



**Ministério da
Ciência e Tecnologia**



Coordenação de Processos Metalúrgicos e Ambientais

**TREATMENT OF AMALGAMATION RESIDUES FOR RECOVERING GOLD AND
MERCURY FOR FURTHER MINIMIZING THE ENVIRONMENTAL IMPACT**

Luis G. Santos Sobral
Ary Caldas
CETEM

Jaime Chirinos
Federico Calizaya
University of San Agustín. PERU

Juan C. Guerrero
UFRJ

**CT2008-016-00 – Comunicação Técnica elaborada para o II
Internacional Workshop on Process
Hydrometallurgy – HYDROPROCESS2008,
14-16 de maio, Santiago – Chile
(pág. 03 a 12).**

Maio / 2008

HYDROPROCESS 2008

**II INTERNATIONAL WORKSHOP ON
PROCESS HYDROMETALLURGY**

14-16 May 2008. Santiago, Chile
Editors Jorge Menacho & Jesús Casas

Copyright

© Copyright 2008. GECAMIN Ltd.

Intellectual property right registration number 170538

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, by photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission from GECAMIN Ltd.

Cover design by GECAMIN Ltd.

Printed and bound in Santiago, Chile.

Disclaimer

Although all care is taken to ensure the integrity and quality of this publication and the information herein, no responsibility is assumed by the Publisher or the author for any damage to property or persons as a result of operation or use of this publication and/or the information contained herein.

I.S.B.N. 978-956-8504-11-3

GECAMIN Ltd.
197 Paseo Bulnes, 6th Floor
Santiago, Chile
Phone: (+56 2) 652 1500
Fax: (+56 2) 652 1570
E-mail: info@gecamin.com
Web: www.gecamin.com

The FIRST EDITION of 400 copies was printed by Quebecor World Chile S.A. Av. Gladys Marín Millie 6920, Santiago, Chile. May 2008.

TREATMENT OF AMALGAMATION RESIDUES FOR RECOVERING GOLD AND MERCURY FOR FURTHER MINIMIZING THE ENVIRONMENTAL IMPACT

Luis Sobral and Ary Caldas

CETEM – Technological Mineral Center. BRAZIL

Jaime Chirinos and Federico Calizaya

University of San Agustín. PERU

Juan C. Guerrero

Federal University of Rio de Janeiro. BRAZIL

ABSTRACT

This research aims at describing a method used for recovering gold from amalgamation tailings generated by the gold mining industry. Besides recovering gold, a precious metal, it was quite suitable to reduce mercury level in the residue in order to dispose it according to the directives of the Brazilian environmental legislation. The maximum limit established by CETESB was 0.5 mg of Hg per kg of residue. Diagnostics cyanidation test was accomplished to determine the efficiency of gold and mercury recovery from the original amalgamation tailings, changing the cyanide concentration, reaction time and maintaining the pH level at 10.5, and 25% of solid in the pulp. In a new stage, a new cyanidation test was carried out with the same previous experimental conditions but using an acid leaching pre-treatment, in order to decrease the cyanide consuming elements such as iron from Fe_2O_3 . Moreover, new tests were accomplished for a flotation and gravimetric concentrates from the aforementioned tailing. The gold recovery from the used amalgamation tailings itself and from those concentrates were carried out successfully. However, in the case of mercury, apart from obtaining interesting results, in term of mercury extraction from the those tailings, the remaining residues were ready to be discard according to the Brazilian environmental legislation.

APROVECHAMIENTO DE LAS COLAS DE AMALGAMACIÓN PARA LA EXTRACCIÓN DE ORO Y MERCURIO VISANDO MINIMIZAR LOS IMPACTOS AMBIENTALES.

