

CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN POR PERCOLACIÓN CON SOLUCION DE CIANURO DE SODIO DE MINERALES AUROCUPRÍFEROS DE MENAS OXIDADAS.**KINETIC PERCOLATION LEACHING WITH AUROCUPRÍFEROUS MINERAL SODIUM CYANIDE SOLUTION OF RUSTY MENAS.**

Eduardo A. Mérida La O ⁽¹⁾, Marcela Figueredo Frías ⁽¹⁾, José Castellanos Suarez ⁽¹⁾, Fátima Bugallo Davis ⁽¹⁾, Eliecer Hidalgo Liriano ⁽¹⁾, Andiel Martínez Quiñones ⁽¹⁾, Yania Cabaleiro Piedra ⁽²⁾, Ing. Heidy Carpio Morales ⁽¹⁾, MSc. Andrey Leyva Mormu ⁽¹⁾

La lixiviación con solución de cianuro de sodio ha sido ampliamente aceptada como un excelente método industrial para recuperar oro y plata. Sin embargo, en muchas ocasiones el oro se encuentra asociado en la mena a minerales de cobre. Estos minerales representan un gran problema debido a su solubilidad en soluciones cianuradas, el cobre reacciona formando un complejo de cianuro de cobre, aumentando así el consumo de cianuro e inhibiendo la extracción de oro y plata. El objetivo del presente trabajo es estudiar la cinética de lixiviación de Au, Ag y cianidas con empleo de la tecnología de cianuración por percolación, de menas aurocupríferas a escala de laboratorio en columnas de 1m de altura. Las menas respondieron satisfactoriamente al proceso de cianuración y los mejores índices tecnológicos obtenidos para la extracción de oro y plata fueron: concentración de NaCN de 0,03 g/L, flujo de irrigación de 20 L/m²*h y el tiempo de lixiviación fue de 17 días. El consumo de cianuro y cal fue de 0,12 kg/t y 12 kg/t respectivamente, valores aceptables para el procesamiento industrial de las menas.

Palabras clave: Lixiviación, percolación, minerales auríferos.

Leaching with sodium cyanide solution has been widely accepted as an excellent industrial method for recovering gold and silver. However, on many occasions gold is associated in the ore to copper minerals. These minerals represent a major problem due to its solubility in cyanide solutions because copper reacts forming a copper cyanide complex, increasing the consumption of cyanide and inhibiting the extraction of gold and silver, or requiring a greater amount of cyanide in solution. The aim of the present work is to study the kinetics of leaching of gold, silver and cyanides; with cyanide percolation technology of aurocupriferos ores. Ores responded satisfactorily to the cyanidation process and the best technological indexes obtained for the extraction of gold and silver were: concentration of 0.03 g/l NaCN and leaching time was 17 days. The consumption of cyanide and lime was 0.12 kg/t and 12 kg/t respectively acceptable values for the industrial processing of ores.

Keywords: Leaching, auriferous minerals, percolation.

Recibido: 19 de mayo del 2015

Aprobado en su forma original: 3 de noviembre del 2015

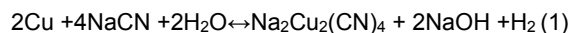
(1) Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), Varona 12028 Km^{1/2} Boyeros, La Habana, Cuba, CP-10800 Correo electrónico: eduardo@cipimm.minem.cu

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la recuperación del oro ha experimentado un gran impulso ante el significativo aumento del precio del metal, desde alrededor de 600 USD /Oz (promedio 2006) hasta cerca de 1300 USD/Oz actualmente (primer trimestre del 2014), situación que ha estimulado el proceso inversionista en la explotación de nuevos yacimientos para la recuperación del metal precioso.

La lixiviación con cianuro ha sido ampliamente aceptada como un excelente método industrial para recuperar oro y plata. Mientras que la lixiviación en pila es una lixiviación por percolación de mineral acopiado sobre una superficie impermeable, preparada para coleccionar las soluciones; a escala industrial contempla el tratamiento de 1000 a más de 50 000 ton/día de mineral. Es también atractiva para el desarrollo de depósitos pequeños. Su gran flexibilidad operativa le permite abarcar tratamientos cortos (semanas) con mineral triturado o bastante prolongados (meses hasta años) con mineral grueso, al tamaño producido en la mina. La adopción de la técnica está condicionada a las características del mineral, habiéndose determinado en forma práctica y a escala piloto los índices favorables, por sus menores costos de capital y de operación,

Sin embargo, cuando se tratan menas donde el oro se encuentra asociado a minerales de cobre, siempre están fuertemente unidos. Vale la pena recordar que la presencia de cobre en menas de oro es uno de los principales problemas para la operación de lixiviación y recuperación de oro, debido a que el cianuro tiene preferencia por el cobre. Ya que el cobre reacciona formando un complejo de cianuro de cobre, aumentando el consumo de cianuro e inhibiendo la extracción de oro y plata o requiriendo una mayor cantidad de cianuro en la solución.



