

Evaluación de la concentración de EDTA en la lixiviación de plata en relaves mineros con Tiourea

Evaluation of EDTA concentration in silver leaching in mine tailings with Thiourea

E.S. Llanos-Blancas ^a, Juárez-Tapia ^a, M. Reyes-Pérez ^a, I. A. Reyes-Domínguez ^b, M. Ramírez-Cardona ^a, E.J. Muñoz-Hernández ^{a,c*}

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

^b Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí 78210, México.

^c Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Mineral de la Reforma, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Resumen

El presente estudio evalúa la influencia del ion etilendiaminetetraacético (EDTA⁴⁻) en la lixiviación de plata (Ag) a partir de relaves mineros utilizando tiourea (TU, CS(NH₂)₂) como agente lixivante. Para caracterizar la muestra, se emplearon las técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) y Fluorescencia de Rayos X (FRX). Posteriormente, se investigó el efecto de la concentración de EDTA y la temperatura en la eficiencia de lixiviación de Ag y disolución de cobre (Cu) y hierro (Fe).

Los resultados experimentales muestran que la máxima lixiviación de plata fue de 94% y esta se alcanzó con una concentración de TU = 0.3 M L⁻¹ y EDTA = 0.007 M L⁻¹, a una temperatura de 65°C, un pH de 1.5 y una velocidad de agitación de 800 min⁻¹ en un volumen de solución de 0.5 L.

Palabras Clave: Tiourea-EDTA, Plata, Cobre, Hierro, Relaves minerales.

Abstract

The present study evaluates the influence of ethylenediaminetetraacetic ion (EDTA⁴⁻) on silver (Ag) leaching from mine tailings using thiourea (TU, CS(NH₂)₂) as a leaching agent. To characterize the sample, X-Ray Diffraction (XRD), Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES) and X-Ray Fluorescence (XRF) techniques were employed. Subsequently, the effect of EDTA concentration and temperature on the leaching efficiency of Ag and dissolution of copper (Cu) and iron (Fe) was investigated.

The experimental results show that the maximum silver leaching was 94% and this was achieved with a concentration of TU = 0.3 M L⁻¹ and EDTA = 0.007 M L⁻¹, at a temperature of 65 °C, a pH of 1.5 and an agitation speed of 800 min⁻¹ in a solution volume of 0.5 L.

Keywords: Thiourea-EDTA, Silver, Copper, Iron, Mineral tailings.

1. Introducción

El aumento en la demanda de metales de alto valor, junto con la creciente conciencia ambiental, ha impulsado la exploración de métodos de extracción más sostenibles (Economía, 2023) (Jiwei Zhang et al., 2023). En este contexto, los relaves mineros, tradicionalmente considerados desechos, han cobrado relevancia al descubrirse que contienen cantidades significativas de metales valiosos. Esto los posiciona como una fuente potencial de materias primas, siempre que se implementen prácticas de gestión adecuadas

(Bandehzadeh Masoud et al., 2016) (Chang Lei et al., 2018) (A. Ruiz-Sanchez et al., 2023).

Entre los metales que más destacan en este tipo de residuos, se encuentra la plata (Ag), un elemento ampliamente utilizado en diversos sectores industriales y tecnológicos. Su extracción tradicional se ha basado en el proceso de cianuración, el cual es reconocido por su viabilidad económica (Hernán Islas et al., 2021). Sin embargo, el uso de cianuro (CN⁻) ha generado serias preocupaciones debido a su alta toxicidad, lo que representa riesgos ambientales y para la salud (Xiuping Chen et al.,

*Autor para la correspondencia: mu449806@uaeh.edu.mx

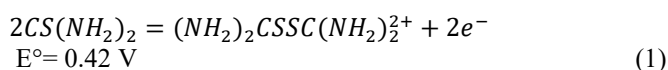
Correo electrónico: ll407006@uaeh.edu.mx (Edith Sarai Llanos Blancas), jcjuarez@uaeh.edu.mx (Julio César Juárez Tapia), mreyes@uaeh.edu.mx (Martín Reyes Pérez), alejandro.reyes@uaslp.mx (Iván Alejandro Reyes Domínguez), mariusr@uaeh.edu.mx (Màrius Ramírez Cardona), mu449806@uaeh.edu.mx (Erick Jesús Muñoz Hernández)*.

2023). Además, este método presenta limitaciones operativas, como tiempos de lixiviación prolongados y baja selectividad (Johnson et al., 2015), (Jaszczak et al., 2017).

