

## Recuperación de oro y plata de los insolubles y productos de la lixiviación directa usando cianuración-glicina

N.G. Picazo Rodríguez<sup>1,4</sup>, F.R. Carrillo Pedroza<sup>2,\*</sup>, A. Martínez Luévanos<sup>1</sup>, M.J. Soria Aguilar<sup>2</sup>, I. Almaguer Guzmán<sup>3</sup>, M. Garza Roman<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>2</sup> Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, Monclova, Coahuila, México.

<sup>3</sup> CIDT-SEPSA Peñoles, Torreón, Coahuila, México

<sup>4</sup> Instituto Tecnológico Superior de Monclova, Monclova, Coahuila, Mexico

\* [raul.carrillo@uadec.edu.mx](mailto:raul.carrillo@uadec.edu.mx)

### RESUMEN

Los insolubles de lixiviación acida directa de concentrados de esfalerita (sulfuro de zinc) son los sólidos que no se lixiviaron, los cuales contienen valores de oro y plata. Estos valores, junto con los productos de la reacción de lixiviación, principalmente jarosita y azufre elemental, constituyen los sólidos de dicho proceso (SL). Dado el contenido de valores, principalmente plata, se propone su recuperación mediante el método de cianuración, y usando como reactivo coadyuvante la glicina. En este trabajo se muestran los resultados de uno de los pretratamientos dados al SL, considerando el efecto que tienen la jarosita y el azufre elemental en la recuperación de oro y plata. Se realiza un análisis de las reacciones químicas y de las especies predominantes para explicar los resultados obtenidos.

**PALABRAS CLAVE:** *sólidos de lixiviación; lixiviación directa; cianuración; glicina*

## **ANTECEDENTES**

El zinc metal es un metal que es obtenido principalmente de la esfalerita por procesos pirohidrometalúrgicos a través del proceso Roast-Leach-Electrowinning (RLE), el cual implica una etapa de tostado y es actualmente responsable de más del 85% de la producción total de zinc (Sahu et al., 2006; Souza et al., 2007). En el proceso RLE, la producción de 1 t de zinc genera 300 t de residuos SL, los cuales contienen altas concentraciones de zinc, plomo, hierro, plata y oro (Zhang et al., 2012). Dado que los concentrados de zinc son más complejos en cuanto a especies como silicatos y minerales combinados de hierro y zinc, estos afectan la eficiencia de la tostación (Mubarok et al., 2018). En este sentido se ha propuesto la ruta de lixiviación directa de esfalerita, en la cual el residuo o sólido generado (al que se le llamara SL) se compone de jarosita y azufre elemental, además de los insolubles (Jorjani and Ghahreman, 2017). En base a lo anterior algunos investigadores se han enfocado en realizar pruebas para estabilizar el residuo (Erdem and Özverdi, 2011) y otros en recuperar los metales de valor (Xiang et al., 2017). Algunos metales de interés como la plata quedan ocluidos en la estructura de la jarosita, por lo que se ha propuesto aplicar un proceso de descomposición antes de la lixiviación de la misma para recuperar la plata (Gonzales et al., 2019; Reyes et al., 2017).

La recuperación de metales como el oro y la plata de los residuos de lixiviación, a través de la vía hidrometalúrgica se puede llevar a cabo en medios lixiviantes alternativos al cianuro tales como la tiourea, tiosulfato, halógenos y solventes orgánicos como la glicina (Oraby and Eksteen, 2015). No obstante, el proceso de cianuración sigue siendo la técnica principal para el tratamiento de minerales de oro y plata (Deschênes et al., 2010).

En el presente trabajo se evaluó el efecto de un pretratamiento alcalino aplicado a un sólido (SL) obtenido de lixiviación directa de esfalerita (constituido principalmente por jarosita, azufre elemental y metales de valor como oro y plata) en la posterior recuperación de oro y plata por el método de cianuración asistida con glicina.

## **METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

En el presente trabajo se emplearon los SL procedentes de un proceso lixiviación directa de esfalerita, con precipitación de hierro como jarosita. Se caracterizó por fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X. Además, se determinó la asociación y composición química de las partículas mediante el sistema MLA (Mineral Liberation Analyzer) adaptado a un MEB (Microscopio Electrónico de Barrido).

El desarrollo experimental consistió en dos etapas: 1.-Pretratamiento del SL y 2.- Recuperación del oro y la plata del SL.

El pretratamiento de SL fue el de descomposición hidrotérmica alcalina: Estas pruebas se llevaron a cabo en un agitador mecánico. Las pruebas se realizaron durante tres horas a 50 °C y a pH 11 el cual se obtuvo empleando una concentración de NaOH de 1 M. La relación SL- líquido fue del 10%.

