

Lixiviación de plata a partir de jarosita con agentes alternativos al cianuro

B. R. González-Bonilla^{1,2*}, G. I. Dávila-Pulido¹, A. A. González-Ibarra¹, M. E. Flores-Favela³

¹Escuela Superior de Ingeniería, Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Norte, Nueva Rosita, Coahuila, 26830, México.

²CINVESTAV Unidad Saltillo, Av. Industria Metalúrgica #1062, parque industrial Saltillo-Ramos Arizpe 25900, Coahuila, México.

³Peñoles Tecnología S.A. de C.V., Torreón, Coahuila, 27300, México.

[*blancagonzalez@uadec.edu.mx](mailto:blancagonzalez@uadec.edu.mx)

RESUMEN

Las jarositas son residuos sólidos generados durante la etapa de purificación en el proceso hidrometalúrgico para la obtención de zinc. Su reutilización es de gran interés porque promueve el manejo adecuado de los desechos industriales y el desarrollo sustentable. Estos residuos pueden contener elementos contaminantes como S, As, Cd, Pb, entre otros, además de metales de interés económico como Cu, Zn y Ag. En este estudio, se evaluó la extracción de plata a partir de jarositas mediante lixiviación, empleando dos agentes comerciales alternativos al cianuro (denominados “A” y “B”). Estos agentes lixiviantes son de interés para la industria debido a los inconvenientes que el uso del cianuro tiene en la actualidad. Los experimentos se llevaron a cabo por lotes, variando la temperatura a 25, 35 y 45 °C y la concentración del agente lixivante a 1, 5 y 10 g/L. Se determinó que las mejores condiciones para la extracción de plata son: concentración de 10 g/L del agente lixivante y una temperatura de 45 °C; la extracción final de plata a estas condiciones fue de 55.9 y 58.7 %, para el reactivo “A” y “B”, respectivamente.

PALABRAS CLAVE: jarosita, plata, lixiviación, cinética

ANTECEDENTES

En la industria hidrometalúrgica de zinc, el proceso de la precipitación de jarosita ha sido el método predominante para la eliminación del hierro y otras impurezas de las soluciones de lixiviación. Štrbac et al. (2011) estiman que se genera alrededor de media tonelada de jarosita por cada tonelada de zinc producida. Este hecho destaca que la cantidad de residuos jarosíticos generados es significativamente más alta en comparación con la de los procesos alternativos (i.e., goetita, hematita y paragoethita). Además, la confinación de las jarositas puede ser un problema a largo plazo porque se pueden descomponer, lo que puede provocar la liberación de iones sulfato y metales traza al medio ambiente. Esto resalta la necesidad de manejar y utilizar instalaciones especiales para minimizar los impactos negativos al medio ambiente (Sarmiento et al., 2012; Aguilar-Carrillo et al., 2018).

La investigación sobre los compuestos tipo jarosita ha generado un gran interés con estudios orientados a desarrollar estrategias para reutilizar y revalorizar estos compuestos de manera sostenible (Bayliss et al., 2010). Algunas investigaciones se han enfocado en la utilización de precipitados de jarosita como materia prima en la industria de la construcción. Estos estudios han demostrado la versatilidad de este tipo de compuestos como recurso en múltiples sectores para la producción de pigmentos y materiales como ladrillos, cemento, tejas y terraplén (Sharma, 2016). Las jarositas han sido objeto de diversos estudios relacionados con la extracción de los elementos que contienen, ya que estas pueden contener entre 150 y 300 g/t de Ag, por lo que la recuperación de este metal representa una alternativa sumamente atractiva (Palden et al., 2019; Antrekowitsch & Hanke, 2020b).

Se ha investigado la extracción de plata a partir de jarositas mediante cianuración convencional, complementándola con un pretratamiento de descomposición en medio alcalino a temperaturas de 60 °C. Sin embargo, resulta importante estudiar la extracción de los metales preciosos utilizando agentes lixiviantes alternativos al cianuro, dado que éste compuesto se encuentra estrictamente regulado. Además, la cianuración presenta una baja eficiencia de extracción en especies refractarias como las jarositas (Kasaini et al., 2008; González-Ibarra et al. 2016; Picazo-Rodríguez et al., 2021). Asimismo, se requieren operaciones unitarias adicionales (e. g., destrucción de cianuro) debido a su toxicidad (Marsden and House, 2006), lo que genera un incremento en los costos del proceso.

