

Artículo Original

La química como auxilio ambiental de los ecosistemas y de las poblaciones en el Perú

CHEMISTRY AS ENVIRONMENTAL ASSISTANCE OF ECOSYSTEMS AND POPULATIONS IN PERU

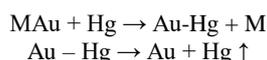
DANIEL LOVERA§*, LIA CONCEPCIÓN§, MIRIAM MEJIA§, NELLY AUCASSI§, VLADIMIR ARIAS§, EDWIN MANRIQUE§, ANSELMO SÁNCHEZ§, BLANCA PERALTA§

Recibido: 05 julio de 2019 / Aceptado: 26 julio de 2019

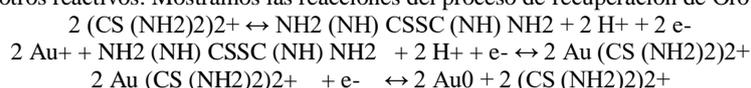
§Instituto de Investigación-Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica-Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú.

Resumen

La minería informal aurífera a nivel nacional e internacional tiene una producción anual importante que muchas veces supera la producción formal, la tecnología de recuperación del oro que utilizan es la clásica Amalgamación con Mercurio:



Dado la Convención de MINAMATA en el cual se precisa los peligros del Mercurio para los ecosistemas y la salud de las poblaciones, es bueno optar por otras tecnologías diferentes a la convencional de Amalgamación - Cianuración ampliamente usadas en la minería informal y formal para procesar sus minerales y relaves. Elsner en 1846 identificó correctamente la reacción química que forma la base de todos los procesos de lixiviación de cianuro en el oro: $4 \text{Au} + 8 \text{NaCN} + \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{Na}[\text{Au}(\text{CN})_2] + 4 \text{NaOH}$. En el marco de las tecnologías limpias, es preciso recurrir a procesos metalúrgicos alternativos para la recuperación aurífera como la concentración gravimétrica y la lixiviación por agitación utilizando Tiourea, Sandioss y Goldmax entre otros reactivos. Mostramos las reacciones del proceso de recuperación de Oro por Tiourea:

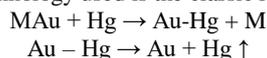


Mostramos resultados de modelamientos y simulaciones de datos experimentales en la obtención de Oro y Plata, considerando la necesidad de emplear procesos que no afecten el medio ambiente y la vida, donde procesar minerales con alto contenido de arsénico, antimonio y cobre que son cianicidas, así como su posterior remediación, resultan antieconómicos. Se realizaron pruebas a nivel laboratorio para obtener parámetros de trabajo con el objetivo de lograr porcentajes de recuperación óptima y el consumo moderado de reactivos. Las pruebas se realizaron por agitación usando carbón activado, los resultados se muestran en los gráficos al final del trabajo.

Palabras claves: Química Ambiental, Amalgamación, Cianuración, Tiourea, Remediación

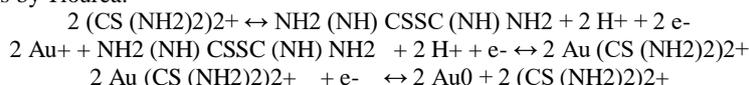
Abstract

Informal gold mining nationally and internationally has an important annual production that often exceeds formal production, the gold recovery technology used is the classic Mercury Amalgamation:



Given the MINAMATA Convention that specifies the dangers of Mercury for ecosystems and the health of populations, it is good to opt for technologies other than conventional Amalgamation - Cyanuration widely used in informal and formal mining to process your minerals and tailings. Elsner in 1846 correctly identified the chemical reaction that forms the basis of all cyanide leaching processes in gold: $4 \text{Au} + 8 \text{NaCN} + \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{Na} [\text{Au} (\text{CN})_2] + 4 \text{NaOH}$. In the context of clean technologies, it is necessary to resort to alternative metallurgical processes for gold recovery such as gravimetric concentration and leaching by agitation using Tiourea, Sandioss and Goldmax among other reagents. We show the reactions of the Gold

recovery process by Thiourea:



We show results of modeling and simulation of experimental data in obtaining Gold and Silver, considering the need to use processes that do not affect the environment and life, where to process minerals with high content of arsenic, antimony and copper that are cyanicides, as well as their subsequent remediation, they are uneconomic. Laboratory tests were performed to obtain working parameters in order to achieve optimal recovery percentages and moderate reagent consumption. The tests were performed by stirring using activated carbon, the results are shown in the graphs at the end of the work.