En cuanto a la formación de complejos cianurados de cobre se puede decir que el CuCN puede ser disuelto en la presencia de exceso de cianuro para formar iones cianocuprosos $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$, $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$, $\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$ en soluciones acuosas, aumentando como se dijo el consumo de cianuro. Los minerales que contienen oro asociado a los minerales de sulfuro de cobre que afectan la selección del proceso o a las condiciones de operación. La disolución del cobre generalmente es indeseable durante la lixiviación ya que puede consumir cianuro y disolver oxígeno, retardar la velocidad de disolución del oro, disminuir el pH de la solución madre, interferir con los posteriores procesos de recuperación y contaminar el producto final. Por lo que el efecto perjudicial de los iones de cobre en la disolución del oro, en algunos sistemas industriales, puede atribuirse a las complicaciones al analizar las soluciones que contienen cobre para el contenido libre de cianuro.

Por lo tanto, el efecto perjudicial de la disolución del cobre y oro (y plata) puede evitarse proporcionando un adecuado cianuro libre en solución para asegurar que se maximice la velocidad de disolución del oro.

En base a diferentes estudios sobre la cinética de disolución del oro, se puede establecer que la velocidad de disolución puede estar controlada por:

- Velocidad de difusión del oxígeno por capa límite.
- Velocidad de difusión del cianuro.
- Pasivación de la superficie del oro.

Cuando el proceso está controlado por difusión, la relación de concentraciones CN- a O₂ es importante. Pues a bajas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución depende solamente de ella. Mientras que a bajas concentraciones de oxígeno, la velocidad será proporcional a la concentración de oxígeno e independiente a la concentración de cianuro. Aunque

también son importantes las variables que definen la cinética de la Cianuración, las cuales son: Tamaño de partículas, concentración de cianuro, Tasa de riego, Temperatura, pH, cantidad de oxígeno disuelto y metales en el mineral que de una u otra forma influyen positiva o negativamente.

Sabiendo que no son pocas las variables a estudiar con este tipo de menas ricas en cobre, se seleccionó solamente el estudio de dos de las variables más influyentes:

- Concentración de cianuro.
- Tasa de riego.

Llegando a establecer como objetivo principal estudiar la cinética de lixiviación de oro, plata y cianicidas (Cu) con empleo de la tecnología de cianuración por percolación, de menas aurocupríferas.

MATERIALES Y METODOS

Las muestras estudiadas fueron preparadas y procesadas por un esquema, desarrollado en investigaciones anteriores y principalmente en el informe de junio del 2013, para su caracterización química empleo en los ensayos de percolación en minicolumnas y columnas de hasta 2m. Se realizó la caracterización química de las muestras determinando los tenores de oro y plata, mediante la técnica de docimasia, seguida de absorción atómica. Como también se le realizó a la muestra un

Análisis químico por fracciones para determinar en qué fracción se encontraba el metal precioso y Análisis mineralógico para confirmar las fases mineralógicas que posee la muestra de estudio.

Los métodos químicos empleados para la caracterización de las muestras se describen en la tabla I,

Tabla I. Métodos químicos empleados en la caracterización de las muestras estudiadas.

Método	Lugar de realización
Potenciométrico con electrodo combinado	In situ
Volumétrico	Laboratorio
Docimasia	Laboratorio
EAA	Laboratorio

Aglomeración del mineral.

Las pruebas de aglomeración se llevaron a cabo en un peletizador de disco (diámetro 390 mm y una altura 65 mm) (Fig 1), en el cual se determinaron las condiciones óptimas de aglomeración. Se fijaron los parámetros siguientes: las RPM del equipo, el ángulo de inclinación del disco, consumo de cemento y la humedad del mineral. Por otro lado la alimentación al peletizador se realizó en forma manual. Las condiciones estudiadas fue variar los consumos de cemento y el consumo de cal ambos como aditivo.



Figura 1. Disco aglomerador empleado en las pruebas.

El material aglomerado fue curado por un período de 72 horas. Concluido este tiempo se comenzaron las pruebas en columnas.

Ensayos de lixiviación en minicolumnas de 1 y 2m.

Con el objetivo de simular la lixiviación por percolación en pila y la minimizar la disolución del cobre e impurezas, se realizaron ensayos en minicolumnas. La granulometría empleada en los estudios fue -6,35mm.

Las primeras pruebas se realizaron en minicolumnas de vidrio cuyas dimensiones fueron 100 mm de diámetro y 1 metro de altura; la segunda escala fue con columnas de 110mm de diámetro y 2 metros de altura. El proceso de carga y curado del mineral se realizó según los procedimientos establecidos en el Manual de Calidad del Laboratorio de Metalurgia Extractiva. (LME PT-03-01). En la parte superior de cada columna de mineral se colocaba una tela de saco de yute para lograr una distribución homogénea de la solución de irrigación. La solución de irrigación se alimentaba en forma continua mediante una bomba peristáltica.

En la zona inferior de cada columna se depositó una camada de aproximadamente 9 cm de altura de material inerte para facilitar el drenaje y evitar la salida de finos

del mineral. Cada 24 horas se medía y anotaba el volumen de salida y de entrada del sistema. Se medía el flujo de irrigación y la altura libre de la cama de mineral para posteriormente calcular el porcentaje de compactación del mineral. También se tomaban 100 ml de muestra para determinar el pH, concentración de Cianuro de sodio y la composición química. Las variables estudiadas fueron Tasa de irrigación y concentración de cianuro en la solución de irrigación. El proceso de lixiviación se continuó hasta alcanzar un contenido de oro diario menor igual de 0,01 mg/L durante 3 días consecutivos. El lavado se realizó usando un flujo de 20 L/m².h, hasta alcanzar un valor de cianuro menor de 10 ppm. Concluido el proceso de lavado y drenaje de 24 horas; se descargaron, tomándose muestra para humedad. El secado del mineral se procedía por oreo en capas de polietileno al sol por espacio de 48 horas. Después de secado el mineral de las columnas por separado, se procedía a su preparación para análisis químico de oro, cobre e impurezas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización química de la muestra estudiada.