Frente a estos desafíos, varios grupos de investigación han propuesto el uso de tiourea (TU, $CS(NH_2)_2$) como alternativa al cianuro para la lixiviación de Ag (Erick Jesús Muñoz Hernández et al., 2025a), (G.T.Lapidus et al., 2020) y (Xue-yi Guo et al., 2020). Entre sus ventajas destacan la posibilidad de realizar el proceso en un medio ácido (pH 1-3), alcanzando tasas de recuperación de hasta el 99% en periodos relativamente cortos (aproximadamente 4 horas), así como su baja toxicidad en comparación con el cianuro, lo que la convierte en una opción más amigable con el medio ambiente (Z.Gamiño-Arroyo et al., 2021), (Ahamed Ashiq et al., 2019), (M.G. Aylmore et al., 2016).

No obstante, la implementación de tiourea no está exenta de desafíos. De acuerdo, con los estudios realizados por (Calla et al., 2016) y (Lapidus et al., 2020), la oxidación de la TU genera disulfuro de formamidina (FDS, $[(NH_2)_2CSSC(NH_2)_2]^{2+}$) (ecuación 1), proceso que se ve favorecido por un aumento en el potencial redox (aproximadamente 0.5 V vs SHE), derivado de la presencia de los iones de hierro (Fe^{3+}) y cobre (Cu^{2+}), los cuales suelen estar presentes en la solución debido a la composición de la muestra, afectando negativamente la eficiencia de la lixiviación de Ag.

Si bien el FDS puede actuar como agente oxidante, su estabilidad es limitada, ya que se descompone en TU, cianamida (CH_2N_2) y azufre elemental (S^0), como se muestra en la Ecuación 2. El S^0 producido es una especie indeseable, debido a que provoca la pasivación de la superficie mineral y disminuyen la lixiviación de Ag (BERG et al., 1947), (M. Elena Poisot-Díaz et al., 2008), (Marsden et al., 2006).



Para resolver este inconveniente, se ha optado por la incorporación de ligandos orgánicos como el ion oxalato ($C_2O_4^{2-}$) y el ion etilendiaminotetraacético ($EDTA^{4-}$) (Muñoz-Hernández et al., 2023), (G.T.Lapidus et al., 2020) y (A. Ruiz-Sánchez et al., 2020a).

El $EDTA^{4-}$, es un ligando hexadentado ampliamente reconocido por su capacidad para formar complejos estables con diversos iones metálicos (Barton, 2023), (G. Anderegg, 1997). Estudios recientes, como los realizados por (Li et al., 2021), (Zhang et al., 2018) y (Puente-Siller et al., 2013), han demostrado que su inclusión en procesos de lixiviación puede mejorar significativamente la disolución de Ag, alcanzando tasas de recuperación de hasta un 90 %.

El objetivo de este estudio es evaluar el efecto de la concentración de EDTA en la lixiviación de plata presente en relaves, así como en la disolución de cobre (Cu) y hierro (Fe). Para ello, primero se llevó a cabo una caracterización mineralógica mediante Difracción de Rayos X (DRX) y un análisis químico mediante Espectrometría de Emisión de Plasma Acoplada por Inducción (ICP-OES) y Fluorescencia de Rayos X (FRX). Posteriormente, se realizaron pruebas experimentales en el laboratorio, variando la concentración

de EDTA y analizando el efecto de la temperatura en el proceso de lixiviación.

2. Metodología

2.1 Preparación del relave minero

La muestra utilizada en este estudio fue obtenida de los relaves mineros del distrito de Zimapán, Hidalgo, México, específicamente de la empresa 'El Espíritu'. Con el fin de obtener una muestra representativa, se implementaron los protocolos establecidos por (Erick Jesús Muñoz Hernández et al., 2024b) y (A. Ruiz-Sánchez et al., 2023b). El proceso incluyó cuarteo y homogeneización de la muestra, seguido de un tamizado con mallas 270 y 400 de la serie Tyler, ajustando el tamaño de las partículas a un rango de -56 a $+37 \mu\text{m}$, hasta alcanzar un total de 1 kg.

2.2 Caracterización mineralógica y química del relave minero

Para determinar la mineralogía presente en la muestra, se analizaron 5 g mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX). El análisis se llevó a cabo utilizando un difractor de rayos X EQUINOX 2000, con radiación $Co-K\alpha_1$ (1.789010 \AA), operando a 30 mA, 20 kV y un voltaje de 220 V. La identificación de las fases mineralógicas se realizó con el software Match 3, empleando la base de datos 'Crystallography Open Database' (COD) Inorganic.

Posteriormente, para conocer el contenido elemental de Ag, Cu y Fe, se llevó a cabo una caracterización química. Para ello se tomó aproximadamente 1 g de muestra en polvo y se colocó en un matraz Erlenmeyer. A continuación, se agregaron 20 ml de agua regia (mezcla de HNO_3 y HCl en proporción 1:3), la mezcla fue calentada en una plancha Thermo Scientific HP88857190, a 75°C , durante 60 minutos. La solución obtenida se transfirió a un matraz aforado de 100 ml y fue analizada mediante Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado por Inducción (ICP-OES), utilizando un equipo Perkin Elmer Modelo 8300.