Keywords: Environmental Chemistry, Amalgamation, Cyanuration, Thiourea, Remediation

Correspondencia de autor:

Instituto de Investigación-Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica-Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú.

E-mail: dloverad@unmsm.edu.pe

INTRODUCCIÓN

El Perú país minero por excelencia reúne una tradición metalúrgica que se remonta a más de 10,000 años de antigüedad, esta labor especializada se inició con la extracción de minerales no metálicos como el cuarzo, riolita, toba, cuarcita y calcedonia; con la finalidad de elaborar sus instrumentos de caza, pesca y recolección; constituyéndose en la actividad minera más antigua de los andes. El poblador andino logró en dos mil años de experimentación, el dominio de las más sofisticadas técnicas para fundir, alear, amalgamar, laminar, unir y soldar los metales (Lovera, 2005).

Con relación a las técnicas de aleación, se reportan objetos de aleación binaria (oro-cobre, oro-plata), y aleación terciaria (cobre, plata, oro); uno de los beneficios de la mezcla por calentamiento es que disminuye su punto de fundición (Figura 1).



Figura 1. Orfebrería Metálica de los antiguos metalurgistas del Perú

La minería artesanal o a pequeña escala de oro es una actividad que se realiza desde la década de 1980. Este tipo de minería explota exclusivamente oro con tecnologías rudimentarias e intensivas en mano de obra y con poca exigencia en cuanto a salud, seguridad y cuidado ambiental. Un efecto negativo que acompaña a las operaciones de minería artesanal o en

pequeña escala es su deficiente manejo ambiental. El uso intensivo de mercurio para amalgamar el oro, la emanación de gases y la dispersión de partículas de mercurio durante su quema hacen que esta actividad sea sumamente contaminante y que tenga grandes impactos sobre la salud pública. Los esfuerzos públicos para detener la contaminación han estado centrados en la provisión de retortas, herramientas que capturan los gases y las partículas de mercurio durante su quema. Sin embargo, los avances han sido limitados debido a la poca adecuación de estas retortas a la idiosincrasia y a las características del proceso productivo de los mineros. Recientemente, se ha dado un incremento del uso de pozas de cianuración para el beneficio del oro (Misari, 2010; Arias, 2005).

El impacto radica en la pobre preparación de las pozas, que pueden generar filtraciones, y en la disposición inadecuada de los relaves (Manuel Glave y Juana Kuramoto 2007). En general, los procesos metalúrgicos que se realizan en la minería artesanal son convencionales y obsoletos trayendo como consecuencia problemas en la baja recuperación de oro y contaminación del medio ambiente por el uso del mercurio. Es así que en la planta artesanal de Río Seco se tienen los siguientes problemas: Baja recuperación de oro, 60%; no cuentan con agua, por eso requieren de cisternas; deficiente seguridad, salud en el trabajo y cuidado del medio ambiente; mínimo uso de maquinaria y tecnología, requiriendo así mayor esfuerzo físico.

Las condiciones climáticas o microclima, de acuerdo al Mapa Ecológico del Perú elaborado por la ONERN (1995), en base al Diagrama Bioclimático de Holdridge, corresponde a la zona de vida con características de desierto peridario premontano tropical (md-P).

En este sector de vida se ha estimado que la biotemperatura media anual máxima es 32 °C y la media anual mínima es 13 °C, el promedio de precipitación pluvial máxima es 46 mm y el promedio mínimo de precipitación pluvial es 14 mm por año; la humedad relativa oscila de 30%-89% (Gallarday, 2006) (Figura 2).

