

Lixiviación de plomo con citrato a partir de un mineral de galena, efecto del pH.

Lead Leaching with Citrate from a Galena Mineral, pH Effect

EPISTEMUS

ISSN: 2007-8196 (electrónico)

David Moisés Pantaleón Tolentino ¹
 Dandy Calla Choque* ²
 José Enrique Santos Jallath ³

Recibido: 20 / 11 / 2022

Aceptado: 14 / 04 / 2023

Publicado: 09 / 05 / 2023

DOI: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.273>

Autor de Correspondencia:

Dandy Calla Choque

Correo: dcalla@unam.mx

Resumen

La recuperación de metales a partir de minerales mediante procesos alternativos es apropiada para la reducción de contaminantes producidos en fundiciones y operaciones tradicionales; la lixiviación de metales con el uso de reactivos químicos a bajas concentraciones permite la reutilización de las soluciones, así como la reducción de problemas en el reciclaje de las soluciones. La lixiviación con reactivos orgánicos a temperatura ambiente reduce los problemas de generación de gases y consumo de reactivos, por lo que resulta ser una opción para la obtención de metales a partir de minerales. Este trabajo presenta una alternativa para la recuperación de plomo mediante la lixiviación de un mineral de galena utilizando citrato de sodio en una concentración de 0.2 M a temperatura ambiente. Se evalúa el efecto del pH en medio ácido, neutro y alcalino, donde se logra recuperar el 99.9% de plomo en medio alcalino.

Palabras clave: plomo, lixiviación, citrato, alcalino.

Abstract

The recovery of metals from minerals through alternative processes is appropriate for the reduction of pollutants produced in foundries and traditional operations; the leaching of metals with the use of chemical reagents at low concentrations allows the reuse of the solutions, as well as the reduction of problems in the recycling of the solutions. Leaching with organic reagents at room temperature reduces the issues in the generation of gases and consumption of reagents, which is why it turns out to be an option for obtaining metals from minerals. This work shows an alternative for lead recovery by leaching a galena mineral using sodium citrate in a concentration of 0.2 M at room temperature. The effect of pH in acid, neutral, and alkaline mediums is evaluated, where recovery of 99.9% of lead in alkaline media is achieved.

Keywords: lead, leaching, citrate, alkaline.

¹ Egresado de Ingeniería de Minas y Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, CDMX, México, davi963chu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5002-4594>

² * Doctor en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica, Departamento de Ingeniería de Minas y Metalurgia – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, dcalla@unam.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2848-4388>

³ Doctor en Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Minas y Metalurgia – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, jesantos@unam.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1729-9382>



INTRODUCCIÓN

La recuperación de plomo mediante métodos alternativos a la fundición es una opción que debe ser considerada para la reducción de la demanda energética, los problemas ambientales y de salud pública relacionados con las técnicas tradicionales. Los procesos pirometalúrgicos utilizados en la recuperación del plomo derivados de la refinación de minerales de zinc y plata requieren altas temperaturas y generan grandes cantidades de gases tóxicos y polvos contaminantes. Estos procesos implican varias fases de purificación, lo que aumenta la complejidad de mismo. Por otro lado, los polvos deben ser tratados de manera exhaustiva para evitar su liberación a la atmósfera y su deposición en aguas utilizadas para el consumo humano. Por estas razones, es importante evaluar métodos alternativos de recuperación del plomo que sean más eficientes y menos perjudiciales para el medio ambiente. Estos métodos alternativos pueden incluir tecnologías para la obtención de plomo a través de procesos hidrometalúrgicos o electrometalúrgicos, los cuales son considerados menos tóxicos y más eficientes para el aprovechamiento del plomo [1].