Finalmente, el resto de los elementos se estimaron mediante la técnica de Fluorescencia de rayos X (FRX), siguiendo el procedimiento descrito por (A. Ruiz-Sánchez et al., 2023b). La muestra se analizó utilizando el modo Geochem, en el analizador portátil Olympus Delta XRF.

2.3 Sistema de lixiviación

En las pruebas experimentales de lixiviación, se empleó una parrilla de calentamiento, sobre la cual se colocó un reactor de 0.5 litros. Para asegurar una adecuada suspensión de las partículas, se utilizó un motor de agitación IKA, modelo EW 20, equipado con una hélice de teflón. El monitoreo del pH y la temperatura se llevó a cabo mediante un potenciómetro Ultra Triode Combination Electrodes Thermo Scientific Orion, junto con su correspondiente electrodo de pH/ATC.

Durante el proceso, se tomaron alícuotas de 10 ml en distintos intervalos de tiempo para cuantificar las concentraciones de Ag, Cu y Fe. La evolución de la reacción se evaluó mediante Espectrometría de Emisión de Plasma Acoplada por Inducción (ICP).

Para la ejecución de los experimentos, se utilizaron los siguientes reactivos: tiourea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$, 99%), EDTA (ácido etilendiaminotetraacético, $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$, 99.9%) y ácido sulfúrico (H_2SO_4 , 98%) para la regulación del pH. En todos los experimentos se utilizó agua desionizada (ultrapura, $\approx 18 \text{ m}\Omega \text{ cm}$).

Las condiciones experimentales utilizadas en este estudio se presentan en la Tabla 1. Se establecieron como referencia los siguientes parámetros: $[\text{TU}] = 0.3 \text{ M}$, $[\text{EDTA}] = 0.007 \text{ M}$, 10 g de muestra, $\text{pH} = 1.5$, $T = 30^\circ\text{C}$ y 800 rpm durante la lixiviación.

Tabla 1. Condiciones experimentales en el estudio de lixiviación.

Parámetros	Condiciones experimentales
Tiourea [M]	0.3
EDTA [M]	0, 0.003, 0.005, 0.007 y 0.014
Radio de partícula (r_0) (μm)	-56 +37
pH	1.5
Temperatura ($^\circ\text{C}$)	20, 30, 55 y 65
Velocidad de agitación (min^{-1})	800
V (L)	0.5
Tiempo (minutos)	60
Muestra (g)	10

El porcentaje de lixiviación de cada elemento se calculó de acuerdo con la ecuación 3 (Erick Jesús Muñoz Hernández et al., 2025).

$$X_m = \frac{C_E \cdot V}{M \cdot x} \times 100 \% \quad (3)$$

Donde C_E es la concentración del elemento medida por ICP-OES (mg/L) en el reactor de lixiviación, V es el volumen total de solución (L), x es la fracción de masa del metal (%), M es la masa de relave utilizada durante la lixiviación (g).

3. Resultados y discusión

A continuación, se muestran los resultados de las técnicas de caracterización utilizadas y las curvas de disolución correspondientes al proceso de lixiviación.

3.1. Análisis mineralógico y químico del relave

El análisis de difracción de rayos X (DRX) del relave se presenta en la Figura 1. En el difractograma se identificaron especies mineralógicas mayoritarias, como pirita [(FeS₂) (96-901-0012)], arsenopirita [(FeAsS) (96-210-4742)], calcita [(CaCO₃) (96-101-0963)] y microclina [(KAlSi₃O₈) (96-900-5304)]. Estas fases mineralógicas han sido reportadas previamente en estudios realizados en la zona por (Raúl MORENO TOVAR et al, 2009a, 2012b) lo que confirma su presencia en el la muestra analizada.

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis químico de la muestra de relave, obtenidos mediante ICP-OES y FRX. La técnica de FRX es ampliamente reconocida por su rapidez y carácter no destructivo, mientras que el ICP-

OES proporciona una mayor sensibilidad para la detección de elementos en bajas concentraciones.

El análisis revela que los elementos mayoritarios en la muestra son Fe (186.36 kg/t (concentración promedio)), azufre ((S), 292.4 kg/t (concentración promedio)) y calcio ((Ca), 107.01 kg/t (concentración promedio)), los cuales están relacionados con las especies mineralógicas previamente detectadas por DRX. La heterogeneidad en la composición metálica de los relaves mineros es evidente en los resultados (A. Ruiz-Sanchez et al., 2023b), lo que resalta la variabilidad en la distribución de los elementos dentro del material de estudio. Finalmente, para el caso de la plata la concentración promedio fue de 55.35 g/t.

