

Lixiviación de indio con pirofosfato a partir de una jarosita industrial

Indium Leaching with Pyrophosphate from Industrial Jarosite

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Dandy Calla-Choque* ¹José María Rodríguez-Aragón ²

Recibido: 20 / 11 / 2022

Aceptado: 14 / 04 / 2023

Publicado: 25 / 04 / 2023

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.272>

Autor de Correspondencia:

Dandy Calla Choque

Correo: dcalla@unam.mx

Resumen

La jarosita es producida en la naturaleza en ambientes húmedos en presencia de sulfuros; además es producida en forma de precipitado en algunos procesos metalúrgicos como método de tratamiento de algunas soluciones para el control de hierro presente en las soluciones ácidas. Los precipitados formados como jarosita tienen contenidos de algunos metales de interés como el oro, la plata y el indio (In). En este trabajo se presenta el efecto del pH, concentración de pirofosfato y tiempo en la lixiviación de indio a temperatura ambiente a partir de jarositas industriales. El contenido de indio en la jarosita fue de 26.8 g/t, donde el 89.5% del In fue recuperado a pH 7, en una solución de pirofosfato 0.1 M a los 60 min de lixiviación. El análisis de resultados incluye un análisis estadístico.

Palabras clave: Indio, Pirofosfato, Hidrometalurgia, Lixiviación.

Abstract

Jarosite is produced in nature, in humid environments, and in the presence of sulfides. In addition, it is produced as a precipitate in some metallurgical processes as a treatment method for some solutions to control the iron present in acid solutions. The precipitates formed as jarosite have contents of some metals of interest such as gold, silver, and indium (In). In this work, the effect of pH, pyrophosphate concentration, and time is studied on the indium leaching at room temperature from industrial jarosite is presented. The indium content in the jarosite was 26.8 g/t, where 89.5% (In) was recovered at pH 7, in a 0.1 M pyrophosphate solution at 60 minutes of leaching. The analysis of results includes a statistical analysis.

Keywords: Indium, Pyrophosphate, Hydrometallurgy, Leaching.

¹ * Doctor en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica, Departamento de Ingeniería de Minas y Metalúrgica – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, dcalla@unam.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2848-4388>

² Estudiante de Ingeniería de Minas y Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, CDMX, México, jose.rodriguez@ingenieria.unam.edu, <https://orcid.org/0000-0002-8909-5493>



INTRODUCCIÓN

El indio es un elemento metálico situado en el grupo 13, periodo 5 de la tabla periódica y estado de oxidación +3 [1,2]. El nombre tiene su origen en la línea de espectro color índigo, es un metal plateado químicamente estable debido a que no reacciona con el aire y el agua a temperatura y presión estándar.

La extracción del In a partir de minerales es de importancia debido a que se encuentra en pequeñas cantidades (0.05 ppm) en la corteza terrestre y 0.072 ppm en la corteza oceánica [3]. El uso del In se ha incrementado debido a su aplicación en las tecnologías emergentes o estratégicas [4], soldaduras [5], dispositivos fotovoltaicos [6], material de interfaz térmica [7], baterías [8], pantallas de cristal líquido [1], entre otras.

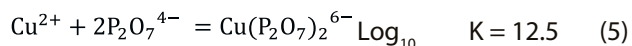
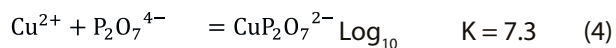
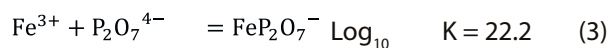
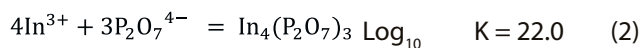
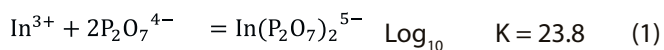
Los minerales de In son extremadamente raros en la naturaleza, donde la roquesita es el mineral más importante; a menudo, el In sustituye a elementos con radios iónicos similares, especialmente aquellos que tienen coordinación tetraédrica con respecto al principal elemento metálico, $(\text{Cu}^+ \text{In}^{3+}) = (\text{Zn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})$, $(\text{Cu}^+ \text{Fe}^{3+} \text{S}_2) - (\text{Cu}^+ \text{In}^{3+} \text{S}_2)$ [9]. Generalmente, el In está asociado a algunos minerales sustituyendo elementos de forma acoplada como, esfalerita (ZnS), calcopirita (CuFeS_2), estannita ($\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$), tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$) y casiterita (SnO_2) [9,10]. El In sustituye al zinc dentro de la red cristalina de la esfalerita y representa el mineral económico principal [9]; alrededor del 95% de la producción global de In es derivada de la refinación de zinc y el 5% restante proviene de operaciones de refinación de cobre y estaño [11]; en la refinación del zinc parte de In se precipita durante el proceso de eliminación del hierro por medio de la formación de jarosita en medio ácido.