El plomo es uno de los metales con mayor demanda a nivel mundial [2] y se estima que más del 80% de este metal se aprovecha a partir del reciclaje de piezas y baterías de automóviles que se han desechado [3]; del restante solo se aprovechan minerales como la galena (PbS) y cerusita ($PbCO_3$) mediante procesos pirometalúrgicos donde es necesario el control de algunas variables operativas en la producción y tratamiento de gases peligrosos, así como el tratamiento y confinamiento de los residuos generados [4]. Los minerales de plomo, en algunos casos, se encuentran asociados a la plata, cobre, hierro, zinc, entre otros [5]; este

tipo de asociaciones son de interés por sus contenidos de plata, cobre y zinc, dejando al plomo una operación secundaria; donde a partir de la concentración de plomo se decide si se trata o se envía a la presa de jales para su confinamiento. Otra vía de uso del plomo se encuentra en el tratamiento de residuos generados en diversas industrias y etapas de algunos procesos como, escorias de fundición [5] dónde se han reportado concentraciones altas derivado del mal control del proceso, y en el desecho de tubos catódicos que puede ser reprocesados para la recuperación de este metal por tratamientos piro e hidrometalúrgicos [6].

La lixiviación de minerales es un método de disolución acuosa que requiere del control de la concentración de los reactivos químicos, pH y temperatura necesaria para llevar a cabo la disolución selectiva de ciertos elementos de interés a partir de minerales. Para la disolución del plomo en medio acuoso, el uso de agentes orgánicos como el citrato de sodio es una alternativa interesante debido a la formación de complejos estables con el plomo y puede ser usado en el tratamiento de materiales con contenido de este metal. En medio ácido, la lixiviación de cerusita ($PbCO_3$) alcanza el 80% de la disolución del plomo a las seis horas [7]; en medio alcalino [8] los materiales de reciclaje provenientes de baterías de automóviles de desecho, la lixiviación con citrato de sodio y ácido acético para la obtención pastas [9]. Por lo tanto, para la recuperación de metales a partir de minerales sulfurados y materiales refractarios de desecho es necesario la implementación de procesos de lixiviación a condiciones exhaustivas (concentración de reactivos y temperatura) [10]; además de la implementación de una etapa de pretratamiento del material para que el proceso de disolución se lleve a cabo. Este trabajo presenta una alternativa para la recuperación de plomo a través del



proceso de lixiviación a temperatura ambiente con citrato a temperatura ambiente con la finalidad de reemplazar los métodos convencionales; la recuperación de plomo se realiza mediante lixiviación de un mineral de galena con alto contenido de plomo usando como lixivante al citrato de sodio a baja concentración (0.2 M) y evaluar el efecto del pH en medio ácido, neutro y alcalino, asimismo se presenta el efecto del peróxido de hidrógeno (0.1 M) como oxidante durante la disolución de plomo.

EXPERIMENTAL

Caracterización del mineral

El trabajo se realizó con un mineral de galena proveniente de una planta de tratamiento de minerales del estado de Zacatecas-México. Este mineral se redujo a una fracción de tamaño en un mortero de ágata. Las especies minerales presentes en la muestra se determinaron por difracción de rayos X (Advance D8), en un intervalo de 2° a 90° para un ángulo de 2θ a la velocidad de $8^\circ/\text{min}$, y el contenido metálico se determinó por digestión ácida. La muestra se redujo de tamaño menor que $53 \mu\text{m}$ en un mortero de ágata y una fracción representativa del todo el mineral de 0.1 g se pasó a digestión con agua regia (75% HCl y 25% HNO_3), la solución obtenida se analizó en un espectrómetro de absorción atómica (SpectrAA Varian AA220).

Materiales y equipos

Todas las soluciones utilizadas en este trabajo fueron preparadas con reactivos de grado químico, agua desionizada, citrato de sodio ($\text{NaH}_2(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}(\text{COO})_3)$), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxido de sodio (NaOH), marca Meyer.

Las pruebas se realizaron en un reactor de agitación orbital (SK-300, figura 1) con matraces Erlenmeyer de 250 mL (pyrex), en los cuales se tomaron los datos de pH y ORP; así como las muestras en los tiempos establecidos, estas muestras se filtraron con ayuda de filtro (PTFE $0.22 \mu\text{m}$)



para su análisis por absorción atómica. Los valores de pH y ORP fueron tomados con ayuda de un medidor multiparámetro Hanna S-5521, para las lecturas del potencial redox relativas al electrodo de hidrógeno estándar, Eh (SHE) se calculó con la lectura del electrodo de platino ORP/Redox (E) y el potencial desarrollado por la parte del electrodo de referencia relativo al SHE (E_{ref}) a 25°C ($E_h = E + E_{\text{ref}}$).



