

Recibido: 30 / 10 / 2009, aceptado en versión final: 02 / 06 / 2010

La influencia de la velocidad de agitación en la lixiviación dinámica de minerales alterados

The influence of the velocity of agitation in the dynamic leaching of altered minerals

Alfonso A. Romero¹; Silvana L. Flores¹

RESUMEN

El estudio denominado La influencia de la velocidad de agitación en la lixiviación dinámica de minerales alterados se realizó con la finalidad de determinar la influencia de la velocidad de agitación del equipo de lixiviación dinámica en la recuperación de metales valiosos en los relaves con alto contenido de oro. Como se sabe, la recuperación del oro, así como de otros metales económicamente rentables, se da en mayor grado debido a la continua alza de los precios de los metales.

Cabe resaltar que la variable dependiente de operación que corresponde a la recuperación, la cual es estudiada teniendo en consideración a la variable independiente principal de operación y es sintetizada en la velocidad de rotación o agitación (rpm) del equipo de lixiviación dinámica, es empleada en la cianuración dinámica de los minerales alterados utilizados, que en este caso particular, lo constituyen los relaves de Ticapampa.

En este sentido, este artículo comprende el estudio de tratamiento de beneficio del relave sulfurado polimetálico de Ticapampa, el cual fue llevado a cabo por las pruebas experimentales a nivel de laboratorio de procesos metalúrgicos tales como: lixiviación por cianuración, con la finalidad de recuperar metales valiosos de oro presente en el relave de Ticapampa.

Palabras clave: Velocidad de agitación, minerales alterados, relave, metales preciosos, tratamiento de beneficio, lixiviación dinámica.

ABSTRACT

The study called Velocity of agitation in the dynamic leaching by altered minerals, has been made with the purpose of determining the influence of the velocity of agitation of the equipment of leaching for the recovery of precious metals from the tailings with high gold content. It's well know, the recovery of valid metal of gold such as other metals valids from the point of view of economy, which are more valuable in certain grade because of the constant increment of metal's prices.

On the other hand, the dependent variable of operation that correspond to the recovery, which has been studied with regard to the main independent variable of operation which has been sintetized for the velocity of rotation or agitation (rpm) of equipment of dynamic leaching, that has been employed in the dynamic cyanidation of altered minerals employed, in this particular case, the tailings from Ticapampa.

In that sense, this paper include the study of the treatment of benefit of polymetallic sulfide tailing from Ticapampa, which has been carried out for Experimental Tests of laboratory scale, that included metallurgy processes such as: leaching by cyanidation with the aim of obtaining the recovery of precious metals of gold present in the tailing of Ticapampa.

Keywords: Velocity of agitation, altered minerals, tailing, precious metals, treatment of benefit, dynamic leaching.

¹ Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
E-mail: aromerob@unmsm.edu.pe, sfloresc@unmsm.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se basó en un proceso de análisis y experimentación a nivel de laboratorio en medio acuoso donde la disolución del oro, plata y algunos otros componentes que se encuentran en un mineral alterado, son recuperados de manera óptima, mediante el uso de una solución alcalina de cianuro, que forma aniones complejos de oro, estables en condiciones líquidas.

La parte experimental de este estudio se realizó mediante los ensayos de recuperación de oro en laboratorio, mediante el tratamiento metalúrgico de lixiviación dinámica, para ello se empleó un reactor de lixiviación especialmente diseñado para obtener recuperaciones de oro, el cual se encuentra en el Laboratorio de Investigaciones Multidisciplinarias de la Escuela de Minas.

Nuestro propósito fue llegar a valores superiores al 85%, teniendo en cuenta los parámetros y variables de operación que intervienen en todo sistema de lixiviación dinámica.

Este estudio tuvo como finalidad recuperar la máxima concentración de oro, a partir de minerales alterados, como un relave polimetálico de flotación. Se tuvo en consideración la velocidad de agitación del sistema de lixiviación por cianuración, como uno de los principales factores que afectan la velocidad de disolución del oro en todo tratamiento hidrometalúrgico que involucra la cinética de la reacción del sistema de lixiviación dinámica o lixiviación por agitación, el cual se fundamenta en el transporte de masa y la química de la cianuración que se basan en el hecho de que bajo condiciones oxidantes, el oro y la plata se disuelven y a complejan en soluciones de cianuros alcalinos.

II. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Mineral alterado

El mineral alterado empleado lo constituye el relave que es de naturaleza polimetálica sulfurada, con alto contenido de metales pesados de cobre, plomo, zinc, hierro, cadmio, arsénico. Esta condición hace que el relave sea un potencial generador de aguas ácidas del medio circundante de la cuenca del río Santa.

Cabe mencionar que el relave es producto de la ganga, el cual es un residuo sólido de las plantas concentradoras de flotación de minerales sulfurosos, puesto que no tiene altas concentraciones de los metales pesados concentrados de cobre, plomo, zinc, así como la presencia de carbonatos.

Como se sabe, estos concentrados con mínimo contenido de metales valiosos son desechados como efluentes metalúrgicos, en algunos casos son bombeados por

tuberías previa clasificación según su granulometría; el relave de grano grueso (malla +200) es enviado a un espesador para aumentar el porcentaje de sólidos y reutilizarlo como relleno hidráulico para socavones de minas, mientras que los relaves de granulometría fina (malla -200) son enviados a las presas de relave, las cuales, sin un diseño adecuado, ocasionan serios problemas al medio físico circundante.

Tal es el caso de la relavera de Ticapampa, puesto que la presencia de este enorme pasivo ambiental genera una contaminación a los cuerpos de agua de la cuenca del río Santa, debido a la presencia de metales pesados en la mineralogía del relave, y a la interacción constante del relave con agentes físicos del medio ambiente, lo cual ocasiona la generación de aguas ácidas en estaciones de lluvia.

Por todo lo mencionado anteriormente, se puede afirmar, que la granulometría del relave de Ticapampa, tiene una granulometría fina de malla -200. Este tamaño de grano de las partículas del relave de Ticapampa, así como la humedad del relave, cuyo valor es aproximadamente 12%, son variables que permiten que se realice el muestreo in situ de las muestras a tratar. (Guevara, 2005)

2.2. Lixiviación dinámica

Uno de los métodos de disolución de oro más utilizado en el mundo, es la cianuración por agitación, debido a la elevada velocidad de reacción, las altas recuperaciones de oro obtenidas y porque funciona para una amplia variedad de minerales. En contraposición tiene costos más altos de instalación y operación respecto de los métodos en pilas, por lo que se aplica solo a menas que poseen leyes económicas.

La elevada cinética de lixiviación de oro se debe primordialmente a la mejor liberación del oro, producto de una reducción de tamaño mayor.

El proceso de agitación funciona muy bien para minerales con tamaños inferiores a 150 μm , existiendo operaciones que trabajan con minerales a d_{80} inferiores a 45 μm . Tamaños mayores incrementan el desgaste de las paletas de agitación por efecto de la abrasión y existe mayor dificultad de mantenerlos en suspensión. (Marsden, 1992)

La densidad de pulpa utilizada varía entre 35–50% de sólidos, dependiendo del tamaño de las partículas, la gravedad específica y la presencia de minerales que incrementan la viscosidad de la pulpa, como las arcillas.

El proceso de cianuración se inicia con la regulación del pH de trabajo entre 9,5 – 11,5, mediante la adición de la cal, previa a la adición de cianuro. Estas adiciones pueden realizarse en el tanque de cianuración o previamente en el molino. (Marsden, 1992)

2.3. Factores que afectan la disolución de oro (Marsden, 1992)

Los principales factores que se deben tener en cuenta en el proceso de cianuración son:

a) Concentración de cianuro

La razón de disolución del oro en soluciones cianuradas aumenta linealmente con la concentración de cianuro, hasta que se alcanza o se produce un máximo, más allá del cual un incremento en la concentración de cianuro no aumenta la cantidad de oro disuelto, sino por el contrario tiene un ligero efecto retardante.

b) Concentración de oxígeno

La concentración de cianuro es relativamente fácil de controlar, no así la del oxígeno, debido a su escasa solubilidad en agua bajo condiciones atmosféricas, a nivel del mar y 25 °C se puede tener en solución 8,2 mg O₂/litro (0.082 g/litro).

Por esta razón se dice que la cianuración está controlada por fenómenos de transporte. El cianuro es fácil de adicionar, pero el oxígeno es difícil de controlar en solución.