El SL sin tratar y tratado se lixivió a escala laboratorio en diferentes medios lixiviantes (cianuro, cianuro con glicina y glicina) para encontrar la ruta óptima para la recuperación de valores. Todas las pruebas de cianuración y cianuración con glicina se llevaron a cabo pesando una cantidad del SL de tal manera que se mantuviera una relación SL-líquido del 10%, las pruebas de cianuración se realizaron en botellas. En la Tabla 1 se muestran las condiciones experimentales aplicadas con el uso de cada tipo de medio lixivante.

**Tabla 1.-** Condiciones experimentales para cada medio lixivante empleado en la recuperación de Au y Ag.

Medio lixivante	pH	Temperatura, °C	[Medio lixivante], M	Reactivos adicionales	Reactor	Tiempo (h)
Cianuro	11	Ambiente	0.06	Ninguno	Botellas	24
Cianuro	11	Ambiente	0.06	Glicina, 0.06 M	Botellas	24
Glicina	11	50°C	1	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , 1%	Vaso	24

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización del SL

El contenido de oro y plata, obtenido por ensaye al fuego y espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.-** Análisis químico de oro y plata en el SL.

Ag (g/t)	192.2
Au (g/t)	0.78

En la Figura 1 se muestra el patrón de difracción de rayos X del SL sin ningún tratamiento.

La Tabla 3 muestra los principales minerales que constituyen el SL.

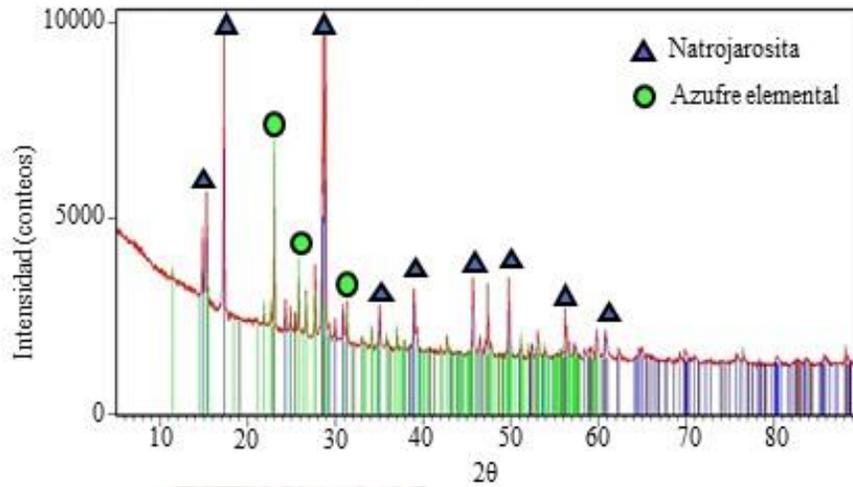


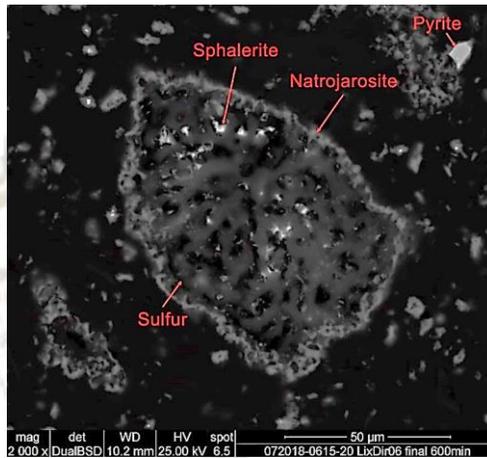
Figura 1.- Patrón de difracción del SL.

Tabla 3.- Reconstrucción mineralógica del SL (wt. %).

Especies identificadas		Composición (% Peso)
Natrojarosita	$\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	58
Azufre	$\text{S}_8$	24
Esfalerita	$\text{ZnS}$	7
Sulfato de Plomo	$\text{PbSO}_4$	1
Pirita	$\text{FeS}_2$	1
Anhidrita	$\text{CaSO}_4$	4
Otros	-	5

La Figura 2 muestra una imagen tomada con un microscopio electrónico de barrido (MEB), donde se observa la presencia de la natrojarosita y el azufre elemental.

La asociación y composición química de las partículas del residuo de lixiviación fue determinada mediante el sistema MLA (Mineral Liberation Analyzer) adaptado a un MEB (Microscopio Electrónico de Barrido). Los resultados son mostrados en la Tabla 4, la metodología del análisis consistió en la adquisición de imágenes con electrones retrodispersados para delinear las partículas minerales para su posterior identificación a través de análisis con rayos X.



**Figura 2.-** Microfotografía del MEB del SL mostrando la presencia de pirita, azufre elemental y esfalerita, estas últimas rodeadas de una capa de jarosita.