Figura 1. Reactor experimental con el multiparámetro para toma de datos y muestras.

Para el trabajo se realizaron una serie de pruebas, con el mineral de galena (PbS) y la solución de citrato de sodio a una relación sólido/líquido de 3 g/L, 0.2 M de citrato y se evaluó la presencia del peróxido de hidrógeno como agente oxidante en el sistema a 0.1 M a diferentes valores de pH 5, 6, 7, y 8 a una velocidad de 250 revoluciones por minuto y temperatura ambiente de 25°C (tabla 1). El tiempo total de las pruebas de lixiviación fue de 10 horas, donde se tomaron muestras a intervalos de 1, 2, 4, 6, 8 y 10 horas, además se realizó el ajuste de condiciones pH con ácido sulfúrico diluido. Todas las pruebas se realizaron en el laboratorio de metalurgia en la Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional Autónoma de México y en la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

Tabla 1. Condiciones para las pruebas de lixiviación.

Parámetro	Valor
Volumen, mL	100
Peso del mineral, g/L	3
Concentración de citrato, M	0.2
Concentración de peróxido, M	0.1
pH	5, 6, 7, y 8
Tiempo, h	10
Velocidad de agitación, rpm	250

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Caracterización

La muestra proveniente del estado de Zacatecas fue pulverizada a una fracción de tamaño de partícula de -53/+44 μm y fue analizada en un equipo de difracción de rayos X, la figura 2 muestra el difractograma obtenido con la muestra, donde se observa la presencia los picos representativos de la galena (1-01-0880) y ruido asociado al tamaño de partícula; el contenido metálico determinado por digestión ácida se presenta en la tabla 2 donde se tiene un contenido metálico de plomo del 69.87% con pequeñas trazas de hierro (0.19%) y cobre (0.28%).

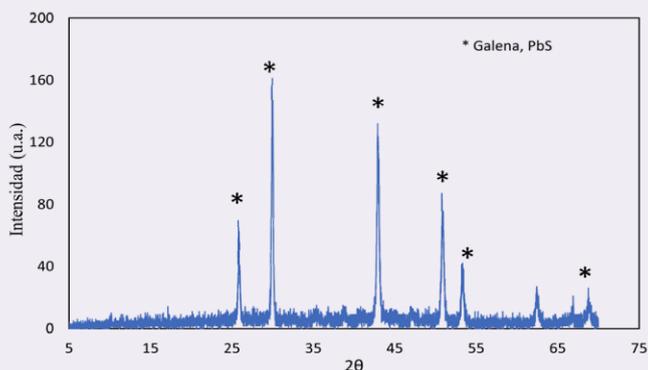


Figura 2. Difractograma de Rayos X de la muestra.

Tabla 2. Contenido metálico de la muestra.

Contenido Metálico (%)		
Pb	Fe	Cu
69.87	0.19	0.28

Lixiviación

Las pruebas de lixiviación se realizaron con la finalidad de evaluar la disolución del mineral de galena en presencia del citrato (0.2 M) a diferentes valores de pH en ausencia y presencia de peróxido de hidrógeno como oxidante.

Para estudio de las condiciones de las pruebas de lixiviación fue necesario la construcción de algunos diagrama-



mas de predominancia (Eh-pH, Pourbaix) por lo que se establecieron los equilibrios químicos presentados en la tabla 3.

Tabla 3. Constantes termodinámicas para las reacciones del sistema plomo-citrato a 25°C [11].

Reacción	Log K	Ecuación
$\text{Pb}^{2+} + \text{H}^+ + \text{cit}^{3-} = \text{Pb}(\text{Hcit})$	11.21	(1)
$\text{Pb}^{2+} + \text{H}^+ + 2\text{cit}^{3-} = \text{Pb}(\text{Hcit})(\text{cit})^{3-}$	-12.75	(2)
$2\text{Pb}^{2+} + 2\text{cit}^{3-} = \text{Pb}_2(\text{cit})_2^{2-}$	-14.06	(3)
$2\text{Pb}^{2+} + 2\text{cit}^{3-} = \text{Pb}_2(\text{Cit})_2(\text{OH})_2^{4-} + 2\text{H}^+$	-1.96	(4)

La figura 3, presenta el diagrama de distribución de especies para el sistema citrato-agua a 25°C, este diagrama permite establecer la zona de estabilidad de las especies de citrato presentes en el sistema evaluado, donde a los valores de pH ensayados en las pruebas de lixiviación (5, 6, 7 y 8) se tienen las especies de HCit^{2-} y Cit^{3-} .