Algunas investigaciones en torno a la extracción de plata mediante otros agentes lixiviantes involucra el empleo de tiourea (NH_2CSNH_2), tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) y tiocianato (SCN^-). Choque & Lapidus (2020) estudiaron la extracción de plata de residuos jarosíticos utilizando como agente lixiviante la tiourea, en donde la extracción de plata alcanzó el 76 % a pH 1. Sin embargo, a este pH, la descomposición de la jarosita liberó iones cúpricos (Cu^{2+}) en la solución, elevando el potencial redox y provocando la oxidación de la tiourea, lo que resultó en un alto consumo de reactivo. Wejman-Gibas et al. (2015) evaluaron un sistema de lixiviación empleando tiosulfato, obteniendo una extracción de plata del 60 % a 25 °C. Recientemente, se ha estudiado el uso del tiocianato en sistemas alcalinos a partir de jarosita sintética,

reportándose una extracción de plata de hasta 35.4 %, donde la temperatura y el pH (> 10) no tiene un efecto significativo en la extracción (Islas et al., 2021).

En el presente estudio se evaluó la extracción de plata a partir de jarositas industriales utilizando agentes comerciales alternativos al cianuro en el proceso de lixiviación en medio alcalino. Para ello, se analizaron distintas temperaturas y concentraciones del agente lixivante para determinar su efecto sobre la cinética de extracción de plata y establecer las mejores condiciones.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Materiales y equipos

Como materia prima se utilizó una muestra de jarosita procedente de una planta hidrometalúrgica para la obtención de zinc situada en el norte de México. La muestra se sometió a caracterización física y química. Las especies mineralógicas se identificaron por difracción de rayos X (Phillips X-PERT) y el análisis elemental se obtuvo mediante espectroscopía de absorción atómica (Perkin Elmer AAnalyst 200).

Pruebas de lixiviación

Las pruebas de lixiviación se llevaron a cabo en un reactor de vidrio con una capacidad de 1 litro. Todos los experimentos se realizaron empleando 32 % de sólidos y la pulpa se mezcló con la ayuda de un agitador mecánico a una velocidad constante de 400 rpm. El pH de la solución se ajustó a un valor de 11 al inicio de la experimentación, empleando hidróxido de sodio (NaOH) 2 M. La temperatura se ajustó a 25, 35 y 45 °C mediante una parrilla eléctrica y las concentraciones del agente lixivante utilizadas fueron de 1, 5 y 10 g/L. Las pruebas tuvieron una duración de 8 horas y se tomaron muestras de la solución en tiempos predeterminados (i.e., 0.5, 1, 2, 3, 5 y 8 h). Estas muestras se analizaron mediante espectroscopia absorción atómica (EAA) para determinar la extracción de plata.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la jarosita

La composición química de la muestra de estudio se detalla en la Tabla 1. La plata es el principal elemento valioso en la jarosita industrial, con un contenido de 121.7 g/t. Además, se determinó un contenido promedio de Fe, Zn, Pb y Cu de 11.1, 2.3, 0.5 y 0.1 %, respectivamente.

Tabla 1. Análisis químico elemental de la jarosita.

Elemento	Ag (g/t)	Fe (%)	Zn (%)	Pb (%)	Cu (%)
Contenido	121.7	11.1	2.3	0.5	0.1

En la Figura 1 se presenta el DRX de la muestra de estudio, donde se identificaron como principales especies: jarosita de potasio (1), yeso (2), calcita (3), azufre (4) y anglesita (5). Este análisis sugiere que la composición mineralógica está influenciada principalmente por las especies secundarias formadas durante el proceso industrial. La formación de jarosita de potasio (i.e., $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) es producto de la etapa de purificación, en donde se precipita el ion férrico (Fe^{3+}) a partir de una solución de lixiviación ácida (pH 0.5 – 2.0) a altas temperaturas (95 – 97 °C) y con la adición de un álcali.