**Tabla 4.-** Especies minerales identificadas por microscopía electrónica de barrido en el SL.

Grupo	Mineral	Fórmula	Peso (%)
Sulfuros	Galena	PbS	0.74
	Esfalerita	ZnS	8.68
	Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	0.75
	Pirita	FeS <sub>2</sub>	1.12
	Arsenopirita	FeAsS	0.52
	Pirrotita	FeS	0.53
Especies de plata	Pirargirita	Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>	0.05
	Freibergita	(Ag <sub>0.3</sub> Cu <sub>0.6</sub> Fe <sub>0.1</sub> ) <sub>12</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	0.01
Otros Zn	Franklinita	Fe <sub>2</sub> ZnO <sub>4</sub>	0.01
	Gunningita	ZnSO <sub>4</sub> *H <sub>2</sub> O	7.54
	Natrojarosita	NaFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	51.82
	Azufre	S°	16.12
	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	0.04

<b>Gangas y otras especies de óxidos</b>	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	2.32
	Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	4.20
	Grosularita	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	0.35
	Actinolita	Ca <sub>2</sub> (Mg,Fe) <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	0.38
	Andradita	Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	0.45
	Otros	/	4.37

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas de recuperación de oro y plata del SL, las cuales fueron realizadas tomando en cuenta su composición, principalmente de azufre elemental, natrojarosita, oro y plata (presente como pirargirita). Respecto a la pirargirita, debido a que hay muy poca información acerca de pretratamientos de este tipo de materiales se considerara como dos especies diferentes Ag<sub>2</sub>S y Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, para una mejor comprensión de los mecanismos de reacción.

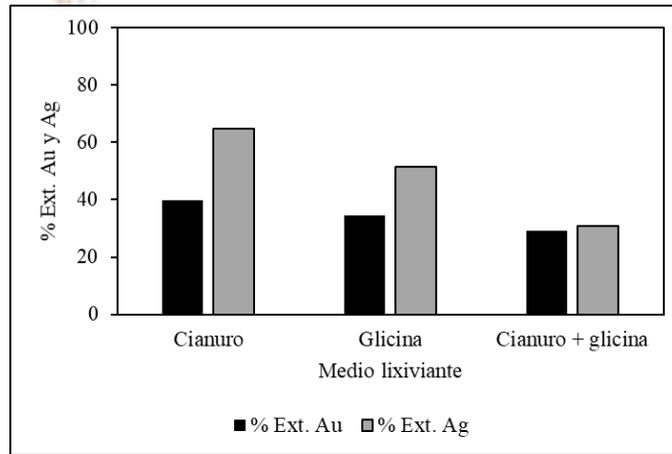
#### **Disolución de oro y plata del SL empleando cianuro, cianuro con glicina y glicina**

En primer lugar, se emplearon medios lixiviantes de cianuro, cianuro con glicina y glicina para llevar a cabo la recuperación de oro y plata del SL sin pretratamientos. En este sentido, se realizó un análisis comparativo utilizando los promedios de las extracciones de oro y plata obtenidas por factor principal (las variables consideradas, tales como medios lixiviantes), esto con la finalidad de evaluar la efectividad de los medios lixiviantes en la extracción del oro y la plata.

La Figura 3 muestra los resultados de la extracción o disolución de oro y plata del residuo de la lixiviación directa de esfalerita en los diferentes medios lixiviantes. Cabe mencionar que, para el caso de la glicina, se utilizó una concentración muy elevada (1M).

De acuerdo con lo observado en la Figura 3 los resultados parecen indicar que tanto el oro como la plata son refractarios (extracción menor al 80%) a los diferentes medios lixiviantes. Aunque, comparativamente, la cianuración es el método que disolvió mayor cantidad de plata y oro.

En el caso de la cianuración convencional, se sabe que el control del pH durante la cianuración es importante para evitar la pérdida excesiva de cianuro por hidrólisis la cual ocurre a valores de pH menores a 9.4, este control de pH normalmente se realiza empleando cal (Ca(OH)<sub>2</sub>). Como se mencionó anteriormente el SL está formado principalmente por natrojarosita y azufre elemental, estos componentes consumen cal de acuerdo con las siguientes reacciones:



**Figura 3.-** Disolución de oro y plata obtenida por diferentes sistemas lixiviantes, para el SL sin pretratamientos en el medio de cianuro, glicina y cianuro con glicina.

Con base a las reacciones anteriores se puede inferir que la cianuración convencional del SL sin pretratamientos no es un proceso adecuado debido a que sus principales componentes son ávidos consumidores de cal. Por otro lado, agregar un exceso de cal en la cianuración, en busca de acelerar la descomposición de la natrojarosita y el azufre elemental en una misma etapa no sería adecuado, ya que un exceso de cal provocaría el incremento de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (de acuerdo con la Reacción 3), el cual se acumula en la superficie del metal y evita la reacción con el cianuro (Habashi, 1967).