[cit³⁻] = 0.2 M

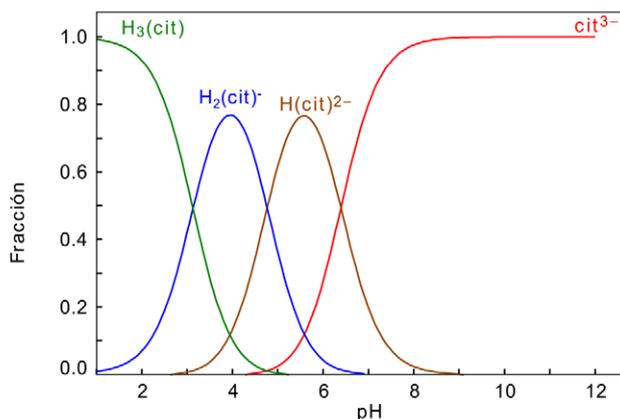


Figura 3. Diagrama de distribución de especies para el sistema citrato-agua, 0.2 M citrato a 25°C.

Finalmente, las zonas de predominancia de las especies del sistema citrato (Pb-cit) a 25°C (figura 4) se determinaron con ayuda de los equilibrios electroquímicos y químicos presentes en el sistema a través de las ecuaciones (5 y 6), donde E y E° representan el potencial de celda y potencial estándar respectivamente (V), R es la constante de los gases ideales (8.314 J/mol·K), T es la temperatura en grados Kelvin (T, °C + 273.15), n es el número de electrones transferidos en la reacción, F es la constante de Faraday (96,485 C/mol).

$$E = E^{\circ} - \frac{2.303 RT}{nF} \text{Log } K \quad (5)$$

$$\Delta G^{\circ} = -2.303 RT \text{Log } K \quad (6)$$

La figura 4, muestra las zonas de predominancia para el sistema plomo-citrato calculados con las constantes presentadas en la tabla 3 y las Ecuaciones 5, 6 y la ecuación de Nernst (Ecuación 7), donde se puede observar que en el rango de pH ensayado se tienen la presencia de la especie $Pb(cit)^-$ por lo que se espera que la disolución del mineral se realice con toda facilidad, para poder obtener el complejo Pb-Cit.

$$E = E^0 - \frac{2.303 RT}{n} \text{Log}K \quad \text{a } 25^\circ\text{C} \quad (7)$$

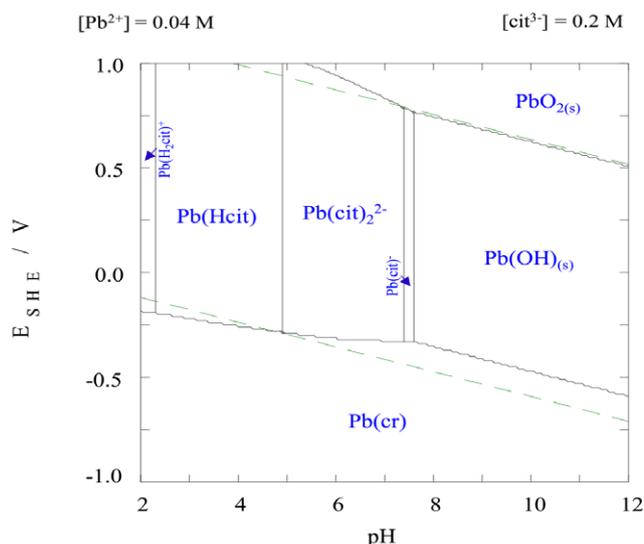


Figura 4. Diagrama de predominancia para el sistema plomo-citrato para 0.04 M Pb y 0.2 M citrato a 25°C [12].

