

## Recuperación de oro y plata de escorias de la unidad "La Herradura"; efecto del zinc durante su lixiviación en el sistema Tiosulfato-Amonía-Cu(II) (TACu)

Ledesma-Herrera Y. G.<sup>1</sup>, Delgado-Hernández S. G.<sup>2</sup>, Camarillo-Silva M.<sup>1</sup>, Martínez-Torres J.D.<sup>1</sup>, Elorza-Rodríguez E.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, P.E. Ingeniería Metalúrgica, 36000 Guanajuato, Gto.,

<sup>2</sup>División de Ciencias Naturales y Exactas, P.E. Químico, 36050 Guanajuato, Gto., [erelorza@ugto.mx](mailto:erelorza@ugto.mx)\*

### Resumen

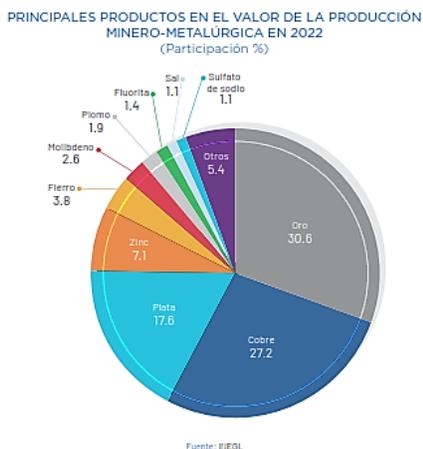
El oro y plata contenidos en las escorias de fundición de precipitados de unidad La Herradura, en concentraciones de 168 g Au/ton y 437 g Ag/ton se presentan en estado metálico, principalmente como aleaciones Au-Ag (75%) y Au-Ag-Cu (22%) con formas esféricas o redondeas, del tipo que origina una fusión y solidificación, la mayor parte de estas se asocian a partículas de silicatos de zinc, principalmente como inclusiones (12 micras) seguido de uniones simples en los bordes de las partículas de silicatos de zinc.

Los resultados de velocidades de disolución del oro en escorias en el sistema Tiosulfato-Amonía-Cu(II) (TACu), basados en análisis de soluciones vía absorción atómica, indican que estas son superiores a las obtenidas en cianuro. La presencia de iones de zinc (100, 200 y 400 ppm), en concordancia con su naturaleza dura-suave, incrementan la velocidad de disolución, no obstante, debe recalcar que el tamaño de inclusiones metálicas y la composición de escoria son factores por considerar en la química de un sistema lixivante, caracterizado por su complejidad y estabilidad.

**Palabras clave:** Escorias fundición Au-Ag, TACu(II),

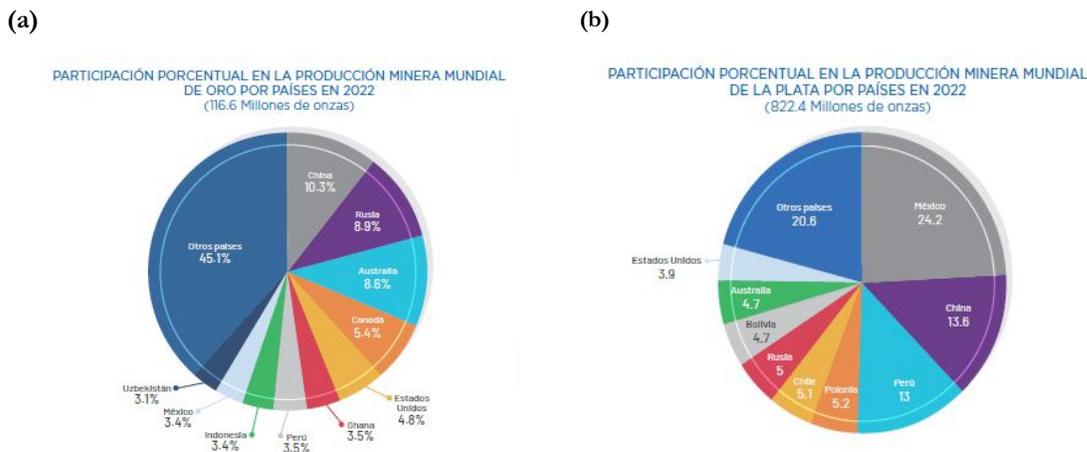
### Introducción

De acuerdo al informe anual 2023 de la Cámara Minera de México (CAMIMEX), el sector minero-metalúrgico en México se mantiene en continuo desarrollo permitiendo el abastecimiento de materias primas a más de 70 sectores productivos, lo que consolida a dicho sector como una de las industrias de mayor importancia; México sigue siendo uno de los diez mayores productores de los Metales Preciosos y minerales base en el mundo, lo que permitió que esta industria representase en el 2022 el 2.46 % del PIB nacional y el 8.63 % del PIB industrial del país, refrendando así su importancia para el desarrollo nacional [1]. La Figura 1, muestra la producción minero-metalúrgica desarrollada en el 2022, representando el oro el 30.6 % del valor de la producción global de este sector, si bien se tiene una producción importante en metales como cobre, plata, zinc, plomo y molibdeno entre otros, la industria del oro sigue siendo en México de gran importancia y aporte a la economía nacional.



**Figura 1.- Principales productos en la producción minero-metalúrgica en el 2022 en México [1].**

En el 2022, México aportó el 3.4 % de la producción mundial del oro (Figura 2a) y el 24.2% de la producción mundial de plata, consolidándose como el mayor productor de este en el mundo (Figura 2b) [1], estas estadísticas muestran la importancia de esta industria en el país, si bien México es productor de otros metales y no metales como Cu, Pb y Zn entre otros, el alto valor del oro y su producción en México consolidan a la extracción de este metal como una de las principales actividades minero-metalúrgicas del país, en este sentido un reto importante para esta industria es la recuperación de estos valores tanto de sus menas como de fuentes alternas o secundarias.