RESUMEN

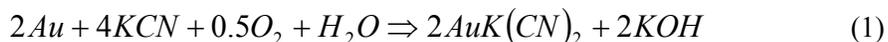
El presente trabajo fue realizado con una cola, producto de un proceso de amalgamación de un mineral oxidado de oro de la región de Paracatú en Minas Gerais. Los objetivos generales fueron recuperar el metal precioso oro, debido al valor agregado que este presenta actualmente en el mercado y la reducción del contenido de mercurio en la cola hasta obtener valores por debajo del nivel máximo permitido por la legislación Brasileña. Según el CETESB (Informe de establecimiento de valores orientadores para suelos y aguas subterráneas del estado de Sao Paulo) dicho valor máximo permisible (alerta) para mercurio es de 0,5 mg/kg. Se hicieron ensayos-diagnósticos de cianuración para determinar la recuperación de oro y mercurio de la muestra original, variando la concentración de cianuro de sodio, el tiempo de retención, manteniendo un pH entre 10 a 10,5 y porcentaje de sólidos del 25%. En una siguiente etapa se realizaron nuevos ensayos de cianuración bajo los mismos parámetros, previo tratamiento de lixiviación ácida, para eliminar algunos elementos cianicidas presentes en dicha cola como el caso del Fe_2O_3 . También se hicieron pruebas de cianuración con el concentrado obtenido por tratamiento de gravimetría y flotación. Se obtuvieron recuperaciones de oro para la cola de amalgamación y el concentrado de esta en el orden del 92% y 96%, respectivamente. Para el caso de mercurio, resultados favorables fueron encontrados para la cola de amalgamación, logrando obtener un residuo sólido con contenido de mercurio dentro de los límites permitidos por la legislación brasileña para descarte de residuos sólidos.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los métodos de concentración de oro para partículas de granulometría gruesa la amalgamación es ampliamente utilizada por el minero artesanal. Este método se basa en la producción de una amalgama oro-mercurio, que luego es quemada y por diferencia de punto de ebullición es separado el oro del mercurio, volatilizándolo este último [Veiga *et al.*, 2002].

Por otra parte, el descarte de los residuos sólidos (colas de amalgamación) en la industria minera para extracción de oro utilizando como medio concentrador el mercurio produce un alto impacto en la naturaleza pues este se transmite en el ambiente en la forma de gas, sólido y en el peor de los casos formando especies solubles que son encaminados a las vertientes de los ríos. Según Veiga *et al.* [1999], y Meech *et al.* [1998], una vez en el ambiente, el mercurio metálico se puede oxidar y acomplejar con ácidos húmicos de los suelos. Así, la situación más favorable para la movilización del mercurio es cuando se deposita en lugares aireados y ricos en materia orgánica.

Este residuo sólido puede ser tratado por cianuración para lixiviar el oro y el mercurio, para luego precipitarlos y en el caso del mercurio reutilizado en el proceso de amalgamación. Según Mardsen y House [1992], Cimenelli y Gomes [2002], y Mullen [1998], en el caso específico de la lixiviación de oro, el cianuro es el reactivo más ampliamente utilizado debido a su relativo bajo costo y a su gran eficiencia en la disolución del metal. La reacción primaria concierne a la disolución de oro en soluciones acuosas, las cuales requieren de un acomplejante y un oxidante. El oxidante más común usado en la lixiviación con cianuro es el oxígeno aplicado en forma de aire siguiendo la ecuación 1. Para más detalles ver Andrade Lima y Hodouin [2006], Wadsworth M. [2000] y Senanayake G. [2005].



El presente trabajo fue realizado con una cola, producto de un proceso de amalgamación de un mineral oxidado de oro de la región de Paracatú en Minas Gerais. Esta cola de amalgamación fue caracterizada en el CETEM [Neumann R., 2006] y en resumen esta presenta la siguiente composición: Au: 1,28; g/t Hg: 1,72 g/t; SiO₂: 39,3%; TiO₂: 0,95%; Al₂O₃: 13,59%; Fe₂O₃: 31,54%; MgO: 0,4%; CaO: 0,11%; K₂O: 2,34% y P₂O₅: 0,4%. Los objetivos generales fueron recuperar el metal precioso oro, debido al valor agregado que este presenta actualmente en el mercado y la reducción del contenido de mercurio en la cola hasta obtener valores por debajo de 0,5 mg/kg, nivel máximo permitido por la legislación Brasileña, según el CETESB.