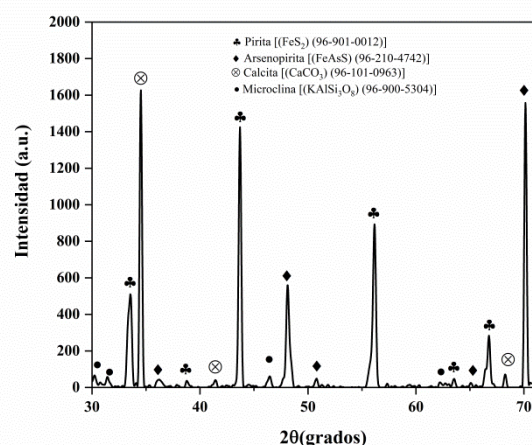


Figura 1. Difractograma de rayos X correspondiente a los relaves de la mina El Espíritu, Zimapán, Hidalgo.

Tabla 2. Composición elemental de la muestra de relave

Elemento	Composición elemental (Kg/t)		Promedio (Kg/t)
	FRX	ICP-IOES	
Ag (g/t)	52	58.7	55.35
Cu	1.36	1.17	1.17
Fe	303.3	69.41	186.36
Ca	135.2	78.82	107.01
Mg	52.9	4.29	28.59
Zn	50.6	3.42	27.01
Pb	12.9	3.00	7.95
As	10.5	22.97	16.74
Mn	2.86	0.98	1.92
S	292.4	-	-
Si	46.9	-	-
Al	14.9	-	-
K	3.85	-	-

3.2. Concentración de EDTA

Para evaluar el impacto del EDTA en la lixiviación de Ag, Cu y Fe, se estableció una concentración fija de 0.3 M L⁻¹ de

tiourea (TU), así como los parámetros experimentales definidos en la metodología (Sección 2.3).

En la figura 2, se muestran los perfiles de lixiviación de la plata. Se observa que el incremento de la concentración de EDTA favorece la lixiviación de Ag, alcanzado un máximo de 90.54% al utilizar una concentración de 0.014 M L⁻¹, al término del experimento. Este comportamiento se atribuye a la formación de complejos solubles de plata con tiourea, específicamente Ag(CS(NH₂)₂)₂⁺ y Ag(CS(NH₂)₂)₃⁺, los cuales presentan una alta estabilidad en medio ácido, como se muestra en el diagrama de Pourbaix (Figura 3), generado con el software MEDUSA© (Puigdomenech, 2004). Las reacciones asociadas a la formación de estos complejos se describen en las ecuaciones (3) y (4).

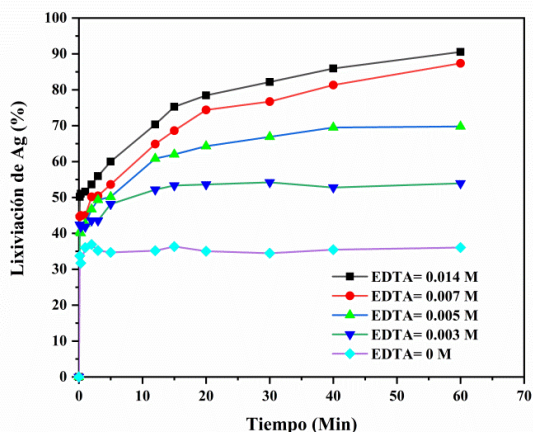
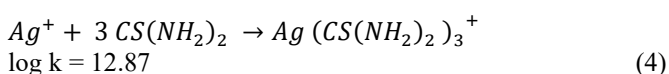
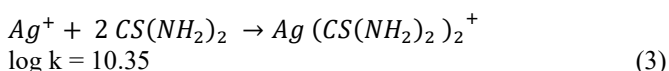


Figura 2. Curvas de Lixiviación de Ag. [TU]= 0.3 M L⁻¹, [EDTA] 0, 0.003, 0.005, 0.007 y 0.0140 M L⁻¹, muestra 10 g, pH=1.5, T= 30 °C, velocidad de agitación = 800 min⁻¹, volumen de solución de 0.5 L, r_o= -56 +37 μm.

[Ag⁺]_{TOT} = 10.26 μM
 [EDTA⁴⁻]_{TOT} = 14.00 mM
 [CS(NH₂)₂]_{TOT} = 300.00 mM

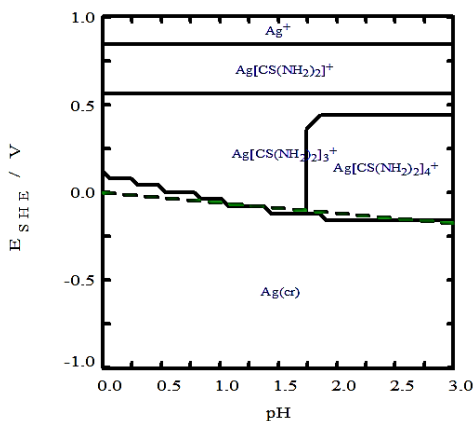


Figura 3. Diagrama Eh-pH para [Ag] = 1.026×10⁻⁵ M con 0.3 M de Tiourea y 0.014 M de EDTA a 25 °C. Diagrama generado con el software MEDUSA©.