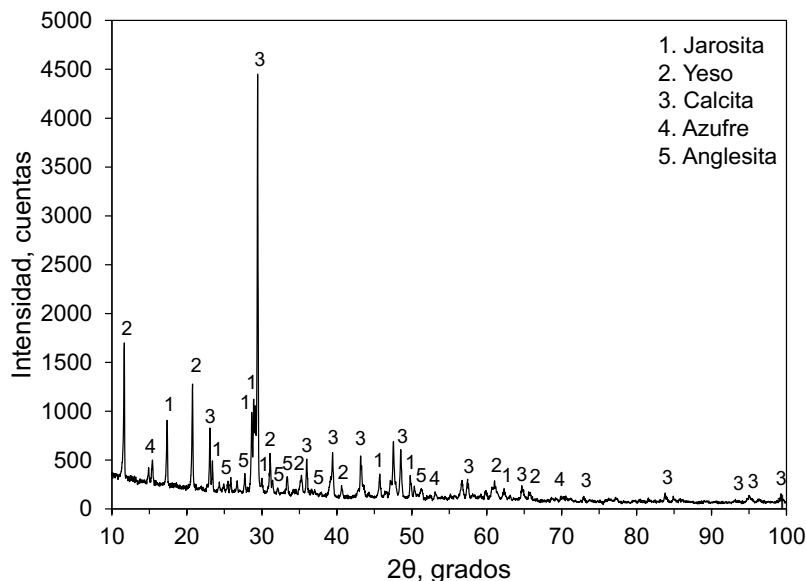


Figura 1. Espectro de difracción de rayos X del compuesto de jarosita industrial. Especies identificadas: 1) jarosita de potasio (01-071-1777), 2) yeso (00-033-0311), 3) calcita (00-005-0586), 4) azufre (01-078-1888) y 5) anglesita (01-072-1389).

Lixiviación de la jarosita industrial empleando el agente lixivante “A”

En la Figura 2 se presenta el efecto de la temperatura sobre la cinética de extracción de plata al utilizar 3 concentraciones del agente lixivante “A”. Se observa que, al utilizar una concentración de 1 g/L la temperatura no tiene efecto en la cinética de lixiviación de plata (ver Figura 2a). Estos resultados parecen contradecir lo reportado en la literatura, ya que a mayores temperaturas hay un mayor grado de descomposición de la jarosita y, por ende, mayor disponibilidad de plata. Sin embargo, este comportamiento podría deberse a que la concentración del agente lixivante no es lo suficientemente alta para disolver la plata liberada del compuesto. Esto se puede corroborar al observar las Figuras 2b y 2c, donde al aumentar la concentración del agente lixivante y la temperatura, se favorece la cinética de disolución. Al utilizar una concentración de 5 g/L (Figura 2b) las extracciones más altas se obtuvieron a las 8 h, alcanzando 41, 47 y 49 % a 25, 35 y 45 °C, respectivamente. Por su parte, al evaluar una concentración

de 10 g/L (Figura 2c) se observa que los tres conjuntos de datos presentan el mismo comportamiento, es decir, la extracción ocurre de manera rápida en los primeros 30 minutos y luego la cinética disminuye conforme transcurre el tiempo de reacción. Las mayores extracciones de plata fueron de 44, 50.4 y 55.9 % a 25, 35 y 45 °C, respectivamente a las 8 h.