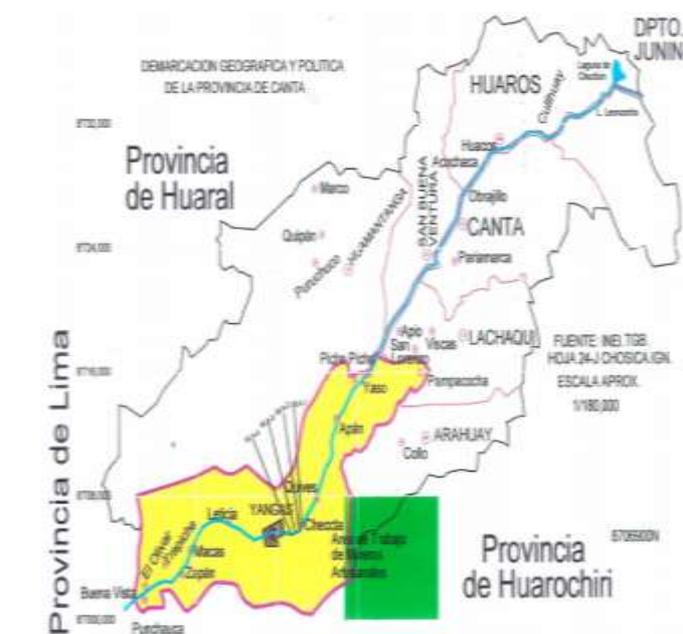


Figura 2. Mapa del Área de Trabajo de los Mineros Artesanales

MATERIALES Y MÉTODOS

LUGAR DE ESTUDIO

Se buscó una muestra de relave de amalgamación proveniente de Yangas-Lima. Para ello, se accedió al centro de minería artesanal con el fin de realizar un cuarteo sistemático por cuadrículas en las canchas de relave. Se tomó una muestra aproximada de 265 kg y se llevó al Laboratorio de Pirometalurgia de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica - Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Figuras 3 y 4).



Figura 3. Muestreo de Relave de amalgamación del Oro – Rio Seco



Figura 4. Cuarteo sucesivo para homogenizar el material

CARACTERIZACIÓN GRANULOMETRICA

Durante el muestreo se pasó el relave por mallas donde se pudo obtener la granulometría, si bien no fue una prueba completa, se tiene un valor para diferentes mallas con el cual se han realizado los diferentes procesos (Figura 5).



Figura 5. Cuarteo del material para homogenizar

CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Se analizaron seis muestras por fluorescencia de rayos-X en energía dispersiva (FRXED). Las muestras fueron codificadas de acuerdo a la información proporcionada. (Figuras 6, 7, 8, 9,10 y 11) (Mejía, 2019).