A partir del análisis previo, se observa que el aumento en la concentración de EDTA de 0 M a 0.014 M L⁻¹ favorece la

disolución de Cu (Figura 4) y Fe (figura 5), aunque con un impacto moderado. Esto se debe a que el EDTA exhibe una afinidad significativamente mayor por estos metales, formando complejos altamente estables (Ecuaciones 5-8), lo que limita su disponibilidad para reaccionar con la tiourea. En contraste, los complejos generados entre Cu, Fe y tiourea (Ecuaciones 9-13) presentan constantes de estabilidad menores, indicando una menor afinidad en comparación con los complejos formados con EDTA. Este comportamiento sugiere que la presencia de EDTA en la solución lixivante no solo estabiliza el sistema, sino que también permite una lixiviación más selectiva de Ag.

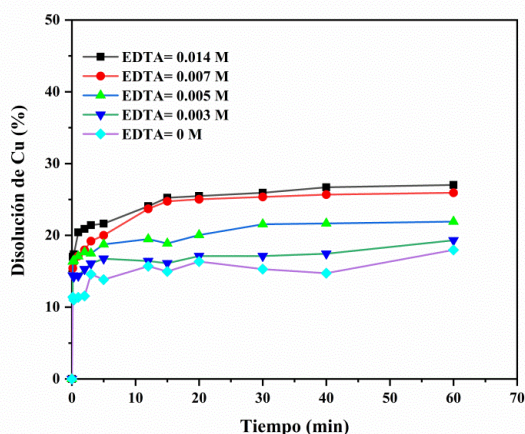


Figura 4. Curvas de Lixiviación de Cu. [TU]= 0.3 M L⁻¹, [EDTA] 0, 0.003, 0.005, 0.007 y 0.0140 M L⁻¹, muestra 10 g, pH=1.5, T= 30 °C, velocidad de agitación = 800 min⁻¹, Volumen de solución de 0.5 L, r_o= -56 +37 μm.

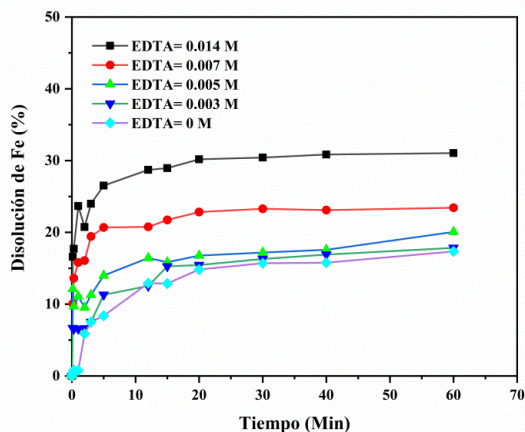
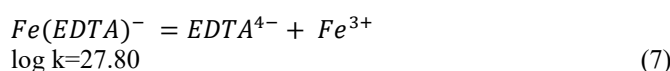
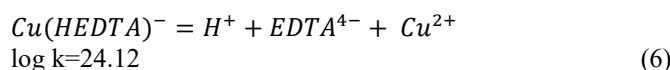
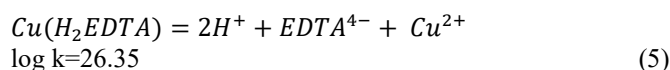
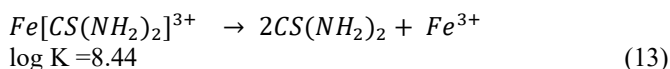
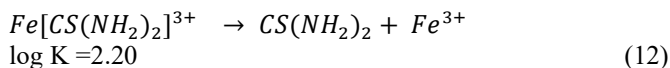
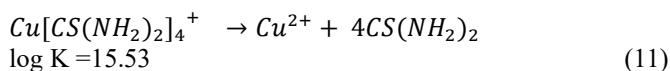
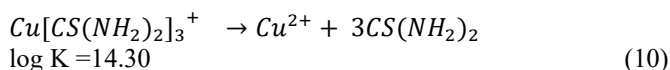
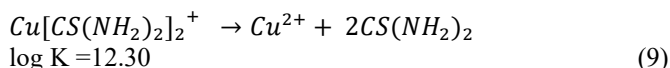
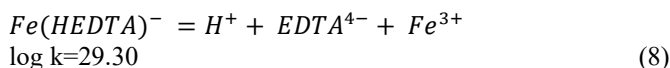


Figura 5. Curvas de Lixiviación de Fe. [TU]= 0.3 M L⁻¹, [EDTA] 0, 0.003, 0.005, 0.007 y 0.0140 M L⁻¹, muestra 10 g, pH=1.5, T= 30 °C, velocidad de agitación = 800 min⁻¹, Volumen de solución de 0.5 L, r_o= -56 +37 μm.