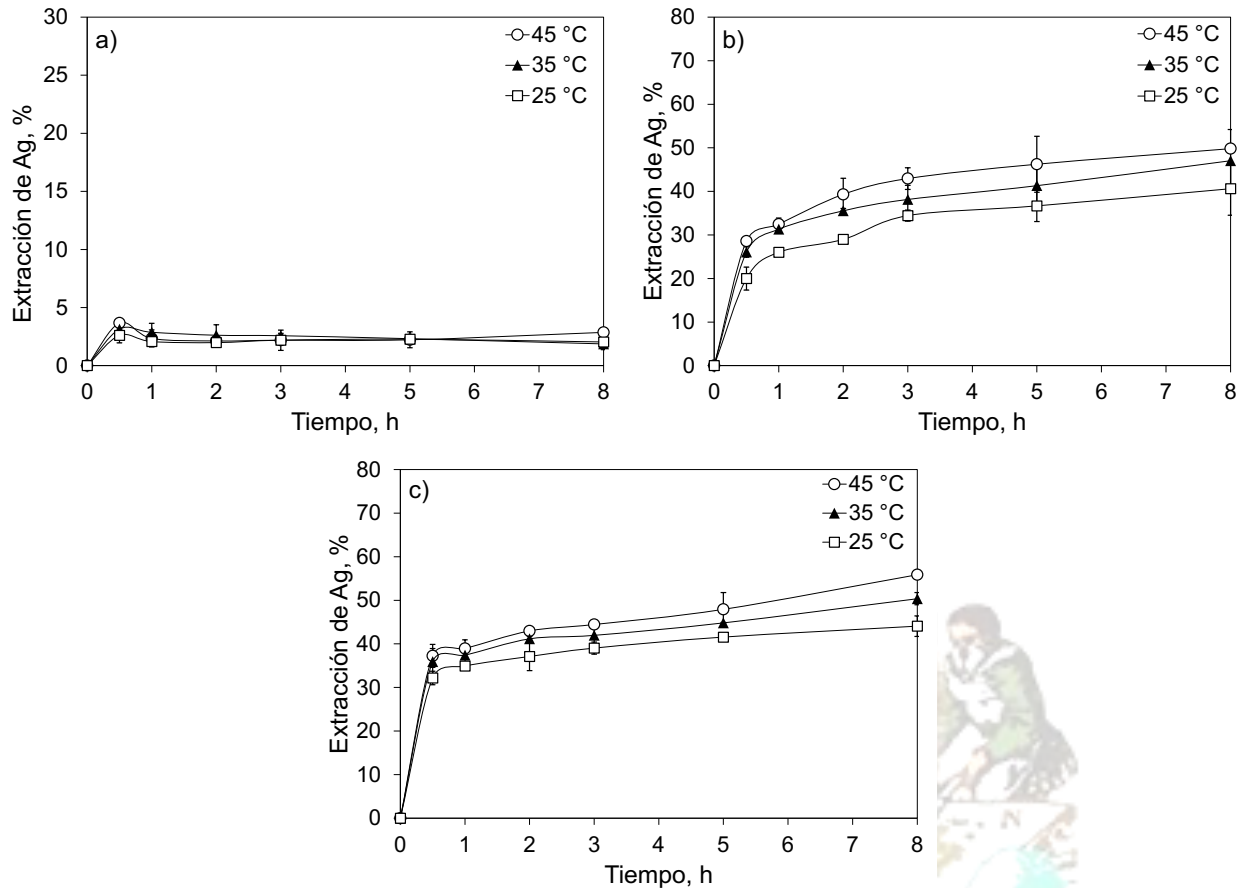


Figura 2. Efecto de la temperatura en la cinética de extracción de plata con a) 1 g/L, b) 5 g/L y c) 10 g/L de agente lixiviante "A".

Lixiviación de la jarosita industrial empleando el agente lixiviante "B"

En la Figura 3 se puede ver el efecto de la temperatura sobre la cinética de extracción a diferentes concentraciones del agente lixiviante "B". En la Figura 3a se observa que utilizar una concentración de 1 g/L no es favorable para el sistema, ya que, a pesar del aumento de la temperatura hasta 45 °C la extracción más alta fue de 6.4 %. En las Figuras 3b y 3c se muestra que al utilizar una concentración de 5 y 10 g/L respectivamente, la cinética de extracción es rápida en los primeros 30 minutos y posteriormente disminuye. Con una concentración de 5 g/L del agente lixiviante "B" a 25, 35 y 45 °C, la extracción a las 8

h fue de 32.3, 42.2 y 37.4 %, respectivamente. Al utilizar una concentración de 10 g/L, se observa que a 25 y 35 °C el comportamiento cinético es muy similar, la máxima extracción a las 8 h fue de 42.4 y 44.5 %, respectivamente. Por otra parte, se puede ver que al utilizar una temperatura de 45 °C la cinética es más rápida, en la cual, la extracción máxima alcanzada al término de la reacción fue de 58.7 % (ver Figura 3c).

La disminución en la cinética observada a temperaturas superiores de 25 °C al utilizar concentraciones de 5 y 10 g/L, se puede atribuir a la formación de productos de baja solubilidad que pasivan la reacción. Por ejemplo, la precipitación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ a medida que la jarosita se descompone y la formación de $\text{Pb}(\text{OH})_2$ a partir de la disolución de la anglesita en el medio. Además, es importante considerar que la muestra inicial contiene azufre. Esta especie ha sido identificada como uno de los principales contribuyentes de la formación de una película pasiva en los procesos de lixiviación (Zia et al., 2019). Aunque eventualmente el azufre se oxida en medios alcalinos para formar sulfato (i.e., SO_4^{2-}) (Kim & Ghahreman, 2020) es probable que aun permanezca en la solución lixiviante.