Se ha determinado, con valores experimentales y prácticos, que es adecuado tener una relación [CN⁻]/[O₂] cercana a 6, para tener la máxima velocidad de disolución de oro.

La máxima concentración de oxígeno en la solución podrá ser de 8 mg/l, entonces la máxima razón de disolución del oro sobre condiciones ideales de agitación y aireación pueden tener lugar en soluciones que contengan 0,0098% NaCN (0,098 g/l).

c) pH y alcalinidad

Para prevenir pérdidas excesivas de cianuro por hidrólisis, el proceso de cianuración se lleva a cabo con valores de pH superiores a 9.4. El efecto del pH en la disolución de oro en valores mayores a 9,5 depende de los minerales que se encuentren como constituyentes de la mena, así como también del álcali empleado para su regulación.

En algunos casos, la velocidad de disolución del oro puede disminuir con el incremento del pH, ya que se aumenta la velocidad de las reacciones que interfieren en el proceso. El valor óptimo de pH en el que se debe trabajar deberá ser determinado de acuerdo a las características de cada mineral en particular.

En el proceso de cianuración es muy importante considerar que para la disolución del oro, se requiere tener en solución, el ion CN⁻. Si se opera a un valor de pH menor que 10, el cianuro libre estará en mayor proporción como HCN, que es muy volátil a

temperatura ambiente, y genera problemas de salud por inhalación, ya que este es un gas venenoso. En la práctica se debe trabajar con valores de pH superiores a 10.5 para evitar la formación de HCN y favorecer la presencia del ion CN⁻.

d) Área superficial y tamaño del oro

La velocidad de disolución del oro es proporcional a la superficie expuesta del oro, la misma que depende del tamaño de la partícula mineral y del grado de liberación del metal precioso.

En general, la velocidad de disolución aumenta con el menor tamaño de partícula (mayor liberación de oro). Sin embargo, al decrecer el tamaño de la partícula, se incrementan también las reacciones de competencia de otros elementos, por tanto, se debe encontrar un compromiso entre el tamaño de la partícula, el porcentaje de extracción del oro y el consumo de cianuro. (Marsden, 1992)

e) Efecto de la agitación

La disolución de oro está usualmente controlada por el transporte de masa y depende del espesor de la capa de difusión, por esto si se incrementa la agitación, aumenta la velocidad de disolución, hasta un máximo sobre el cual este efecto ya no tendrá mayores beneficios.

f) Constituyentes de la mena o procedentes de otros procesos

Ciertos constituyentes de la mena o reactivos de operaciones anteriores, pueden ejercer un efecto positivo o negativo sobre las reacciones de cianuración. Así, los reactivos de flotación ejercen un efecto inhibitorio sobre dichas reacciones.

Los compuestos minerales de la mena, donde se incluyen algunas especies de cobre, hierro, zinc, plomo, arsénico, antimonio, entre otros, consumen cianuro y oxígeno, por consiguiente se requiere mayor concentración en solución para lograr tasas aceptables de extracción.

Las sustancias carbonáceas adsorben el oro disuelto, lo que disminuye la extracción del metal precioso y el material arcilloso genera problemas de recuperación si el oro está asociado directamente a las arcillas en tamaños similares al de ellas, como se ha señalado anteriormente. (Marsden, 1992)

III. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

En la investigación se estudia la influencia de la variable independiente de la velocidad de rotación del equipo de lixiviación dinámica que determina el nivel de recuperación del metal valioso de oro, que permite el máximo nivel de optimización del proceso de lixiviación dinámica o lixiviación por agitación.

Mediante este estudio, se determinarán las condiciones óptimas de la operación del proceso de lixiviación dinámica, que involucra el establecimiento de parámetros tales como: peso de relave, relación sólido/líquido, peso de cal y peso de cianuro de sodio y pH inicial.

Asimismo, se establecerán los rangos de consumos óptimos de reactivos de cal y cianuro de sodio, que permitieron definir las condiciones óptimas de recuperación de oro presente en el relave. Estos rangos de consumos óptimos de reactivos se determinarán a través de curvas de cinética de los consumos de cal y cianuro de sodio, respectivamente.

Una vez determinadas las condiciones óptimas de operación de lixiviación, con el establecimiento de sus parámetros óptimos, curvas de consumo óptimo de reactivos, se procederá a determinar el grado de recuperación de oro, que se representará de manera óptima mediante el establecimiento de curvas de cinética de lixiviación dinámica evaluando principalmente la variable de recuperación en función de la velocidad de agitación del sistema de lixiviación dinámica (reactor de lixiviación-pulpa-aire).

