PROPUESTA DE TRATAMIENTO PARA LA REMEDIACIÓN AMBIENTAL DE MENAS AURÍFERAS

A TREATMENT PROPOSAL FOR THE AURIFEROUS ORES ENVIRONMENTAL REMEDIATION.

Lidia Rosa Calzada González[(1)], Marcela Figueredo Frías [(1)], María Tania Lubián Martínez [(1)]

En el presente trabajo se propone una alternativa para el tratamiento de las pulpas residuales generadas durante el procesamiento de una mena aurífera por la tecnología de lixiviación con cianuro. Las pulpas residuales fueron sometidas a diferentes procesos para su caracterización y tratamiento, La concentración de Cu, Zn, Pb y As se determinaron por técnicas de análisis químico elemental como (ICP) Espectroscopia de Masa de Plasma Acoplada Inductivamente y Absorción Atómica (AA) y se analizaron para cianuro libre por método volumétrico, siendo analizadas nuevamente al concluir las pruebas. Para identificar las causas de cada efecto dentro del estudio experimental se utilizó la técnica estadística de diseño de experimento 2^3, al manipular deliberadamente una o más variables, vinculadas a las causas, que pueden influir en el resultado de la remoción de cianuro y metales pesados. Para la ejecución de las pruebas de laboratorio se empleó el método de oxidación y precipitación de metales tóxicos con empleo de Sulfato ferroso heptahidratado. Se realizó un estudio de separación de las fases. Como resultado se obtuvo un procedimiento de tratamiento que permite una remoción eficiente de los contaminantes con remociones de cianuros y Cu de hasta 98,5%.

Palabras clave: Desechos, efluentes, residuales, remediación ambiental, remoción.

In the present work it is recommended an alternative for the treatment of residual pulps generated while processing an auriferous ore by cyanide leaching technology. Residual pulps were subjected to different processes for their characterization and treatment; Cu, Zn, Pb and As concentration were determine by elemental chemical analysis techniques such as (ICP) Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy and Atomic Absorption (AA) and they were analyzed for free cyanide by volumetric method, being analyzed again at the conclusion of the tests. It was used the statistical technique of experiment design 2^3 to identify the causes of each effect in the experimental study, with intent of manipulating one or more variables, linked to the causes, that can influence the result of the cyanide and heavy metals removal. The oxidation and precipitation of toxic metals method using heptahydrated ferrous sulfate was used for the implementation of the laboratory tests. Besides a phase separation study was carried out. As a result, a treatment procedure was obtained that allows an efficient removal of the contaminants with cyanide and Cu eliminations up to 98.5%.

Keywords: Waste, effluents, residual, environmental remediation, removal

Recibido: 6 de **junio** del 2016
Aprobado en su forma original: 8 de mayo del 2017
(1) Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), Varona 12028 Km1$^{1/2}$ Boyeros, La Habana, Cuba, CP-10800 Correo electrónico: lidia@cipimm.minem.cu

INTRODUCCIÓN

El proceso de cianuración para extraer el oro de sus minerales es un proceso muy eficiente, capaz de extraer oro cuando está presente en cantidades tan pequeñas como un 0,25 por ciento de onza en una tonelada de roca, con un rendimiento del orden del 90 por ciento. La recuperación del oro una vez disuelto es igualmente eficaz.

La química de las disoluciones de cianuros es sumamente compleja y es esta complejidad la determinante de su aptitud para disolver el oro y la plata. El cianuro forma compuestos complejos con otros metales, como mercurios, zinc, cobre, hierro, níquel y plomo, que en parte son causantes del consumo de cianuro en la extracción de oro y dan lugar a la formación de aguas residuales difíciles de tratar y a las complicaciones observadas en el análisis del cianuro en disolución. Las razones principales del lugar destacado que ocupa el cianuro en el tratamiento de las menas de oro son su disponibilidad, y solubilidad del complejo de cianuro de oro.

Lograr una explotación racional desde el punto de vista técnico y económico del prospecto en estudio, no es sólo el objetivo principal de su investigación tecnológica, sino también obtener una tecnología ambientalmente sostenible donde se logre armonizar el desarrollo económico con el medio ambiente.

Con el objetivo de elevar el grado de las reservas minerales del depósito, se ha desarrollado una tecnología para la recuperación de oro y plata con empleo del proceso de lixiviación con cianuro de sodio y adsorción de los metales preciosos con carbón activado en pulpa (CIP), por lo cual resulta de suma importancia garantizar durante la operación de la planta industrial un manejo seguro de sus efluentes residuales, así como lograr la implementación de una planta de cero vertimientos.