Por ende, cuando únicamente se emplea tiourea como agente lixiviante, sin la adición de EDTA, los porcentajes máximos de extracción alcanzados son 36.04% para Ag (figura 2), 17.97% para Cu (figura 4) y 17.34% para Fe (figura 5), a los 60 minutos, evidenciando la menor eficiencia del proceso en ausencia del ligando orgánico.

3.3. Efecto de la Temperatura

La Figura 6 presenta los perfiles de lixiviación de plata en función de la temperatura. Durante los primeros 20 minutos, la recuperación de Ag aumenta del 62.28% al 80.73% conforme la temperatura se incrementa de 20°C a 65°C. Sin embargo, al comparar los valores máximos obtenidos a 55°C y 65°C, se observa que la diferencia es mínima, con valores finales de 93.12% y 94%, respectivamente, al término de los experimento.

Estudios previos realizados por (Mohammed R. Ahmed, 2020) y (Daniel A. Ray, 2022) reportan que la descomposición de la tiourea se acelera a temperaturas superiores a 40°C, reduciendo su eficiencia como agente lixiviante. No obstante, los resultados obtenidos en este estudio sugieren que, a pesar del aumento de temperatura, la recuperación de plata no se ve afectada negativamente. Esto podría atribuirse a la presencia de EDTA, que posiblemente estabiliza la tiourea y evita su degradación térmica. Sin embargo, un análisis detallado de este mecanismo queda fuera del alcance del presente estudio.

Finalmente, el aumento de la temperatura también favoreció la disolución de Cu y Fe, como se observa en las Figuras 7 y 9, respectivamente. Para el cobre, los porcentajes de disolución alcanzaron un máximo de 31.97% a 65 °C y un mínimo de 20.04% a 20 °C. De manera similar, la disolución del hierro mostró valores de 31.30% a 65 °C y 17.87% a 20 °C. Estos resultados sugieren que la temperatura juega un papel determinante en la solubilización de ambos metales, mejorando su extracción en presencia de tiourea y EDTA.

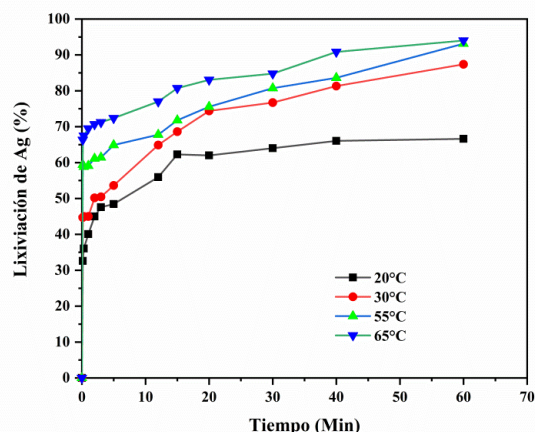


Figura 6. Curvas de Lixiviación de Ag. [TU]= 0.3 M L⁻¹, [EDTA] 0.007 M L⁻¹, muestra 10 g, pH=1.5, T= 20, 30, 55 y 65 °C, velocidad de agitación = 800 min⁻¹, Volumen de solución de 0.5 L, r₀= -56 +37 μm.

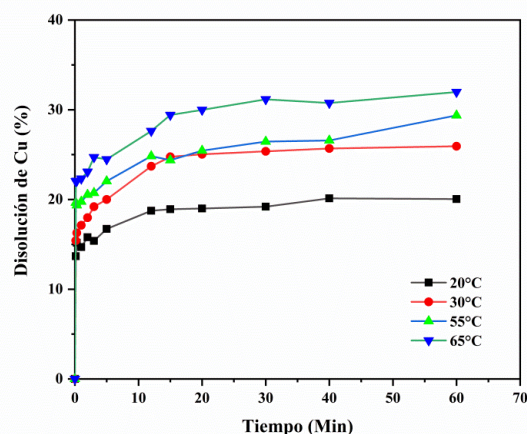


Figura 7. Curvas de Lixiviación de Cu. [TU]= 0.3 M L⁻¹, [EDTA] 0.007 M L⁻¹, muestra 10 g, pH=1.5, T= 20, 30, 55 y 65 °C, velocidad de agitación = 800 min⁻¹, Volumen de solución de 0.5 L, r₀= -56 +37 μm.