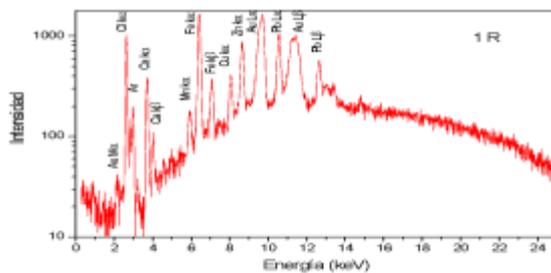


Figura 6. Espectro de la muestra 1R – presencia de Zn, Pb, Fe, Au

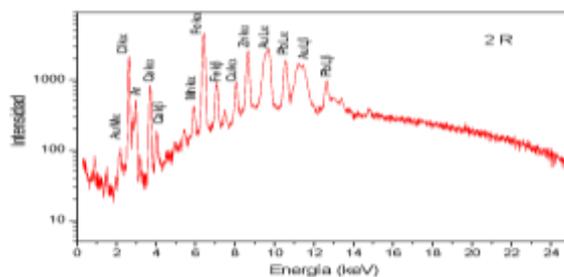


Figura 7. Espectro de la muestra 2R – presencia de Zn, Pb, Fe, Mn, Au

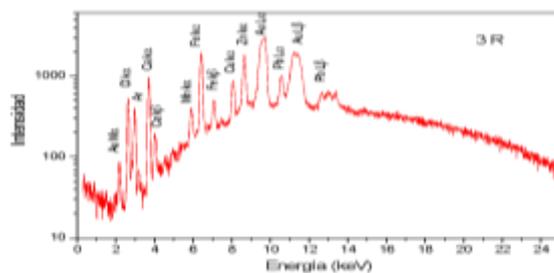


Figura 8. Espectro de la muestra 3R – presencia de Zn, Pb, Fe, Cu, Au

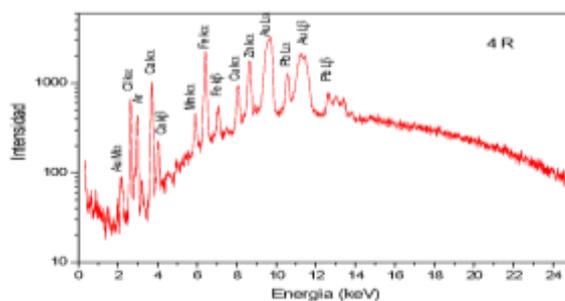


Figura 9. Espectro de la muestra 4R – presencia de Zn, Pb, Fe, Cu, Ca, Au

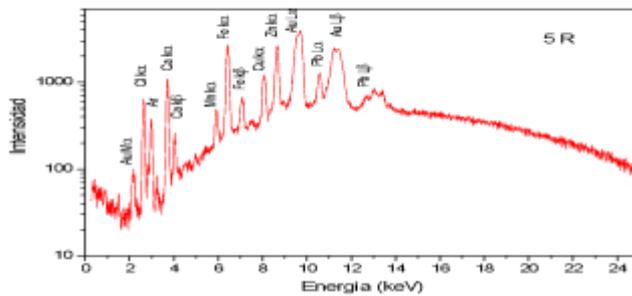


Figura 10. Espectro de la muestra 5R – presencia de Zn, Pb, Fe, Cu, Ca, Au

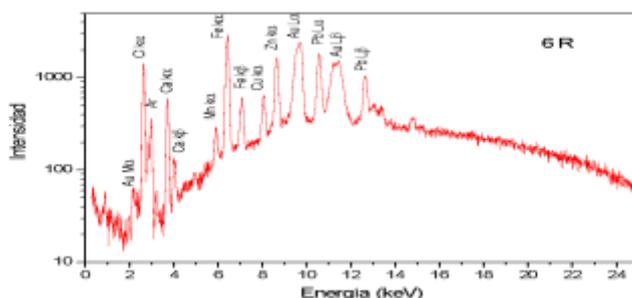


Figura 11. Espectro de la muestra 6R – presencia de Zn, Pb, Fe, Cu, Ca, Au

RESULTADOS Y DISCUSIONES

MATRIZ ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA AURÍFERA

Proceso de amalgamación del oro (Figura 12)

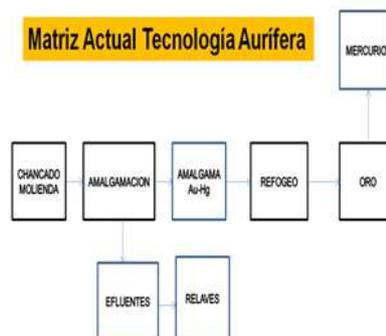
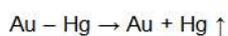
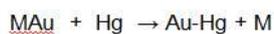


Figura 12. Matriz Actual Tecnología Aurífera

Precipitación del Hg y Au

Los relaves de amalgamación del oro de las labores de la minería artesanal de Rio Seco son almacenados, secados, encostalados, transportados y comercializados para ser tratados en Plantas de Cianuración en Palpa, el mercurio no se recupera previamente, se procesa todo el material con soluciones lixiviantes de Cianuro de Sodio a las condiciones convencionales de parámetros y variables que intervienen en el proceso.

Mostramos los resultados de la Recuperación del Mercurio de las distintas pruebas experimentales efectuadas en la presente investigación (Figuras 13 y 14).