Tabla II. Composición química promedio de la muestra estudiada.

Au	Ag	Fe _T	Cu	Pb	Zn	S _T	Si ₂ O	As	Sb
g/t									
		%							
1,25	5	2,18	0,0325	0,05	0,02	3,88	56,44	0,005	0,0001

Como se puede observar en la tabla II el contenido de Cobre es bajo pero como a escala industrial se procesan enormes cantidades de mineral, si son significativos

estos valores, afectando el proceso de lixiviación del oro. Mientras que el contenido de Azufre total influye negativamente en el pH del mineral aportando más acidez

Tabla III. Análisis granulométrico de la muestra estudiada.

Fracción (mm)	% en peso	Ley de Au (g/t)	Recuperación (%)	Cu (%)	Recuperación (%)
-6,35+3,35	23,26	1,54	28,59	0,027	20,10
-3,35+1,0	23,26	1,50	27,85	0,033	24,50
-1,0+0,5	4,71	1,40	5,27	0,048	7,23
-0,5+0,25	4,74	2,59	9,81	0,054	8,20
-0,25+0,15	3,87	0,90	2,76	0,049	6,06
-0,15+0,074	1,53	1,21	1,48	0,023	1,13
-0,074+0,045	2,98	0,83	1,97	0,022	2,10
-0,045+0,038	0,53	0,93	0,39	0,022	0,37
-0,038	35,12	0,78	21,87	0,027	30,32
Total	100,00	1,253	100,00	0,031	100
Ley de Au cabeza recalculada (g/t)		1,253			

Como se observa en la tabla III la ley de oro por cabeza recalculada coincidió con la ley de oro cabeza directa. La distribución de oro en las distintas fracciones analizadas es homogénea, observándose en las fracciones bajo 1mm un contenido de finos alto del orden de 53,5 %, lo cual indicó la necesidad de aglomerar la muestra para la

lixiviación por percolación. La distribución obtenida para el cobre, mostró una distribución homogénea en todas las fracciones estudiadas. En la tabla IV se muestra un análisis racional de cobre realizado a la muestra estudiada, reportando los siguientes resultados:

Tabla IV. Análisis racional de cobre en la muestra estudiada.

Mineral	Cobre (%)				
	Cu _T	Cu soluble	Cu combinado	Cu oxidado	Cu sulfuro
Contenido	0.03	0.0022	0.0031	0.0071	0.018
% en peso	100	7.33	10.33	23.67	60.00

Este tipo de análisis es importante para conocer las distintas especies de cobre prevaletentes en la muestra estudiada y observar el comportamiento de las mismas a entrar en contacto con soluciones lixivadoras y cuales son más fáciles de solubilizar afectando a las soluciones ricas en oro en procesos posteriores de recuperación. Como se observa del análisis racional, existe un potencial de generación ácida en el mineral de un 67,3%, prevaleciendo en su composición el cobre como sulfuro que es quien aporta el mayor porcentaje de oxidación. Afectando el pH de la solución rica en oro y aportando cobre

soluble también lo cual pudiera indicar que existe la posibilidad de coprecipitación de este metal por efecto de la acidez presente.

Análisis mineralógico de la muestra tecnológica estudiada.

Para la caracterización sustancial mineralógica de las muestras estudiadas, se aplicó un conjunto de técnicas instrumentales tales como: Difracción de Rayos-X, análisis químico y el análisis mineralógico apoyado en un estudio granulométrico por vía húmeda. Como se puede observar en los difractogramas (Fig.

2) las fracciones estudiadas están constituidas principalmente por cuarzo y presentan hidromicas, pirita y en menor contenido clorita, calcopirita, feldespato albita. En la muestra cabeza el contenido de cuarzo es casi el doble del contenido

presente en la fracción fina, esto se debe a que la roca muestra un alto contenido de minerales secundarios alterados los cuales al ser inducidos a un proceso de trituración se acumulan en las fracciones finas.