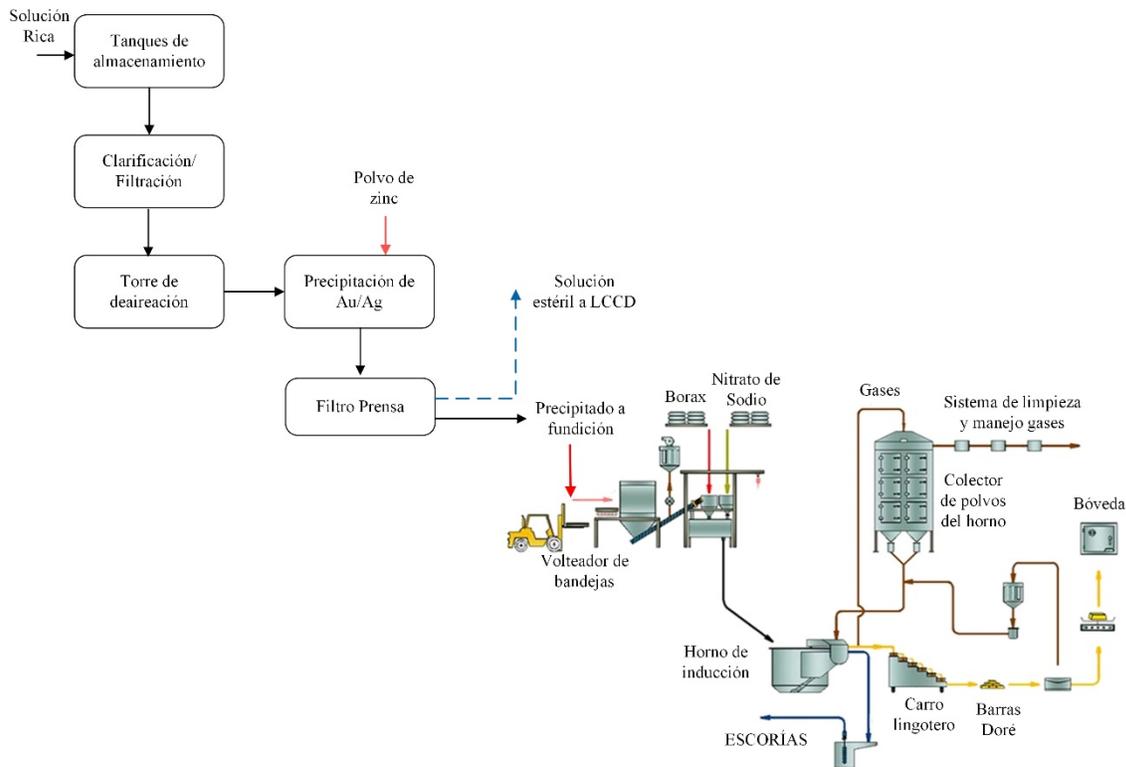
**Figura 2.** (a) Panorama mundial y nacional de la producción del oro en el 2022 y, (b) Panorama mundial y nacional de la producción de plata en el 2022 [1].

La recuperación de los valores metálicos (oro/plata) de sus menas es cada vez más complicada debido a la complejidad mineralógica de estas, la llamada “refratariedad”, referida a aquellos minerales en donde el oro/plata es recuperado con baja eficiencia, menos del 80% por métodos convencionales como cianuración o flotación; esta última puede medirse en términos del grado de recuperación como alta refratariedad (recuperación <50%), moderada refratariedad (recuperación 50-80%) o baja refratariedad (recuperación 80-95%). Las causas de la refratariedad son diversas y se centran en propiedades físicas o químicas del mineral, en donde la asociación mineralógica juega un importante papel, en este sentido la recuperación de oro muestra dos grandes retos en la industria metalúrgica, por una parte la búsqueda de tratamientos que optimicen la recuperación del oro-plata de los minerales refractarios y la recuperación económica del oro de fuentes alternas, chatarra electrónica, escorias u otros materiales [2].

Las escorias son desechos sólidos vítreos producidos en diversos procesos pirometalúrgicos y su formación se debe a la presencia de impurezas y elementos no deseados que por lo regular se encuentran en la ganga asociada a la mena del yacimiento que se explota. Estas impurezas pueden ser óxidos, sulfuros, silicatos u otros compuestos [3, 4]. Las escorias que resultan del proceso metalúrgico para la obtención de metales preciosos en forma de lingotes conocidos como “doré” incluyen una serie de operaciones unitarias como las que se observan en la Figura 3. Una vez que la mena mineral es lixiviada con una solución de cianuro de sodio, la solución rica resultantes se almacena previo a la precipitación de valores, primeramente se filtra para clarificarla (< 10 ppm de sólidos), enseguida se alimenta a una torre de deaireación (reducción del oxígeno en solución a 0.2-0.8 ppm), se ajusta su composición química y, finalmente, se conduce a la etapa de precipitación de metales preciosos mediante la adición de polvo de zinc [5], posteriormente el precipitado se filtra y se envía a fundición donde se generan barras de doré y escoria [6]. Si bien estas escorias son desechos de la etapa metalúrgica de fundición, muestran actualmente un gran interés debido a su alto contenido de oro que puede llegar a ser en ocasiones de hasta 279 g de Au por tonelada, como la que se ha observado en los procesos de recuperación del oro en la unidad de “La Herradura”, dicha ley es similar a la comúnmente observada en concentrados de metales preciosos que son sometidos a cianuración, es por ello que la recuperación de estos valores de las escorias se vuelve de interés para la industria metalúrgica.