Para dar cumplimiento a las exigencias de las normativas ambientales vigentes, se realizaron durante las pruebas en planta piloto un grupo de ensayos con el fin de obtener un procedimiento de tratamiento que permitiera una remoción eficiente de los contaminantes y la destrucción de los cianuros presentes en las colas residuales del proceso, con vista a recircular el máximo de las aguas tratadas y disponer las colas finales tratadas en la presa de colas.

MATERIALES Y METODOS

Los ensayos de laboratorio se realizaron con muestras (pulpas residuales agotadas) obtenidas durante las pruebas a escala de planta piloto de la muestra tecnológica estudiada. Las pruebas se realizaron aplicando distintas dosificaciones de cal y Sulfato ferroso heptahidratado, sobre pulpas residuales agotadas al 42% de sólidos.

Reactivos empleados para las pruebas de tratamiento químico:

- ✓ Sulfato ferroso heptahidratado $FeSO4. 7 H2O$; polvo GA
- ✓ Cal de pureza (65% CaO).

Para la ejecución de las pruebas de laboratorio se empleó el método de oxidación de Precipitación de metales tóxicos con empleo de Sulfato ferroso heptahidratado.

Los métodos de análisis empleados para la determinación de los indicadores de la contaminación se resumen en la tabla 1I.

Tabla 1. Métodos de caracterización empleados para la determinación de los indicadores de la contaminación.

Parámetros	Método	Lugar de realización
pH	Potenciométrico con electrodo combinado	In situ
Cianuro libre	Método Volumétrico, Standard Methods, 4500-CN –D, 1995.	Laboratorio
Cianuros totales	Destilación de cianuros totales, Standard Methods, 4500-CN -C, 1995	Laboratorio
Metales (Au, Ag, Fe, Cu, Zn, Pb, As, Sb, Ca, Mg y Al)	ICP y AA	Laboratorio

Las pruebas de sedimentación de las pulpas productos, se realizaron según el procedimiento LAM 02-04, basado en la norma ramal NRIB- 579, que se fundamenta en los métodos experimentales desarrollados por Talmague y Fitch.

Las determinaciones de cianuros libres y totales fueron realizadas inmediatamente después de concluir las pruebas.

Las pulpas residuales fueron obtenidas de la sección de adsorción de oro con carbón en pulpa generadas en las pruebas en planta piloto. Las pulpas agotadas fueron caracterizadas y se analizaron para cianuro libre y los metales cobre, plomo, arsénico y zinc fundamentalmente. Posteriormente fueron sometidas a los diferentes procesos para su tratamiento, siendo analizadas nuevamente al concluir las pruebas.

Para identificar las causas de cada efecto dentro del estudio experimental se seleccionó un diseño factorial a dos niveles, con tres variables con réplica en el punto central para un total de 11 experimentos. Un diseño 2^3 permite en este caso el estudio del efecto de cada factor sobre la variable respuesta, así como el efecto de las interacciones entre factores sobre dicha variable. Las variables utilizadas en el diseño fueron el resultado de la aplicación del diagrama de Ishikawa. El procesamiento estadístico del diseño experimental, así como los modelos de regresión lineales, se desarrollaron con los módulos Experimental Design y MultipleRegression del software Statgraphics Plus 5.0 desarrollado por StatisticalGraphics Corp. for Windows.

.

La tabla 2 muestra la relación entre los factores, las variables y los niveles.

Tabla 2. Diseño de experimento.

		Niveles	
Factores	Variables	Mínimo	Máximo
Tiempo (min)	X1	15	45
Masa de sal (Sulfato Ferroso Heptahidratado) FeSO4. 7 H2O (g)	X2	10	20
Masa de Cal de pureza (65%) (g)	X3	1	3
Variable respuesta	Y Cu, Y CN		

Los ensayos se realizaron en un Floculador con una agitación de 250 rpm, un tiempo de reacción (0,5 h) y variando las cantidades de cal y Sulfato ferroso heptahidratado. El

volumen de solución empleado en cada prueba fue de 1000 ml.A continuación se muestra en la figura 1 el equipo empleado en las pruebas de tratamiento de las pulpas agotadas residuales.