Otro factor para considerar es la plata que está presente como pirargirita, un 37.2% asociada a la natrojarosita y un 62.8% libre. Se sabe que cuando la plata está contenida en el  $\text{Ag}_2\text{S}$ , esta se disuelve fácilmente en cianuro, sin embargo, cuando está asociada al Sb como pirargirita difícilmente se extrae (Habashi, 1967). Durante la cianuración, el antimonio se disuelve durante la cianuración para formar antimonatos, retrasando la disolución del oro y la plata (Deschênes et al., 2009).

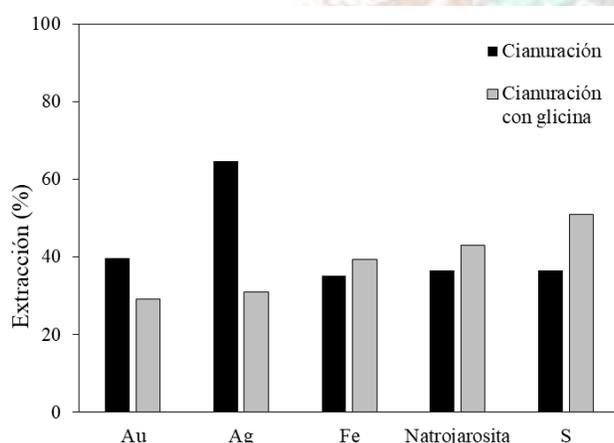
Liu et al. (2017) mencionan en su trabajo de investigación que en el proceso de lixiviación alcalina con cianuro el  $Sb_2S_3$  incrementa el consumo de  $OH^-$ ,  $CN^-$  y  $O_2$ , a continuación, se presentan las reacciones propuestas por estos investigadores:



El  $Sb_2S_3$  se deposita en la superficie de las partículas de oro, formando una capa de producto densa e impidiendo la difusión de  $CN^-$  y  $O_2$  a las partículas de oro, lo que lleva a una baja relación de lixiviación. Algunos investigadores proponen ciertos pretratamientos para este tipo de materiales refractarios como lo son las lixiviaciones alcalinas con  $NaOH$  o  $Na_2S$  (Alp et al., 2010; Elorza et al., 2010) o tostación (Fraser et al., 1991).

En a los resultados anteriores, se decidió solamente estudiar la cianuración convencional y la cianuración asistida con glicina para visualizar el efecto de esta última en la extracción de los valores comparándola con la cianuración.

En la Figura 4 se presentan los resultados de la extracción de oro y plata, así como la interacción de otros elementos presentes en el SL, como el Fe y el  $S^\circ$  con el medio de lixiviación, los cuales pueden interferir con la extracción de los valores. En la Tabla VI se muestra como fueron cambiando la composición química y las fases del SL en estos medios lixiviantes.



**Figura 4.-** Extracción (%) de Au, Ag, Fe,  $S^\circ$  y descomposición de natrojarosita (%) del SL sin pretratamientos durante la cianuración y cianuración con glicina.

Como se puede observar en la Figura 4 se obtuvo una extracción de oro de 40% y 65% de plata durante la cianuración convencional. En primer lugar, parte de la plata presente como pirargirita se encuentra asociada a la natrojarosita. De acuerdo con los resultados, cerca del 40% de la natrojarosita se descompuso durante la cianuración formando hidróxidos de hierro de acuerdo con la reacción 1.

No obstante, la formación de óxidos de hierro y/o hidróxidos insolubles no siempre es deseable, ya sea antes o durante la lixiviación con cianuro, ya que estos productos pueden recubrir las partículas de oro y pueden reducir la eficiencia de lixiviación, a veces de manera significativa (Marsden & House, 2005). Por otro lado, parte del hierro que se disuelve de la natrojarosita puede ser reducido por el cianuro para luego formar hexacianuro de hierro de acuerdo con las siguientes reacciones:



Lo anterior se muestra en Figura 5 que representa el diagrama de distribución de especies del  $\text{Fe}^{2+}$  y el  $\text{CN}^-$ , la reacción del hierro y el cianuro disminuye la disponibilidad de este último (este diagrama fue realizado a través del software Medusa con las concentraciones reales de las especies empleadas en los experimentos).