Para el desarrollo del estudio, se tuvo en cuenta los siguientes materiales:

Materiales

- Relave
- Botellas de plástico
- Agua destilada
- Vaso de precipitado
- Piceta
- Probeta
- Buretra
- Mallas: +200
- Espátula
- Balde
- Papel de filtro
- Pipeta
- Embudo



Foto N.º 1. Sistema de cianuración dinámica de relave: eje-paleta-solución a cianurar.

Equipos

- Agitador mecánico-eléctrico.
- Reactor
- pHmetro y balanza

Reactivos requeridos para pruebas

- Cal
- Cianuro de sodio
- Nitrato de plata.
- Fenoltaleína.
- Yoduro de potasio

3.1. Pruebas experimentales

Para realizar las pruebas experimentales del presente estudio, se requiere el laboratorio metalúrgico y el laboratorio químico. Ver Fotos N.º 1, 2, 3 y 4.

En el laboratorio metalúrgico se realizaron las siguientes pruebas:

- Determinación del tamaño de partícula:
Para el relave, el tamaño de partícula fue de 100% menos malla 200.
- Cianuración por agitación:
Se realizaron las pruebas de cianuración dinámica, las cuales se basan en el principio básico del proceso metalúrgico mencionado durante diferentes períodos de tiempo en contacto, que mencionamos a continuación:
a) Condiciones de las pruebas de cianuración por agitación N.º 1:

Pruebas de cianuración de dos horas

Para la presente prueba, se emplearon las muestras de relave con los siguientes parámetros y variables de operación:

- Peso de relave: 500 gr
- Volumen de agua: 2500 ml



Foto N.º 2. Soluciones de tratamiento de cianuración dinámica de relave polimetálico de Ticapampa.

Peso de cal:	20 gr
Peso de cianuro de sodio:	2 gr
Relación L/S:	2500/500 = 5/1
pH inicial de la muestra:	11.5
Velocidad de agitación:	300 RPM

Con ello se obtuvo la mezcla necesaria para poderse llevar a cabo la cianuración por agitación.

b) Condiciones de las pruebas de cianuración por agitación N.º 2:

Pruebas de cianuración de dos horas

Para la presente prueba, se emplearon las muestras de relave, utilizándose los siguientes parámetros y variables de operación:

Peso de relave:	500 gr
Volumen de agua:	2500 ml
Peso de cal:	20 gr
Peso de cianuro de sodio:	2 gr
Relación L/S:	2500/500 = 5/1
pH inicial de la muestra:	11.3
Velocidad de agitación:	550 RPM

Se obtuvo la mezcla necesaria para poderse llevar a cabo la cianuración por agitación.

En el laboratorio químico se realizaron las siguientes pruebas:

Preparación de reactivos para determinar el consumo de cal y cianuro

Se procedió a preparar reactivos para realizar la determinación del consumo de cal y de cianuro libre, que se empleó durante la cianuración por agitación de mineral alterado del relave de Ticapampa.



Foto N.º 3. Mecanismo de agitación intensa de la cianuración dinámica, empleando velocidad de agitación de 550 rpm.

Preparación de reactivos para determinar el consumo de cal

a) Preparación de ácido oxálico:

Se pesó 5.63 gr de ácido oxálico y se disolvió en un litro de agua destilada.

b) Preparación de fenolftaleína:

Se pesó 1 gr de fenolftaleína en 100 ml de solución de alcohol.

Determinación de consumo de cal:

$$\%CAL = (\text{Volumen gastado de Ácido Oxálico})/100$$

Preparación de reactivos para determinar el consumo de cianuro

a) Preparación de yoduro de potasio: Se pesó 3 gr de KI y se diluyó en 100 ml de agua destilada.

b) Preparación de solución de nitrato de plata: Se pesó 4.3 gr de AgNO₃ y se diluyó en un litro de agua destilada.

Determinación de consumo de cianuro

$$\%NaCN = (\text{Vol. Gastado de AgNO}_3)/100$$

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de la determinación de los consumos óptimos de reactivos de cal y cianuro de sodio para las pruebas óptimas de lixiviación dinámica de relave que presentaron mayores niveles de recuperación con velocidades de agitación de valores de 300 rpm y 550 rpm.