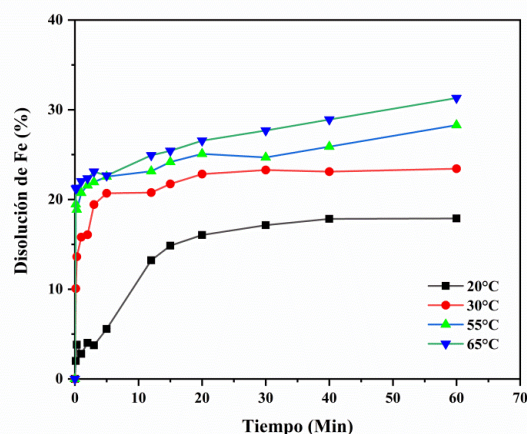


Figura 8. Curvas de Lixiviación de Fe. [TU]= 0.3 M L⁻¹, [EDTA] 0.007 M L⁻¹, muestra 10 g, pH=1.5, T= 20, 30, 55 y 65 °C, velocidad de agitación = 800 min⁻¹, Volumen de solución de 0.5 L, r₀= -56 +37 μm.

4. Conclusiones

Los resultados de este estudio confirman que la adición de EDTA en la lixiviación con tiourea favorece la disolución de Cu y Fe. Sin embargo, su impacto en la recuperación de plata es menos significativo, aunque contribuye a mejorar la eficiencia del proceso. Esto se debe a que el EDTA no forma complejos con la Ag, permitiendo que esta permanezca disponible para su interacción con la tiourea y optimizando su lixiviación.

Asimismo, se demostró que el incremento de la temperatura hasta 65 °C mejora la recuperación de Ag. La estabilidad de la tiourea frente a la degradación térmica podría estar influenciada por la presencia de EDTA, lo que representa una ventaja potencial para su aplicación a nivel industrial.

Agradecimientos

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada a E.J. Muñoz Hernández (n.º CVU: 1077834), a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) y a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) por las facilidades brindadas para llevar a cabo el presente proyecto.