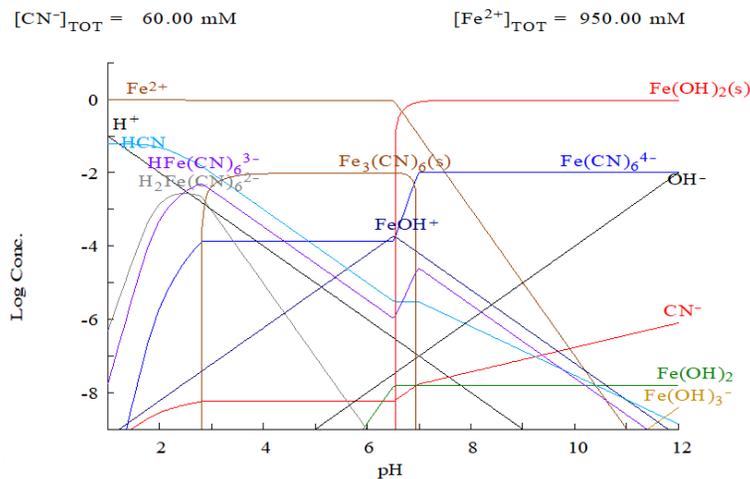
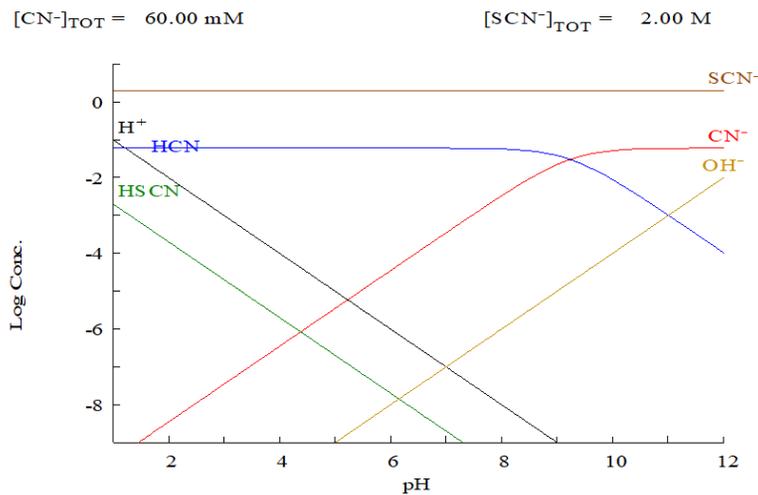


Figura 5.- Diagrama de distribución de especies del sistema  $\text{Fe}^{2+}$ - $\text{CN}^-$ .

En el caso del azufre, este también afecta la recuperación de los valores ya que consume cianuro para formar tiocianato de acuerdo con la siguiente reacción.



En el diagrama de distribución de especies de la Figura 6 se puede observar que el tiocianato es estable en toda la escala de pH (este diagrama fue realizado a través del software Medusa con las concentraciones reales de las especies empleadas en los experimentos).



**Figura 6.-** Diagrama de distribución de especies del sistema CN-SCN<sup>-</sup>.

Además de acuerdo con la siguiente reacción, el complejo de plata y cianuro puede reaccionar con el S<sup>o</sup> y por lo cual la plata disuelta puede precipitar nuevamente como tiocianato de plata.



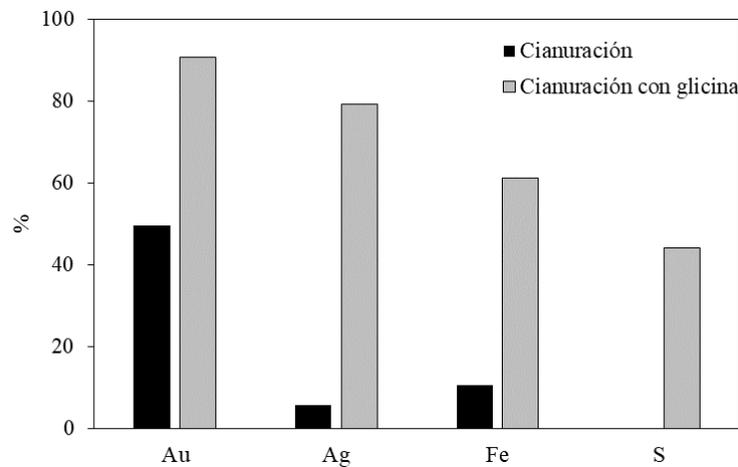
En el caso de la cianuración con glicina de acuerdo con algunos investigadores la glicina forma complejos con el hierro y consume radicales OH<sup>-</sup>, según la siguiente reacción (Yin et al., 2017).



En el caso de los resultados la cianuración con glicina del SL mostrados en la Figura 4 indican que la glicina no tuvo efecto significativo en la extracción de oro, la extracción del hierro es un poco superior a la obtenida en la cianuración convencional, por lo que se infiere que la glicina solo tuvo efecto en el consumo de los radicales  $\text{OH}^-$ , lo que en conjunto con lo mencionado anteriormente de que la natrojarosita consume cianuro y álcali, y que el  $\text{S}^0$  además consume cianuro para formar tiocianato y precipitar de nuevo la plata, afecta la recuperación de los valores.