Ver Tablas N.º 1, 2, 3, 4 y Figuras N.º 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8.



Foto N.º 4. Soluciones filtradas provenientes de cianuración de relave de Ticapampa.

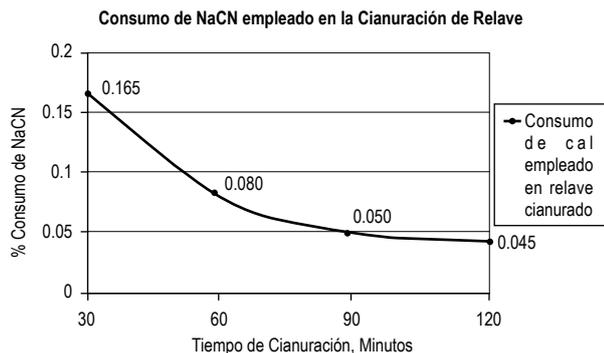


Figura N.º 1. Curva de determinación de cal empleada en cianuración de relave con 300 rpm.

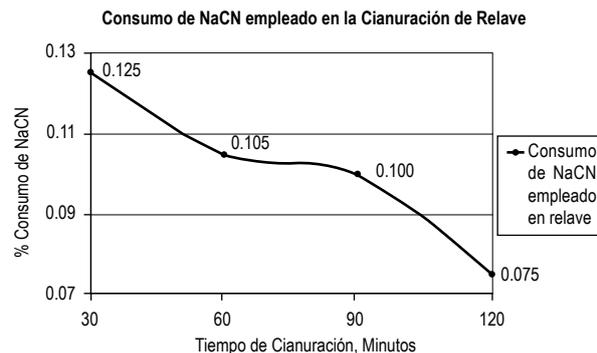


Figura N.º 2. Curva de determinación de consumo de cianuro de sodio con 300 rpm.

4.1. Prueba de lixiviación dinámica N.º 1

Para esta prueba de lixiviación dinámica, se realizaron determinaciones de consumo de cal, cianuro de sodio y porcentaje de recuperación de oro, con una velocidad de agitación de 300 rpm.

- a) Determinación de consumo de cal en muestras de relave:

Este procedimiento se realizó para determinar el consumo de cal durante dos horas de cianuración por agitación, con intervalos de 30 minutos, se tomaron muestras de 25 ml de solución filtrada, las cuales fueron tituladas con ácido oxálico.

Tabla N.º 1. Determinación de consumo de cal en prueba de lixiviación dinámica de relave de Ticapampa con 300 rpm.

Tiempo de cianuración (Minutos)	% consumo de cianuro de sodio
30	0.125
60	0.105
90	0.100
120	0.075

- b) Determinación de consumo de cianuro en muestras de relave:

Tabla N.º 2. Determinación de consumo de cianuro de sodio en prueba de lixiviación dinámica de relave de Ticapampa con 300 rpm.

Tiempo de Cianuración (Minutos)	% Consumo de Cal
30	0.165
60	0.08
90	0.05
120	0.045

En este procedimiento se determinó el consumo de cianuro de sodio durante dos horas de cianuración por agitación, con un intervalo de 30 minutos, se

tomaron muestras de 25 ml de solución filtrada, las cuales fueron tituladas con nitrato de plata.

- c) Determinación de porcentaje de recuperación de oro presente en relave cianurado lixiviado a 300 rpm.

4.2. Prueba de lixiviación dinámica N.º 2

Para esta prueba de lixiviación dinámica, se realizaron determinaciones de consumo de cal, cianuro de sodio y porcentaje de recuperación de oro, empleando una velocidad de agitación de 550 rpm.

- a) Determinación de consumo de cal en muestras de relave:

El procedimiento experimental se repite igual al de la prueba de lixiviación dinámica N.º 1.

Tabla N.º 3. Determinación de consumo de cal en prueba de lixiviación dinámica de relave de Ticapampa con 550 rpm.