METODOLOGÍA

Para este estudio fueron utilizadas las muestras de cola de amalgamación y su respectivo concentrado. Este último fue obtenido por tratamiento gravimétrico y de flotación. Los valores de contenido de oro y mercurio para este concentrado son de 2,20 g/t y 3,23 g/t, respectivamente. Las dos muestras fueron conminuidas 100% pasante de malla 150 (105 μm) en un molino de barras, luego fueron homogenizadas y cuarteadas hasta obtener sub-muestras representativas de 250g y 200g respectivamente. Parte de la masa fue utilizada para determinar contenidos de oro y mercurio, y el restante se guardó como respaldo. Las muestras LA1 y LA2 fueron pre-tratadas, es decir, lixiviadas con ácido sulfúrico para eliminar algunos elementos cianicidas presentes en la muestra. Para que la disolución de sales ocurra es necesario mantener el pH siempre menor a 2 con la adición

de ácido. El porcentaje de sólidos en la pulpa fue del 25%, el tiempo de residencia fue de dos horas. Una vez terminado el ensayo, la pulpa fue filtrada, para separación de las fases sólido y líquido. El residuo sólido fue lavado inmediatamente con abundante agua para neutralizar el ataque ácido.

La metodología y los cálculos para los ensayos de cianuración, fueron seguidos con base al manual de instrucción de uso para estudios de cianuración del CETEM [Pinheiro 2000]. Las alícuotas de la lixivia, antes de ser enviadas para análisis fueron tratadas para eliminar el cianuro siguiendo el procedimiento descrito por Pinheiro *et al.*, [2005]. Los ensayos de cianuración fueron efectuados en los laboratorios de la Coordinación Procesos Minero Ambientales (CPMA). Básicamente se utilizó un reactor Kettler-Pirex de un litro, un agitador mecánico modelo Nova Etica y un medidor de pH digital modelo PM600 con electrodo de referencia de Ag/AgCl (ver Figura 1). Se tomaron muestras del residuo sólido después de la lixiviación para análisis de oro por ensayos al fuego (*fire assay*) y mercurio por digestión ácida y espectrometría de absorción atómica–AAS.

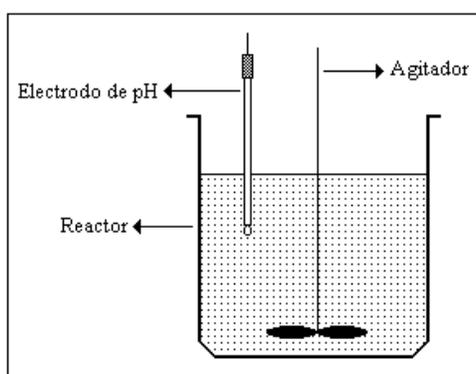


Figura 1 Representación gráfica del sistema reaccional.

La tabla 1, a seguir, muestra las condiciones experimentales para los ensayos de cianuración de la cola de amalgamación y el concentrado.

Tabla 1 Condiciones experimentales en las pruebas de cianuración.

Código	Pre-Trat (Lix. ácida)	NaCN (g/L)	pH	% de Sólidos	Tiempo de Residencia (h)
1	No	2,5	10,5	25	30
2	No	1,5	10,5	25	24
LA1	Si	2,5	10,5	25	24
LA2	Si	1,5	10,5	25	24
C1	No	2,5	10,5	25	24
C2	No	1,5	10,5	25	24

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Extracción de Oro y Mercurio

La Figura 2 muestra los resultados obtenidos en la extracción de oro para todos los ensayos. En la misma se observa que la mejor recuperación de oro se obtuvo en el ensayo 1, con una concentración de cianuro de sodio de 2,5 g/L.

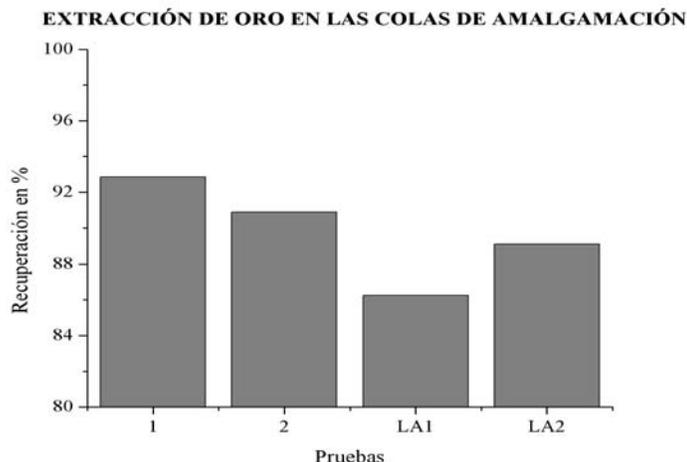


Figura 2 Recuperación de oro de las colas de amalgamación en las pruebas 1 (2,5 g/L de NaCN), 2 (1,5 g/L de NaCN), LA1 (2,5 g/L de NaCN con lixiviación ácida), LA2 (1,5 g/L de NaCN con lixiviación ácida).