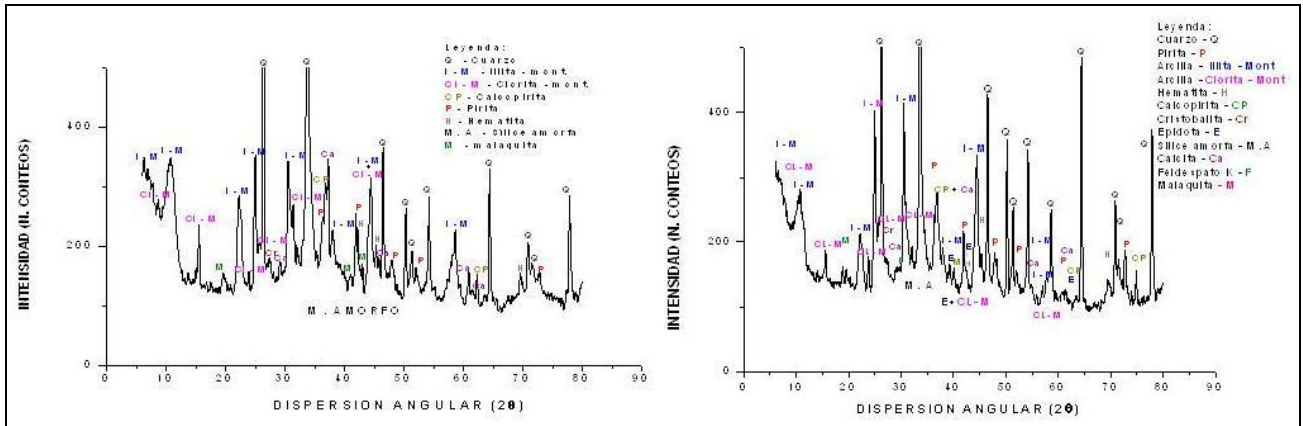


Figura 2. Difractogramas de la muestra cabeza y la fracción fina (-0,074mm) de la muestra estudiada.

Como conclusiones importantes del análisis mineralógico se observó que en la muestra estudiada existe un predominio de la fase cuarzosa fundamentalmente en las fracciones más gruesas. Producto de la alteración de las rocas y de los minerales primarios, se forma un material arcilloso, clorita-montmorillonita y Illita-montmorillonita el cual predomina en las fracciones más finas. Los óxidos de hierro se encuentran en

todas las fracciones asociados a las arcillas y otros minerales. Como minerales sulfurosos se observaron: la pirita, calcopirita, esfalerita y algún carbonato de Cu.

Resultados del estudio de la aglomeración de la muestra estudiada.

Tabla V. Resultados del análisis granulométrico del material aglomerado.

Fracción (mm)	% en peso	Ley de Au (g/t)	Recuperación (%)
+6,35	9,45	1,21	9,25
-6,35+3,36	59,41	1,54	74,00
-3,36+1,0	26,47	0,50	10,71
-1,0+0,1	3,71	1,62	4,85
-0,1	0,96	1,54	1,20
Total	100,00	1,24	100,00
Ley de Au cabeza recalculada		1,236	

Como se observa en la tabla V, El material aglomerado el porciento de fino bajo 1 mm

disminuyó en forma considerable de un 53,5% a 4.85% en las condiciones

seleccionadas de aglomeración lográndose producir un aglomerado de alta calidad. El material aglomerado retenido en cada fracción fue pesado y comparado con el peso del material natural seco retenido en el tamiz. Se estudiaron distintas dosis de cal (7, 9, 12, 15 y 18 kg cal/t de mineral). Pureza de la cal empleada % CaO = 64,67%). Tomando en consideración la calidad del material aglomerado se seleccionaron las condiciones de peletización: la velocidad fue de 30rpm; la humedad promedio fue de 12 – 13% y el índice de consumo de cemento se fijó en 9 kg Cemt/t mineral. El consumo de cal se mantuvo en el intervalo de 11,5 - 15 kg/t en las todas las pruebas, un consumo

relativamente alto para este tipo de proceso, notándose el incremento del consumo de la cal en las pruebas con mineral aurocuprífero. Lo cual nos indicó la generación ácida de los materiales estudiados.

Resultados de los ensayos de percolación. Columnas de 1m

El estudio de lixiviación fue conducido bajo las condiciones reportadas en las Tablas VI para cada minicolumna.

Las condiciones en que se aglomeró el mineral en estas pruebas fue (9 kg/t de cemento y 9 kg/t de cal).

Tabla VI Parámetros de operación de las minicolumnas.

Prueba No.	Flujo de Irrigación (L/m ² h)	C(NaCN) g/L	Días de operación
C1	10	0,1	20
C2	10	0,5	20
C3	10	0,03	20
C4	20	0,03	17
C5	30	0.03	15

En todas las pruebas se observó que en las primeras horas de lixiviación el pH disminuyó notablemente, manteniéndose como promedio en un rango entre (8,72 - 9,41), lo cual indicó la hidrólisis ácida del mineral estudiado. Resultados similares se reportan en los estudios (Hernández, M, 2001), para las muestras MT-I y MT-II muy similares a la estudiada en este trabajo, a pesar de haber incrementado la dosis de cal en la aglomeración y mantener el pH de la solución de irrigación entre 11,5 - 12,0.

El consumo de cianuro estuvo entre (0,25 - 1,22 kg/t), reportándose el mayor consumo en la prueba donde se operó con la concentración más alta de cianuro 0,5 g/L. El volumen de la solución de irrigación osciló entre 1,86-2,2 m³/t de mena en las pruebas C1a C3, resultados similares a los reportados en estudios anteriores para una tasa de irrigación de 10 L/m²h. En las pruebas C4 y C5 el volumen de la solución

de irrigación se incrementó a 4,17m³/t y 7,34 m³/t, para una de tasa de irrigación de 20 y 30 L/m²h respectivamente. Durante todo el período no se detectaron problemas de permeabilidad de la cama de mineral en las columnas. La contracción de la cama de mineral varió entre 12,29-23,41%.