Figura 1. Equipo empleado en las pruebas de tratamiento de las pulpas agotadas



Figura 2. Prueba de sedimentación a las 12 horas

En cada una de las pruebas realizadas al concluir el proceso de tratamiento se le realizó un estudio de separación de las fases, con vistas a determinar el porciento de densificación final de las mismas. A continuación se muestra en la figura 2 Prueba de sedimentación a las 12 horas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación en la Tabla 3 se muestra la composición química promedio de las pulpas agotadas residuales obtenidas en la investigación a escala de planta piloto:

Tabla 3. Caracterización química de las pulpas agotadas residuales obtenidas a escala de planta piloto.

Indicador	pH	CN ppm	[Cu] mg/L	[Zn] mg/L	[As] mg/L	[Pb] mg/L
Fase líquida pulpas residuales	11.3	164.5	8.09	0.09	<0.024	<0.51
NC 27/2012 Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado (CMA)	6-9	<0.5	<0.5	5.0	<0.5	1.0

(CMA) Concentración máxima admisible

Como se observa las pulpas agotadas residuales generadas con el procesamiento de las menas auríferas, reportaron concentraciones promedio de metal tóxico Cu= 8,09 mg/L y CNT= 164,5 ppm por encima de la concentración máxima

admisible establecida en la NC 27:2012, clasificando el cuerpo receptor como clase (C), teniendo en cuenta que la futura planta industrial se ubicará sobre una cuenca hidrográfica, que desembocan una Bahía que representa el cuerpo receptor final.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la caracterización de las pulpas residuales agotadas, se decide realizar un estudio de laboratorio más detallado del comportamiento de las mismas. Los trabajos realizados estuvieron encaminados fundamentalmente a:

- ✓ Realizar pruebas de remoción de impurezas (Cu) utilizando cal y Sulfato de hierro II, con diferentes dosis (Diseño de experimento).
- ✓ Realizar pruebas de sedimentación de las pulpas antes y después de tratada.

En cada prueba realizada, al concluir el proceso de tratamiento se le realizó un estudio de separación de las fases para determinar el porciento de densificación final.

Análisis de los resultados del diseño de experimentos

En la tabla 4 aparecen los resultados de las pruebas de tratamiento para la remoción de cianuros y el metal tóxico (Cu).

Tabla 4. Resultados del diseño de experimento realizados en las pruebas de tratamiento de residuales.

Experimentos	Tiempo (min)	Sal Fe (g)	Cal (g)	Cu (mg/L)	CN_T (mg/L)
1	45	10.0	1.0	0.22	7.5
2	30	15.0	2.0	0.14	4.0
3	15	10.0	1.0	0.18	6.2
4	45	10.0	3.0	0.20	7.0
5	30	15.0	2.0	0.15	3.9
6	30	15.0	2.0	0.14	3.9
7	**15**	**20.0**	**3.0**	**0.12**	**2.5**
8	45	20.0	3.0	0.13	2.7
9	45	20.0	1.0	0.14	2.8
10	15	20.0	1.0	0.13	3.0
11	15	10.0	3.0	0.14	8.0

Como se observa en la tabla 4 la prueba que reportó los mejores resultados fue la siete, donde se obtuvo una concentración de cianuros totales de 2,5 mg/L y concentraciones del orden de las trazas para el metal tóxico estudiado. El tiempo de reacción fue de 15 minutos.

El comportamiento obtenido para los indicadores de la contaminación evaluados cumplieron con las concentraciones máximas admisibles establecidas en las normas ambientales de vertimientos (NC: 27/2012) en cuanto al metal (Cu) para cuerpos receptores de clase C.

En el caso de los cianuros totales después del tratamiento aplicado aún se encuentra por encima de las concentraciones máximas admisibles exigidas por las normas. En tal sentido es oportuno destacar que en las plantas metalúrgicas de oro donde se opera por la tecnología de lixiviación con cianuro, se prevé en el diseño una operación de cero vertimiento, lo cual quiere decir que se recirculan al máximo las aguas al proceso recuperando los contenidos de cianuro y alcalinidad presentes en la fase líquida de las pulpas.

Los resultados obtenidos en las pruebas 2, 5 y 6 confirman que el diseño es preciso estadísticamente. Mientras más grados de libertad en el sistema los resultados son más confiables y se garantiza que el rango de confianza sea mayor de 95 %.

En la tabla 5 se presentan los resultados de la eficiencia de remoción alcanzados en cada prueba para el Cu y los cianuros totales. Como se observa se alcanza una eficiencia de más de un 97% para el Cu en el caso de los cianuros totales fue de más de un 95%.

Tabla 5. Resultados de eficiencia de remoción para el Cu y cianuros totales.