Por otro lado la búsqueda de alternativas de lixiviación del oro al cianuro ha sido un tema controvertido y altamente evaluado en la metalurgia, se ha mostrado el tiosulfato como una posible alternativa ambiental de lixiviación del oro frente al cianuro [7-13], el presente proyecto propone la evaluación de la recuperación del

oro de las escorias provenientes de la unidad “La Herradura” con sistemas de lixiviación con tiosulfato, así como la evaluación del efecto de aditivos como Zn y tiourea en la disolución del oro.



**Figura 3.** Diagrama de flujo simplificado del proceso de precipitación de metales preciosos con polvo de zinc para la producción de doré [6, 14, 15].

## Antecedentes

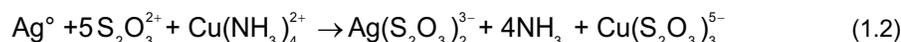
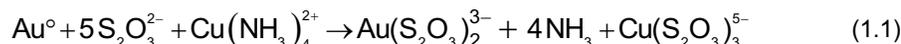
La cianuración ha sido el método más eficiente, simple y económico en la extracción de metales preciosos, sin embargo, en los últimos años las investigaciones se han enfocado a buscar disolventes y métodos alternos de tratamiento, esto debido a que el CN<sup>-</sup> es un agente lixivante tóxico. El uso del sistema Tiosulfato-Amoníaco-Cobre (TACu) es un método alternativo que tiene entre sus principales ventajas: no es tóxico y posee velocidades de disolución de metales preciosos más rápidas que las obtenidas en CN<sup>-</sup>. Aunque sus primeros usos se remontan a los años de 1900, hace algunos años fue retomado para el tratamiento de algunas menas refractarias, específicamente aquellas asociadas o que contienen cobre soluble en cianuro (óxidos y sulfuros secundarios) y las asociadas a materia carbonosa prerrodadora [7-13].

El sistema lixivante de tiosulfato ( $S_2O_3^{2-}$ ) consiste en una solución acuosa de esta sal ligeramente alcalina, conteniendo cobre y amoníaco libre. El sistema tiene como principales ventajas: (a) menor costo que el cianuro (3000 USD/Ton del NaCN, 400 USD/Ton del  $Na_2S_2O_3$ ); (b) el cobre que se utiliza como “catalizador” puede estar presente en algunas menas de Ox.Cu-Au y (c) baja toxicidad, además de que también forma complejos estables con el oro ( $\log K_{Au(CN)_2} = 38.3$ ,  $\log K_{Au(S_2O_3)_2} = 28.7$ ).

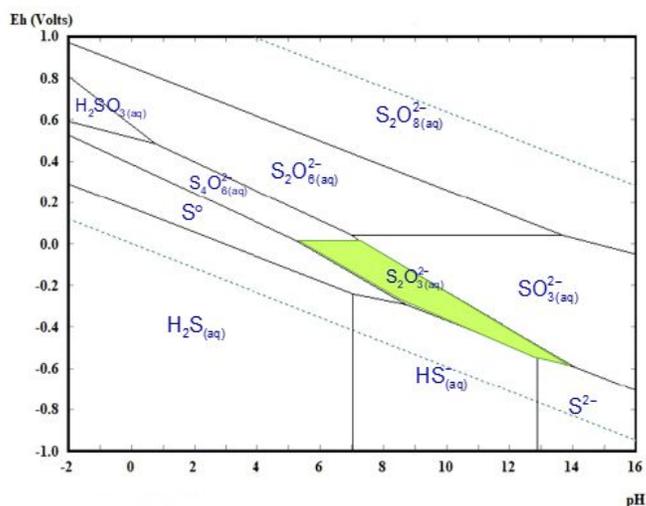
En contraste a estas y otras ventajas no mencionadas, la química del sistema tiosulfato-amoníaco-cobre (TACu) es relativamente complicada, lo que demanda la necesidad de buscar y mantener adecuadas concentraciones de sus constituyentes a fin de tener condiciones de potencial ( $E_h$ ) y pH que permitan tener buenas extracciones de metales preciosos y bajos consumos de reactivos [16]. El cobre y amoníaco en el sistema lixivante, forman tetramino de cobre ( $Cu(NH_3)_4^{2+}$ ), el cual favorece la velocidad de disolución de oro (18 a 20 veces con respecto al cianuro), no obstante, su exceso puede causar la oxidación-degradación del

tiosulfato, y por ende la pérdida del oro-plata al sólido. El exceso de amoníaco libre en la solución puede dar lugar a la disolución de impurezas indeseables, las que a menudo causan la oxidación excesiva de tiosulfato [17]. Contrariamente, su ausencia puede causar pasivación del oro debido a la acumulación de recubrimientos de azufre sobre la superficie de las partículas de oro, esto último resultado de la descomposición del tiosulfato [18].

Las reacciones de disolución de oro y plata metálicas en el sistema lixiviante TACu, además de otras posibles, son como siguen [19, 20] :



La aparente simplicidad del mecanismo resumido por las reacciones (1.1) y (1.2) en el sistema TACu es extremadamente complejo, la gran cantidad de equilibrios y especies químicas involucradas en el sistema requiere que las condiciones de trabajo deben ser controladas debido a la descomposición del primero en politionatos, por lo que se debe utilizar una solución alcalina para prevenir esta descomposición a pH ácidos. El diagrama  $E_h$ -pH para el sistema S-H<sub>2</sub>O, mostrado en Figura 4, y reportado en la literatura por varios autores revela la estrecha zona estable del tiosulfato y su descomposición en una gran variedad de politionatos (Tritionato  $\text{S}_3\text{O}_6^{2-}$ , Tetrionato  $\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$ , Pentionato  $\text{S}_5\text{O}_6^{2-}$ ) [7, 21].