Por otra parte, en la Figura 3, son presentados los resultados de los contenidos de oro y mercurio en los residuos de cianuración. Solamente en el ensayo 1 se llegó a tener una concentración de mercurio dentro de los límites permitidos para el descarte.

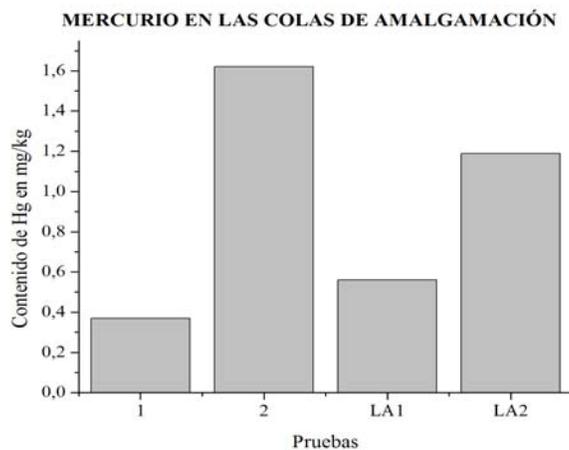


Figura 3 Concentración de mercurio de las colas de amalgamación de las pruebas 1 (2,5 g/L de NaCN), 2 (1,5 g/L de NaCN), LA1 (2,5 g/L de NaCN con lixiviación ácida), LA2 (1,5 g/L de NaCN con lixiviación ácida).

Para los ensayos realizados con el concentrado la extracción de oro se mostró eficiente en ambas pruebas (ver figura 4), siendo que se obtuvo una mejor extracción en las condiciones del ensayo C2.

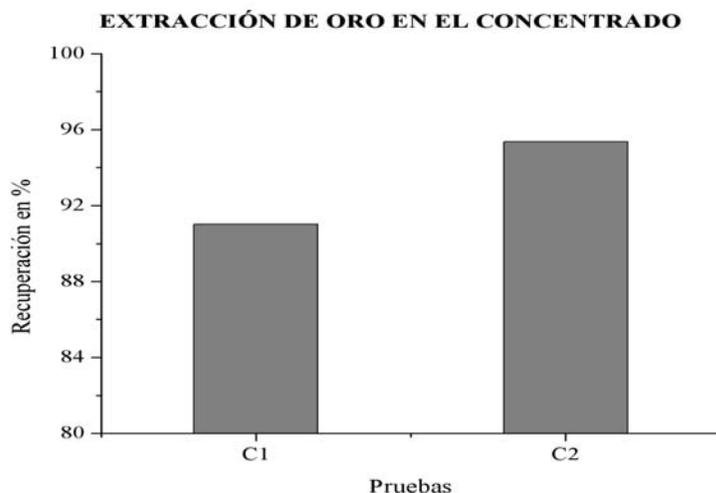


Figura 4 Extracción de oro en el concentrado de las colas de amalgamación de las pruebas C1 (2,5 g/L de NaCN), C2 (1,5 g/L de NaCN).

Los contenidos de mercurio obtenidos en el sólido luego de la cianuración, representados en la Figura 5, muestran que se llegó a extraer más mercurio en el ensayo C1. Es importante mencionar que en ese mismo ensayo la cantidad de oro extraída fue menor, la selectividad para el mercurio creció junto con la concentración de cianuro. Los resultados muestran también, para el caso del mercurio, la extracción de este metal se incrementa con el aumento de la fuerza de cianuración.