Considerando que los componentes del residuo provocan su refractariedad, para evaluar adecuadamente el efecto de la glicina y optimizar la cianuración convencional, se decidió evaluar un tratamiento previo a la cianuración. En la Figura 7 se presenta la extracción de oro, plata, hierro y azufre elemental del SL tratado alcalinamente y lixiviado en medio de cianuro y cianuro con glicina y en la Tabla VII se muestra como fueron cambiando la composición química y las fases del SL después del pretratamiento alcalino y de la lixiviación en los medios lixiviantes empleados.

El residuo después de ser sometido al pretratamiento hidrotérmico alcalino se filtró y se lixivió en cianuro y cianuro con glicina, como se observa en la Tabla 5 la plata se concentró de 192 g/t a 236.83 g/t, por lo que el residuo sometido a la lixiviación tenía mayor contenido de oro y plata que el residuo sin pretratamientos.

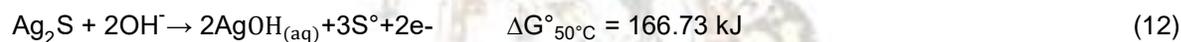


**Figura 7.-** Extracción (%) de Au, Ag, Fe y  $\text{S}^0$  de SL tratado en medio alcalino.

**Tabla 5.-** Composición química del residuo y fases del SL con pretratamiento alcalino antes y después de la lixiviación con cianuro y cianuro con glicina.

Análisis químico				Especies, Composición (% peso)			
Muestra	Au (g/t)	Ag (g/t)	Fe (%)	S°	Natrojarosita NaFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	ZnS	Material no identificado
SL	0.78	192	17.94	24	58	7	6
SL sometido a pretratamiento alcalino	0.76	236.83	20.34	17		17	56
Cianuración	0.51	216.85	21.5	22		17	55
Cianuración con glicina	0.49	121.63	22.1	23		17	48

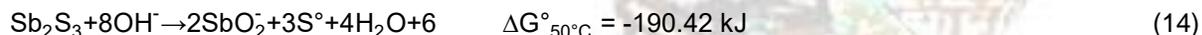
Suponiendo que la pirargirita consiste en Ag<sub>2</sub>S y Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, la reacción de la pirargirita con el NaOH ocurre de la siguiente manera:



En el caso del sulfuro de antimonio, Sminčáková (2009), menciona que la lixiviación de antimonio en medio alcalino con NaOH se lleva a cabo de acuerdo con la siguiente reacción:

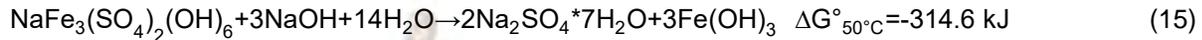


Sin embargo, se propone la siguiente reacción calculada empleando el software HSC Chemistry 6:

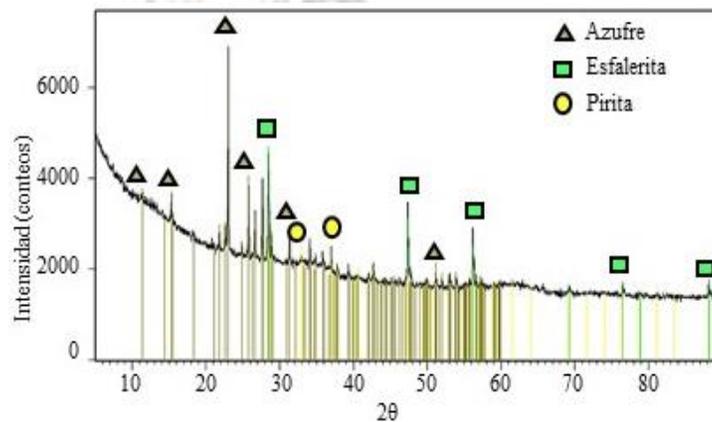


Como se observa en la reacción del sulfuro de plata en el medio alcalino el  $\Delta G^\circ$  es positivo, por lo que termodinámicamente no es factible que ocurra; no obstante, el  $\Delta G^\circ$  negativo de la reacción del sulfuro del antimonio en medio alcalino indica que el NaOH contribuye a disolver al antimonio de la pirargirita quedando solamente el Ag<sub>2</sub>S.

Como se puede ver en la Tabla 6 la natrojarosita fue descompuesta durante el tratamiento alcalino. De acuerdo con la reacción 15 la natrojarosita se descompone en hidróxidos de hierro, en este caso amorfos.



En la Figura 8 se muestra el patrón de difracción del residuo de lixiviación después del tratamiento hidrotérmico alcalino, en donde se observa la desaparición de la fase de natrojarosita y la presencia de material no identificado en su lugar, el cual posiblemente corresponde a la descomposición de la natrojarosita en hidróxidos de hierro ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) amorfos.