**Figura 4.** Diagrama  $E_h$ -pH del sistema S-H<sub>2</sub>O (0.10 M) [21].

No obstante esta dualidad, las velocidades de disolución que muestra el sistema TACu sobre los metales preciosos aunado a la alta suavidad del  $\text{S}^{2-}$ , motivan a considerarlo para recuperar los metales contenidos en las escorias de fundición de los precipitados de las operaciones de lixiviación en montones y lixiviación dinámica de la unidad "La Herradura" [14, 15].

## Metodología Experimental

En esta sección resumimos el sistema experimental, los materiales, reactivos utilizados y el procedimiento de pruebas.

### Reactivos y Escorias de Estudio

Los reactivos utilizados fueron todos grado analítico, para trabajo de análisis químico cuantitativo, algunos de ellos se tienen también en grado técnico, no obstante, solo se utilizan en las prácticas generales.

Tabla 1. Reactivos utilizados y sus características.

NOMBRE	FÓRMULA	P.A., P.M.	Marca	Pureza
Tiosulfato de sodio	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	248.17	Karal	99.50
Sulfato de amonio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	132.15	Monterrey	Grado Analítico
Sulfato cúprico	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	249.68	Monterrey	98.5
Sulfato de zinc	ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	287.58	Fermont	98.0
Cianuro de sodio	NaCN	49.07	Monterrey	95.0
Nitrato de plomo	PbNO <sub>3</sub>	331.20	Golden Bell	98.0
Hidróxido de amonio	NH <sub>4</sub> (OH)	35.05	Karal	Grado Analítico

### Escorias de Fundición de Precipitados Au-Ag

#### Caracterización Física

El material de estudio lo constituyó una porción de aproximadamente un kilogramo de escorias de fundición molidas en seco a un tamaño de P<sub>80</sub> = 138 micras, resultantes estas de la fusión de precipitados de metales preciosos de las operaciones de la unidad minero-metalúrgica La Herradura. La Figura 5 muestra la distribución de tamaño de partícula de una porción de las escorias molidas.

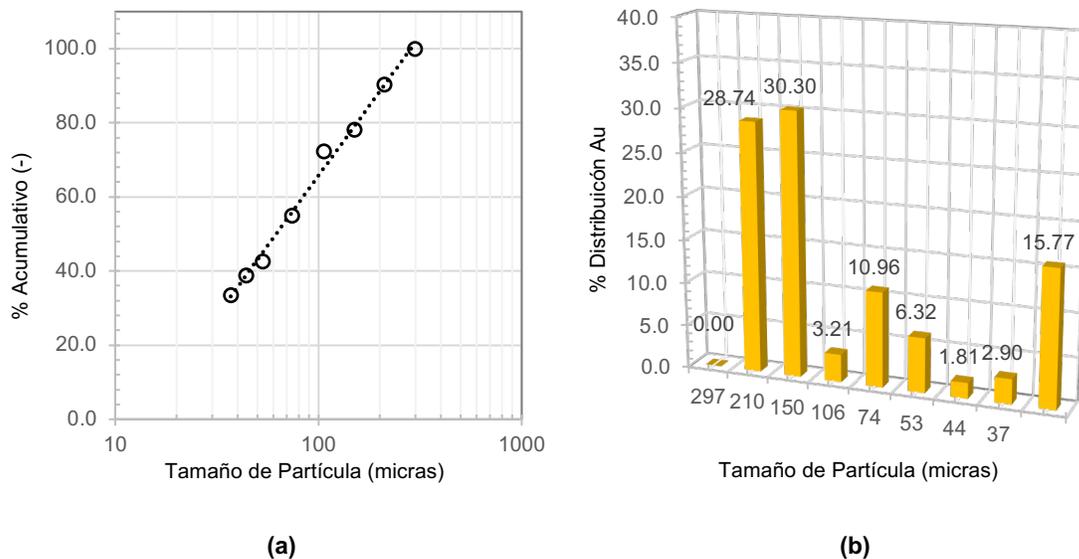


Figura 5. (a) Distribución de tamaño de partícula de escorias molidas, P<sub>80</sub> = 150 μm, y (b) Distribución % Au en cada fracción de tamaño.

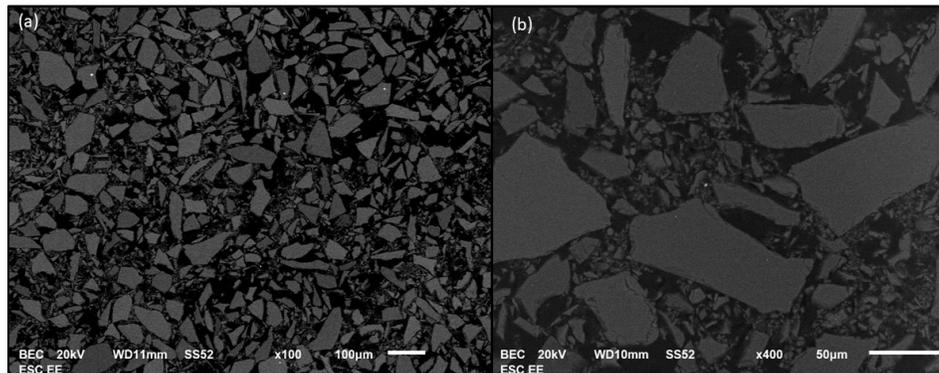
#### Caracterización Química y Microscópica

La Tabla 2 resume el análisis químico de una porción representativa de estas escorias, este es el promedio de dos determinaciones.

Tabla 2. Análisis químico de las escorias de fundición de precipitados.