Efecto del pH y H_2O_2

La figura 5, presenta los resultados de las pruebas de lixiviación del mineral a diferentes valores de pH y una concentración de 0.2 M de citrato; para estas pruebas, la recuperación de plomo presente en la muestra de galena tiene un comportamiento inestable durante el proceso de lixiviación del plomo contenido en la galena a pesar de la presencia del citrato. La recuperación del plomo es menor que 29%, el citrato tiene la capacidad de formar complejos es-

tables con el plomo a los valores de pH ensayados (figura 4). Es importante mencionar que en estas pruebas no se utilizaron agentes oxidantes o reductores que faciliten el proceso de disolución de la galena.

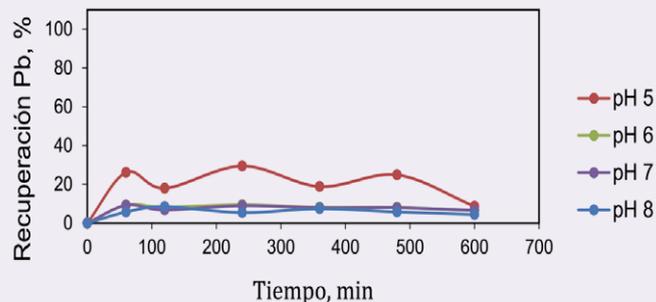


Figura 5. Recuperación de plomo en pruebas sin peróxido de hidrógeno a diferentes pH.

En la figura 5 se obtiene una recuperación de plomo menor que 30% a todos los valores de pH ensayados y un potencial menor que 400 mV (figura 6), este comportamiento confirma la importancia del uso del agente oxidante en el proceso de lixiviación de la galena.

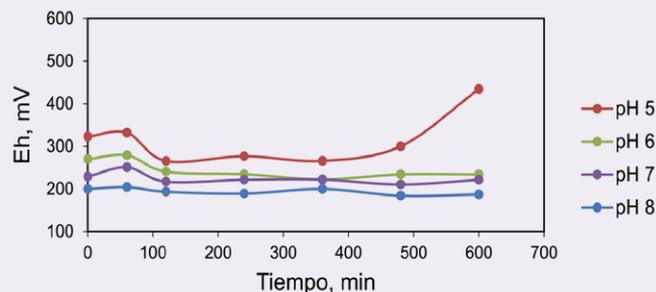


Figura 6. Potencial óxido-reducción para el sistema Pb-Cit sin oxidante a diferentes valores de pH.

La figura 7, muestra las zonas de predominancia para el sistema PbS-Cit a temperatura ambiente donde la estabilidad de PbS se extiende en todo el rango de pH y varía con respecto al potencial del sistema y el pH en la medida que el pH se incrementa de 6 a 8 la estabilidad de PbS disminuye.



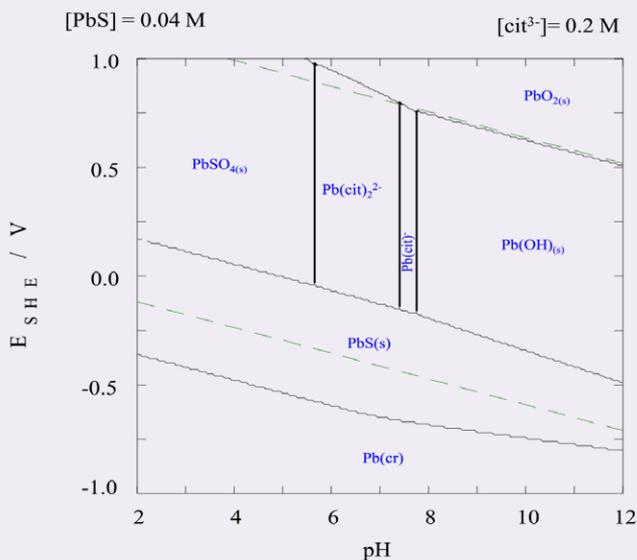


Figura 7. Diagrama de predominancia para el sistema PbS-Cit a diferentes valores de pH a 25 °C.