Referencias

- A. Ruiz-Sánchez, I. L. (2020a). Improvement effect of organic ligands on chalcopyrite leaching in the aqueous medium of sulfuric acid hydrogen peroxide-ethylene glycol. *Hydrometallurgy*, Volume 193(105293). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105293>.
- A. Ruiz-Sánchez, J. C. (2023b). Evaluation of acid mine drainage (AMD) from tailings and their valorization by copper recovery. Volume 191(107979). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107979>.
- Ahamed Ashiq Janhavi Kulkarni, Meththika Vithanage, (2019). *Electronic Waste Management and Treatment Technology*. Chapter 10. *Hydrometallurgical Recovery of Metals From E-waste*. Vithanage Editors: Majeti Narasimha Vara Prasad and Meththika. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816190-6.00010-8>. ISBN 978-0-12-816190-6.
- Bandehzadeh Masoud Aryanimehr Amir, Reza Bahram, (2016). Investigate of Effective Factors on Extraction of Silver from Tailings of Lead Flotation Plant Using Thiourea Leaching. *World Journal of Engineering and Technology*. Scientific Research Publishing. Vol. 4. DOI: 10.4236/wjet.2016.42031. ISSN Online: 2331-4249.
- Barton, C. C. (2023). EDTA (Ethylenediaminetetraacetic Acid). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00692-8>.
- BERG, P. W. (1947). Oxidation-Reduction Potentials of Thiol-Dithio Systems: Thiourea-Formamidine Disulfide I. *Journal of the American Chemical Society*. Pages 322–325. doi:10.1021/ja01194a048.
- Chang Lei, Bo Yan, Tao Chen, Xiao-Liang Wang, Xian-Ming Xiao, (2018). Silver leaching and recovery of valuable metals from magnetic tailings using chloride leaching. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.243>.
- Chao Zhang, S. W.-F. (2018). A novel process for the separation and recovery of value-added metals from manganese-silver ores by EDTA/EDTA-2Na and thiosulfate. *Hydrometallurgy*. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.05.007>.
- D.Calla-Choque, N.-A. J.-A. (5 de November de 2016). Acid decomposition and thiourea leaching of silver from hazardous jarosite residues: Effect of some cations on the stability of the thiourea system. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 192. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105289>.
- D.M. Puente-Siller, J. F.-A.-A. (2013). A kinetic-thermodynamic study of silver leaching in thiosulfate-copper-ammonia-EDTA solutions. *Hydrometallurgy*. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.02.010>.
- Daniel A. Ray, M. B. (2022). Thiourea Leaching: An Update on a Sustainable Approach for Gold Recovery from E-waste. *Journal of Sustainable Metallurgy*. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00499-8>.
- Economía, S. d. (28 de Junio de 2023). Secretaría de Economía. Obtenido de Secretaría de Economía: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria>.
- Erick Jesús Muñoz Hernández, Norman Toro, Martín Pérez, Alejandro Reyes Domínguez, Aislinn Michelle Teja Ruiz, Mizraim Uriel Flores Guerrero, Jesús Iván Martínez Soto, Gabriel Cisneros Flores, Cesar Juárez. (2025a). Evaluation of Silver Recovery from High-Sulphur Mining Waste Using Thiourea-Oxalate System. <https://doi.org/10.3390/ma18020347>.
- Erick Jesús Muñoz Hernández, M. G. (2024b). Application of the Thiocyanate-Thiourea System for the Leaching of Copper Present in Tailings from Pachuca, Hidalgo, Mexico. TMS 2024 153rd Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50349-8_161.
- G.Anderegg. (1997). CRITICAL SURVEY OF STABILITY CONSTANTS OF EDTA COMPLEXES. Pp 1-36.
- G.T.Lapidus, D.Calla-Choque, (March 2020). Acid decomposition and silver leaching with thiourea and oxalate from an industrial jarosite sample. *Hydrometallurgy*. Vol. 192. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105289>.
- Hernán Islas, M. U. (2021). Silver leaching from jarosite-type compounds using cyanide and non-cyanide lixiviants: A kinetic approach. *Minerals Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107250>.
- Jaszczak, E. P. (2017). Cyanides in the environment analysis problems and challenges. *Environ Sci Pollut Res*. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9081-7>.
- Jiwei Zhang, Junling Zhang, Yirong Deng, Chao Wu, Hua Li, Zhanhui Qing, Jinxiang Li, Wei Zhang (2023). Quantitative evaluation of ecological and environmental impacts caused by future mining. *Ore Geology Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105672>.
- Johnson, C. A. (2015). The fate of cyanide in leach wastes at gold mines: An environmental perspective. *Applied Geochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.05.023>.
- M. Elena Poisot-Díaz, I. G. (2008). Electrodeposition of a Silver-Gold Alloy (DORÉ) from Thiourea Solutions in the Presence of Other Metallic Ion Impurities. 93(1-2). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.02.015>.
- M.G. Aylmore, (2016). Alternative Lixiviants to Cyanide for Leaching Gold Ores. *Gold Ore Processing, Project Development and Operations*. Elsevier Science. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-00699-2>. - ISBN: 978-0-444-63658-4.
- Marsden, J. H. (2006). *The chemistry of gold extraction*. SME. ISBN: 978-0-87335-240-6.
- Mohammed R. Ahmed, H. S.-F.-M. (2020). Gold Leaching Using Thiourea from Uranium Tailing Material, Gabal El-Missikat, Central Eastern Desert, Egypt. *Journal of Sustainable Metallurgy*. <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00295-2>.
- Moreno Tovar, R. &. (2009a). Neoformación mineralógica en residuos mineros (jales) del distrito minero Zimapán, estado de Hidalgo, México. *Minería y Geología*. Revista internacional de contaminación ambiental, Vol. 28, págs. 203-218. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000300003&lng=es&tlng=es.. ISSN 0188-4999.
- MORENO TOVAR, J. T. (2012b). Influencia de los minerales de los jales en la bioaccesibilidad de arsénico, plomo, zinc y cadmio en el distrito minero Zimapán, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000300003&lng=es&tlng=es.. ISSN 0188-4999.
- Muñoz-Hernandez, E. J., Teja-Ruiz, A. M., Reyes-Pérez, M., Cobos-Murcia, J. Ángel, Reyes-Cruz, V. E., & Juárez-Tapia, J. C. (2023). Estudio preliminar de lixiviación de Polibasita: efecto de la temperatura. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.9951>.
- Puigdomenech, I. (2004). *Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms*. MEDUSA). *Inorganic Chemistry*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Qian Li, Jun Luo, Rui Xu, Yongbin Yang, Bin Xu, Tao Jiang, Huaqun Yin, (2021). Synergistic enhancement effect of Ag⁺ and organic ligands on the bioleaching of arsenic-bearing gold concentrate. *Hydrometallurgy*. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105723>.
- Xiuping Chen, Yuanchuan Ren, Guangfei Qu, Zuoliang Wang, Yuyi Yang, Ping Ning. (2023). A review of environmental functional materials for cyanide removal by adsorption and catalysis. *Inorganic Chemistry Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111298>.
- Xue-yi Guo, Lei Zhang, Qing-hua Tian, Hong Qin. (2020). Stepwise extraction of gold and silver from refractory gold concentrate calcine by

thiourea. Hydrometallurgy. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105330>.
Z.Gamiño-Arroyo, D.Pareau, A.Buch, F.I.Gomez-Castro, L.E.Sánchez-Cadena, M.Stambouli, J. El Bekri, M.Avila-Rodriguez (July 2021).

Design of Multistage Extraction System for Simultaneous Separation of Silver and Gold from Thiourea Solutions. Volume 164. <https://doi.org/10.1016/j.ccp.2021.108391>.