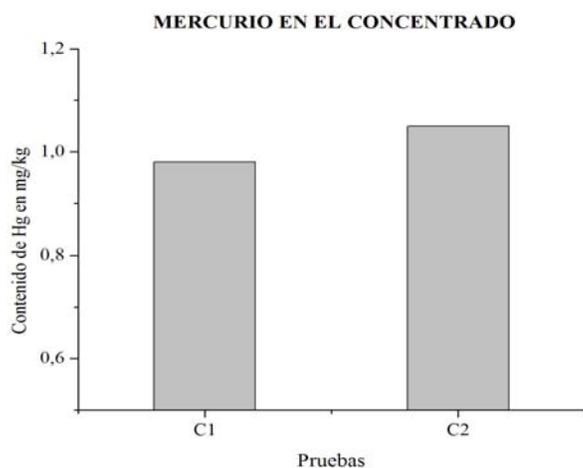


Figura 5 Recuperación de mercurio del concentrado de las colas de amalgamación de las pruebas C1 (2,5 g/L de NaCN), C2 (1,5 g/L de NaCN).

Efecto de la Concentración de Cianuro de Sodio

El consumo de NaCN en todas pruebas fue elevado, ver figura 6, debido a un considerable contenido de impurezas de sales de hierro y aluminio en la muestra. Se aprecia en el mismo gráfico que hubo un mayor consumo de reactivo en el ensayo 1. También se observa que para las pruebas donde la muestra sufrió un pre-tratamiento con ácido sulfúrico (LA1 y LA2), el consumo de cianuro

disminuyó, es decir, los ensayos de lixiviación ácida cumplieron el objetivo de disolver parte de los agentes cianocidas en la muestra. El consumo de cal en las pruebas LA1 y LA2 fue mayor que para los ensayos 1 y 2.

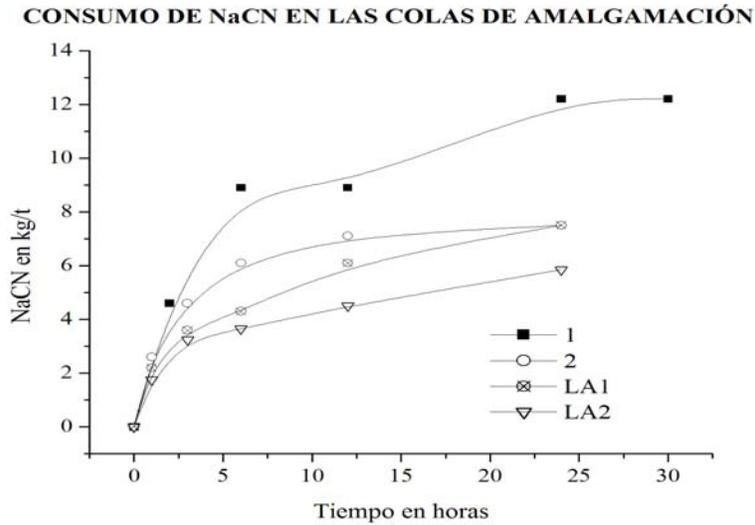


Figura 6 Consumo de NaCN de las colas de amalgamación de las pruebas 1 (2,5 g/L de NaCN), 2 (1,5 g/L de NaCN), LA1 (2,5 g/L de NaCN con lixiviación ácida), LA2 (1,5 g/L de NaCN con lixiviación ácida).

Por otra parte, observando las curvas de las pruebas C1 y C2 (ver Figura 7), el consumo de cianuro de sodio disminuyó en un 72,73%, trabajando con una concentración de 1,5 g/L. También se puede resaltar que el consumo de cianuro de sodio en la prueba C1 se incrementa drásticamente a partir de la 7 hora. Esta concentración de cianuro de sodio promueve la disolución de minerales de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio aumentando el consumo de Cianuro. Esto se lo podrá demostrar con la ejecución de nuevas pruebas, determinando en estas la concentración de sales de hierro y aluminio disueltas en las lixivias.

