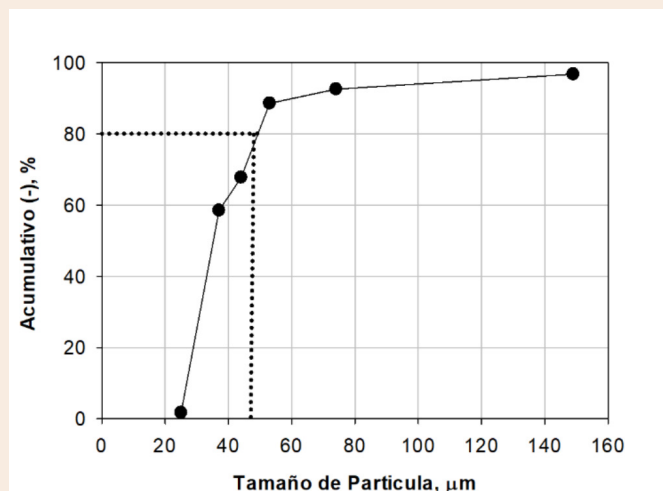


Figura 1. Distribución de tamaño de partícula del concentrado de pirita empleado.

La Tabla 1, muestra el análisis químico para el concentrado de pirita. La ley de oro y plata se determinó mediante análisis de vía seca, mientras que el análisis de hierro, cobre zinc y plomo se realizó mediante espectroscopia de absorción atómica, Perkin-Elmer Analyst-200.

Tabla 1. Análisis químico para el concentrado de pirita.

Elemento o Compuesto	g/ton	%
Au	5.99	
Ag	733.53	
FeS <sub>2</sub>		67.44
Pb		1.62
Zn		6.07
Cu		6.37

Se realizó una caracterización mineralógica del concentrado aurífero con el objetivo principal de observar las especies minerales presentes en dicho concentrado. El estudio de la caracterización mineralogía se realizó mediante un microscopio metalográfico Nikon Eclipse MA200. La Figura 2 presenta fotomicrografías del concentrado de estudio, en donde se observa que cualitativamente, la especie presente en mayor proporción en el concentrado resulto ser la pirita, con contenidos menores de calcopirita y de esfalerita, así como una pequeña cantidad de silicatos.

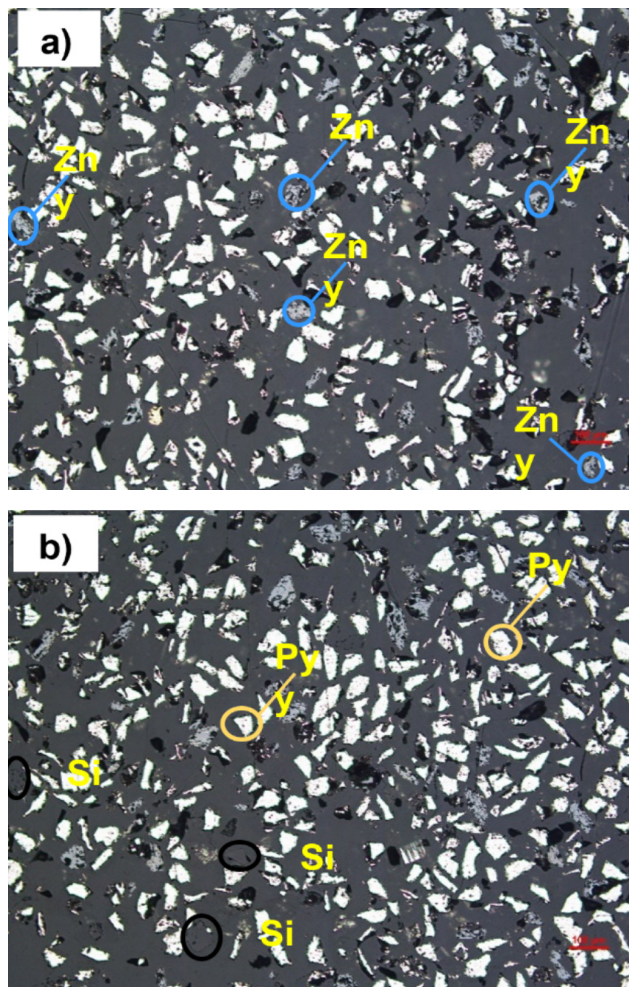


Figura 2. Fotomicrografía de las partículas del concentrado de estudio para la fracción +325 $\mu\text{m}$ : (a) Granos de esfalerita y (b) Granos de silicatos y partículas de pirita. Escala: 100  $\mu\text{m}$ .