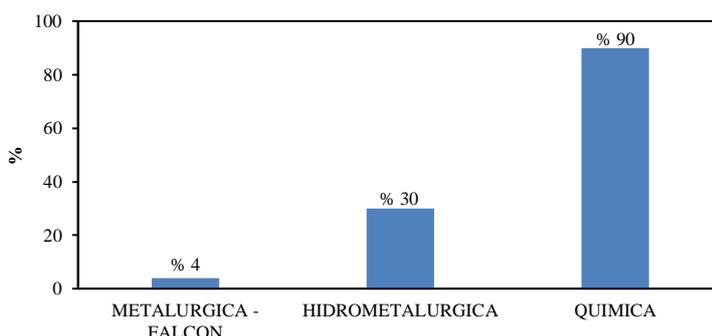


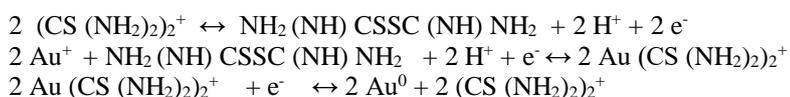
Figura 13. Recuperación del Mercurio con Diferentes Tecnologías



Figura 14. Botón de Oro obtenido de la Amalgama Inicial

Matriz tecnológica aurífera alternativa

En el marco de las tecnologías limpias es preciso apelar a otros procesos metalúrgicos de recuperación auríferas como: la Concentración Gravimétrica, Lixiviación por Agitación con reactivos como: Tiourea, Sandios, Goldmax entre otros como sustitutivos para la Amalgamación – Cianuración de la minería informal. Mostramos las reacciones del proceso de Recuperación de Oro por Tiourea (Figura 15).



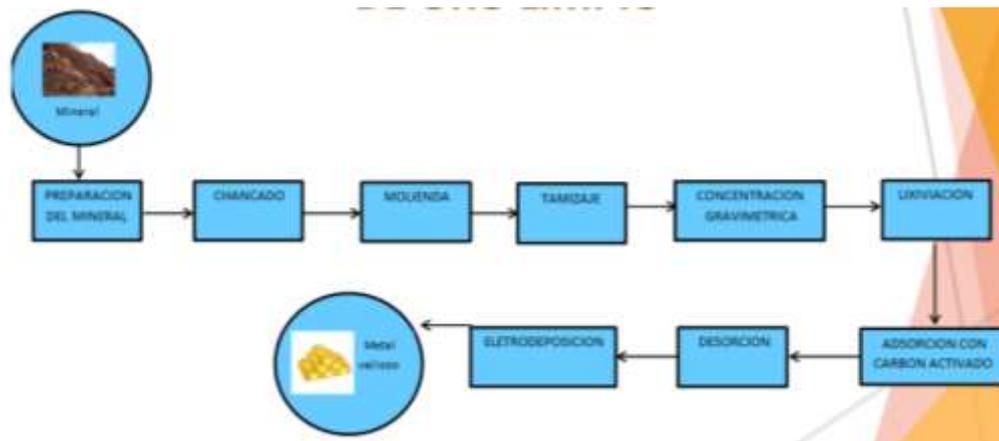
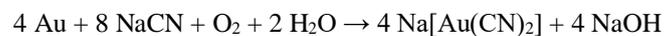


Figura 15. Matriz Tecnológica Aurífera Alternativa – resumen del proceso de producción de oro limpio

Lixiviación con reactivo Cianuro

Dado la Convención de MINAMATA (2017) en el cual se precisa los peligros del Mercurio para los Ecosistemas y la salud de las poblaciones, es bueno optar por otras tecnologías diferentes a la convencional de Amalgamación - Cianuración usadas en la minería informal y formal en procesar sus minerales y relaves por muchos tiempos (Aramburu, 2010; Aramburu, 2011; Azañero, 1998; Lovera, 2002; Habashi, 2006).

L. Elsner en 1846 identificó correctamente la reacción química que forma la base de todos los procesos de lixiviación de cianuro en el oro:



Adsorción y desorción del CPLS Auríco

El desarrollo de los procesos de adsorción y electro obtención, proponiéndose el empleo del carbón activado para recuperar el oro contenido en disoluciones originadas por los diversos procesos de cianuración, entre los que destacan actualmente, el de lixiviación en pilas, carbón en lixiviación (CIL) y carbón en pulpa (CIP). El proceso de carbón en pulpa (CIP) posee importantes ventajas comparativas sobre el de cementación de oro con zinc (Navarro et al, 1999).