La figura 8, presenta la recuperación de plomo por lixiviación con citrato a diferentes valores de pH, a una concentración de 0.1 M de peróxido (H_2O_2) como agente oxidante. A estas condiciones en medio neutro y alcalino, pH 6, 7 y 8 se tienen altas disoluciones de plomo alcanzando 95.4, 99.7 y 99.9%, respectivamente; este comportamiento está relacionado a la formación del complejo plomo-citrato ($Pb-cit$, figura 6) esta zona de estabilidad del complejo se reduce en la medida que disminuye el valor del pH; por lo tanto, se tiene una menor recuperación a pH 6 (41.6 %) a los 600 min. A pH 8 se alcanza una mayor recuperación de plomo a tiempos menores de 60 min; sin embargo, este presenta un descenso en la recuperación de plomo a los 120 min este comportamiento puede estar relacionado a la formación de sólidos causando inestabilidad, en el sistema que a tiempos mayores de 500 min la recuperación de plomo se favorece debido a que se tiene una baja concentración de hierro en el sistema.

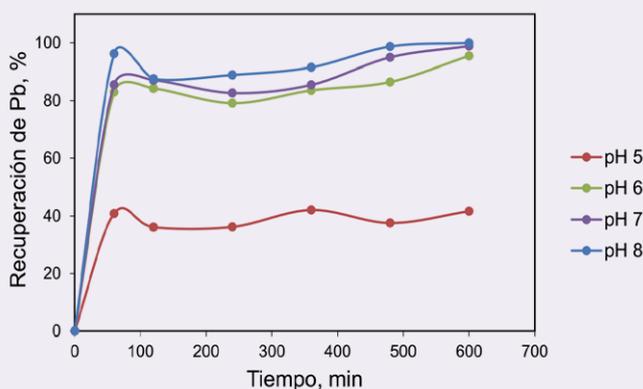


Figura 8. Recuperación de plomo para el sistema Pb-Cit a diferentes valores de pH con 0.1 M H_2O_2 .

El efecto del oxidante (H_2O_2) juega un rol importante debido a que un incremento del potencial de óxido-reducción (ORP) permite la disolución de PbS , cuando este no está presente en el sistema el valor de potencial es menor que 400 mV vs SHE (figura 6); al adicionar 0.1 M H_2O_2 el potencial del sistema se incrementa a un valor mayor que 400 mV vs SHE (figura 9). En cuanto a la recuperación de plomo, en presencia del peróxido de hidrógeno se presenta en la (figura 8), donde se tiene una mayor recuperación en el sistema neutro y alcalino (pH 7 a pH 8) con un porcentaje de disolución cercano al 96% a la primera hora de iniciada la prueba; en la medida que se modifica el pH a un medio ácido, el porcentaje de recuperación es de 80% para pH 6 y finalmente a pH 5 la recuperación disminuye a un valor de 40%. De acuerdo a este comportamiento se puede asegurar que el sistema de lixiviación alcalino es el más eficiente para la recuperación del plomo presente en la galena bajo las condiciones ensayadas.

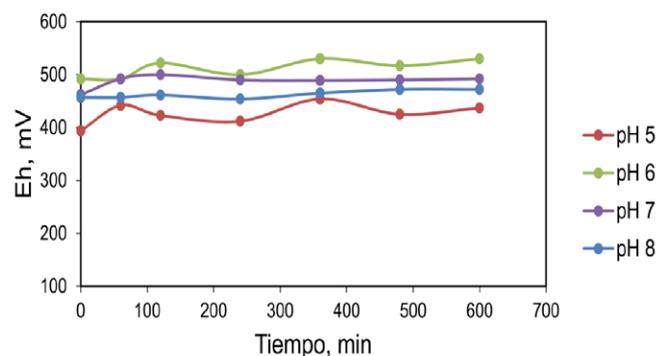


Figura 9. Potencial oxido-reducción para el sistema Pb-Cit con oxidante a diferentes valores de pH.

En cuanto al comportamiento de la disolución del hierro se presenta en la tabla 4, la disolución es menor que 2 ppm mostrando un comportamiento inestable por el contenido de la muestra y el valor de pH ensayado.

Tabla 4. Disolución de hierro a diferentes valores de pH y 0.2 M Cit, con 0.1 M H_2O_2 y sin H_2O_2 a 25 °C.