La formación de la jarosita formada en un proceso industrial permite el control de hierro (Fe^{3+}), sulfatos (SO_4^{2-}) y otras impurezas presentes en el sistema de lixiviación [12];

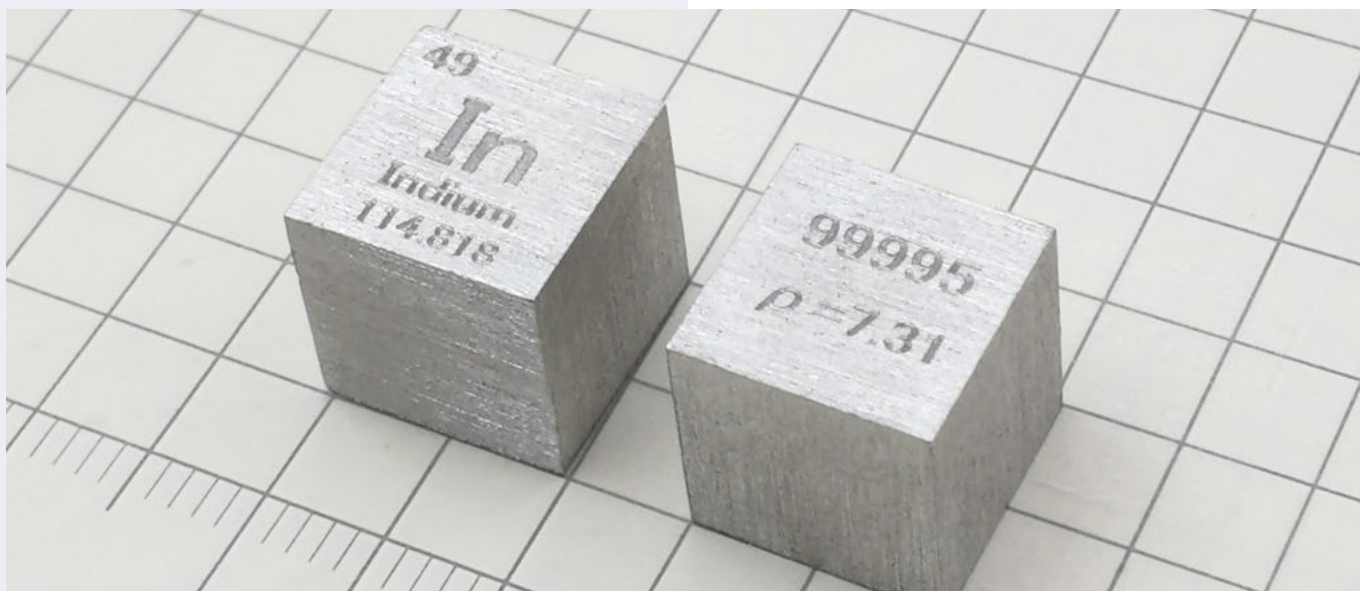
se representa típicamente con la fórmula $\text{MFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, donde M corresponde a alguno de los siguientes iones H_3O^+ , Na^+ , Rb^+ , Ag^+ , NH_4^+ , o Pb^{2+} [13]. Además, se han reportado contenidos de plomo, cobre, galio, arsénico, cadmio, también del In, utilizando espectroscopía de emisión atómica ICP-OES [14,15], por lo que recientemente se han desarrollado procesos para la obtención de estos metales utilizando algunos métodos pirometalúrgicos [14], en unión con los hidrometalúrgicos [16] con el uso de solventes orgánicos [17].

Otra fuente importante para la obtención de este metal es el reciclaje de productos electrónicos [18] como las pantallas de cristal líquido (LCD), donde el contenido de In es recuperado de forma selectiva mediante un proceso de lixiviación con ultrasonido en presencia de pirofosfato ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) [19].

El pirofosfato (PPi) es un ligando de interés por su coordinación versátil, solubilidad, baja toxicidad y biocompatibilidad [20]; puede formar complejos estables con el In (Ec. 1 y 2), hierro (Ec. 3) y cobre (Ec. 4 y 5) [21].



En este artículo se presentan los resultados de la lixiviación de jarositas con contenido de In a diferentes valores de pH y concentraciones de pirofosfato a temperatura ambiente. La experimentación y los resultados fueron evaluados con un análisis de varianza (ANOVA), porque permite disminuir el número de pruebas mediante la experimentación fraccionada sin perder representatividad.





MATERIALES Y MÉTODOS

Las jarositas usadas en este trabajo son residuos de una planta de electro-refinación del zinc. Para las soluciones de lixiviación se utilizaron reactivos de grado analítico y agua desionizada, pirofosfato de sodio (PPI) y ácido sulfúrico (H_2SO_4).

El contenido de metales se obtuvo mediante digestión ácida analizada por medio de espectrometría de absorción atómica (Varian SpectrAA 220 FS). La determinación de las especies mineralógicas se realizó por difracción de rayos X (Philips, X-Pert PW3040).

Todas las pruebas fueron realizadas usando agitación magnética a temperatura ambiente con 3 g jarosita en 100 mL de agua desionizada (30 g/L) a diferente pH y concentración de PPI (tabla 1) con la finalidad de evaluar estos parámetros en la lixiviación de In con ayuda de un diseño experimental. El control de pH se realizó con alícuotas de ácido sulfúrico diluido.

Para el análisis termodinámico se utilizó el software Medusa Chemistry® desarrollado por el KTH Royal Institute of Technology [22] de acuerdo con las condiciones presentes en el sistema estudiado.

Durante la lixiviación se midió el potencial oxidoreducción (ORP), pH y se tomaron muestras de la solución lixiviada a diferentes tiempos, para el análisis del contenido de In, Cu y Fe, se utilizó el espectrómetro de absorción atómica.