### METODOLOGÍAS

Para este trabajo de investigación, se implementaron 3 metodologías: a) una cianuración convencional, b) un pre-tratamiento con ozono y c) pretratamiento con ozono seguido de cianuración. A continuación, se describe de manera general el objetivo de cada una de las metodologías.

## Cianuración convencional

Se realizaron 2 cianuraciones al concentrado de pirita a diferentes concentraciones de cianuro: 1000 y 3000 ppm de  $\text{CN}^-$ . Las condiciones experimentales que se utilizaron fueron: una dilución de pulpa 1:1, es decir 50% CW (100 g de concentrado mineral y 100 mL de la solución de cianuro),  $25^\circ\text{C}$  ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ), pH de la pulpa fue 14 (regulado por NaOH) y un tiempo de cianuración de 48 horas. Las pruebas se efectuaron en botellas y permanecieron en agitación durante todo el tiempo de cianuración. Todas las pruebas se realizaron por duplicado.

Los experimentos se realizaron de la siguiente manera: se pone en contacto el concentrado de pirita y la solución de cianuro a una determinada concentración en una botella ámbar de 1 L de capacidad. La agitación se llevó a cabo en una mesa rodillos, con una velocidad de agitación 110 rpm (ver Figura 3). Se tomaron alícuotas de 20 mL de pulpa a 2, 4, 6, 10, 24 y 48 horas, y 5 mL se destinaron para medir el consumo de cianuro mediante titulación con nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) con una concentración de 0.025 M y los otros 15 mL se utilizaron para medir Ag y Fe. En cada muestreo se repone el cianuro consumido y el volumen de pulpa extraído.

A las 48 horas, se procedió a filtrar la pulpa para recuperar los sólidos que no reaccionaron y se analizaron por oro y plata; también se analizó la solución rica por oro y plata. Adicionalmente, cada vez se lavaron los sólidos filtrados para retirar los contenidos de oro y plata remanentes.



Figura 3. Sistema empleado para realizar proceso de cianuración.

## Pre-tratamiento con ozono

Se utilizó un ozonificador, el cual generó una corriente gaseosa de 1 L/min con una concentración de 0.02 g  $\text{O}_3/\text{L}$ . Se da inicio a la generación de ozono y una vez que se estabiliza la producción de ozono se vierten 400 mL de solución de ácido nítrico al 10% vol., junto con 115 g del concentrado de pirita al reactor de vidrio, se inicia el cronometraje del tiempo y la agitación mecánica a 1100 rpm. El tiempo de tratamiento con ozono fue de 6 horas a una temperatura de  $25^\circ\text{C}$  ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ). Al final del tratamiento se recuperan los sólidos, se enjuagan, se filtran y se secan. El equipo experimental empleado se muestra en la Figura 4.

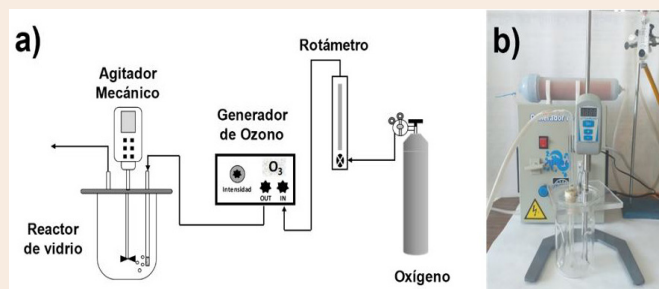


Figura 4. a) Esquema y b) fotografía del equipo experimental utilizado en la ozonización del concentrado de pirita.

## Cianuración con Pre-Tratamiento con Ozono

Una vez que se aplicó el pretratamiento con ozono al concentrado de pirita, se procedió a preparar soluciones de cianuro a 1000 y 3000 ppm de  $\text{CN}^-$ . El procedimiento seguido para estas cianuraciones fue idéntico al mencionado-describió en el apartado de la cianuración convencional.