**Figura 8.-** Patrón de difracción del residuo de lixiviación directa después del tratamiento hidrotérmico alcalino.

Como se mencionaba anteriormente, los hidróxidos de hierro tienden a recubrir las partículas de oro y plata e inhiben su recuperación. Debido a esto, en el caso de la cianuración convencional del residuo tratado alcalinamente, la extracción de oro y plata disminuyó en comparación con la cianuración del residuo sin pretratamientos. En el caso del hierro, parte del hierro del SL se disuelve y forma complejos con el cianuro y, por otro lado, el azufre elemental no se disuelve durante la cianuración convencional posiblemente por el efecto de los hidróxidos de hierro.

En el medio de cianuro con glicina, se observa un incremento substancial en la extracción de oro y plata, como se puede notar también hubo un incremento en la extracción de hierro en comparación con la obtenida en la cianuración convencional, posiblemente porque la glicina disuelve los hidróxidos de hierro depositados sobre las partículas como  $\text{Fe}^{2+}$  y forma un complejo, como se explicó previamente. En el siguiente diagrama se muestra la distribución de especies del sistema  $\text{Fe}^{2+}$  y glicina, como se puede

observar en este diagrama, la glicina en medio alcalino consume radicales  $\text{OH}^-$  y forma el ion glicinato ( $\text{gly}^-$ ), el cual reacciona con el  $\text{Fe}^{2+}$  para formar el complejo de hierro y glicina.

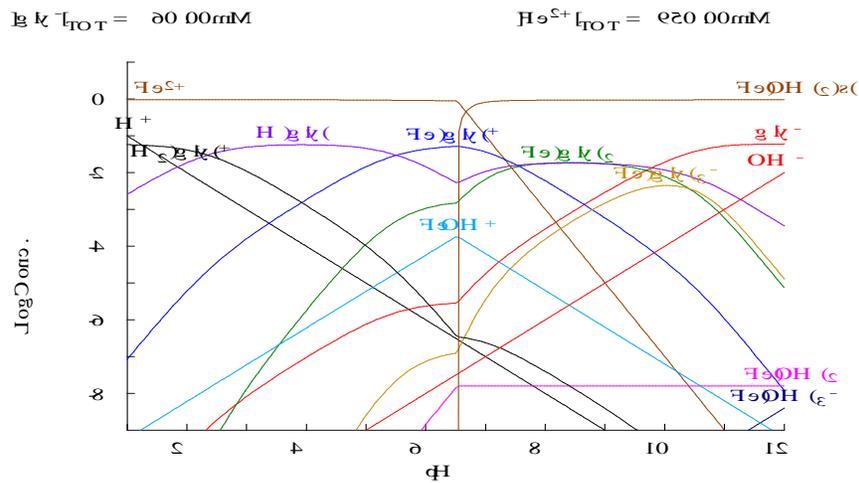


Figura 8.- Diagrama de distribución de especies del sistema  $\text{Fe}^{2+}$ -glicina.

Se infiere que el complejo permanece estable en la solución de la lixiviación, lo cual permite una mayor disponibilidad de cianuro y una mejor disolución de oro y plata, no obstante, al eliminar la capa de hidróxidos de hierro, incrementa la disolución de azufre elemental, el cual es un consumidor del cianuro, por lo cual no se obtienen los valores de recuperación de oro y plata deseados.

## CONCLUSIONES

La cianuración y cianuración con glicina fueron los mejores medios lixiviantes para recuperar los valores del SL sin pretratamientos, por lo cual fueron estudiados en el presente trabajo, no obstante la natrojarosita en medio alcalino tiende a descomponerse y formar hidróxidos de hierro sobre las partículas disminuyendo la extracción de oro y plata, además el azufre elemental consume reacciona con cianuro para formar tiocianato de sodio, o puede reaccionar con el complejo de plata y cianuro presente en solución para precipitar la plata como tiocianato de plata. En base a lo anterior se planteó la realización de pretratamientos al SL con el objetivo de optimizar la recuperación de los valores.

Cuando el SL se sometió a un tratamiento hidrotérmico alcalino antes de ser lixiviado, se obtuvo una baja extracción de oro y plata en la cianuración convencional debido a los hidróxidos de hierro amorfos formados

de la descomposición alcalina, los cuales se depositan en las partículas de oro y plata, además parte del cianuro se consume por complejos formados con el hierro del SL pretratado que se disuelve en el medio de lixiviación. No obstante, se encontró que en la cianuración asistida con glicina el hierro forma un complejo, incrementando la extracción de oro y plata.