Pruebas desarrolladas de Adsorción y desorción de PLS obtenidos por Lixiviación de relaves auríferos con Tiourea fueron analizados por fluorescencia de rayos-X en energía dispersiva (FRXED).

Se utilizó un espectrómetro de FRXED marca Amptek con ánodo de oro que operó a un voltaje de 30 kV y corriente de 15 μA . Los espectros se acumularon durante un intervalo neto de 300 s utilizando 2048 canales, con ángulos de incidencia y salida de alrededor de 45°. La tasa de conteo depende de la composición elemental de la muestra. Esta técnica permite detectar la presencia de elementos químicos de número atómico Z igual y mayor que 13 mediante la detección de los rayos X característicos que emiten los átomos (Tabla 1).

Tabla 1. Matriz Tecnológica Aurífera Alternativa (Mejía, 2019)

Carbón 1 cosecha 0,15 Na CN		Carbón 2 cosecha 0,15 Na CN	
Elemento	Abundancia (%)	Elemento	Abundancia (%)
Al	1,309	Al	2,127
Si	0,644	Si	0,922
P	0,498	P	0,328
S	0,456	S	0,500
Cl	0,076	Cl	0,061
K	0,096	K	0,208
Ca	3,495	Ca	2,474
Ti	0,002	Ti	0,003
Cr	0,000	Cr	0,000
Mn	0,004	Mn	0,003
Fe	0,050	Fe	0,030
Co	0,002	Co	0,000
Ni	0,004	Ni	0,003
Cu	0,216	Cu	0,224
Zn	0,498	Zn	0,401
As	0,012	As	0,010
Sr	0,005	Sr	0,003
Zr	0,002	Zr	0,004
Ag	1,906	Ag	0,829
Au	0,196	Au	0,000
Pb	0,020	Pb	0,008
Total	9,491	Total	8,136

Lixiviación con reactivo SANDIOSS

Es un reactivo 100% lixivante para minerales de oro y plata, tanto en óxidos como en sulfuros; relaves cianurados, relaves de amalgamación y escorias de fundición. Se aplica en pilas (heap leaching), en pozas (vat leaching) y tanques de agitación, obteniéndose alta recuperación mediante una lixiviación gradualmente sostenida y eficiente (Tablas 2, 3 y Figuras 19).

Tabla 2. Control de parámetros de la prueba con Sandioss - Lixiviación de oro (al 0.1%)

TIEMPO AGITACION (h)	PARAMETROS		LEY PREGNANT (ppm)	mg descontados	CONTENIDO FINOS (mg)	EXTRACCION (%)
	Ph INICIAL	pH FINAL	Au	Au	Au	Au
0	3,50	10,51	0,00		0,00	0,0
2	9,88	10,60	0,21	0,003	0,08	13,9
4	10,80	10,80	0,45	0,006	0,18	30,5
6	10,71	10,73	0,63	0,008	0,26	43,4
8	10,93	10,93	0,77	0,010	0,32	54,1
24	10,52	10,52	0,99	0,013	0,42	70,5
48	10,35	10,60	1,09	0,014	0,47	78,9
72	10,14	10,14	1,19	0,015	0,53	88,3
TOTAL			1,19	0,069	0,53	88,30

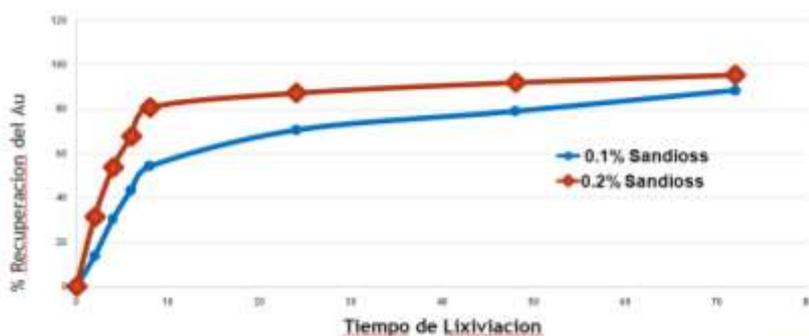


Figura 16. Cinética de la Recuperación del Oro con Sandioss

Tabla 3. Control de parámetros de la prueba con Sandioss - Lixiviación de oro (al 0.2%)