Para el Análisis de Varianza (ANOVA) se realizó un diseño experimental fraccionado 3^{3-1} con los factores que afectan la lixiviación (pH, PPI y tiempo) con la finalidad de obtener una combinación representativa del comportamiento de los factores en la lixiviación del In, el diseño resultante fue de 27 pruebas con 3 factores y 3 niveles (tabla 1).

Tabla 1. Parámetros para las pruebas de lixiviación con 30 g/L de jarosita a diferente pH, concentración de pirofosfato (PPI) y tiempo de lixiviación a temperatura ambiente.

	Nivel		
	1	2	3
pH	5	6	7
PPI (M)	0.051	0.1	0.15
Tiempo (min)	30	60	120

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización

Mediante difracción de rayos X (figura 1) se determinó la especie de jarosita de sodio ($NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) como especie mayoritaria, además de magnetita ($(ZnFe)Fe_2O_4$) presente en el residuo de una planta de refinación de zinc; por absorción atómica se determinó un contenido de 26.8 g/t In, 45.94% Fe, y 0.96% Cu.

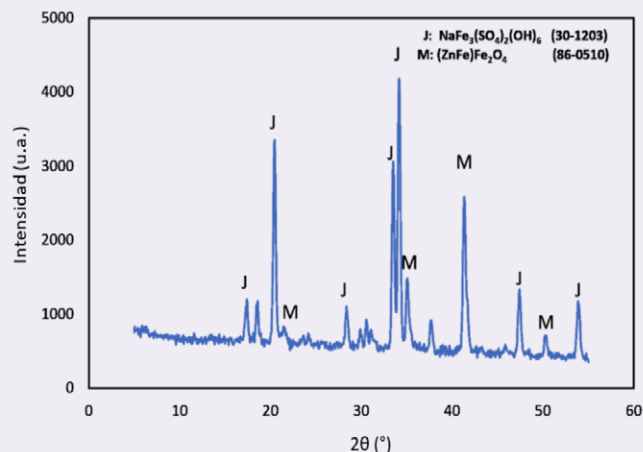


Figura 1. Difractograma de rayos X (XRD) de la jarosita industrial estudiada.

Pruebas de lixiviación

Se realizaron 27 pruebas de lixiviación conforme al diseño experimental presentado en la tabla 1, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2 donde se obtienen diferentes porcentajes de lixiviación de In, Cu y Fe de acuerdo con la concentración de PPI, el pH y el tiempo de lixiviación a temperatura ambiente.

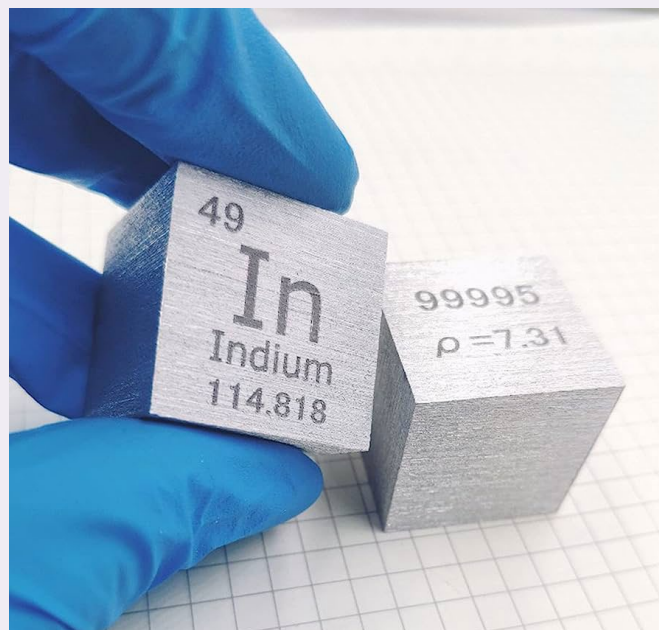


Tabla 2. Matriz de valores experimentales, disolución de In (%), hierro (%) y cobre (%) a temperatura ambiente.

Prueba	PPI (M)	pH	Tiempo (min)	In (%)	Cu (%)	Fe (%)
1	0.051	5	30	25.46	1.28	0.10
2	0.051	5	60	31.67	1.11	0.13
3	0.051	5	120	26.39	0.40	0.21
4	0.100	5	30	42.45	1.26	0.08
5	0.100	5	60	37.57	0.60	0.13
6	0.100	5	120	62.40	1.08	0.29
7	0.150	5	30	49.01	1.38	0.12
8	0.150	5	60	61.80	1.81	0.19
9	0.150	5	120	58.60	1.92	0.29
10	0.051	6	30	58.38	2.52	0.08
11	0.051	6	60	42.85	2.69	0.11
12	0.051	6	120	36.95	2.75	0.20
13	0.100	6	30	39.69	2.39	0.07
14	0.100	6	60	23.35	2.73	0.10
15	0.100	6	120	74.92	1.72	0.09
16	0.150	6	30	38.00	2.42	0.06
17	0.150	6	60	55.40	2.38	0.08
18	0.150	6	120	44.22	1.25	0.12
19	0.051	7	30	30.58	1.21	0.02
20	0.051	7	60	15.07	1.22	0.03
21	0.051	7	120	25.48	0.85	0.04
22	0.100	7	30	86.29	3.29	0.11
23	0.100	7	60	89.52	3.29	0.13
24	0.100	7	120	84.03	3.60	0.01
25	0.150	7	30	59.49	2.52	0.06
26	0.150	7	60	46.70	0.03	0.08
27	0.150	7	120	46.88	1.90	0.11