Disolución de hierro (ppm)		
pH	pruebas con peróxido	pruebas sin peróxido
5	2.10	0.6
6	0.89	1.2
7	1.40	0.3
8	0.03	0.8

La figura 10 presenta el diagrama de distribución de especies para el sistema hierro-citrato ($Fe-Cit$) donde a un pH mayor que 6 se tiene la presencia de Fe_2O_3 en forma sólida el cual es el posible responsable de la baja disolución del hierro en el sistema y promueve una mayor selectivi-



dad del citrato por el plomo. El comportamiento del cobre no forma parte del estudio debido a la baja concentración presente en el mineral.

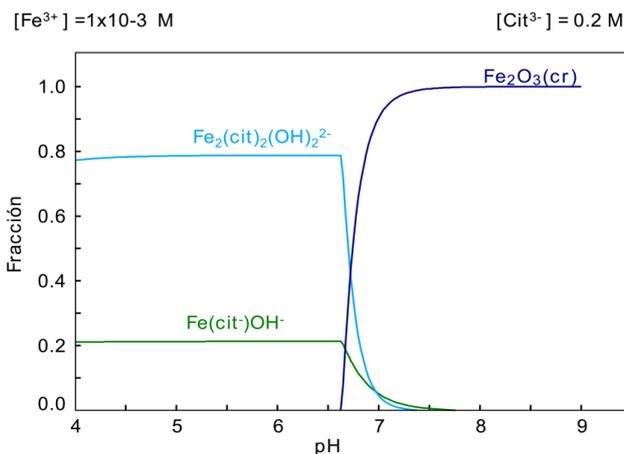


Figura 10. Diagrama de distribución de especies para el sistema Fe-Cit, $1 \times 10^{-3} Fe^{3+}$, 0.2 M Cit a 25°C.

En la figura 11A se puede observar el residuo generado del proceso de disolución de la galena con citrato sin peróxido donde este es incompleto para cualquier valor de pH (5, 6, 7, 8) al final de las pruebas se muestra casi la mitad en relación a la muestra inicial a diferencia la figura 11B muestra los residuos del proceso de lixiviación con oxidante donde disolución del mineral es completa para pH 8 y en medida que baja el valor del pH la disolución se ve afectada hasta llegar a un pH 5 donde queda una mayor cantidad del mineral sin disolver.

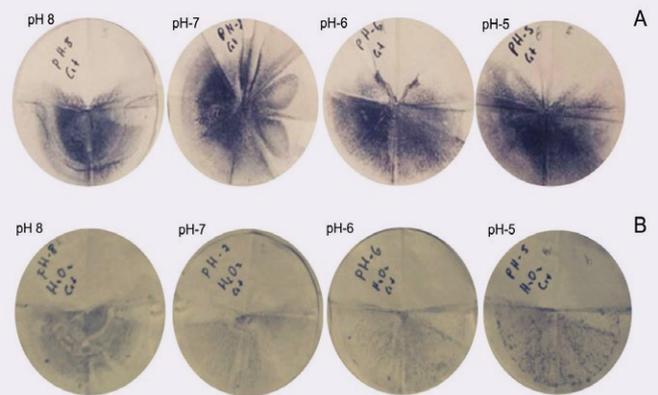


Figura 11. Residuos de la lixiviación, A sin oxidante, y B con oxidante

CONCLUSIONES

Para el sistema propuesto a pH 5, 6, 7 y 8 a temperatura ambiente 25 °C y a una velocidad de 250 rpm la disolución de plomo se lleva a cabo en presencia de citrato en una concentración de 0.2 M y peróxido de hidrógeno a 0.1 M, en medio alcalino se alcanza una mayor disolución de plomo en presencia del peróxido de hidrógeno, donde se consiguen resultados favorables para el plomo (99.9%) antes de llegar a la primera hora de lixiviación a pH 8. La disolución de hierro presenta una menor disolución (0.03 ppm) debido al potencial de oxidación alcanzado (mayor que 400 mV vs SHE) donde se propicia a la lixiviación selectiva de la galena. El uso del peróxido es determinante para que se lleve a cabo el proceso de disolución del plomo.