TIEMPO AGITACION (h)	ALICUOTA (ml)	pH		LEY PREGNAN T (ppm)	mg descontados	CONTENIDO FINOS (mg)	EXTRACCION (%)
		PH INICIAL	PH FINAL	Ag	Ag	Ag	Ag
0	0	3.91	11.54	0.000		0.00	0.0
2	15	12.02	12.02	5.93	0.089	2.37	16.5
4	15	12.02	12.02	13.13	0.197	5.34	37.1
6	15	12.04	12.04	19.01	0.285	7.89	54.8
8	15	12.05	12.05	19.8	0.297	8.49	59.0
24	15	11.81	11.81	21.54	0.323	9.48	65.9
48	15	11.41	11.41	21.57	0.324	9.82	68.2
72		11.40	11.40	22.11	0.000	10.36	71.9
TOTAL					1.515	10.36	71.94

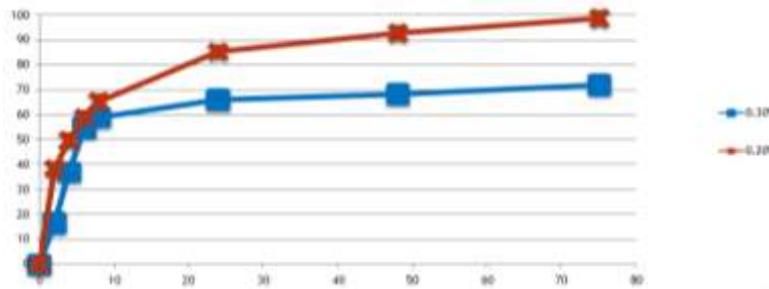


Figura 17. Cinética de la Recuperación de la Plata con Sandioss

MODELAMIENTO Y SIMULACION

Cinética de lixiviación de relave aurífero con Sandioss

El modelo cinético que ajusta los datos experimentales de la Lixiviación de los Relaves Auríferos es el de difusión del SANDIOSS a través de los poros del relave aurífero y el modelo tiene la siguiente configuración:

$$1 - \frac{2}{3} \alpha - (1-\alpha)^{\frac{2}{3}} = 0.2173(\% \text{ Sandioss})^{0.355} * t$$

Se compara los datos experimentales con los datos calculados con el modelo cinético, encontrándose una buena correlación, así como también la cinética de decaimiento cuando se adsorbe el oro con carbón activado de la solución compleja de oro (Figuras 21 y 22).

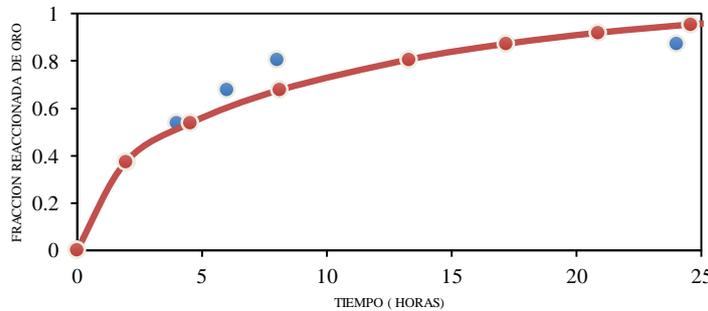


Figura 18. Cinética del Decaimiento del Complejo Áurico por Adsorción con Carbón Activado