Descripción Muestra	Ensaye (g/Ton)	
	Au	Ag
Escorias Fundición "La Herradura"	167.84	436.99

El aspecto global a bajas magnificaciones revela que la muestra se encuentra constituida mayormente de partículas de silicatos de zinc. La Figura 6, muestra la caracterización por MEB, en donde observa una vista general de la muestra con partículas de silicato de Zn en tamaños semi-homogéneos, con partículas que van desde los 112.5  $\mu\text{m}$  a 12.5  $\mu\text{m}$ .



**Figura 6.** MEB de las escorias, (a) ampliación de 100X y (b) ampliación de 400X.

El oro y la plata siempre se presentan juntos como aleación, y algunas veces con cobre, y muy ocasionalmente se observa plata con plomo en forma metálica también. Las especies y proporciones aproximadas corresponden a las siguientes:

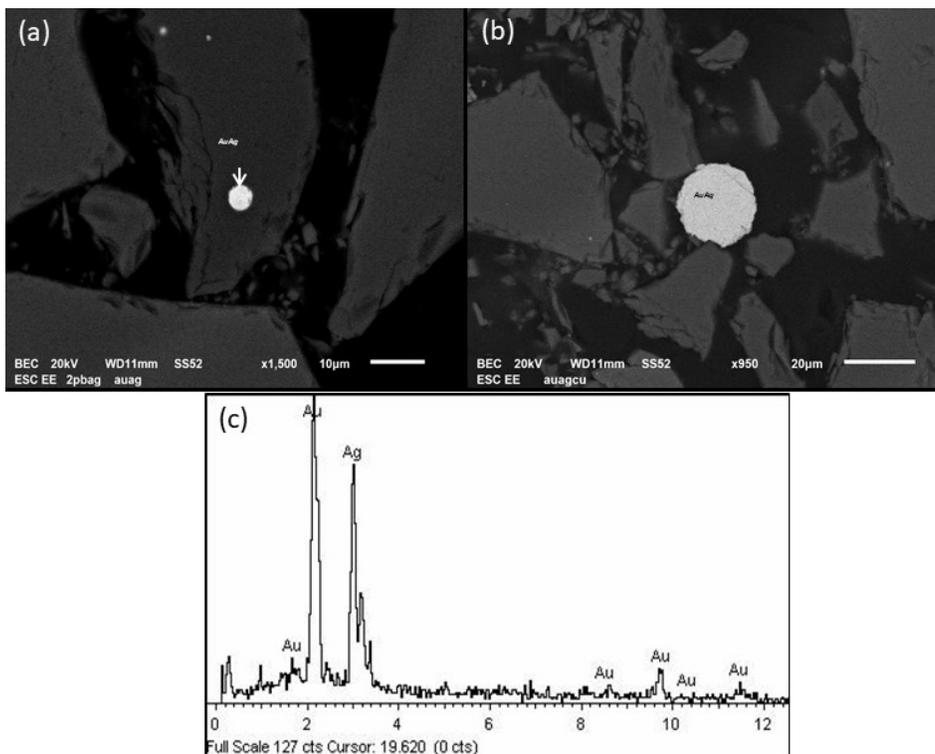
Mayoritarias		Minoritarias	
Au-Ag	75 %	Pb-Ag	2 %
Ag-Au-Cu	22 %	Pb-Ag-Cu-Se-S	1 %

Las características texturales de estas especies tipo aleación se pueden resumir según lo siguiente, en general, todas las partículas de estas especies presentan formas esféricas o redondeadas, del tipo que origina una fusión y solidificación. La mayor parte de estas se asocian a partículas de silicatos de zinc, principalmente como inclusiones seguido de uniones simples en los bordes de las partículas de silicatos de zinc. Los tamaños mayores corresponden a la aleación Au-Ag que alcanzan hasta 20  $\mu\text{m}$ , seguido de la aleación Au-Ag-Cu; y en ambas aleaciones, las proporciones de los elementos Au y Ag varían ampliamente, mientras que el Cu permanece como elemento minoritario. La aleación Pb-Ag, resulta minoritaria con respecto a las mencionadas anteriormente, en donde el Pb es el elemento dominante en esta aleación. Los sulfoseleniuros con plata son muy ocasionales, la Tabla 3 resume las características texturales de escorias.

**Tabla 3.** Características texturales de las partículas de estas especies con Oro y/o Plata [22].

Asociación	Tipo de Unión	Proporción %	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	
			Promedio	Variación
Características texturales de la aleación Au-Ag (75%)				
Au-Ag	Libre	30	12	10-20
Au-Ag con Silicato de zinc	Inclusiones en bordes	45	5	2-8
		25	8	3-12
Características texturales de la aleación Au-Ag-Cu (22%)				
Au-Ag-Cu	Libre	20	8	6-10
Au-Ag-Cu con Silicato de zinc	Inclusiones en bordes	50	2	<1-5
		30	6	3-8
Características texturales de la aleación Pb-Ag (2%)				
Pb-Ag con Silicato de zinc	Inclusiones En bordes	90	1	<1-2
		10	1	<1-2

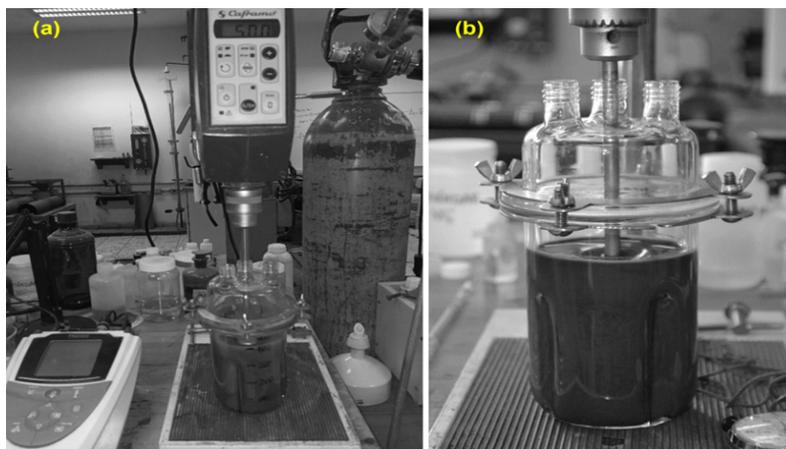
La Figura 7, muestra la micrografía de la aleación Au-Ag presente en la escoria incluida en una partícula de silicato de zinc, con tamaños de 5  $\mu\text{m}$  y partículas libres de tamaños de 11.7  $\mu\text{m}$  rodeadas de silicato.