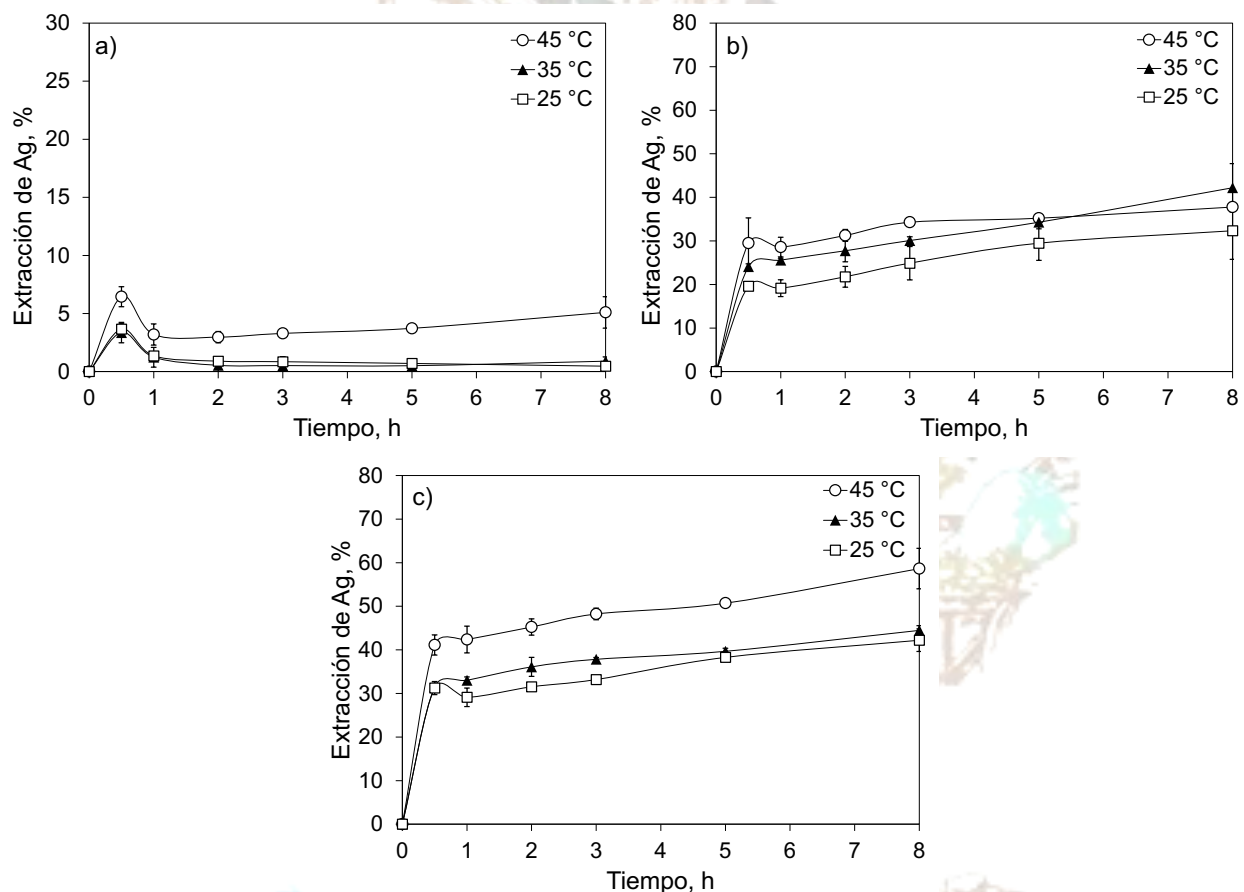


Figura 3. Efecto de la temperatura en la cinética de extracción de plata con a) 1 g/L, b) 5 g/L y c) 10 g/L de agente lixiviante "B".

CONCLUSIONES

Las principales fases mineralógicas identificadas en la muestra de estudio son jarosita de potasio, calcita, yeso, anglesita y azufre. El análisis químico reveló una ley de plata de 121.7 g/t, un valor suficientemente atractivo para su recuperación.

Durante el proceso de lixiviación implementado con agentes alternativos al cianuro, se logró extraer plata de los residuos de jarosita. Se observó que la cinética de extracción utilizando una concentración de agente lixivante de 1 g/L fue ineficiente, con extracciones por debajo del 10 % para ambos agentes lixiviantes, independientemente de la temperatura. En contraste, al aumentar la concentración a 5 y 10 g/L, la velocidad de extracción fue más rápida en los primeros 30 minutos y se vio favorecida con el incremento de la temperatura. Sin embargo, las cinéticas presentaron una desaceleración posterior, lo que sugiere la pasivación de la reacción de lixiviación.

Las condiciones para alcanzar la máxima extracción de plata (i.e., 55.9 y 58.7 % para los agentes "A" y "B", respectivamente) en medio alcalino, involucran una concentración de 10 g/L del agente lixivante y una temperatura de 45 °C. Este resultado destaca la importancia de gestionar adecuadamente estos factores para optimizar la eficiencia del proceso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONAHCYT por la beca de posgrado otorgada a González-Bonilla B.R.