El comportamiento obtenido para los cianidas (Cu, Zn y Pb) varió en función de la concentración de cianuro reportándose las mayores concentraciones para el cobre con el empleo de la concentración de NaCN de 0,5 g/L, favoreciendo su disolución la hidrólisis ácida del mineral. La concentración promedio de cobre osciló entre 22,8-42,6 mg/L. Las menores concentraciones se reportan al disminuir la concentración de NaCN a 0,03 g/L y aumentar la tasa de irrigación. A continuación en la Figura 3 se muestra la cinética de recuperación de oro en las pruebas C1 a C3.

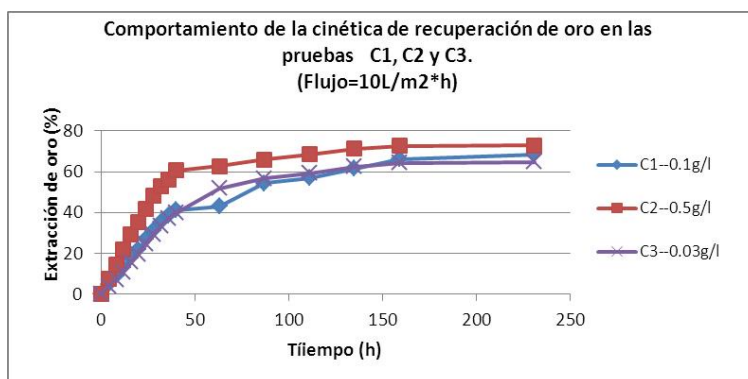


Figura 3. Comportamiento de la cinética de recuperación de oro, en las pruebas C1 a C3.

A modo comparativo se observa una disminución de la extracción de oro con la disminución de la concentración de cianuro (C1 y C3), sin embargo en las primeras 40 horas de lixiviación se recupera casi el 50% del oro en todas las pruebas. En la figura 4

se muestra la cinética de disolución de cobre para las distintas concentraciones NaCN estudiadas, obsérvese la notable disminución de la concentración de cobre al disminuir la concentración de NaCN.

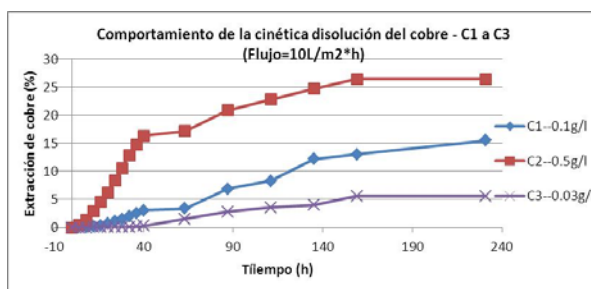


Figura 4. Comportamiento de la cinética de disolución de cobre en las pruebas C1 a C3.

Teniendo en cuenta estos resultados se decidió aumentar la tasa de irrigación con el objetivo de contrarrestar el efecto de la disminución de cianuro y evaluar el

comportamiento de la recuperación de oro así como su cinética. A continuación se muestran los resultados en la Figura 5.

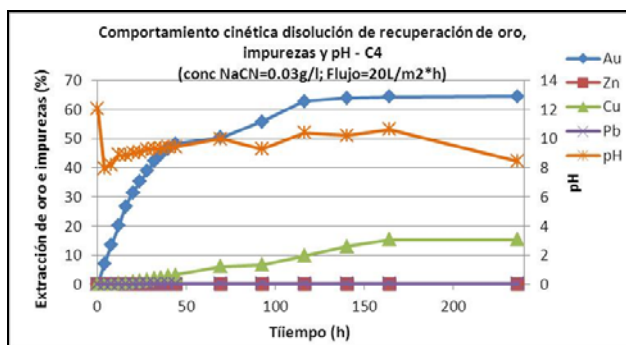


Figura 5. Comportamiento de la cinética de disolución de oro, impurezas y pH en la C4.

El comportamiento observado para el pH fue similar al obtenido en las pruebas anteriores, nótese como disminuye desde las primeras horas de lixiviación (pH=9,29), comportándose como promedio por debajo del pH requerido para la operación durante todo el proceso. La recuperación de oro fue de 64,8% para un consumo de cal de 16,67 kg/t. El aumento de la tasa de riego mejoró

la cinética de lixiviación del mineral, ya que al incrementar la tasa de riego la velocidad de disolución de oro es mayor, debido al ingreso de mayor cantidad de cianuro al mineral, sin embargo el contenido de oro en la solución es menor producto del efecto de dilución. A continuación se muestran los resultados obtenidos al aumentar la tasa de riego a 30 L/m²h en la Figura 6

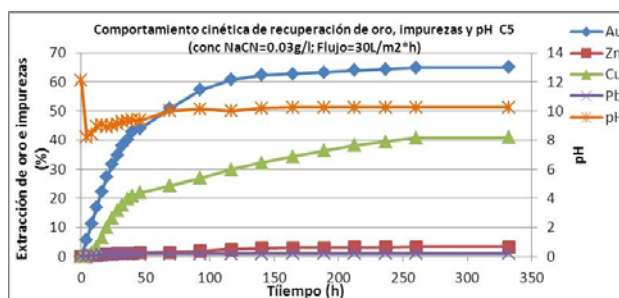


Figura 6. Comportamiento de la cinética de recuperación de oro, impurezas y pH en la prueba C5.