Análisis estadístico

Como se puede observar en la figura 2, la distribución de las métricas descriptivas, muestran que el valor mayor en la media es para el In (36.7); mientras que, el Fe y Cu, presentan valores relativamente bajos (0.15% y 8.58%, respectivamente). El In presenta una mayor desviación de los datos (20.39%), es decir, mayor será la variabilidad o dispersión de los datos en relación con su media debido a que los efectos en las pruebas tienen mayor impacto en el porcentaje de recuperación de In. Este comportamiento está relacionado a la concentración de In en el sistema de lixiviación ($\mu = 0.4$ ppm). Para el Cu y Fe se obtienen una desviación de 1.76% y 0.08% respectivamente, existe baja va-

riación respecto a la media debido a la formación de complejos estables con el PPI.

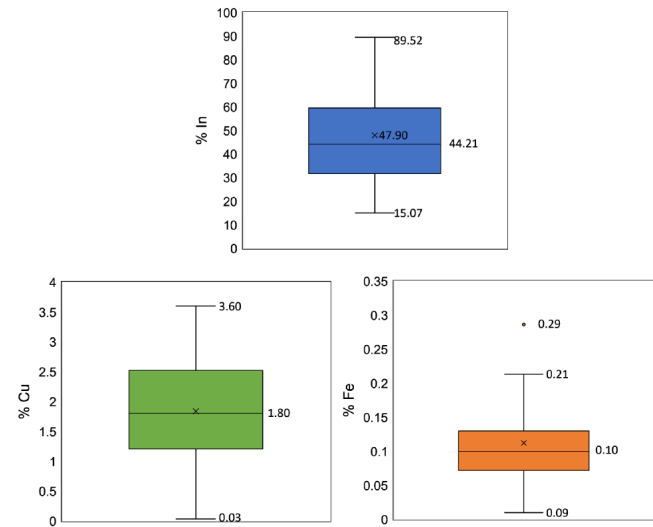


Figura 2. Diagrama de cajas, distribución de las métricas descriptivas para el In, Cu y Fe.

A diferencia del In, el Cu y Fe presentan distribución simétrica, donde se observa una distribución mayor entre los valores del máximo (89.52%) y mínimo (15.07%), los datos se encuentran más dispersos entre sí, además, de tener un porcentaje de lixiviación media 44.21% de In. Para el Cu y Fe se tiene un promedio del 1.80% y 0.10% respectivamente (figura 2, tabla 3).

Tabla 3. Métricas descriptivas del porcentaje de elemento en solución.

	In	Cu	Fe
Media (%)	47.90	1.84	0.11
Desviación estándar	19.84	0.93	0.07
Mínimo (%)	15.07	0.03	0.01
Q1 (25%)	31.67	1.21	0.07
Q2 (50%)	44.22	1.80	0.01
Q3 (75%)	59.49	2.52	0.13
Máximo (%)	89.52	3.60	0.29

Análisis de Varianza

Se consideró usar el efecto de pH (A), concentración de PPI (B) y tiempo (C) así como sus combinaciones (AB, BC, AC) para evaluar el porcentaje de lixiviación de In presente en la jarosita con un análisis de varianza (tabla 1). De acuerdo con el diagrama de Pareto con los efectos estandarizados (figura 2) no todas las combinaciones resultaron significativas, solo el efecto de la concentración de PPI (B) y el

efecto combinado entre el pH y la concentración de PPI (A y B). Los demás efectos estandarizados individuales y en conjunto no tienen una relación significativa con la recuperación del In presente en la jarosita con un nivel de confianza del 95%.

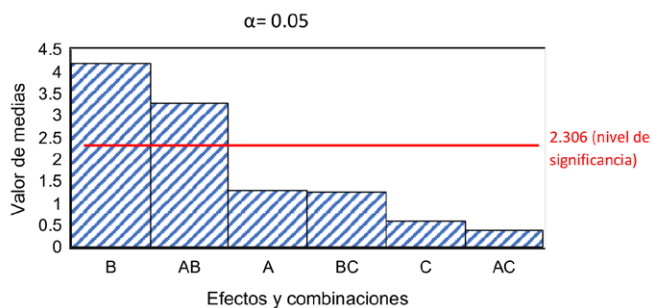


Figura 2. Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados.

Por lo que para el análisis de varianza solo se tomaron en cuenta los términos de pH (A) y concentración de PPI (B), en la tabla 4 se presentan los grados de libertad (GL), suma ajustada de los cuadrados (SC Ajust.), cuadrados medios ajustados (MC Ajust.), estadístico F (valor F) y valor p. El valor p permite evaluar la relación de igualdad entre todas las medias de la población estudiada, la hipótesis planteada se relaciona con el valor p, al ser valores cercanos a 0 entre las medias de la población se afirma la hipótesis nula, la cual asume que no hay una diferencia significativa entre los grupos en términos de la variable de medición.