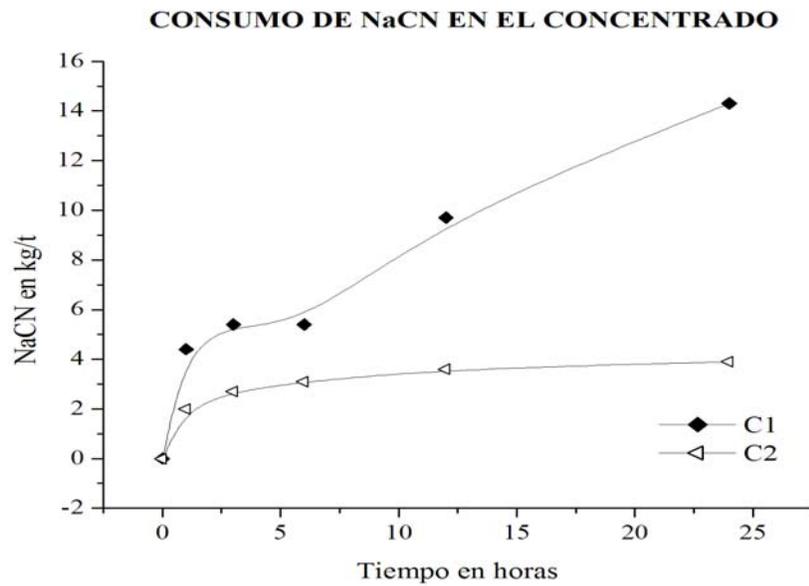


Figura 7 Consumo de NaCN en el concentrado de las colas de amalgamación de las pruebas C1 (2,5 g/L de NaCN), C2 (1,5 g/L de NaCN).

Cinética de la Disolución de Oro y Mercurio

De la Figura 8, se puede estimar como un óptimo tiempo de residencia de la pulpa en la lixivia, para la disolución de oro, de 8 horas. A partir de allí, la curva de disolución de oro para todas las muestras se mantiene constante, hasta llegar a un punto en que la concentración de oro en solución comienza a caer. La cinética de disolución de oro se mostró rápida en todas las pruebas. La disolución de oro para las muestras que sufrieron pre-tratamiento (pruebas LA1 y LA2) fueron menores a las que se cianuro directamente (pruebas 1 y 2), esto se debe al menor contenido de oro de las muestras sólidas después del la lixiviación ácida, se cree que las pérdidas de oro ocurrieron en el proceso de pre-tratamiento pues cuando se lixivias con ácido se genera como subproducto una lama que es difícil de filtrar y manipular entonces parte del oro que se encuentra en los finos es perdida por arrastre en esa etapa.

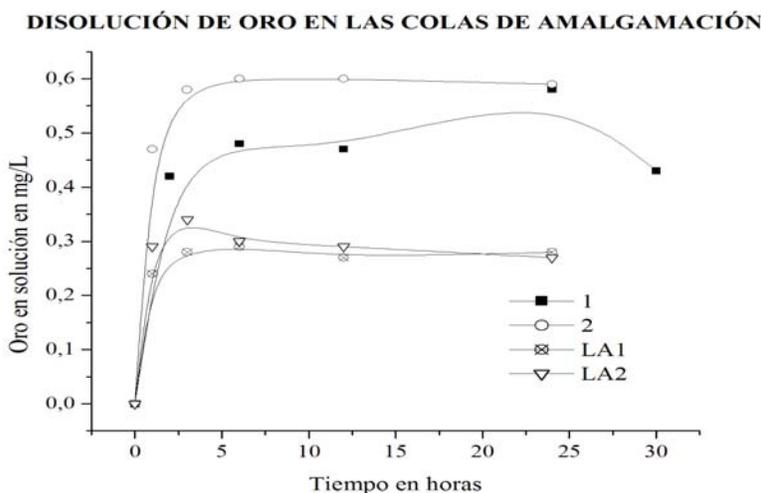


Figura 8 Efecto de la concentración de cianuro de sodio y pre-tratamiento en la cinética de la disolución de oro en las colas de amalgamación de las pruebas 1 (2,5 g/L de NaCN), 2 (1,5 g/L de NaCN), LA1 (2,5 g/L de NaCN con lixiviación ácida), LA2 (1,5 g/L de NaCN con lixiviación ácida).

Observando la Figura 9, para la prueba 2, la disolución de mercurio fue menor y cae después de las primeras seis horas, trabajando con una concentración de 1,5 g/L, es decir, no se está removiendo mercurio de la cola de amalgamación. Probablemente la concentración de cal existente en esta prueba elevó el pH por encima de lo esperado, impidiendo así que se acompleje el mercurio con el cianuro debido a que valores de pH por encima de 10 favorece a la formación de hidróxido de mercurio, especie insoluble que precipita este metal.