REFERENCIAS

- Aguilar-Carrillo, J., Villalobos, M., Pi-Puig, T., Escobar-Quiroz, I.N., & Romero, F.M. (2018). Synergistic arsenic (V) and lead (II) retention on synthetic jarosite. I. Simultaneous structural incorporation behaviour and mechanism. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 20(2), 354-369. <https://doi.org/10.1039/c7em00426e>
- Antrekowitsch, J., & Hanke, G. (2020b). Characterization and processing of residues from hydrometallurgical zinc smelters. *The minerals, metals & materials series* (pp. 437-445). https://doi.org/10.1007/978-3-030-37070-1_38
- Bayliss, P., Kolitsch, U., Nickel, E.H., & Pring, A. (2010). Alunite supergroup: recommended nomenclature. *Mineral. Mag.* 74 (5), 919–927.
- Choque, D. C., & Lapidus, G. (2020). Acid decomposition and silver leaching with thiourea and oxalate from an industrial jarosite sample. *Hydrometallurgy*, 192, 105289. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105289>

González-Ibarra, A. A., Nava-Alonso F., Fuentes-Aceituno J. C. & Uribe-Salas A. (2016). Hydrothermal decomposition of industrial jarosite in alkaline media: the rate determining step of the process Kinetics. *Journal of Mining and Metallurgy Section B-Metallurgy*, 52(2), 135-142.

Islas, H., Flores, M. U., Juárez, J. C., Reyes, M., Blanco, A., Gutiérrez, E. J., Aguilar, J., Nolasco, M. C., Rodríguez, I., & Reyes, I. A. (2021). Silver leaching from jarosite-type compounds using cyanide and non-cyanide lixiviants: a kinetic approach. *Minerals Engineering*, 174, 107250. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107250>

Kasaini, H., Kasongo, K., Naude, N., & Katabua, J. (2008). Enhanced leachability of gold and silver in cyanide media: Effect of alkaline pre-treatment of jarosite minerals. *Minerals Engineering*, 21(15), 1075-1082. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.12.005>

Kim, R., & Ghahreman, A. (2020). A mechanism of metastable sulfur speciation and the adsorption on a gold surface in the presence of sulfidic ore and lead in cyanide medium. *Hydrometallurgy*, 193, 105294. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105294>

Marsden J., & House I. (2006). The chemistry of gold extraction. 2nd ed., Society for Mining, and Exploration, Inc. (SME), Colorado.

Palden, T., Regadío, M., Onghena, B., & Binnemans, K. (2019). Selective metal recovery from jarosite residue by leaching with Acid-Equilibrated ionic liquids and Precipitation-Stripping. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(4), 4239-4246. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05938>

Picazo-Rodríguez, N., Carrillo-Pedroza, Martínez, L. A., Soria-Aguilar, M., & Almaguer-Guzmán, I. (2021). So and jarosite behavior during recovery of values from the direct leaching residue of sphalerite using cyanide and glycine. *Journal Of Mining And Metallurgy. Section B, Metallurgy/Journal Of Mining And Metallurgy. Section B, Metallurgy*, 57(3), 349-358. <https://doi.org/10.2298/jmmb191221031p>

Sarmiento, A.M., Caraballo, M.A., Sanchez-Rodas, D., Nieto, J.M., Parviainen, A., (2012). Dissolved and particulate metals and arsenic species mobility along a stream affected by acid mine drainage in the Iberian pyrite belt (SW Spain). *Appl. Geochem.* 27, 1944–1952.

Sharma, P. (2016). Feasibility study of industrial jarosite waste as vital material for construction: positive and negative aspects. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 28.

Štrbac, N., Mihajlovič, I., Andrič, V., Živkovič, Ž., ~ Rosič, A. (2011). Kinetic investigations of two processes for zinc recovery from zinc plant residue. *Can. Metall. Q.* 50 (1), 28–36.

Wejman-Gibas, K., Chmielewski, T., Borowski, K., Gibas, K., Jeziorek, M., & Wodka, J. (2015). Thiosulfate leaching of silver from a solid residue after pressure leaching of industrial copper sulfides flotation

concentrates. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 51(2), 601-610.
<https://doi.org/10.5277/ppmp150219>

Zia, Y., Mohammadnejad, S., & Abdollahy, M. (2019). Gold passivation by Sulfur Species: A Molecular Picture. *Minerals Engineering*, 134, 215-221. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.009>