Tabla 4. Análisis de varianza con los factores, pH y concentración para In.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	7742.3	967.8	6.98	0
Lineal	4	4027.1	1006.8	7.26	0.001
pH	2	486.8	243.4	1.76	0.201
Concentración	2	3540.3	1770.2	12.77	0
Interacciones de 2 términos	4	3715.2	928.8	6.7	0.002
pH * Concentración	4	3715.2	928.8	6.7	0.002
Error	18	2495	138.6		
Total	26	10237.3			

Análisis de efectos

La figura 3, presenta el efecto del pH en la lixiviación de la jarosita, en la medida que el pH se incrementa de 5 a 7 la recuperación de In se favorece de 44 al 53.8% respectivamente, este comportamiento está relacionado a la forma-

ción del complejo $\text{In}(\text{P}_2\text{O}_7)_2^{5-}$ el cual permite que el In pase a solución (figura 4 y 5). Sin embargo, el efecto del pH está relacionado a la presencia del complejo Fe-PPI (FeP_2O_7^-) el cual limita la presencia de PPI necesario para la lixiviación de In (figura 6).

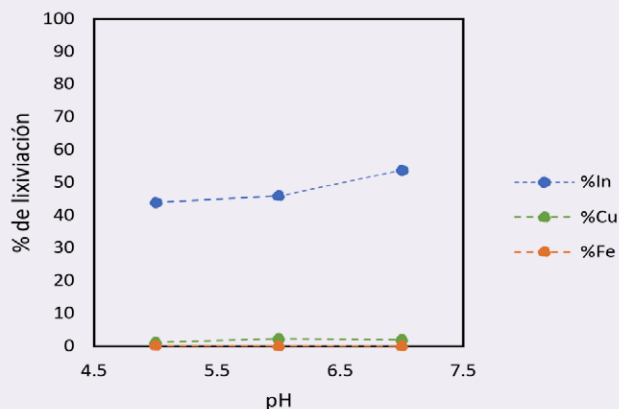


Figura 3. Efecto del pH en la lixiviación de In, Fe y Cu.

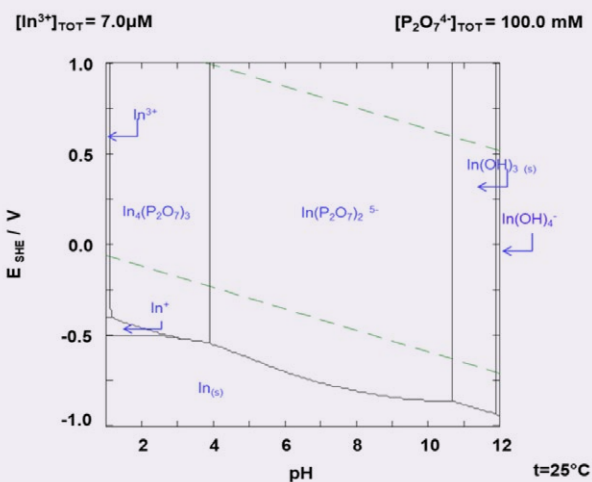


Figura 4. Diagrama Eh-pH para el sistema $\text{In}-\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$, $0.10 \text{ M } \text{P}_2\text{O}_7^{4-}$, y $0.7 \times 10^{-6} \text{ M In}$ a 25°C .

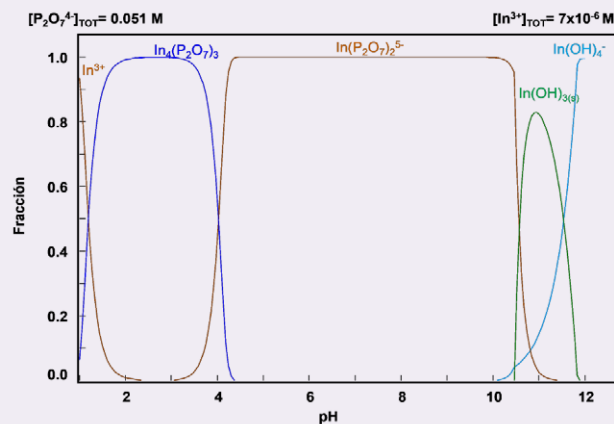


Figura 5. Diagrama de distribución de especies para el sistema $\text{In}-\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$, $0.10 \text{ M } \text{P}_2\text{O}_7^{4-}$, y $0.7 \times 10^{-6} \text{ M In}$ a 25°C .

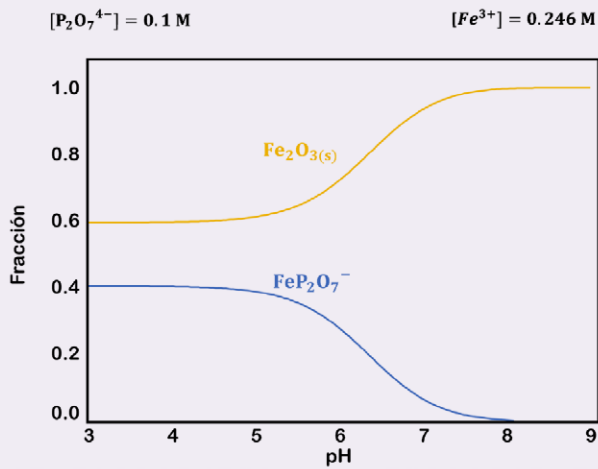


Figura 6. Diagrama de distribución de especies para el sistema Fe- $P_2O_7^{4-}$, 0.246 M Fe y 0.1 M $P_2O_7^{4-}$ a 25°C.