DISOLUCIÓN DE MERCURIO EN LAS COLAS DE AMALGAMACIÓN

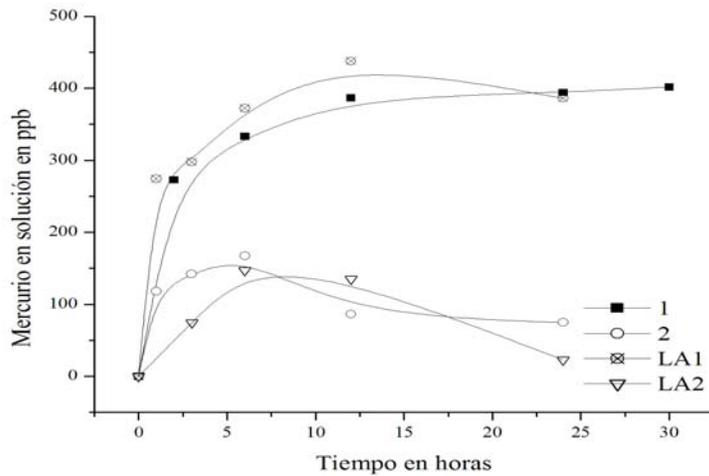


Figura 9 Efecto de la concentración de cianuro y pre-tratamiento en la cinética de la disolución de mercurio en las colas de amalgamación de las pruebas 1 (2,5 g/L de NaCN), 2 (1,5 g/L de NaCN), LA1 (2,5 g/L de NaCN con lixiviación ácida), LA2 (1,5 g/L de NaCN con lixiviación ácida).

La Figura 10 muestra como influye la concentración de cianuro de sodio en la cinética de la disolución de oro. Según la grafica, para una mayor concentración de cianuro de sodio se produce un incremento en la disolución de oro. Cabe mencionar que a partir de la doceava hora ambas curvas comienzan a caer, es decir, comienza haber un detrimento en la concentración de oro en la solución.

La Figura 11 muestra que existe una mayor disolución de mercurio con el aumento de la concentración de cianuro de sodio. Esta disolución de mercurio no presento los valores esperados, prácticamente la disolución de este metal fue poca. Teniendo en consideración además, que a partir de la quinta hora la concentración de Mercurio en solución comienza a caer hasta prácticamente llegar a valores inferiores de 50 ppb al final de las pruebas.

DISOLUCIÓN DE ORO EN EL CONCENTRADO

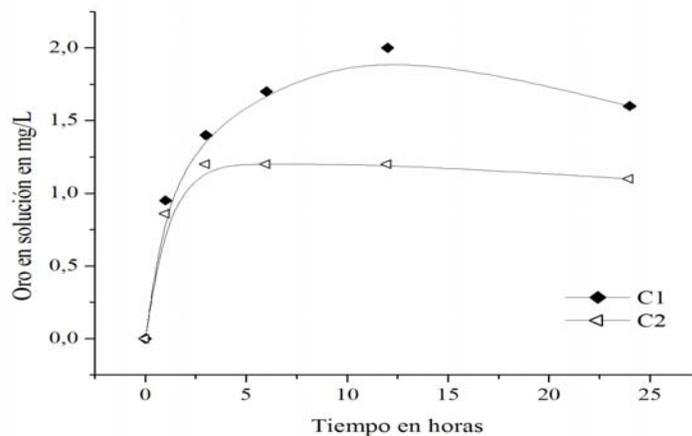


Figura 10 Efecto de la concentración de cianuro de sodio en la cinética de la disolución de oro en el concentrado de las colas de amalgamación de las pruebas C1 (2,5 g/L de NaCN), C2 (1,5 g/L de NaCN)