RECOMENDACIONES

Es necesario integrar al proceso de lixiviación de plomo una etapa de recuperación de los valores presentes en la solución por precipitación o electrodeposición tomando en cuenta los resultados mostrados hasta el momento, concentración de citrato y pH, se requiere de un método que no demandé exceso de reactivos, energía y tiempo para que pueda ser adoptado en la industria.

AGRADECIMIENTOS.

Investigación y experimentación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) "lixiviación selectiva de cobre y plomo a partir de sulfuros en medio alcalino con tiourea (Tu) y otros agentes orgánicos". Clave del proyecto: IA 10622.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] David O'Connor, Deyi Hou, Jing Ye, Yunhui Zhang, Yong Sik Ok, Yinan Song, Frederic Coulon, Tianyue Peng, Li Tian, (2018). "Lead-based paint remains a major public health concern: A critical review of global production, trade, use, exposure, health risk, and implications." *Environment International* 121: 85-101. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.052>.
- [2] United States Geological Survey, USGS (2021). Mineral Commodity Summary. Series definitions. USGS Publications Warehouse.
- [3] Chuh-Shun Chen, Yu-Jen Shih, Yao-Hui Huang (2016). Recovery of lead from smelting fly ash of waste lead-acid battery by leaching and electrowinning. *Waste Management*, 52, 212-220. [doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.056](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.056)
- [4] Y.S. Rammah, K.A. Mahmoud, M.I. Sayyed, F.I. El-Agawany, R. El-Mallawany (2020). "Novel vanadyl lead-phosphate glasses: P2O5-PbO-ZnONa2O-V2O5: Synthesis, optical, physical and gamma photon attenuation properties." *Journal of Non-Crystalline Solids* 534: 119944. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119944>

- [5] John, J. J., De Houwer, V., Van Mechelen, D., & Van Gerven, T. (2020). Effect of ultrasound on leaching of lead from landfilled metallurgical residues. *Ultrasonics Sonochemistry*, 69, 105239. [doi:https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105239](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105239)
- [6] Hou, Z., Peng, C., Guangyuan, M., Zhang, X., Zhang, L., & Lu, Z. (2022). Lead leaching behaviors during panel-funnel glass waste separation from cathode-ray tube glass using thermosol, acid etching or mechanical cutting methods. *Journal of Saudi Chemical Society*, 26(6), 101557. [doi:https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101557](https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101557)
- [7] Zárate-Gutiérrez, R. and G.T. Lapidus (2014). "Anglesite (PbSO4) leaching in citrate solutions." *Hydrometallurgy* 144-145: 124-128. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.02.003>
- [8] Xie, H., Xiao, X., Guo, Z., & Li, S. (2022). One-stage ultrasonic-assisted calcium chloride leaching of lead from zinc leaching residue. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 176, 108941. [doi:https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108941](https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108941)
- [9] Xinfeng Zhu 1, Xiong He, Jiakuan Yang, Linxia Gao, Jianwen Liu, Danni Yang, Xiaojuan Sun, Wei Zhang, Qin Wang, R Vasant Kumar.(2013) "Leaching of spent lead acid battery paste components by sodium citrate and acetic acid," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 250-251, pp. 387-396, 2013/04/15/ 2013.
- [10] G. Han, P. Wang, C. Zhu, B. Liu, S. Su, and Y. Huang, "Synchronous extraction of Mn, Pb, Sn, and Se from hazardous electrolytic manganese anode slime (EMAS) via sulfidation transformation and leaching: Rapid separation and sulfidation mechanism," *Minerals Engineering*, vol. 184, p. 107657, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107657>
- [11] NIST (2004). Critically Selected Stability Constants of Metal Complexes. Version 8.0.
- [12] Puigdomenech, I. (2004). Make equilibrium diagrams using sophisticated algorithms (MEDUSA), inorganic chemistry. Stockholm, Sweden

Cómo citar este artículo:

Pantaleón Tolentino, D. M., Calla Choque, D., & Santos Jallath, J. E. (2023). Lixiviación de plomo con citrato a partir de un mineral de galena, efecto del pH. *EPISTEMUS*, 17(34). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.273>