Experimentos	Eficiencia de remoción (%)	
	Cu	CNT
1	97.28	95.44
2	98.26	97.50
3	97.77	96.23
4	97.52	95.74
5	98.14	97.62
6	98.26	97.62
7	98.51	98.48
8	98.39	98.35
9	98.26	98.29
10	98.39	98.17
11	98.26	95.13

Resultados de las pruebas de sedimentación

En la Tabla 6 aparecen los resultados de las pruebas de sedimentación realizadas con los mejores índices de remoción obtenidos en el diseño experimental y con la pulpa agotada residual sin tratar (PAR). En total se realizaron cuatro pruebas que permitieron estudiar el comportamiento de la sedimentación de las pulpas residuales y determinar su densidad final.

Tabla 6. Resultados de las pruebas de sedimentación en las pulpas tratadas.

Prueba	%S inicial	Dp (g/L)	DpFinal (g/L)	Cs (g/L)	% S final	Velocidad de sedimentación
PAR*	42,0	1347,7	1,4855	553,44	50,0	0,099m/h
P-01	40,1	1336,5	1,4850	535,61	52.0	0,140m/h
P-02	42,0	1359,0	1,4607	571,43	50.2	0,138m/h
P-03	43,0	1370,3	1,4778	589,41	51.5	0,140m/h

* Pulpa Agotada Residual sin tratar (PAR) concentración NaCN (0,5 g/L)

Como se observa las pulpas tratadas alcanzan de un 50 a 52 % de espesamiento permitiendo una recuperación de agua al proceso de 33.3%. En el caso de la pulpa residual no tratada tuvo el mismo comportamiento que las tratadas.

CONCLUSIONES

1. La caracterización química de las pulpas residuales agotadas reportaron concentraciones promedio de metal tóxico (Cu= 8,09 ppm) y CN_T= 164,5 ppm por encima de la concentración máxima admisible establecida en la NC 27:2012.
2. Los mejores resultados obtenidos con el diseño de experimento reportaron una concentración de cianuros totales de 2,5 ppm y concentraciones de Cu de 0, 2 ppm.
3. El comportamiento alcanzado para los indicadores de la contaminación de las pulpas tratadas cumple con las concentraciones máximas admisibles establecidas en las normas ambientales de vertimientos (NC: 27/2012) en cuanto al cobre (Cu) para cuerpos receptores de clase C.
4. Se determinó que la variable sal de hierro, tuvo una influencia significativa sobre la eficiencia de remoción del CN_T y Cu; mientras que la cal y el tiempo no influyeron en las condiciones estudiadas.
5. Las pulpas tratadas alcanzaron densificaciones entre 50 – 52 % de sólidos lo que permite recircular de un 30 – 40 % de los licores tratados al proceso.

BIBLIOGRAFÍA

Arévalo, S. C. 2011. Control de efluentes cianurados mediante la oxidación con Peróxido de Hidrogeno en un laboratorio de análisis de minerales. Facultad de Química e Ingeniería Química. Lima-Perú. http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/551/1/arevalo_sc.pdf.

Bachiller D.; Rendueles, M.2001. Reducción del impacto ambiental en el desarrollo de nuevos proyectos de minería de oro. http://www.unizar.es/aeipro/finder/MEDIO%20AMBIENTE.

Calzada L.; Figueredo. 2014. Aplicación de técnicas de tratamiento para la descontaminación de efluentes residuales cianurados. INFOMIN ISSN-19924194, Julio-Diciembre, Vol. 6, No.2, pp.36-48.

Chacón L.; Ruiz F. y Zapico, R. 2005. Rev. Metal. Madrid Vol. Extr. 390-394.

Carrera, Alvarado; Domínguez, S, Lucía. 2012. Remoción de metales pesados por métodos físico químicos presentes en agua proveniente de una industria minera. Revista sistemas ambientales. Vol. 5, No. 1, p27-40.

Gaceta oficial de la República de Cuba.1997 Ley No. 81del Medio Ambiente, edición extraordinaria, la Habana, 11 de julio de 1997, año XCV.

Norma cubana NC 27:2012, Vertimiento de las aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado, especificaciones. Segunda edición, Octubre 2012.

Scott J.S. y J. Ingles, 1981. Canadian Mineral Processors Thirteenth Annual Meeting, Otawa, Canadá, The Canadian Mineral Processors Society (Eds.), Otawa, Canadá, pp. 380-418.

Smith A. y T. Mudder, 1996. Tratamiento de residuos de cianuración. Mining Journal Books,Ltd, ISBN 090011780 X.