## RESULTADOS

### Cianuración convencional

La cianuración en botellas se realiza con el fin de obtener información sobre el consumo de reactivos, como lo es el cianuro, de igual manera, ayuda a predecir el porcentaje de recuperación de metales preciosos tales como el oro y la plata de acuerdo a determinados tiempos de lixiviación.

Para este trabajo solo se presenta la recuperación de plata. La Figura 5 presenta el porcentaje de recuperación de plata mediante el proceso de cianuración convencional, para las concentraciones de cianuro de 1000 y 3000 ppm de  $\text{CN}^-$ , en donde se observa que el porcentaje de recuperación resultó ser aproximadamente de 22% y 54%, respectivamente. A concentraciones altas de cianuro (3000 ppm de  $\text{CN}^-$ ) se tienen porcentajes de recuperación más altos.

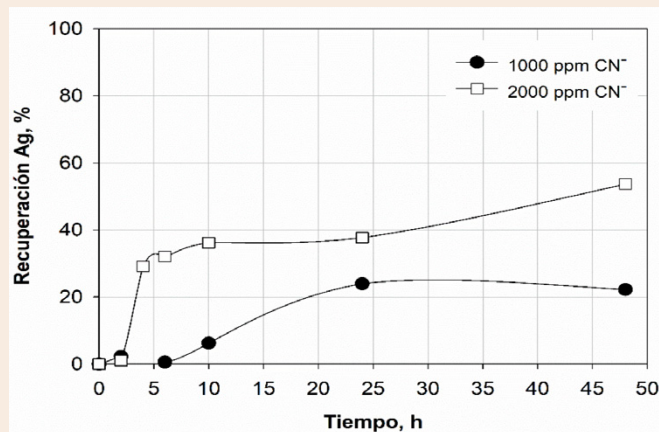


Figura 5. Cinética de lixiviación de plata contenido en el concentrado de pirita aurífero empleando una cianuración convencional.



## Cianuración con Pre-Tratamiento con Ozono

El ozono busca disolver parcialmente la matriz de pirita para que posteriormente, las partículas de oro se encuentren expuestas en la solución de cianuro y exista mayor recuperación de metales preciosos como el oro y la plata en solución. Es conveniente mencionar que, en las pruebas que se presentan a continuación se realizó el pretratamiento con ozono antes de la cianuración.

En la Figura 6 se muestra la cinética de lixiviación de plata para el concentrado de pirita aurífera utilizando un pretratamiento de ozono antes de la cianuración, en donde se aprecia que, durante el periodo de las primeras 10 horas de cianuración se obtiene la mayor recuperación de plata para las concentraciones aplicadas de 1000 y 3000 ppm de  $\text{CN}^-$ , resultando estas de aproximadamente 37% y 93%, respectivamente. Sin embargo, a partir de las 10 horas del proceso de cianuración, se observa que, para las mismas concentraciones de cianuro, el porcentaje de recuperación de plata disminuye hasta 35% y 67% respectivamente.

La alta recuperación de plata en las primeras 10 horas se debe principalmente a que el ozono logra disolver una cantidad considerable de partículas minerales, lo que lleva a que los metales de interés tales como la plata queden expuestos a la solución de cianuro. No obstante, al finalizar la cianuración, los niveles de recuperación para las tres concentraciones empleadas de cianuro, disminuye notablemente, ya que se sugiere una precipitación de los valores de plata, debido a que como se tiene una concentración de oxígeno limitada y una alcalinidad alta, es posible dar lugar a una concentración mínima de ion sulfuro ( $\text{S}^{2-}$ ), la cual sería suficiente para precipitar la plata.

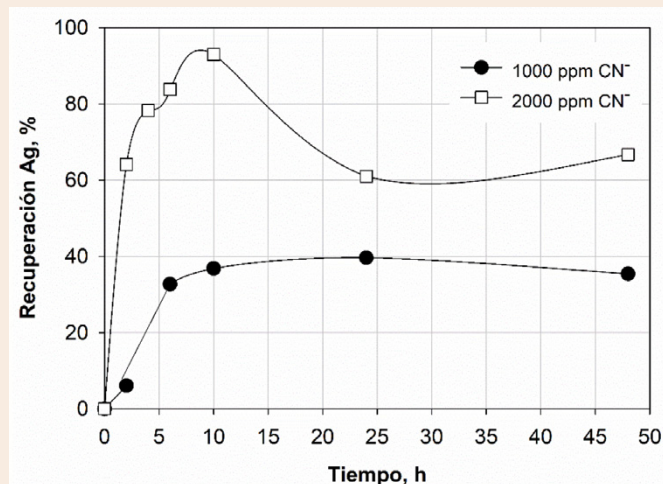


Figura 6. Cinética de lixiviación de plata utilizando un pretratamiento con ozono antes de la cianuración para un concentrado de pirita aurífera.

## Consumo de Cianuro

La Figura 7 muestra la comparación del consumo de cianuro para las dos concentraciones de cianuro estudiadas para a) la cianuración convencional y b) utilizando el

pretratamiento con ozono antes de la cianuración. Se observa en la Figura 7a, que el consumo de cianuro fue de 367 ppm y 518 ppm de  $\text{CN}^-$  para las concentraciones de cianuro a un tiempo de 48 horas de cianuración. En la Figura 7b, se observa que el consumo resultó ser aproximadamente de 200 ppm y 359 ppm de  $\text{CN}^-$  respectivamente.

Estos resultados inferen que, el consumo de cianuro para la lixiviación del concentrado de pirita aurífero disminuyó al emplear un pretratamiento con ozono, esto en comparación con la cianuración convencional, en donde para las concentraciones de 1000 y 3000 ppm de  $\text{CN}^-$  se tuvo una disminución en el consumo de cianuro de alrededor del 54.5% y 69.3%.

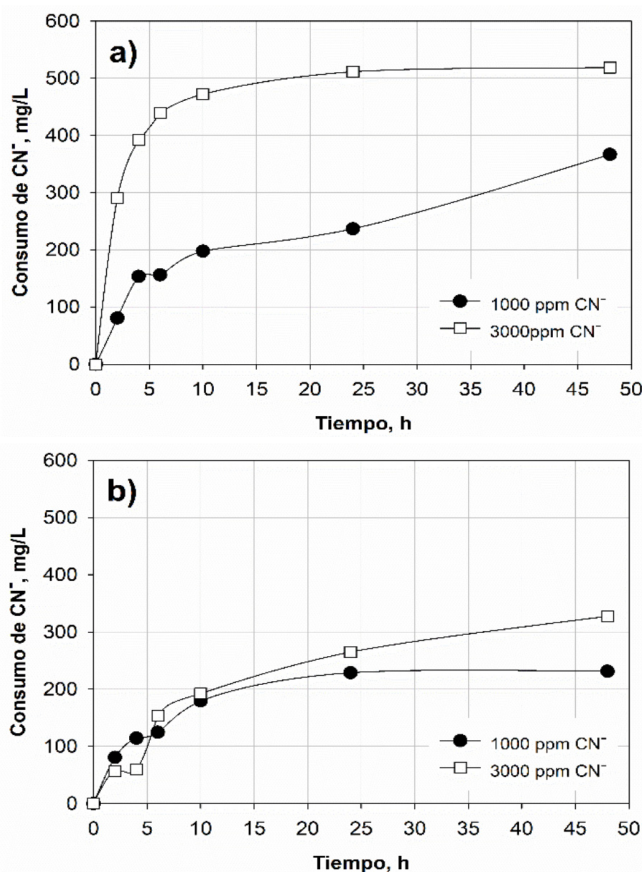


Figura 7. Consumo de cianuro para el concentrado de pirita para 1000 y 3000 ppm  $\text{CN}^-$ , para el a) proceso de cianuración convencional y b) utilizando

## CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este trabajo han sido principalmente enfocados en el comportamiento de la disolución de plata contenida en un concentrado pirítico de oro-plata, cuya concentración de esta última es de 734 g Ag/ton, dicho concentrado proviene de un proceso de flotación de una operación industrial mexicana en el estado de Zacatecas.

Se observó que un pretratamiento con ozono en me-



dio ácido aplicado al concentrado de pirita, genera una extracción mayor de plata cuando este es sometido a una cianuración a una concentración alta de cianuro (3000 ppm de CN<sup>-</sup>), incrementado su recuperación de 54% a 93% pero en un tiempo de cianuración de 10 horas. Sin embargo, la disminución de la plata que se da después de las 10 horas de cianuración se pudiera atribuir a una reprecipitación de la plata, debido a que se estuvo incrementando la alcalinidad para contrarrestar el carácter ácido que genera el concentrado de pirita, el cual pudiera dar lugar a una concentración pequeña de ion sulfuro (S<sup>2-</sup>) pero suficiente para precipitar la plata [10].

En cuanto al consumo de cianuro, se observó una disminución de un 69.3% para la recuperación más alta de plata empleando un pre-tratamiento con ozono antes de la cianuración, esto se debe a que, en la etapa de ozonización, se disuelve una cantidad considerable de pirita, la cual reaccionaría en la etapa de cianuración.

En este sentido, se puede concluir, que el uso del ozono puede ser una alternativa interesante para la recuperación de metales preciosos contenidos en concentrados de pirita industriales al emplearlo como pre-tratamiento antes de una cianuración convencional, presentando disminuciones considerables de consumos de cianuro, lo cual generaría un impacto ambiental positivo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT por el financiamiento parcial para esta investigación de acuerdo con el proyecto 35079.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] SGM, Anuario Estadístico de la Minería Mexicana Ampliado 2019, Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2020.
- [2] Bustos R., H., Oyola L., D., Rojas M., A., Pérez A., G. A., Balogh, A. G. (2011). Cuantificación de oro refractario en granos de pirita y arsenopirita de la mina de oro "El Diamante" en Nariño - Colombia. *Revista Tumbaga*, 6, 153-164.
- [3] Habashi, F. (2006). Pyrite: The Strategic Mineral That became an industrial Nuisance. *De re Metallica*, 6 (7), 43-58.
- [4] Arias-Arce V., Coronado-Falcon, R., Puentes-Santibáñez, L., Lovera-Dávila, D. (2005). Refractoriedad de concentrados

auríferos. *Revista del Instituto de Investigación*, 8(16), 5-14. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v8i16.493>

- [5] Coronado, J. H., Encinas, M. A., Leyva, J. C., Valenzuela, J. L., Valenzuela, A., Minive, G. T. (2012). Tostación de un concentrado de refractario de oro y plata. *Revista de Metalurgia*, 48(3), 165-174. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1102>
- [6] Iglesias, N., Carranza, F., Palencia, P., (1997). La biolixiviación como pretratamiento de menas auríferas refractarias en matriz de sulfuros. *Revista de Metalurgia*, 34 (1), 29-38. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.i1.656>
- [7] Gavino, J. P. (2018). Tratamiento por flotación y cianuración de minerales auríferos con presencia de pirita para la concentración y extracción de oro y plata a nivel experimental (tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, Huacho, Perú.
- [8] Flatt, J.R, Wood, R. (1995). A voltametric investigation of the oxidation of pyrite in nitric acid solutions: relation to treatment of refractory gold ores. *Journal of applied electrochemistry*, 25, 882-856. <https://doi.org/10.1007/BF00233904>
- [9] Morera, J. (2004). Lixiviación de metales con ozono acuoso. Cinética de la plata y el oro: aplicaciones (tesis de pregrado). Universidad de Barcelona, España.
- [10] Uribe, A. S. (2002). Precipitación química de metales de sus soluciones. U. S. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. Guanajuato, Guanajuato: 1-15.

## Cómo citar este artículo:

Rodriguez-Rodriguez, C. de J., Salas-Puente, G., Baltazar-Vera, J. C., Valtierra-Olivares, J. E., & Alonso-Gonzalez, O. (2022). CONSUMO DE CIANURO DE CONCENTRADO DE PIRITA AURIFERA, EMPLEANDO OZONO COMO PRETRATAMIENTO. *EPISTEMUS*, 15(31). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i31.194>