Para el efecto de la concentración del pirofosfato (figura 7), en la medida en que la concentración de PPI se incrementa, el porcentaje de lixiviación de In también se favorece, por ejemplo, a una concentración de 0.05 M se tiene una recuperación de 32.5% y si se incrementa la concentración a 0.1 M se alcanza una recuperación del 60% de In. Finalmente, a una concentración de 0.15 M la recuperación desciende, este comportamiento puede estar relacionado a la formación de un complejo entre el cobre y el hierro que se favorece a mayor concentración de PPI; si se comparan los diagramas a 0.1 M de PPI y 0.15 M de PPI del cobre (figura 8 y 9, respectivamente). Se observa que el área de predominancia del ion $Cu(P_2O_7)_2^{6-}$ es mayor en la concentración de 0.15 M a pesar de ser una diferencia pequeña podría ser la razón de la caída de recuperación a un pH 7 y 0.15 M de PPI.

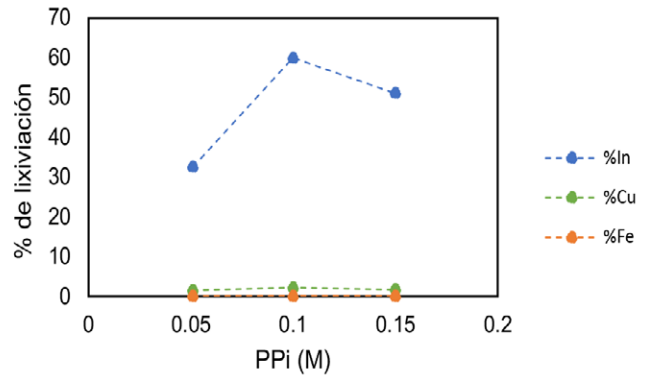
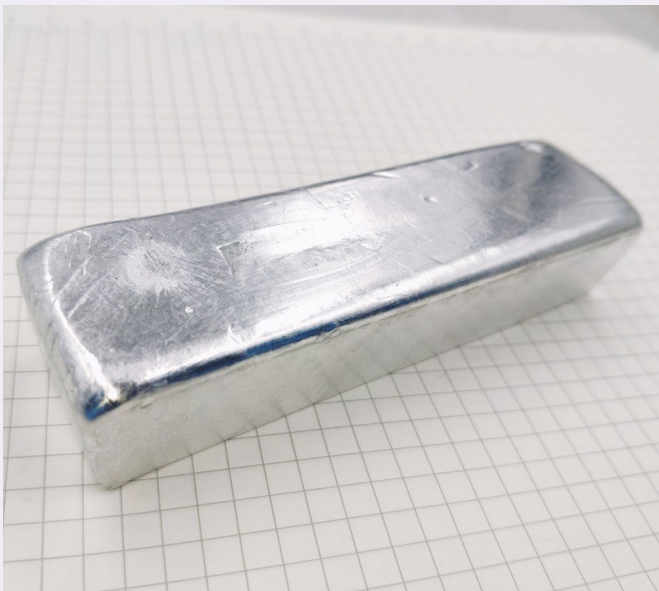


Figura 7. Efecto de la concentración de $P_2O_7^{4-}$ (PPI) en la lixiviación de In, Fe, y Cu.

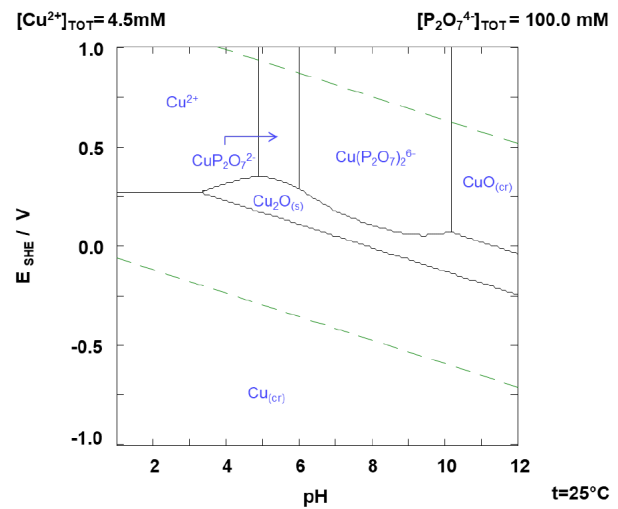


Figura 8. Diagrama de Eh-pH para el sistema Cu- $P_2O_7^{4-}$, a 0.10 M $P_2O_7^{4-}$, y 4.5×10^{-6} M Cu a 25°C.