## REFERENCIAS

- Adams, A. D. (2016). Overview of the Gold Mining Industry and Major Gold Deposits. *Gold Ore Processing, Project Development and Operations*. M. Adams, Elsevier: 25-30.
- Alp, I., Celep, O., Deveci, H., 2010. Alkaline sulfide pretreatment of an antimonial refractory Au-Ag ore for improved cyanidation. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 62 (11), 41-44. DOI: 10.1007/s11837-010-0167-7.4
- Deschênes, G., Xia, C., Fulton, M., Louis., Cabri, L., Price J., Alp, I., Celep, O & Deveci, H., 2009. Evaluation of leaching parameters for a refractory gold ore containing aurostibite and antimony minerals: Part I – Central zone. *Minerals Engineering*, 22 (9-10), 799-808. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.02.003>
- Deschênes, G., Fulton, M., Rajala, J., and Guo, H., 2010. Leaching of gold and silver from the Kupol composite sample: Part II – assessment of the CELP. *Minerals & Metallurgical Processing*. 27(4), 179–183.
- Elorza, E., García, J., García, V., 2010. Pirargirita, sulfonoantimoniuro de plata ( $2\text{Ag}_2\text{SbS}_3$ ) o mezcla de sulfuros de plata y antimonio ( $3\text{Ag}_2\text{S}\cdot\text{Sb}_2\text{S}_3$ ). XV Congreso de Procesamiento de Minerales, San Luis Potosí.
- Erdem, M., Özverdi, A., 2011. Environmental risk assessment and stabilization/solidification of zinc extraction residue: II. Stabilization/solidification. *Hydrometallurgy*. 105, 270-276. doi:10.1016/j.hydromet.2010.10.014.
- Fraser, K., Walton, R., Wells, J., 1991. Processing of refractory gold ores. *Minerals Engineering*, 4, 1029-1041.
- González, A., Nava, F., Fuentes, J & Uribe, A. (2016). Hydrothermal decomposition of industrial jarosite in alkaline media: The rate determining step of the process kinetics. *Journal of mining and metallurgy, Section B: Metallurgy*. 52, 135-142. DOI:10.2298/JMMB150430016G.
- Habashi, F., 1967. Kinetics and mechanism of gold and silver dissolution in cyanide solutions. Butte, Montana, Department of Metallurgy, Montana College of Mineral Science and Technology. 1-42.
- Jorjani, E., Ghahreman, A., 2017. Challenges with elemental sulfur removal during the leaching of copper and zinc sulfides, and from the residues; a review. *Hydrometallurgy*, 171, 333-343.

Liu, W., Fu, X., Shuai, R., Yang, T., Zhang, D., Chen, L., 2017. Selection on the process for removing and recovering antimony from antimonial refractory gold ores. The Minerals, Metals & Materials Society, 489-498. DOI 10.1007/978-3-319-51382-9\_53.

Marsden, J., House, I., 2005. The Chemistry of Gold Extraction (2nd ed.). West Sussex, UK: Ellis Horwood Ltd.

Mubarok, M., Sukamoto, K., Ichlas, Z., Sugiarto, A., 2018. Direct leaching of zinc sulfide concentrate using ozone as oxidant under atmospheric pressure. Minerals & Metallurgical Processing. 35(3), 133-140. DOI: 10.19150/mmp.8462.

Oraby, E., Eksteen, J., 2015. The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine-peroxide and their adsorption on carbon. Hydrometallurgy. 152, 199-203.

Reyes, I., Patiño, F., Flores, M., Pandiyan, T., Cruz, R., Gutiérrez, E., Reyes, M & Flores, V., 2017. Dissolution rates of jarosite-type compounds in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> medium: A kinetic analysis and its importance on the recovery of metal values from hydrometallurgical wastes. Hydrometallurgy, 167, 16-29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.10.025>.

Sahu, S. K., Sahu, K. K., Pandey, B. D., 2006. Leaching of zinc sulfide concentrate from the ganesh-himal deposit of Nepal. Metallurgical and materials transactions B. 37(4), 541-549. <https://doi.org/10.1007/s11663-006-0037-4>.

Sminčáková, E., 2009. Leaching of natural stibnite using sodium hydroxide solution. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 61(10),32-35. DOI: 10.1007/s11837-009-0149-9

Souza, A. D., Pina, P. S., Leão, V. A., 2007. Bioleaching and chemical leaching as an integrated process in the zinc industry. Minerals Engineering. 20(6), 591-599. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.12.014>.

Xiang, P., Ma, B., Zeng, P., Wang, C., Wang, L., Zhang, Y., Chen, Y., Wang, S., Wang, Q., 2017. Deep cleaning of a metallurgical zinc leaching residue and recovery of valuable metals. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 24(11), 1217-1227. DOI: 10.1007/s12613-017-1514-2

Yin, W., Huang, L., Bjerglund, E., Frandsen, C., Hansen, H., 2017. Glycine buffered synthesis of layered iron (II)-iron (III) hydroxides (green rusts). Journal of Colloid and Interface Science. 497(429-438).

Zhang, Y., Yu, X., Li, X., 2012. Kinetic of simultaneous leaching of Ag and Pb from hydrometallurgical zinc residues by chloride. The Nonferrous Metals Society of China. 31(4), 403-409. DOI: 10.1007/s12598-012-0528-.