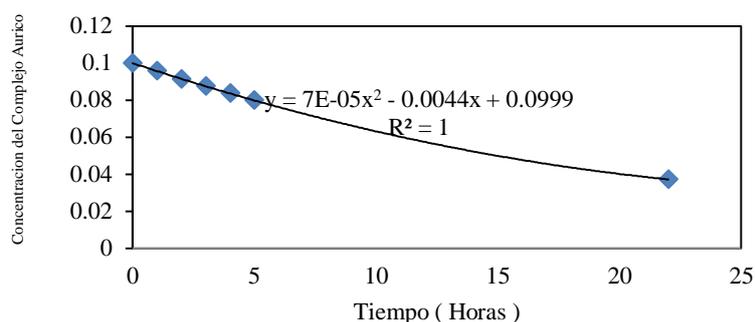


Figura 19. Cinética del Decaimiento del Complejo Áurico por Adsorción con Carbón Activado

CONCLUSIONES

La caracterización del relave proveniente de la planta artesanal de amalgamación y los análisis efectuados precisaron la existencia de calcopirita, esfalerita, cuarzo, piritas, oxidados de hierro donde se muestra la presencia del Oro, Zinc, Plomo, Arsénico, Mercurio entre otros.

Las pruebas de separación del mercurio por los métodos gravimétrico, químicos, hidrometalúrgicos a partir de los relaves tienen resultados favorables. Destaca el método químico cuya recuperación de mercurio alcanza hasta un 90%.

El método químico tuvo buenos resultados, dando la posibilidad de implementarlo a las operaciones de obtención de oro puro si emplear el fuego y las retortas.

Se hicieron pruebas para ver la viabilidad de la recuperación de oro con reactivos convencionales como el cianuro de sodio y otros reactivos comerciales ecológicos con resultados expectantes.

Agradecimientos

Al Ministerio del Ambiente – PERU por el financiamiento del proyecto, a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica del UNMSM por el apoyo con sus Laboratorios de Pirometalurgia, Biometalurgia y Extractiva. A la Escuela de Ciencias Físicas por los análisis FRXED y otras caracterizaciones. Al Grupo de Investigación Tecnologías Metalúrgicas Sostenibles, al Emprendimiento Simulación 3C Ambiental (SIM3CAM), por su apoyo y asistencia técnica a lo largo del proyecto..

Referencias

- Aramburú, S., Núñez, P. A., Azañero, A., Figueroa, A., Gagliuffi, P. (2010). Recuperación de oro y mercurio de los relaves del proceso de amalgamación con tecnología limpia. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Vol. 13, Núm. 25.
- Aramburu, S., Núñez, P., Azañero, A., Gagliuffi, P., Sánchez, L.A., Pérez, J. (2011). Proceso metalúrgico alternativo para la minería aurífera artesanal. Rev. Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográfica, Vol 14, Núm 28

- Arias, V., Coronado, R., Puente, L., Lovera, D. (2005). Refractariedad de concentrados auríferos. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Vol. 8, Núm. 16.
- Azañero, A. (1998). Oro aluvial: alternativas de beneficio metalúrgico. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Vol. 1, Núm. 1.
- Gallarday, T. (2006). Estudio del impacto ambiental de la extracción aurífera artesanal dentro de la jurisdicción política del distrito de Santa Rosa de Quives, año 2006. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Vol. 9, Núm. 18.
- Habashi, F. (2006). Pressure Hydrometallurgy Update, XXII International Mineral Processing Congress, Istanbul.
- La realidad de Minería ilegal en países amazónicos. http://proesmin.com/main/sites/default/files/Manual_Mineria.pdf.
- Lovera, D., Quiñones, J., Aramburú, S., Gagliuffi, P., Puente, L., Concepción, L., Flores, R. (2002). Procesos de tostación – lixiviación de minerales auríferos con metales cianicidas. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Vol. 5, Núm. 10.
- Lovera, D. (2005), Historia, Procesos, Producción y Redes Metalúrgicas. Boletín CSI – UNMSM, pg. 13 – 19. <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/consejo/boletin55/a03.pdf>
- Mejía, M. (2019). Informes Internos de Análisis de muestras de carbón en polvo por FRXED. Escuela de Ciencias Físicas – UNMSM.
- Misari, F. (2010). Metalurgia del Oro, 1era. Ed, págs. 15-28.
- Navarro, R. Wilkomirsky I. (1999), Efecto del oxígeno disuelto en la adsorción de oro en carbón activado. Rev. Metal Madrid 35, pg. 301-307. <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia>