

Comportamiento termodinámico de la lixiviación de plata con tiosulfato, EDTA y arsénico: Estudio experimental y estequiométrico

Thermodynamic behavior of silver leaching with thiosulfate, EDTA and arsenic: Experimental and stoichiometric study

G. Cisneros-Flores ^{a,*}, J. C. Juárez-Tapia ^a, M. Reyes-Pérez ^a, G. Urbano-Reyes ^a, A. M. Teja-Ruiz ^a
A. Ruiz-Sánchez ^a

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

Este estudio aborda el análisis termodinámico de la lixiviación de plata en distintos sistemas: $\text{Ag}_2\text{S} - \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, $\text{Ag}_2\text{S} - \text{S}_2\text{O}_3^{2-} - \text{As}_2\text{O}_3$ y $\text{Ag}_2\text{S} - \text{S}_2\text{O}_3^{2-} - \text{As}_2\text{O}_3 - \text{EDTA}$ en donde el rango de estabilidad tanto de pH como de potencial de las especies en cada sistema se determinó mediante un estudio termodinámico. A su vez, la interacción entre reactantes se analizó con la construcción de las estequiometrias, mientras que, se llevaron a cabo experimentos para analizar la cantidad de plata lixiviada en función del tiempo. Los resultados revelaron que la máxima cantidad de plata lixiviada fue en el sistema $\text{Ag}_2\text{S} - \text{S}_2\text{O}_3^{2-} - \text{As}_2\text{O}_3 - \text{EDTA}$ con inyección de aire alcanzando un 43.9% a los 360 minutos transcurridos de la reacción bajo las siguientes condiciones: $[\text{S}_2\text{O}_3^{2-}] = 0.2 \text{ M}$, $[\text{EDTA}] = 0.05 \text{ M}$, $[\text{As}_2\text{O}_3] = 0.0004 \text{ M}$ en medio alcalino. Estos hallazgos señalan que la presencia de arsénico junto con EDTA favorecen el proceso de disolución de la plata.

Palabras Clave:

Lixiviación de plata, complejos de tiosulfato, complejos de EDTA, estudio termodinámico.

Abstract

This study focuses on the thermodynamic analysis of silver leaching in various systems: $\text{Ag}_2\text{S} - \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, $\text{Ag}_2\text{S} - \text{S}_2\text{O}_3^{2-} - \text{As}_2\text{O}_3$ y $\text{Ag}_2\text{S} - \text{S}_2\text{O}_3^{2-} - \text{As}_2\text{O}_3 - \text{EDTA}$. The stability range of pH and potential for the species in each system was determined through thermodynamic investigation. Additionally, the interaction between reactants was analyzed using stoichiometry, and experiments were conducted to assess the amount of leached silver over time. The results revealed that the highest amount of leached silver occurred in the $\text{Ag}_2\text{S} - \text{S}_2\text{O}_3^{2-} - \text{As}_2\text{O}_3 - \text{EDTA}$ system with air injection, reaching 43.9% at 360 minutes of reaction time under the following conditions: $[\text{S}_2\text{O}_3^{2-}] = 0.2 \text{ M}$, $[\text{EDTA}] = 0.05 \text{ M}$, $[\text{As}_2\text{O}_3] = 0.0004 \text{ M}$ in an alkaline medium. These findings indicate that the presence of arsenic, along with EDTA, enhances the silver dissolution process.

Keywords:

Silver leaching, thiosulfate complexes, EDTA complexes, thermodynamic study.

1. Introducción

Actualmente, diversos investigadores han centrado sus esfuerzos en estudiar alternativas a procesos de lixiviación convencionales. La lixiviación de plata utilizando agentes complejantes respetuosos con el medio ambiente se ha vuelto cada vez más desafiante debido a la sobreexplotación de las fuentes de extracción primaria. Esta sobreexplotación ha llevado a que el proceso de disolución de plata se concentre principalmente en concentrados, sulfosales y jales. Las alternativas más prometedoras al uso de cianuro que se han reportado en la literatura son la tiourea ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$), tiocianato (SCN^-), glicina ($\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$) y tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) (Alonso et al., 2008; Choque et al., 2016; Yang et al., 2010; Oraby & Eksteen, 2015; Munive et

al., 2020; Roldán et al., 2020; Teja et al., 2020). La formación de complejos entre el tiosulfato y la plata, un proceso clave en la lixiviación, requiere condiciones específicas y la participación de agentes reductores y agentes oxidantes tales como oxígeno, ozono y iones metálicos (Rivera et al., 2015; Salinas E. et al., 2022). Estos agentes desempeñan un papel esencial en la estabilización y movilización de los metales valiosos y su interacción con otros componentes presentes en el sistema. Por ejemplo, Urzúa et al., (2018) llevaron a cabo un estudio electroquímico que analiza la lixiviación de plata en soluciones de tiosulfato. En sus hallazgos, se revela que la plata se electrooxida a potenciales de 200 mVSHE y forma complejos con el tiosulfato. Mientras que, a potenciales de hasta 600 mVSHE se observa un proceso de degradación del tiosulfato. Sin embargo, la lixiviación de plata con tiosulfato no es un proceso 100% escalable a nivel industrial por la inestabilidad

*Autor para la correspondencia: ci336682@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: ci336682@uaeh.edu.mx (Gabriel Cisneros-Flores), jcjuarez@uaeh.edu.mx (Julio Cesar Juárez-Tapia), mreyes@uaeh.edu.mx (Martín Reyes-Pérez), gustavo_urbano@uaeh.edu.mx (Gustavo Urbano-Reyes), ice9791@gmail.com (Aislinn Michelle Teja-Ruiz), sanchez.angel@hotmail.com (Ángel Ruiz-Sánchez)

del agente complejante ya que, se puede degradar excesivamente mediante un proceso de oxidación, o se puede presentar un mayor consumo de tiosulfato por reacciones no deseadas (Gihenai, 2012). Esta observación sugiere la necesidad de considerar cuidadosamente los procesos redox y la influencia de los agentes oxidantes en la disolución de plata.

Diversos estudios han investigado la interacción de iones metálicos con agentes ligandos en la lixiviación de plata, con el objetivo de estabilizar los iones y prevenir la formación de precipitados no deseados. Entre los complejos ligando – iones metálicos examinados se encuentran: ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) – Cu^{2+} , (EDTA) – Fe^{2+} , monoetanolamina (MEA) – Cu^{2+} y citrato (Cit) – Cu^{2+} (Puente Siller et al., 2013, 2014, 2017, 2021; Deutsch J, 2012; Deutsch & Dreisinger, 2013I, 2013II).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo estudiar el comportamiento de los iones de As^{3+} en conjunción con el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) como posibles agentes oxidantes en el proceso de disolución de plata con tiosulfato. Cabe destacar que, la incorporación de iones de arsénico en el proceso de lixiviación de plata mediante tiosulfato plantea consideraciones relevantes en términos de posibles impactos ambientales, en virtud de la conocida toxicidad y la capacidad de acumulación de arsénico en los ecosistemas. Por otra parte, es esencial abordar la cuestión ambiental de manera proactiva. No obstante, resulta alentador destacar que existen enfoques científicos y técnicos que pueden atenuar estos efectos. La utilización de agentes ligandos orgánicos por ejemplo, se ha perfilado como una alternativa factible para amortiguar los posibles efectos adversos. Estos agentes favorecen la formación de complejos estables en la lixiviación, promoviendo así la retención y reduciendo la movilización de los iones de arsénico en el entorno circundante (Pillay L & Kindness A., 2016).

Esta investigación se enfocó en el análisis de la lixiviación de plata utilizando tiosulfato en presencia de arsénico y EDTA. Se emplearon herramientas como la construcción de diagramas Eh-pH y la distribución de especies, así como la elaboración de estequiometrías para comprender en detalle el sistema. La cantidad de plata lixiviada en cada uno de los sistemas fue comparada, y se observó un incremento significativo en la cantidad de plata lixiviada en presencia de iones de arsénico y EDTA.

2. Desarrollo experimental

Los reactivos utilizados durante la experimentación fueron de grado laboratorio con las siguientes características: sulfuro de plata (Ag_2S) marca MEYER 99% pureza, trióxido de arsénico (As_2O_3) marca MEYER 99.9% pureza y EDTA ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$) marca Aldrich pureza 97%.

El estudio termodinámico se realizó con la construcción de Diagramas de Distribución de Especies y Diagramas de Pourbaix con el objetivo de determinar las condiciones de Eh y pH así como establecer las posibles reacciones redox que podrían tomar lugar.

La construcción de diagramas fue considerando los datos de equilibrio contenidos en la Base de datos del software Hydra Medusa Chemical Equilibrium Software (Vol. 1, Department of Inorganic Chemistry-The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000). La experimentación constó en montar un reactor de 0.3 L marca PYREX sobre una parrilla de calentamiento proporcionando las condiciones experimentales de la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones experimentales del sistema $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ - Ag – As^{3+} - EDTA

Parámetros	Condiciones experimentales
$[\text{S}_2\text{O}_3^{2-}]$ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	30
$[\text{Ag}_2\text{S}]$ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.3
$[\text{As}_2\text{O}_3]$ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.087
$[\text{EDTA}]$ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.46, 2.92, 7.30, 14.61
Temperatura (K)	298
$[\text{NaOH}]$ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.02
Vol. de solución (L)	0.250
Velocidad de agitación (RPM)	750
Flujo de aire (L/min)	3
Flujo de Ozono (L/min)	3
t_r (min)	360

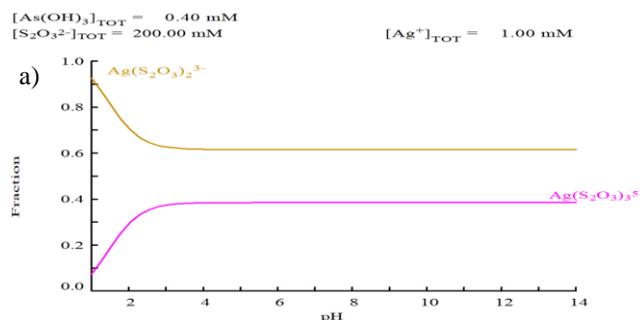
El aire y el ozono fueron inyectados a través de un difusor, el cual fue introducido en una de las boquillas del reactor. Se adicionó 0.250 L de agua desionizada al reactor. Posteriormente, se agregó la concentración de tiosulfato, seguido de los reactivos de alta pureza. Se tomaron alícuotas de 10 mL a distintos intervalos de tiempo en el transcurso de la reacción. El pH y la temperatura fueron monitoreados y controlados durante la reacción. Mediante la técnica de Análisis Químico por Espectrometría de Emisión de Plasma Acoplado por Inducción (ICP) se analizaron las alícuotas extraídas para determinar la fracción de plata disuelta en cada una de las alícuotas usando un Espectrofotómetro Perkin Elmer 3000.

3. Resultados y discusión

3.2 Estudio termodinámico

Mediante la construcción de diagramas de Pourbaix y distribución de especies se analizaron los cambios en el sistema al modificar alguna concentración de los parámetros indicados en la tabla 1.

En la figura 1a se muestra el diagrama de distribución de especies para el sistema Ag – S_2O_3 – As^{3+} el cual indica que el complejo $\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ es la especie predominante a las condiciones experimentales utilizadas. En el diagrama de Pourbaix (figura 1b) se observa que el producto de la oxidación del arsénico en medio alcalino es la especie HAsO_4^{2-} la cual es estable a valores de pH entre 7 y 12 y a desde 0.1 V en adelante. Por otra parte, a potenciales reductores la estabilidad de un sólido (As_2S_3) indica que al precipitar los iones de As^{3+} se podría generar una capa de pasividad a potenciales reductores.



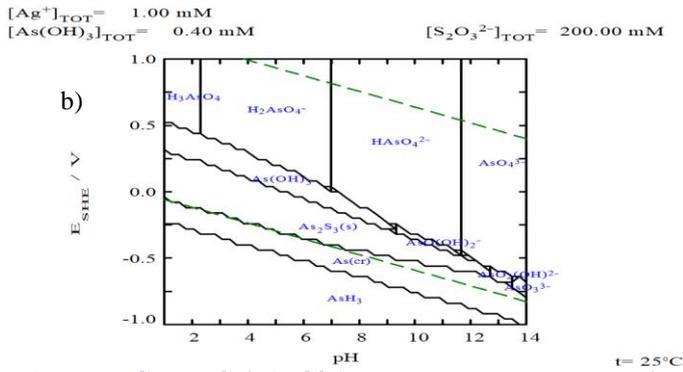
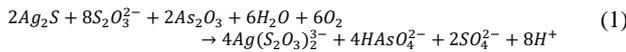
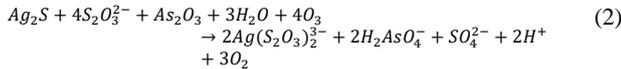


Figura 1 Estudio termodinámico del sistema Ag – S₂O₃²⁻ - As³⁺ a 25 °C: a) Diagrama de Distribución de especies, b) Diagrama de Pourbaix

Con la información del análisis termodinámico se construyó la estequiometría global del sistema Ag₂S – S₂O₃²⁻ - As (ecuación 1):



De igual manera, se construyó la estequiometría global del sistema cambiando la inyección de aire por inyección de ozono (ecuación 2):



Se analizó la posible influencia del EDTA al adicionarlo al sistema de la ecuación 1 mediante la elaboración de un nuevo estudio termodinámico. La adición de EDTA tiene como propósito principal formar complejos con el arsénico y mantenerlos estables en solución. Los resultados derivados de los diagramas en la Figura 2, muestran la relación entre las concentraciones variables de EDTA, y la formación de complejos tiosulfato-plata. Es relevante destacar que, la variación de las concentraciones de EDTA no influyeron en la estabilidad de la especie Ag(S₂O₃)₂³⁻.

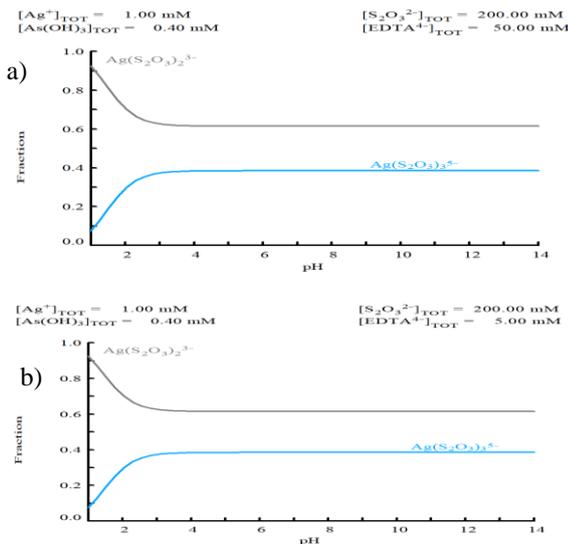
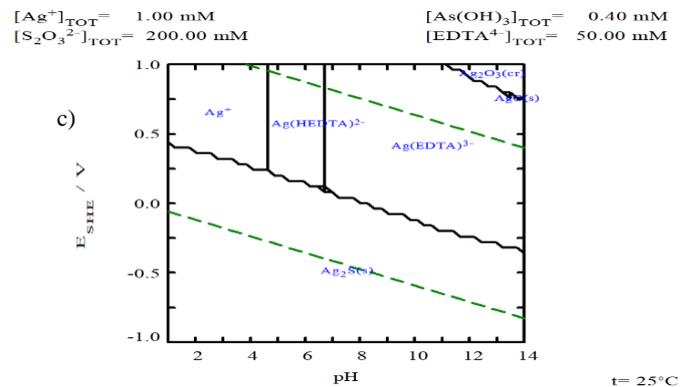
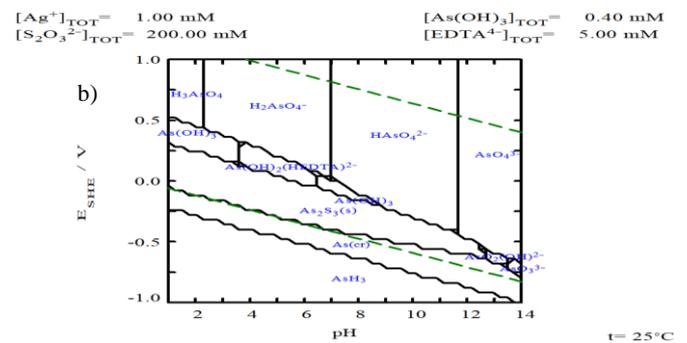
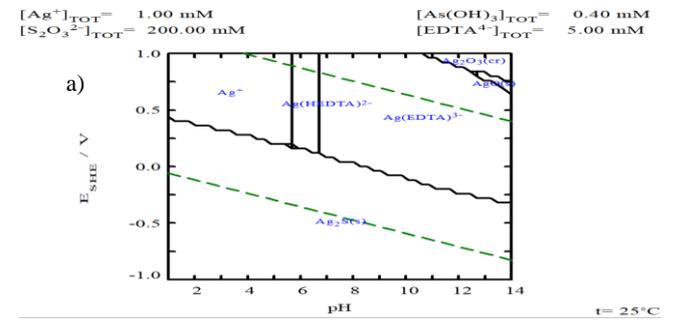


Figura 2 Diagrama de Distribución de especies del sistema Ag – As³⁺- S₂O₃²⁻ - EDTA; a) [EDTA]=1.46 g·L⁻¹, b) [EDTA]= 14.61 g·L⁻¹

Por otra parte, en la figura 3 se presenta el comportamiento del metal precioso frente a EDTA y el comportamiento del As – EDTA. En la figura 3a se observa la estabilidad de dos complejos EDTA – Ag; el complejo Ag(HEDTA)²⁻ el cual presenta un rango

de estabilidad a valores de pH entre 6 y 6.9 y a potenciales por encima de 0.2 V a una concentración de EDTA igual a 1.461 g·L⁻¹. Analizando la estabilidad del complejo Ag(EDTA)²⁻ se observó que esta especie es estable a valores de pH por encima de 7 y de 0.2 V en adelante. Aunado a esto, el agente quelante puede formar complejos también con los iones de As³⁺ formando la especie As(OH)₂(HEDTA)²⁻ siendo estable a pH entre 3.8 y 7 y desde 0.1 a 3.0 V (figura 3b). Con el objetivo de identificar el efecto del EDTA a diferentes concentraciones, se varió dicha concentración en el presente estudio termodinámico. En la figura 3c se observa que al aumentar la concentración de EDTA, el rango de estabilidad de los complejos Ag – EDTA aumentan, teniendo el rango de estabilidad de la especie Ag(HEDTA)²⁻ desde 4.8 hasta 7 y a potenciales desde 0.2 en adelante. Por otra parte, el complejo Ag(EDTA)²⁻ se mantuvo en las mismas condiciones de estabilidad que en la figura 3a. Finalmente, la figura 3d indica que al aumentar la concentración de EDTA, la estabilidad del complejo As – EDTA incrementa a valores de pH entre 3.8 a 8 y a potenciales de 0.1 a 0.48 V.



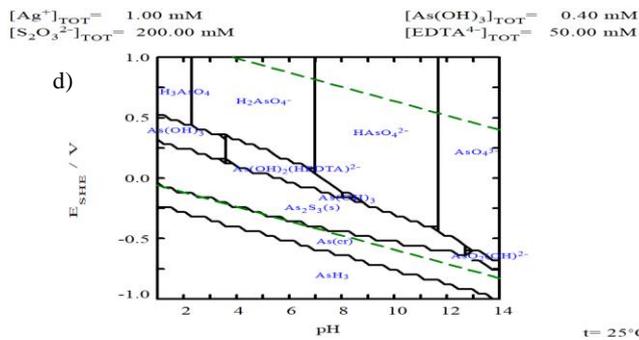
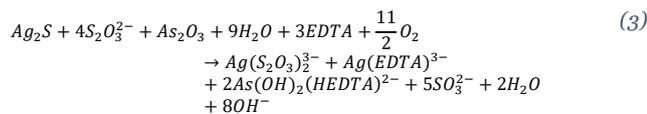


Figura 3 Diagramas Eh - pH del sistema Ag - As³⁺ - S₂O₃²⁻ - EDTA a 25 °C, [EDTA] = 1.46 y 14.61 g·L⁻¹

El comportamiento del sistema analizado en la figura 3 es similar a lo reportado por Puente-Siller et al., 2017, donde el agente quelante utilizado fue la monoetanolamina (MEA) y como agente oxidantes iones de Cu²⁺. Puente-Siller investigó que el quelato podía formar complejos tanto con el metal precioso como con los iones de cobre indicando un comportamiento favorecedor al reducir el consumo y degradación de tiosulfato identificando dicho proceso mediante titulación por yodometría al igual que, mantener a los iones de cobre estables en solución. Partiendo de los resultados obtenidos en el estudio termodinámico, se construyó la estequiometría global del sistema Ag - As - S₂O₃²⁻ - EDTA (ver ecuación 3):



3.3 Efecto de la concentración de EDTA en la lixiviación de plata del sistema Ag - S₂O₃²⁻ - As³⁺ - EDTA

Los resultados de lixiviación de la figura 4 muestran la cantidad de plata disuelta de los sistemas Ag - S₂O₃²⁻ - aire, Ag - S₂O₃²⁻ - As³⁺ - aire y Ag - S₂O₃²⁻ - As³⁺ - O₃ aplicando las condiciones experimentales de la tabla 1. En el sistema Ag - S₂O₃²⁻ - aire se obtuvo un 27.63% de plata complejada a los 360 minutos transcurridos de la reacción. Posteriormente, adicionando iones de As³⁺ al sistema, se identificó un periodo de inducción durante los primeros 15 minutos para alcanzar un 43.5% de plata disuelta a los 180 minutos de la reacción, sin embargo, posterior a este lapso de tiempo, el porcentaje de lixiviación de plata decreció manteniéndose estable a un 40.5% mostrando que la cantidad de plata lixiviada en presencia de arsénico fue mayor a la obtenida en el sistema Ag S₂O₃²⁻ - aire. Finalmente, se analizó el efecto que tiene la inyección de ozono en el proceso de lixiviación de plata. Experimentalmente se observó que en presencia de ozono, el pH de la reacción bajó hasta 6.8 desestabilizando las condiciones experimentales necesarias de basicidad para el reactivo complejante. Las fluctuaciones en la curva de disolución del sistema al introducir ozono se le atribuye a la degradación de tío del tiosulfato, influenciada tanto por el aumento del potencial como por la disminución del pH (Sitando O et al., 2018). A pesar de que se observó un aumento en el porcentaje de plata lixiviada con la adición de ozono, la diferencia del 2% en la cantidad de plata disuelta no parece suficiente para respaldar la utilización del ozono en lugar de aire.

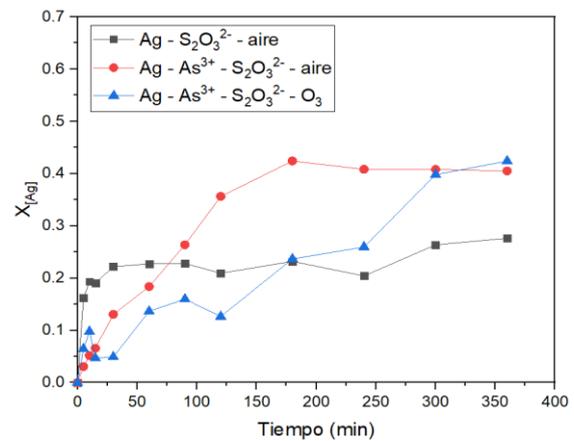


Figura 4. Cantidad de plata disuelta en los sistemas Ag - S₂O₃²⁻ - aire, Ag - S₂O₃²⁻ - As³⁺ - aire y Ag - S₂O₃²⁻ - As³⁺ - O₃

Con los resultados obtenidos en la figura 4, se determinó que el sistema más eficiente fue Ag - S₂O₃²⁻ - As³⁺ - aire con lo que se prosiguió a adicionar las concentraciones de EDTA mencionadas en el desarrollo experimental.

En la figura 5, se presenta la cantidad de plata disuelta con la adición de EDTA al sistema. Se observa que, empleando las 2 concentraciones más bajas de EDTA iguales a 1.46 y 2.92 g·L⁻¹ se obtuvo un 14.03% y 17.6% de plata disuelta respectivamente. Al utilizar concentraciones mayores de EDTA igual a 7.30 y 14.61 g·L⁻¹, la disolución de plata incremento a valores de 24.32% y 43.39% siendo esta la máxima cantidad de plata lixiviada a los 360 minutos transcurridos de la reacción. Dicho comportamiento es posiblemente atribuido a que los iones de As³⁺ en conjunto con el EDTA facilitan la disolución del metal precioso, puesto que, la ausencia de arsénico muestra una baja disolución de plata. Eun K et al., en su estudio de 2016, señaló que el arsénico presenta una mayor eficiencia en la formación de complejos con el EDTA cuando se encuentra en presencia de agentes reductores. Estos agentes reductores mejoran la movilidad y solubilidad del arsénico, lo que a su vez promueve el proceso de complejación. Siguiendo esta línea de pensamiento, es plausible sugerir que los resultados obtenidos en la presente investigación reflejen posiblemente el mismo efecto observado en el estudio de Eun K, derivado de los reactivos empleados en el sistema, aunque se requiere llevar a cabo investigaciones adicionales para validar esta hipótesis. Por otra parte, conforme se aumentó la concentración del agente quelante, la estabilidad de la reacción se vio favorecida, dicho resultado se le atribuye a que puede existir un menor consumo de tiosulfato debido a que el ligando puede también complejar a la plata. Estos resultados son coherentes con los obtenidos en el estudio termodinámico en donde se observó que a mayor presencia de EDTA, el rango de estabilidad del complejo arsénico - EDTA aumentaba manteniendo estables a los iones de arsénico los cuales actúan como agentes oxidantes. La posible formación de complejos más estables entre el arsénico y el EDTA podría tener repercusiones beneficiosas desde una perspectiva ambiental. Estos complejos mejor estabilizados podrían facilitar la retención controlada y la movilización eficiente del arsénico en soluciones acuosas, lo que a su vez podría simplificar su tratamiento y la restauración de áreas contaminadas. Además, esta formación de complejos más resistentes podría mitigar la liberación no deseada de arsénico en el entorno, contribuyendo potencialmente a reducir el riesgo de contaminación y los posibles impactos perjudiciales tanto para la salud humana como para los ecosistemas.

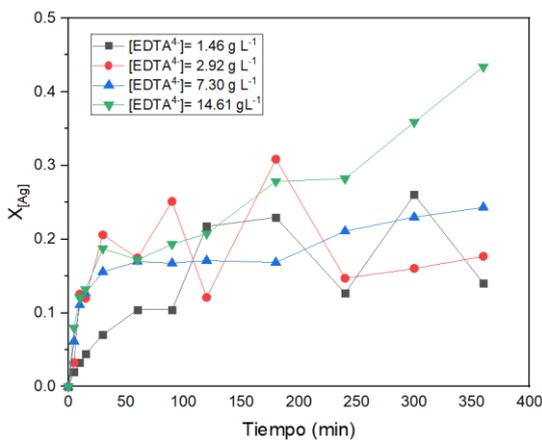


Figura 5. Lixiviación de Ag, efecto $[EDTA^{4-}] = 1.46, 2.92, 7.30, 14.61 (g \cdot L^{-1})$

4. Discusión

Mediante los resultados obtenidos en el estudio termodinámico se determinó que, la presencia de arsénico no incrementa el consumo de tiosulfato y tampoco influye en la estabilidad de los complejos tiosulfato - plata. A su vez, el estudio termodinámico del sistema $Ag_2S - S_2O_3^{2-} - As_2O_3 - EDTA$ demostró que el agente quelante puede actuar de dos maneras: formando complejos con la plata ($Ag(HEDTA)^{2-}$, $Ag(EDTA)^{2-}$) y la formación de un complejo As - EDTA ($As(OH)_2(HEDTA)^{2-}$). Un cambio significativo en cada uno de los diagramas, fue que al aumentar la concentración utilizada de EDTA, el rango de estabilidad de los complejos formados con los iones metálicos de igual manera aumento. Por otra parte, en el experimento en donde se cambió ozono por aire buscando un ambiente oxidante más eficiente, sin embargo, al inyectar ozono el pH de la solución pasó de un medio básico a un medio moderadamente ácido como resultado de los productos en la ecuación 3 propiciando la descomposición del tiosulfato. Por otra parte, en el sistema tiosulfato - plata - aire se logró recuperar un 27.6% a los 360 minutos de la reacción. Mientras que agregando arsénico la recuperación logró aumentar hasta un 40.5% durante los mismos 360 minutos. Este hallazgo muestra que la presencia de arsénico favorece el proceso de disolución de plata con tiosulfato. Finalmente, con el estudio del efecto de EDTA presentado en la figura 5. Se observó que empleando las concentraciones más bajas de EDTA (1.46 y 2.92 $g \cdot L^{-1}$) la cantidad de plata lixiviada disminuyó. Sin embargo, empleando las concentraciones más altas (7.30 y 14.61 $g \cdot L^{-1}$) la estabilidad de la reacción fue más notoria y por ende la cantidad de plata lixiviada aumento hasta un 43.9% a los 360 minutos de la reacción. Dichos resultados concuerdan con los obtenidos en el estudio termodinámico refiriéndose al aumento de estabilidad de las especies inmersas con el aumento de la concentración de EDTA. Lo anteriormente expuesto sugiere que la presencia de arsénico y EDTA favorece el proceso de lixiviación de plata con tiosulfato bajo las siguientes hipótesis: 1) el ambiente oxidante que genera la presencia de iones de arsénico favorece el proceso de lixiviación de plata y en conjunto con el EDTA se mantienen mayormente estables en solución, 2) el arsénico y el EDTA realizan una sinergia facilitando la disolución de la plata al igual que, el EDTA ayuda a mitigar los efectos nocivos medioambientales que conllevan el uso de arsénico. Los hallazgos ponen de relieve la complejidad de los equilibrios químicos y su influencia en la eficacia del proceso, además de posibles aplicaciones beneficiosas en términos de movilidad y mitigación del arsénico en

soluciones acuosas. Este análisis establece un sólido cimiento para futuras investigaciones y aplicaciones en la esfera de la lixiviación de metales preciosos en contextos controlados.

5. Conclusiones

- La lixiviación de plata con tiosulfato resultó favorecida ante la presencia de iones de As^{3+} al aumentar de un 27.6% a un 40.5%. Por otra parte, el estudio termodinámico determinó que el tiosulfato no presenta selectividad ante el arsénico evitando un consumo excesivo del reactivo complejante.
- Al realizar experimentos donde se inyectó ozono, el pH disminuyó derivado de la reacción entre los iones de arsénico y ozono generando mayor inestabilidad debido a la degradación del tiosulfato.
- La disolución de plata con tiosulfato resultó favorecida al adicionar EDTA. Termodinámicamente el EDTA mostró que podía formar complejos con arsénico al igual que con la plata propiciando la estabilidad de los iones de arsénico y plata.
- Los reactivos adicionados en esta investigación pueden favorecer la formación de complejos As - EDTA al incrementar la movilidad y estabilidad en solución de dichas especies. Esto a su vez, favorece en el sentido medioambiental al mantener los iones de arsénico estables en medio acuoso disminuyendo el riesgo de contaminación y sus efectos adversos en la salud humana y los ecosistemas.

Agradecimientos

G. Cisneros agradece a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por la oportunidad de realizar estudios de posgrado y a CONACyT por la beca otorgada.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Referencias

- Calla-Choque, D., Nava-Alonso, F., & Fuentes-Aceituno, J. C. (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*, 317, 440-448.
- Deutsch, J. L. (2012). Fundamental aspects of thiosulfate leaching of silver sulfide in the presence of additives (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Deutsch, J. L., & Dreisinger, D. B. (2013). Silver sulfide leaching with thiosulfate in the presence of additives part I: Copper-ammonia leaching. *Hydrometallurgy*, 137, 156-164
- Deutsch, J. L., & Dreisinger, D. B. (2013). Silver sulfide leaching with thiosulfate in the presence of additives Part II: Ferric complexes and the application to silver sulfide ore. *Hydrometallurgy*, 137, 165-172.
- Kim, E. J., Jeon, E. K., & Baek, K. (2016). Role of reducing agent in extraction of arsenic and heavy metals

- from soils by use of EDTA. *Chemosphere*, 152, 274-283.
- Munive, G. T., Encinas, M. A., Salazar Campoy, M. M., Álvarez, V. E., Vázquez, V. M., & Choque, D. C. (2020). Leaching Gold and silver with an alternative system: Glycine and thiosulfate from mineral tailings. *Jom*, 72, 918-924.
- Oraby, E. A., & Eksteen, J. J. (2015). The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine-peroxide solutions and their adsorption on carbon. *Hydrometallurgy*, 152, 199-203.
- Pillay, L., & Kindness, A. (2016). A preliminary investigation into the stability of inorganic arsenic species in laboratory solutions simulating sediment pore water. *South African Journal of Chemistry*, 69, 9-14.
- Puente-Siller, D. M., Fuentes-Aceituno, J. C., & Nava-Alonso, F. (2013). A kinetic-thermodynamic study of silver leaching in thiosulfate-copper-ammonia-EDTA solutions. *Hydrometallurgy*, 134, 124-131.
- Puente-Siller, D. M., Fuentes-Aceituno, J. C., & Nava-Alonso, F. (2014). Study of thiosulfate leaching of silver sulfide in the presence of EDTA and sodium citrate. Effect of NaOH and NH₄OH. *Hydrometallurgy*, 149, 1-11.
- Puente-Siller, D. M., Fuentes-Aceituno, J. C., & Nava-Alonso, F. (2017). An analysis of the efficiency and sustainability of the thiosulfate-copper-ammonia-monoethanolamine system for the recovery of silver as an alternative to cyanidation. *Hydrometallurgy*, 169, 16-25.
- Puente-Siller, D. M., Fuentes-Aceituno, J. C., Nava-Alonso, F., Uribe-Salas, A., Pérez-Garibay, R., & Martínez-Gómez, V. J. (2021). A phenomenological study of the silver sulfide passivation and oxidative degradation of thiosulfate in the thiosulfate-ammonia-copper-citrate leaching system. *Hydrometallurgy*, 200, 105547.
- Rivera, I., Patiño, F., Roca, A., & Cruells, M. (2015). Kinetics of metallic silver leaching in the O₂-thiosulfate system. *Hydrometallurgy*, 156, 63-70.
- Roldán-Contreras, E., Salinas-Rodríguez, E., Hernández-Ávila, J., Cerecedo-Sáenz, E., Rodríguez-Lugo, V., I. Jeldres, R., & Toro, N. (2020). Leaching of silver and gold contained in a sedimentary ore, using sodium thiosulfate; a preliminary kinetic study. *Metals*, 10(2), 159.
- Salinas-Rodríguez, E., Hernández-Ávila, J., Cerecedo-Sáenz, E., Arenas-Flores, A., Veloz-Rodríguez, M. A., Toro, N., ... & Acevedo-Sandoval, O. A. (2022). Leaching of Copper Contained in Waste Printed Circuit Boards, Using the Thiosulfate-Oxygen System: A Kinetic Approach. *Materials*, 15(7), 2354.
- Sitardo, O., Senanayake, G., Dai, X., Nikoloski, A. N., & Breuer, P. (2018). A review of factors affecting gold leaching in non-ammoniacal thiosulfate solutions including degradation and in-situ generation of thiosulfate. *Hydrometallurgy*, 178, 151-175.
- Teja-Ruiz, A. M., Reyes-Domínguez, I. A., Acevedo-Sandoval, O. A., Palacios-Beas, E. G., Flores-Guerrero, M. U., Pérez-Labra, M., & Juárez-Tapia, J. C. (2020). Silver leaching from miargyrite (AgSbS₂) sulfosalt in the system S₂O₃²⁻-Ca (OH)₂: Kinetic analysis and experimental design approach. *Hydrometallurgy*, 198, 105456.
- Urzúa-Abarca, D. A., Fuentes-Aceituno, J. C., Uribe-Salas, A., & Lee, J. C. (2018). An electrochemical study of silver recovery in thiosulfate solutions. A window towards the development of a simultaneous electroleaching-electrodeposition process. *Hydrometallurgy*, 176, 104-117.
- EUNYang, S. H., Yang, J. G., Liu, W., Chen, G. T., Tang, M. T., & Qiu, G. Z. (2010). Oxidative Pressure Leaching of Silver from Flotation Concentrates with Ammonium Thiocyanate Solution. *Metallurgical and Materials transactions B*, 41, 3-9.