El pH mostró una ligera mejoría en comparación con las pruebas anteriores, nótese como disminuye desde las primeras horas de lixiviación y después de 60 horas se mantiene el pH por encima de 10,1. La recuperación de oro fue de 65,6%, para un consumo de cianuro de sodio entre 0,11-0,17 kg/t, operando a una concentración de 0,03 g/L.

Como se observa, un incremento de la tasa de riego mejoró notablemente la cinética de disolución de oro, alcanzándose una recuperación similar para las tres tasas de irrigación estudiadas con iguales concentraciones de Cianuro de sodio. Por tanto es importante considerar el empleo de menores concentraciones de cianuro, que permitan minimizar la disolución del cobre durante la lixiviación, disminuyendo los consumos de cianuro y la disolución de oxígeno, mejorando la velocidad de disolución del oro. La mejor dosis de cianuro estudiada resultó ser 0,03 g/L, pues

se logra minimizar la disolución del Cu, que se observó que al incrementar la tasa de riego se incrementaba la velocidad de disolución del oro, no obstante en las condiciones estudiadas no se logró mantener el pH en el rango establecido para el trabajo con cianuro por tanto para las pruebas en columnas de 2m se decide estudiar el efecto del incremento de la dosis de cal en la aglomeración y el incremento en el flujo de irrigación de la solución lixivante.

Columnas de 2m.

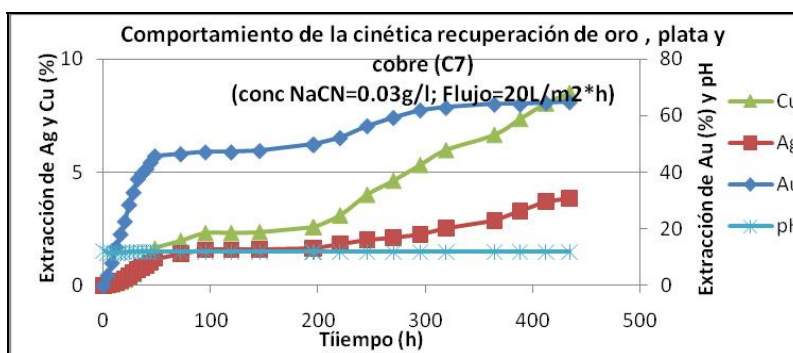
El estudio de lixiviación para las columnas de 2m fue conducido bajo las condiciones reportadas en la tabla VII para cada columna. La concentración de NaCN seleccionada para el estudio fue 0,03 g/L. La dosis de cemento empleada para la aglomeración del mineral se mantuvo en 9 kg/t de mena.

Tabla VII. Parámetros de operación de las columnas 2m.

Prueba No.	Flujo de Irrigación (L/m ² h)	Dosis de cal en aglomeración (kg/t)	Días de operación
C7	20	18	17
C8	30	18	17
C9	20	15	17
C10	30	15	17

El índice de compactación disminuyó en comparación con estudios anteriores, oscilando entre 1,26 - 2,27% lo cual indicó que los pellets obtenidos fueron de muy buena calidad en ambas tipos de columnas, enfatizando en que las condiciones de peletización fueron las mismas para todas las pruebas en columnas estudiadas (C1 - C10). La disminución del índice de compactación fue el resultado del incremento de la cal en la aglomeración pues la cal le da resistencia, dureza y

estabilidad a los pellets al igual que el cemento pues ambos son buenos aglutinadores. El consumo de cal se comportó entre 23,4-36,6 kg/t, valores que permitieron garantizar un pH alto en la solución de irrigación (11,5-12,0). La concentración de oro promedio disminuyó por efecto de la dilución al aumentar la tasa de riego a 20 y 30 L/m²h. La disolución del cobre se minimizó a valores del orden de hasta 6,4ppm.



En la Figura 7 se muestra la cinética de recuperación de oro e impurezas de la C7.

El gráfico de la figura 7 muestra que a los 12 días se alcanzó la máxima recuperación de oro, sin embargo el cobre se continúa extrayendo aunque con una baja recuperación del orden de un 6-7%. El comportamiento observado para la plata indicó una muy baja recuperación. También se observó que el pH como promedio se mantuvo alto del orden de 11,82 lo cual

indicó que se logró operar con las condiciones requeridas para una operación eficiente con el mínimo consumo de cianuro. Estas condiciones permitieron mantener una baja disolución del cobre.

Los resultados obtenidos para la columna C8 se muestran en la Figura 8.

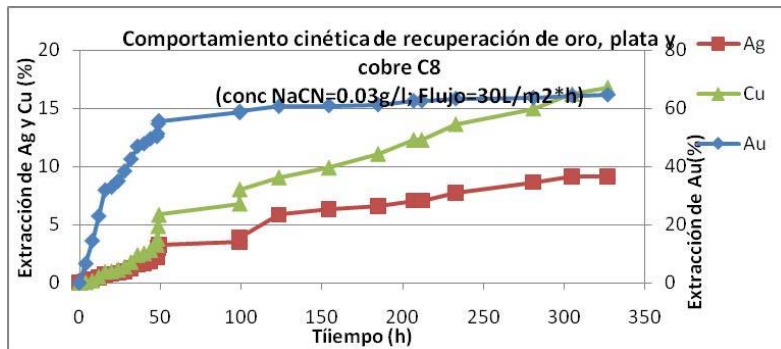


Figura 8. Comportamiento de la cinética de recuperación de oro, plata y cobre C8 con una dosis de cal en la aglomeración de 18 kg/t.

La recuperación alcanzada para el oro fue de 65,6% y un consumo de cianuro de 0,14 kg/t. El comportamiento obtenido para el plata

fue como promedio fue 11,6 y se mantuvo alto durante toda la prueba (Figura 9).

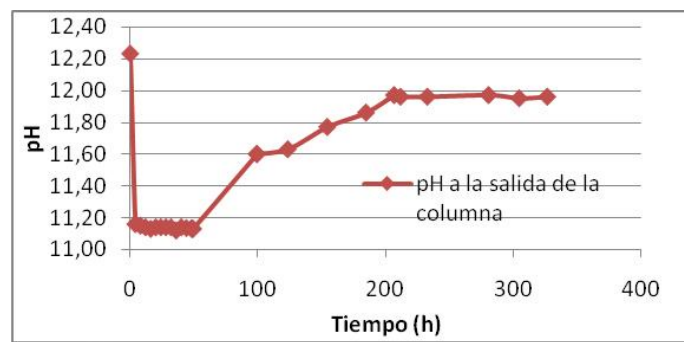


Figura 9. Comportamiento del pH durante el proceso de percolación en la C8.

Los resultados obtenidos para la columna C9 y C10 se muestran en la Figura 10.

Como se observa la extracción de oro en todas las pruebas fue similar.

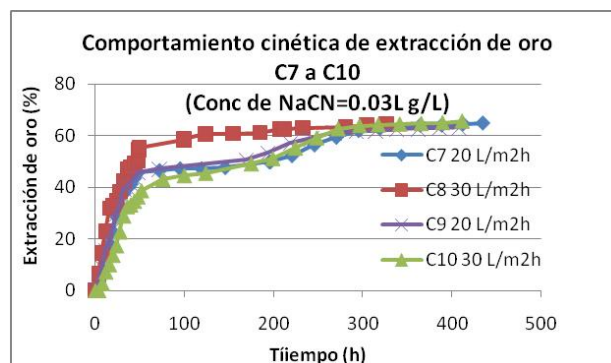


Figura 10. Comportamiento de la cinética de recuperación de oro en las columnas C7, C8, C9 y C10.

El aumento de la tasa de riego mejoró la cinética de lixiviación del mineral, ya que al incrementar la tasa de riego la velocidad de disolución de oro es mayor, debido al

ingreso de mayor cantidad de cianuro al mineral, sin embargo el contenido de oro en la solución es menor producto del efecto de dilución.

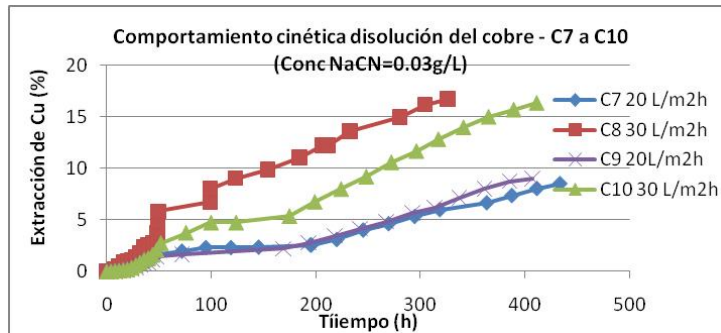


Figura 11. Comportamiento de la cinética de disolución de cobre en las columnas C7, C8, C9 y C10.

Como se observa la disolución de cobre se minimiza al operar en las condiciones estudiadas. El incremento de la dosis de cal en la aglomeración a 18 y 15 kg/t de mena favoreció considerablemente el proceso de percolación, garantizando durante todo el período de lixiviación una alta velocidad de

disolución de oro y mínima disolución del cobre, además de mantener un pH alto como requiere la operación y la mena estudiada. En la Figura 12 se muestra el comportamiento del pH en todas las pruebas en columnas.

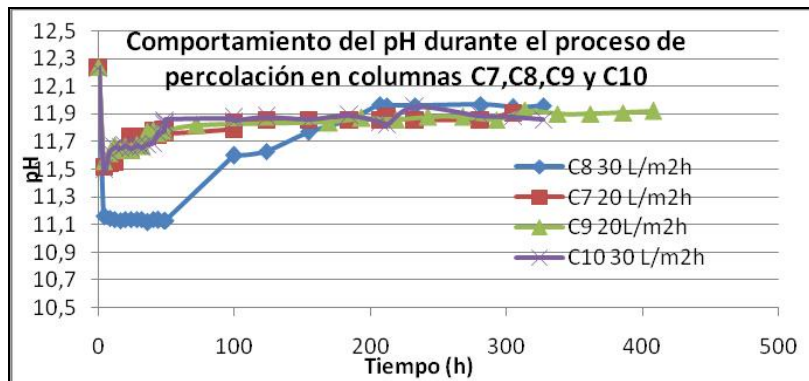


Figura 12. Comportamiento del pH en las columnas C7, C8, C9 y C10.

El empleo de una tasa de irrigación de 20 L/m2h mejoró la cinética de disolución de oro. La concentración de oro como promedio osciló entre (0,11-0,14 mg/L). El tiempo de lixiviación requerido para alcanzar la máxima extracción fue de 8,3

días. Como se muestra en la figura 11, el promedio de la concentración del cobre se comportó entre (10,5-17,4 mg/L), valores aceptables para el procesamiento de los licores percolados ricos por el proceso de precipitación con zinc.

Se demostró que el mineral presenta hidrólisis ácida, al no alcanzar valores de pH esperados para trabajar este tipo de proceso con pH alcalinos protectores. Las condiciones de aglomeración en cuanto a la dosificación de cal fueron ajustadas para garantizar el pH óptimo requerido. Los índices de consumo de cal se incrementaron en función de mantener un pH en la solución de irrigación como promedio de 12,64.

Los estudios reportaron que un aumento de la tasa de irrigación produjo una mejora en la cinética de disolución de oro, debido al ingreso de mayor cantidad de cianuro al mineral, sin embargo el contenido de oro en la solución es menor producto del efecto de dilución. La recuperación de oro fue del orden de hasta un 65% alcanzándose una disminución significativa del consumo de cianuro el cual osciló entre 0,17-0,25 kg/t de mena, para un flujo de irrigación de 20 y 30 L/m²h. Y con vista a minimizar la disolución del cobre presente en el mineral y los pisos así como disminuir los consumos de cianuro de sodio, manteniendo un riguroso control del pH en la solución de irrigación (pH=11,5-12). No obstante la cinética de lixiviación del oro mejoró considerablemente al mantener un pH alcalino mayor de 11.5, favoreciendo la disolución del oro y no la del cobre en la muestra de mineral estudiado. Otro de los factores influyentes en dicha cinética fue la tasa de irrigación, la cual al aumentarla favorecía también a la especie oro y no al cobre y otros cianicidas.

Como se observó, en los resultados obtenidos en las pruebas el consumo total de NaCN durante la lixiviación fue mucho menor que el reportado en las pruebas C7-C10. Lográndose una reducción apreciable del consumo de cianuro de sodio. La disminución del consumo de cianuro está dada por una operación sostenida con pH protector alcalino, y al mismo tiempo se disminuyen las pérdidas de cianuro libre por formación de HCN gaseoso. Los resultados alcanzados en las pruebas en minicolumnas confirmaron los resultados obtenidos en

estudios anteriores, demostrando la compatibilidad de las menas en explotación con el proceso de cianuración por percolación en pilas.

CONCLUSIONES

- 1.- En la lixiviación de las menas aurocupríferas, una disminución de la concentración de NaCN hasta 30 ppm reportó una extracción de oro de un 66,4% para una tasa de irrigación de 10 L/m²h.
- 2.- La concentración de cobre en los licores finales fue del orden de 17 ppm. Mejorando la cinética de lixiviación del oro.
- 3.- Un incremento de la tasa de irrigación a 20 y 30 L/m²h mejoró la cinética de disolución de oro, reportando una recuperación de oro de 65,6% respectivamente.
- 4.- Se logra disminuir la disolución de los cianicidas de estos tipos de mineral principalmente el Cu.
- 5.- Los índices tecnológicos para la **aglomeración** fueron de 12 kg/t de cal para una pureza de 65%CaO y 9 kg/t de cemento.
- 6.- Se redujo apreciablemente el consumo de cianuro de sodio.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias, V. 1996. Tecnologías de Refinación de Metales Preciosos. Grafica Grezzly. Lima, Perú.
- Cheng, S.; Gattrell, M; Guena, T.; Dougall, B. 2002. The electrochemical oxidation of alkaline copper cyanide solutions. *Electrochimica Acta* 47 3245-3256.
- Cunha, F.A. & Martins, A.H. 2007. Evaluation of some leaching reagents for copper extraction from a gold complex ore. Brazil.

- Domic, E. 2001.HIDROMETALURGIA. Fundamentos, procesos y aplicaciones. Santiago de Chile.
- Figueredo Frías, M. y otros. 2013. Pruebas en minicolumnas y columnas de hasta 2 m de las menas en explotación del yacimiento oro barita. Cuba.
- Gupta, C.K. 2000.Hydrometallurgy in Extraction Processes, CRC.
- Guerrero Escate, R. A. 2011. Aplicación de la cianuración dinámica en la recuperación del oro para disminuir el tiempo y la cantidad de reactivos empleados en el proceso, Perú.
- Hagel, J.E. 1994. Minería del Oro, Instituto de Geología Económica Aplicada: Concepción.
- Malenitski, I.N., Chugacv, L.V. 1972. Metalurgia de los Metales Nobles. Editorial Metalurgia, Moscú.
- Manrique Martínez, J. A. 2011.Manejo de Pilas de Lixiviación de Oro en Minera Yanacocha S.R.L.
- Marsden, J. And House, I. 1993The Chemistry of Gold Extraction. New York.
- Salinas, E.; Rivera, I.; Carrillo, F. R.; Patiño, F.; Hernández, J.Y Hernández, L. E. 2004. Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono. México.