**Figura 7.** MEB de partículas de Ag-Au presentes en las escorias: (a) ampliación del 1500x; (b) ampliación del 950x y (c) espectro EDS de las partículas Au-Ag [22].

### Procedimiento de Pruebas

Las pruebas de lixiviación de escorias se realizaron tanto en el sistema cianuro como en el TACu, el arreglo implementado para estas lo constituyo un reactor baffleado de 400 mL de volumen, la agitación fue provista a través de un cabezal Caframo, al que se adosa una flecha-propela del tipo turbina de 5 cm de diámetro, fijándose la velocidad de agitación de prueba en 400  $\text{min}^{-1}$ , la Figura 8 ilustra el arreglo para pruebas.



**Figura 8.** Sistema para pruebas de cinética de lixiviación: a) reactor baffleado de 400 mL, cabezal, y flecha-propela, y (b) detalles del reactor baffleado.

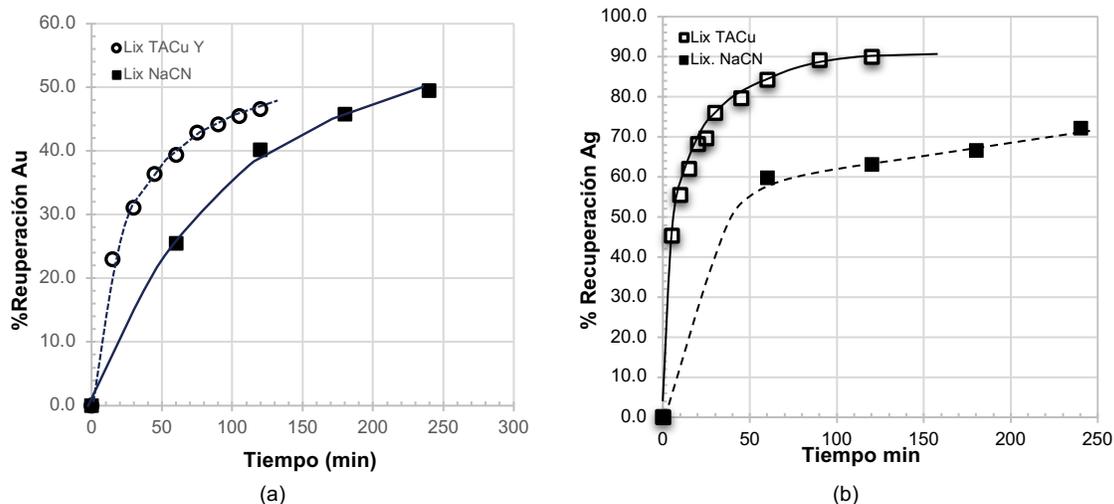
Para cada prueba primeramente se preparó la disolución lixivante a usar, para ello se dispusieron 300 mL de agua destilada en un vaso de medio litro, se pesó la masa de tiosulfato de prueba y se integró al agua, enseguida se tomaron los mililitros de hidróxido de amonía e igualmente se adicionaron a la disolución de tiosulfato, finalmente se pesó el sulfato de cobre, se aforo en matraz volumétrico y se agito para su homogeneización. De esta última disolución se tomaron 400 mL, se transfirieron al reactor bafleado, enseguida se pesaron 40 gramos de muestra de escorias, se agregaron al reactor, arrancándose la agitación y el reloj.

El seguimiento de prueba; recuperación de valores contra tiempo, se hizo tomando muestras de la solución de prueba cada 10 minutos durante la primera media hora, y después cada quince minutos hasta completar un total de dos horas de prueba. Para cada toma de muestra se detuvo la agitación, se dejaron decantar los sólidos de escoria por cinco minutos, se tomaron cinco mililitros, los que enseguida se centrifugaron a  $3000 \text{ min}^{-1}$ . La solución centrifugada se transfirió en su totalidad a un vial de 20 mL, de la que, para efectos de llevar a cabo el análisis químico, se tomó un mililitro y se diluyo en un vial con 9 mililitros de agua destilada.

Al terminó de cada prueba, las soluciones de muestra fueron analizadas vía absorción atómica en un Equipo Perkin-Elmer, AAnalyst 200. Primeramente, se determinó oro sobre muestras concentradas de prueba, para esto se colocó la lámpara de oro, se dejó calentar por un tiempo de 15 minutos, enseguida se leyeron y registraron las absorbancias de estándares (1-5, 7.5, 10, 15 y 20 mg Au/Ton) y finalmente se procedió a la lectura de absorbancia en muestras de prueba. Las concentraciones de oro en muestras problema se obtuvieron a partir de la curva de calibración de estándares, las determinaciones de plata fueron realizadas siguiendo el mismo procedimiento, con excepción de que los analitos leídos fueron los diluidos.