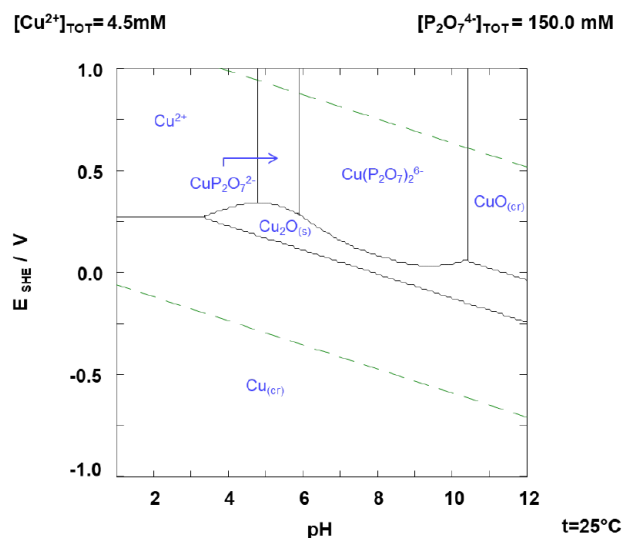


Figura 9. Diagrama de Eh-pH para el sistema Cu- $P_2O_7^{4-}$, a 0.15 M $P_2O_7^{4-}$, y 4.5×10^{-6} M Cu a 25°C.



El efecto del tiempo en lixiviación se presenta en la figura 10 donde en la medida que se aumenta el tiempo la lixiviación de In se favorece en la solución a partir de la jarosita a las condiciones ensayadas.

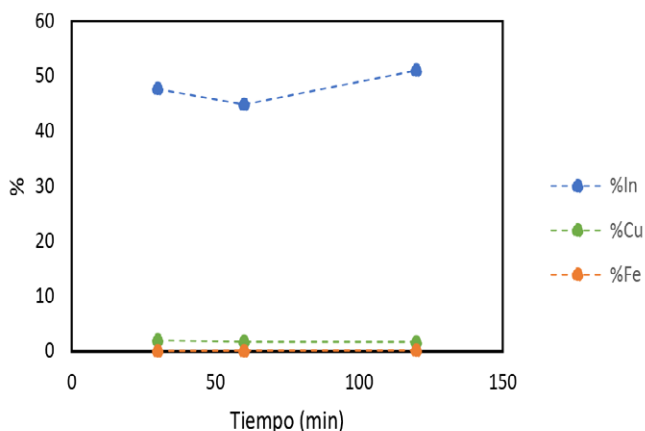


Figura 10. Efecto del tiempo de lixiviación en la recuperación de In y la disolución de Fe y Cu.

Para el caso del cobre y hierro en las condiciones estudiadas no se tienen disoluciones altas, el cobre tiene una disolución menor que 3.5% y el hierro menor que 0.28%; este comportamiento podría estar relacionado a la posible formación del complejo sólido CuFeO_2 y la baja descomposición de la jarosita en las condiciones estudiadas (figura 10) lo que permite que la mayor cantidad de cobre y el hierro permanezcan con el mineral.

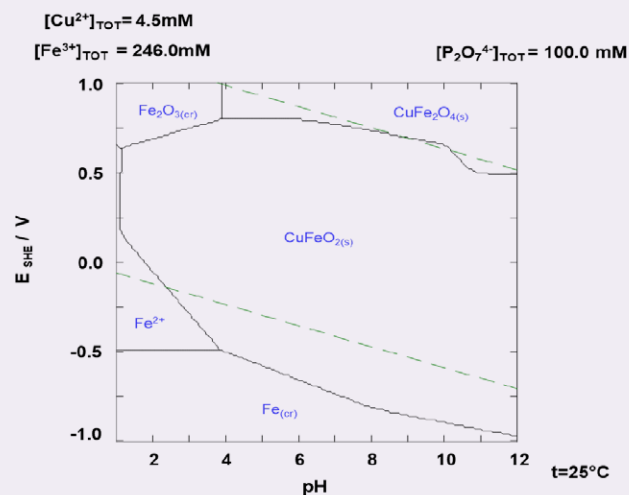


Figura 11. Diagrama Eh-pH para el sistema Cu-Fe- $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$, 0.10 M PPI, 4.5×10^{-6} M Cu y 0.246 M Fe a 25°C.

CONCLUSIONES

Los resultados presentados demuestran la posibilidad de extracción de In con pirofosfato a partir de la jarosita en un rango de pH de 5 a 7.

De acuerdo con los resultados estadísticos se tiene una correlación entre el pH y la concentración de pirofosfato asociados a la recuperación de In, este proceso permite una lixiviación selectiva del In, debido a la baja disolución

de hierro y cobre; se obtiene una lixiviación del 89.52% In, 0.1% Fe, y 3.3% Cu a pH 7 y 0.1 M de pirofosfato a temperatura ambiente.

RECONOCIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PA-PIIT) de la Universidad Nacional Autónoma de México IA 106221.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alfantazi, A. M. and R. R. Moskalyk. 2003. Processing of indium: a review. *Minerals Engineering* 16(8): 687-694. [http://dx.doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00168-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00168-7)
- [2] Pradhan, D., Panda, S., & Sukla, L. 2017. Recent advances in indium metallurgy: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 39, 167-180. <http://dx.doi.org/10.1080/08827508.2017.1399887>
- [3] Goldfarb, R. J. "Critical Metals Handbook (Gus Gunn, ed.). 2014. "Economic Geology 109(6): 1801-1802. <http://dx.doi.org/10.2113/econgeo.109.6.1801>
- [4] E. M. Harper, , Goksin Kavlak, Lara Burmeister, Matthew J. Eckelman, Serkan Erbis, Vicente Sebastian Espinoza, Philip Nuss, T. E. Graedel. 2015. Criticality of the Geological Zinc, Tin, and Lead Family. *Journal of Industrial Ecology*, 19(4), 628-644. <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12213>
- [5] Humpston, G., & Jacobson, D. M. 2005. Solders and Their Metallurgy In *Principles of Soldering* (pp. 0): ASM International. <http://dx.doi.org/10.31399/asm.tb.ps.t62440049>
- [6] Nakamura, M., Yamaguchi, K., Kimoto, Y., Yasaki, Y., Kato, T., & Sugimoto, H. 2019. Cd-Free Cu(In,Ga)(Se,S)₂ thin-film solar cell with record efficiency of 23.35%. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9, 1863-186 <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2937218>
- [7] Too, S., Touzelbaev, M., Khan, M., Master, R., Diep, J., & Keok, K.-H. 2009. Indium Thermal Interface Material Development for Microprocessors. <http://dx.doi.org/10.1109/STHERM.2009.4810762>
- [8] Zhang, L., Chen, X., Wan, F., Niu, Z., Wang, Y., Zhang, Q., & Chen, J. 2008. Enhanced Electrochemical Kinetics and Polysulfide Traps of Indium Nitride for Highly Stable Lithium-Sulfur Batteries. *ACS Nano*, 12(9), 9578-9586. <http://dx.doi.org/10.1021/acsnano.8b05466>
- [9] N. J. Cook, Sundblad, K., Valkama, M., Nygård, R., Ciobanu, C. L., & Danyushevsky, L. 2011. Indium mineralisation in A-type granites in southeastern Finland: Insights into mineralogy and partitioning between coexisting minerals. *Chemical Geology*, 284(1), 62-73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.02.006>
- [10] Murakami, H., & Ishihara, S. 2013. Trace elements of Indium-bearing sphalerite from tin-polymetallic deposits in Bolivia, China and Japan: A femto-second LA-ICPMS study. *Ore Geology Reviews*, 53, 223-243, Enero 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.01.010>
- [11] Schwarz-Schampera. 2013. U. Indium. In *Critical Metals Handbook*. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118755341.ch9>
- [12] Groat, L. A., Jambor, J., & Pemberton, B. 2003. The crystal structure of argentojarosite, AgFe₃(SO₄)₂(OH)₆. *Canadian Mineralogist - CAN MINERALOG*, 41, 921-928. <http://dx.doi.org/10.2113/gscanmin.41.4.921>
- [13] Das, G. K., Acharya, S., Anand, S., & Das, R. P. 1996. Jarosites: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 16(3), 185-210. <http://dx.doi.org/10.1080/08827509708914135>
- [14] Wagscheider, S., Steinlechner, S., & Leuchtenmüller, M. 2016.

Innovative Concept for the Recovery of Silver and Indium by a Combined Treatment of Jarosite and Electric Arc Furnace Dust. *JOM*, 69(2), 388-394. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-016-2192-7>

- [15] Kerolli-Mustafa, M., Fajković, H., Rončević, S., & Čurković, L. 2015. Assessment of metal risks from different depths of jarosite tailing waste of Trepça Zinc Industry, Kosovo based on BCR procedure. *Journal of Geochemical Exploration*, 148, 161-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.09.001>
- [16] Maihatchi Ahamed, A., Pons, M. N., Ricoux, Q., Issa, S., Goettmann, F., & Lopicque, F. 2021. New pathway for utilization of jarosite, an industrial waste of zinc hydrometallurgy. 170, 107030. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107030>
- [17] Li, S.-q., Tang, M.-t., He, J., Yang, S.-h., Tang, C.-b., & Chen, Y.-m. 2006. Extraction of indium from indium-zinc concentrates. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16(6), 1448-1454. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(07\)60036-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(07)60036-3)
- [18] Zhang, K., Wu, Y., Wang, W., Li, B., Zhang, Y., & Zuo, T. 2015. Recycling indium from waste LCDs: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 276-290. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.015>
- [19] Toache-Pérez, A. D., Lapidus, G. T., Bolarín-Miró, A. M., & De Jesús, F. S. 2022. Selective Leaching and Recovery of Er, Gd, Sn, and In from Liquid Crystal Display Screen Waste by Sono-Leaching Assisted by Magnetic Separation. *ACS Omega*, 7(36), 31897-31904. <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.2c02729>
- [20] Iktotun, O. F., Marino, N., Kruger, P. E., Julve, M., & Doyle, R. P. 2010. Coordination complexes incorporating pyrophosphate: Structural overview and exploration of their diverse magnetic, catalytic and biological properties. *Coordination Chemistry Reviews*, 254(7), 890-915. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ccr.2009.12.015>
- [21] Peter Linstrom. 2017. NIST Chemistry WebBook - SRD 69, National Institute of Standards and Technology, 2022
- [22] Puigdomenech, I. 2004. Make equilibrium diagrams using sophisticated algorithms (MEDUSA), inorganic chemistry. Stockholm, Sweden

Cómo citar este artículo:

Calla Choque, D., & Rodríguez-Aragón, J. M. (2023). Lixiviación de indio con pirofosfato a partir de una jarosita industrial. *EPISTEMUS*, 17(34). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.272>