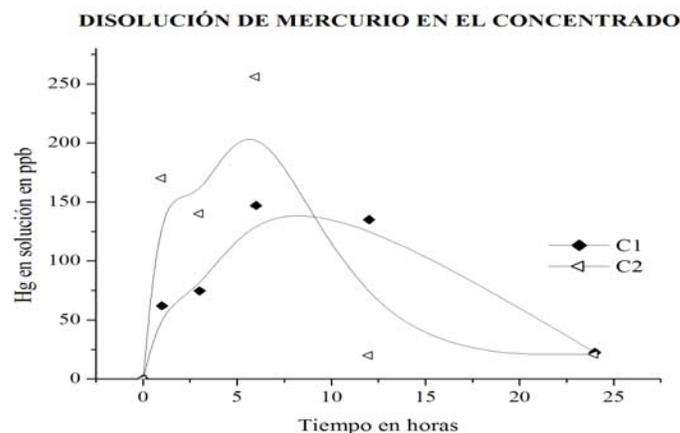


Figura 11 Efecto de la concentración de Cianuro de Sodio en la Cinética de Disolución de Mercurio en el concentrado de las colas de amalgamación de las pruebas C1 (2,5 g/L de NaCN), C2 (1,5 g/L de NaCN).

CONCLUSIONES

De acuerdo a los valores mostrados en este estudio, el tratamiento del mineral oxidado de oro de la región de Paracatú, para extraer el oro y recuperar el mercurio de las colas de amalgamación y el concentrado por cianuración es favorable técnicamente.

El mejor resultado se obtuvo con la cola de amalgamación lixiviando esta a una concentración de 2,5 g/L de NaCN. La recuperación fue del 92,9% y los niveles de mercurio (0,38 mg/kg) en los residuos sólidos estuvieron dentro de los límites permitidos por la legislación brasileña.

Además, se recomienda mejorar el desempeño de este tratamiento controlando el pH y aumentando la fuerza de cianuración, pues según lo demostrado, con el aumento de la concentración de cianuro se produce un incremento en la disolución de mercurio.

REFERENCIAS

Ciminelli, V., Gomes A. (2002). “Princípios da Cianetação”. Extração de Ouro: Princípios, Tecnologia e Meio Ambiente. Trindade, R., Barbosa Filho, O. (Editores), CETEM/MCT, Brasil, pp. 59-94. [1]

De Andrade Lima, L.R.P., Hodouin, D. (2006). “Analysis of the gold recovery profile through a cyanidation plant”. Minerals engineering 80, pp. 15–26. [2]

Marsden J., House L. (1992). “The Chemistry of Gold Extration”, Editores. Ellis Horwood Series in Metals and Associated Materials, p. 597.[3]

Meech, J. Veiga, M, Tromans, D. (1998). “Reactivity of Mercury from Gold Mining Activities in Darkwater Ecosystems”. Ambio, vol. 27, n 2, pp. 92-98. [4]

Mullen T. (1998). “Short history of man and gold”. Mining Engenieering, pp.50-56, 1998. [5]

Neumann R. (2006). “Caracterização mineralógica de minério de ouro”, CETEM-COAM-SCT, Relatório Técnico elaborado para a RPM-KINROSS AMERICAS, p. 16. [6]

Pinheiro A. (2000). “Instrução de Uso para Estudos de cianetação”, Instrução de trabalho elaborada para o CETEM/MCT, 7p. [7]

Pinheiro A., Monteiro M., Oliveira N., Carneiro M., Da Silva L. (2005). “Preparação de amostras cianetadas para determinação de metais por espectrometria de absorção atômica com chama”, Instrução de trabalho elaborada para o CETEM/MCT, p. 8. [8]

Senanayake, G. (2005). “Kinetics and reaction mechanism of gold cyanidation: Surface reaction model via Au(I)–OH–CN complexes”. Hydrometallurgy 80, pp 1-12. [9]

Veiga, M. Silva, A. Hinton, J. (2002). “O Garimpo de Ouro na Amazônia: Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Sociais”. Extração de Ouro: Princípios Tecnologia e Meio Ambiente. Trindade, R., Barbosa Filho, O. (Editores), CETEM/MCT, Brasil, pp. 95-133. [10]

Veiga, M.M. Hinton, J. Lilly, C. (1999). “Mercury in the Amazon: A comprehensive Review with Special Emphasis on Bioaccumulation and Bioindicators”. In: Proc. Of the NIMD (National Institute For Minamata Disease) Forum '99, Minamata-Japan, pp. 19 39. [11]

Wadsworth, M. E. (2000). Surface processes in silver and gold cyanidation. Minerals processing 58, pp 351–368. [12]