## Resultados

Los primeros resultados de prueba mostrados son de la lixiviación de escorias en el sistema cianuro, el cual se considera como el sistema referente, caracterizado este por velocidades de disolución moderadas del orden de  $3.25 \text{ mg/cm}^2/\text{h}$  (equivalentes a una penetración de 1.68 micrones/h), así como en el sistema TACu, el que, como se mencionó puede alcanzar velocidades 18 a 20 veces mayores a esta [23]. Los resultados de recuperación oro contra tiempo en estos dos sistemas son resumidos en Figura 9.

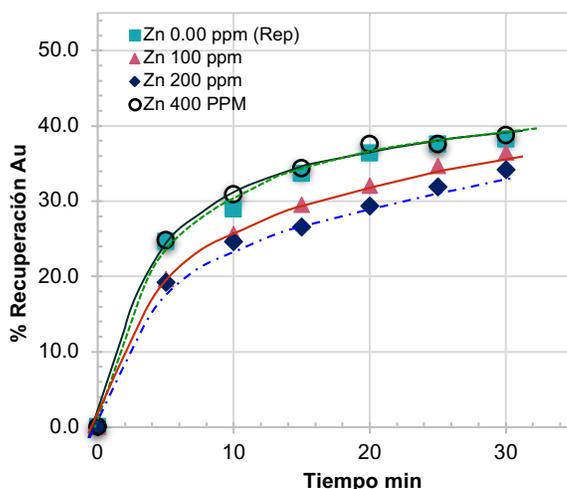


**Figura 9.** Recuperaciones en los sistemas de lixiviación de cianuro ( $0.060 \text{ M NaCN}$  y  $\text{pH}=11$ ) y tiosulfato-amonía-cobre ( $0.10 \text{ M S}_2\text{O}_3^{2-}$ ,  $0.40 \text{ M NH}_4^+$  y  $0.005 \text{ M Cu}^{2+}$ ) (a) oro y (b) plata.

Realizadas estas pruebas preliminares, se procedió a evaluar el efecto que tiene la adición de algunos iones en el sistema de lixiviación TACu, estudios previos sobre un disco rotatorio de plata y un concentrado de flotación del distrito minero mostraron que la adición de iones plomo, calcio, zinc, entre otros, en bajas concentraciones pueden catalizar la velocidad de disolución de plata. No obstante, debe mencionarse que debido a la complejidad del sistema, las velocidades observadas dependen de las concentraciones de tiosulfato, amonía, cobre y pH, es decir de la química de la solución [24, 25].

En términos del principio ABDB, según el cual los cationes-aniones se combinan de manera preferencial, es decir duro con duro y blando con blando. Así sí el  $S^{2-}$  es un anión blando, es de esperar que los compuestos resultantes con cationes blandos se caractericen por constantes de acción de masas altas, es decir, sean más estables, p.e. con Au(I) el  $Au(S_2O_3)_2^{3-}$  debe ser un compuesto de alta estabilidad. En el caso la alta suavidad del  $S^{2-}$  da cuenta, o en cierto modo explica las altas constantes de estabilidad del Au(I) con ligandos tales como:  $HS^-$ ,  $SO_3^{2-}$ , entre otros [26].

No obstante que, existen un sinnúmero de iones con características blandas, en este estudio, por brevedad de tiempo solo se realizaron pruebas con zinc, adicionando o teniéndose concentraciones de 100, 200 y 400 mg/L, los resultados de estas pruebas, así como la referente (sin agregar zinc), son resumidos en Figura 10.



**Figura 10.** Recuperaciones de oro de escorias en el sistema TACu : 0.10 M  $S_2O_3^{2-}$ , 0.40 M  $NH_4^+$ , 0.005 M Cu, y 100 a 400 ppm de Zn.

## Conclusiones

El estudio parcial aquí reportado ha sido enfocado a determinar importantes características de la disolución del oro contenido en escorias de fundición en el sistema tiosulfato-amoniaco-cobre, así como la familiarización del comportamiento del sistema, en términos de su estabilidad y el efecto de la adición de zinc (ion blando) como catalizador de la velocidad de disolución de los metales preciosos. El mayor esfuerzo y tiempo dedicado se centró en definir un marco referente, para subsecuentemente determinar las velocidades de disolución en el sistema disolvente de interés. Como conclusiones podemos resumir las siguientes, en comparación con cianuro, las velocidades de disolución en el sistema TACu son mayores. Por debajo de 200 ppm de zinc no parece haber un efecto de catalizador de este en la velocidad.

Las características texturales de las especies metálicas de interés en escorias, como son: 99% de los metales preciosos se encuentran formando aleaciones; 75% como Au-Ag y 22% Au-Ag-Cu, de las que el 45% se encuentra como inclusiones de 5 micras dentro silicatos, así como la composición química, se traduce en lentas velocidades de disolución, resultado de una liberación parcial.

## Agradecimientos

Los alumnos Yessenia Guadalupe Ledesma Herrera<sup>1</sup>, Mariana Camarillo Silva<sup>1</sup>, Juan Diego Martínez Torres<sup>1</sup> y Susana Guadalupe Delgado Hernández<sup>2</sup>, alumnos de los Programas Educativos de <sup>(1)</sup> Ingeniería Metalúrgica y <sup>(2)</sup> Química, y el profesor Enrique Elorza Rodríguez, agradecen a la directora del XXIX Verano de la Ciencia Dra. Diana del Consuelo Caldera González por la oportunidad y confianza. Asimismo, agradecen a la Universidad de Guanajuato, la beca otorgada y el facilitarnos sus instalaciones para la realización de este proyecto.

## Referencias

- [1]. Camimex, *Minería Sostenible*, I.d.I.O.S.A.G.O.d.I.C.M.d. México, Editor. 2023, Cámara Minera de México: México. p. pág.: 1-89.
- [2]. Yannopoulos, J.C., *Treatment of Refractory Gold Ores (Chapter 5)*, in *The Extractive Metallurgy of Gold*. 1991, Van Nostrand Reinhold: New York. p. 79-113.
- [3]. Cui, J. and H.J. Roven, *Electronic Waste*, in *Waste: A Handbook for Management. Electronic Waste*. 2011, Elsevier Inc. p. pág.: 281-296.
- [4]. Sarfo, P., et al., *Carbothermal reduction of copper smelter slag for recycling into pig iron and glass*. *Mineral Engineering*, 2017. Volume 107: p. pág.: 8-19.
- [5]. Walton, R., *Zinc Cementation in Gold Ore Processing, Project Development and Operations*, M. Adams, Editor. 2016, Elsevier: New York. p. pág.: 553-560.
- [6]. Gamboa-Hernández, A., J.R. Parga-Torres, and H.A. Moreno-Casillas, *Recovery of silver from slags generated by melting precipitates from the Merrill–Crowe process*. *The Canadian Metallurgical Quarterly*, 2018. Volume 58 (2): p. pág.: 204-212.
- [7]. Alymore, M.G. and D.M. Muir, *Thiosulfate Leaching of Gold-A Review*. *Minerals Engineering*, 2001. Volume 14 (2): p. pág.: 135-174.
- [8]. Alymore, M., *Hydrometallurgy 2014, 7th International Symposium, in Thiosulfate leaching of Gold*. 2014: Victoria, British Columbia, Canada. p. pág.:1-155.
- [9]. Fleming, C.A. and W.G. Grot, *Hydrometallurgical extraction process*. 1998: Unite States of America Patent.
- [10]. Flett, D.S., R. Derry, and J.C. Wilson, *Chemical study of thiosulfate leaching of silver sulfide (Sec. C Mineral Processing, Extractive Metallurgy)*. *Transaction of the Intitute of Mineral Metallurgy* 1983. Volume 92: p. pág.: 216-223.
- [11]. Xinrong, L., et al., *Highly efficient and selective extraction of Au(I) from thiosulfate gold-leaching solution using diphenylphosphine*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024. Volume 12 (Número 1): p. pág.: .
- [12]. Xinrong, L., et al., *Efficient and Selective Recovery of Gold from Thiosulfate Leaching Solution Using Functionalized Cyclodextrins Synthesized by a Steric Hindrance Strategy*. *Advanced Functoinal Materials*, 2024. **39**(1).
- [13]. Yue, L., et al., *Synergistical thiourea and thiosulfate leaching gold from a gold concentrate calcine with copper-ammonia catalysis*. *Separation and Purification Technology*, 2023. Volume 327.
- [14]. Elorza, E.R., *Operación Patios, Merrill Crowe, Fundición La Herradura (Planta Herradura, PH)*, in *Videos de la operación de la unidad minero-metalúrgica La Herradura*. 2022: Guanajuato.
- [15]. Méndez, D., *Estudio de obtención de valores de Au y Ag por cianuración de escorias de fundición*, in *Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología*. 2023, Universidad de Gunajuato: Guanajuato. p. pág.: 1-127.
- [16]. Adams, M.D., *Chapter 21:Alternative lixivants to cyanide for leaching gold ores - Chapter 22: Thiosulfate as an alternative lixiviant to cyanide for gold ores*, in *Advances in Gold Ore Processing*, D.A. Mike and B.A. Wills, Editors. 2005, Elsevier. p. pág.: 501-561.
- [17]. Ji, J., et al. *In 5th International Symposium on Hydrometallurgy. in A novel thiosulfate system for leaching gold without the use of copper and ammonia*. 2003. Vancouver British Columbia, Canada.: TMS, Cánada.
- [18]. Pedraza, A.M., et al., *Electrooxidation of thiosulphate ion on gold: Study by means of cyclic voltammetry and auger electron spectroscopy*. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 1988. Volume 2 (Número 250): p. pág.: 443-449.
- [19]. Feng, D. and J.S.J.v. Deventer, *The effect of sulphur species on thiosulphate leaching of gold*. *Minerals Engineering*, 2006. Volume 20 (Número 3): p. pág.: 273-281.

- [20]. Senanayake, G., *Gold leaching by copper(II) in ammoniacal thiosulphate solutions in the presence of additives. Part I: A review of the effect of hard-soft and Lewis acid-base properties and interactions of ions*. Hydrometallurgy, 2012. Volume 115, 116: p. pág.: 1-20.
- [21]. Aymore, M., *Thiosulfate Leaching of Gold*, in *Tenova, Mining & Minerals (Australia) Pty Ltd*, t.I.S. Hydrometallurgy 2014, Editor. 2014: British Columbia, Canada.
- [22]. Aragón, A.P., *ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE ESPECIES DE ORO Y PLATA EN MUESTRA DE ESCORIA*. 2022, Instituto de Metalurgia: San Luis Potosí. p. pág.: 1-19.
- [23]. Banisi, S. and A.R. Laplante, *El comportamiento del oro en el circuito de molienda de Hemlo Gold Mines Ltd*. 2016, FLDSmith.
- [24]. Álvarez, G.L. and E.R. Elorza, *Efecto de algunos iones en la cinética de disolución de plata en el sistema tiosulfato-amonía-cobre (TACu)*, in *XX Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico*. 2015: Mazatlán. p. pág.: 1-16.
- [25]. Elorza-Soto, F., et al., *Efecto de algunos iones en la velocidad de disolución de plata metálica, y de los metales preciosos en un concentrado en el sistema Tiosulfato-Amonía-Cobre II*, in *XXVI Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva*, U.d. Sonora, Editor. 2017: Mazatlán. p. pág.: 1-15.
- [26]. Pearson, R.G., *Segunda parte, teorías subyacentes: Ácidos y bases duras y blandas*. Chemical Education, 1968. Volume 45: p. pág.: 112-118.