Tiempo de cianuración (minutos)	% consumo de cal
30	0.044
60	0.035
90	0.033
120	0.025

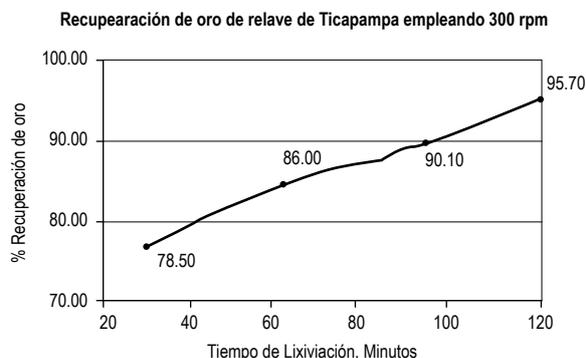


Figura N.º 3. Curva de recuperación de oro presente en relave con 300 rpm.

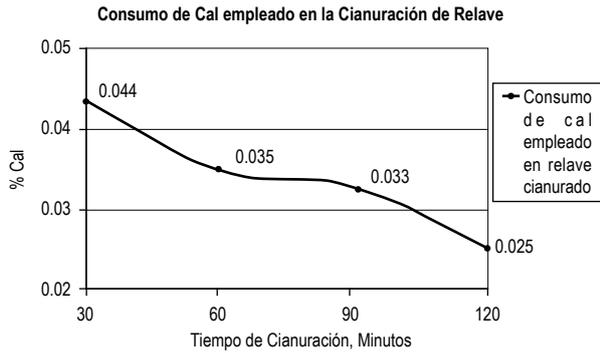


Figura N.º 4. Curva de determinación de cal empleada en cianuración de relave con 550 rpm.

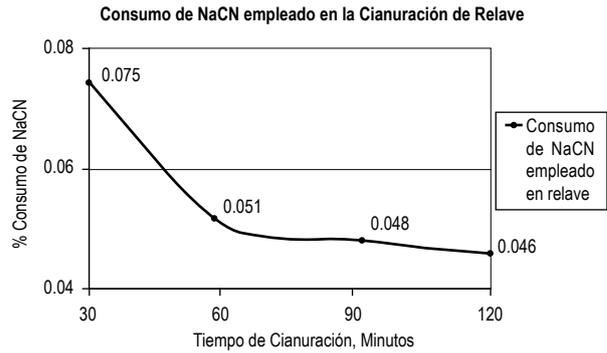


Figura N.º 5. Curva de determinación de consumo de cianuro de sodio con 550 rpm.

b) Determinación de consumo de cianuro en muestras de relave:

Tabla N.º 4. Determinación de consumo de cianuro de sodio en prueba de lixiviación dinámica de relave de Ticapampa con 300 rpm.

Tiempo de Cianuración (Minutos)	% Consumo de Cianuro de Sodio
30	0.075
60	0.051
90	0.048
120	0.046

El procedimiento experimental, se repite igual al de la prueba de lixiviación dinámica N.º 1.

c) Determinación de porcentaje de recuperación de oro presente en relave cianurado lixiviado a 550 rpm.

4.3. Comparación de resultados

En la Figura N.º 7, se observa que para 550 rpm, el consumo de cal es mínimo, en relación con la velocidad de 300 rpm.

4.4. Análisis de resultados

Las curvas de recuperación de oro de relave muestran que las máximas recuperaciones de oro, se obtienen cuando se emplean las velocidades de agitación en 300 rpm y 550 ppm, respectivamente en el sistema de cianuración por agitación, cuyos valores son: 95.70 y 90.64%, cuando el relave es sometido a pruebas de cianuración por agitación durante dos horas.

V. CONCLUSIONES

La máxima curva de recuperación de oro del punto de relave se obtiene cuando la muestra de relave es sometido a cianuración por agitación durante dos

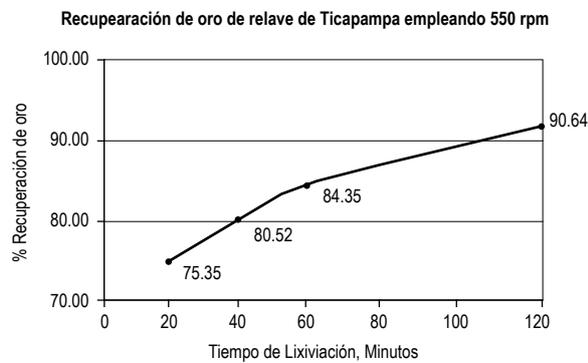


Figura N.º 6. Curva de recuperación de oro presente en relave con 550 rpm.

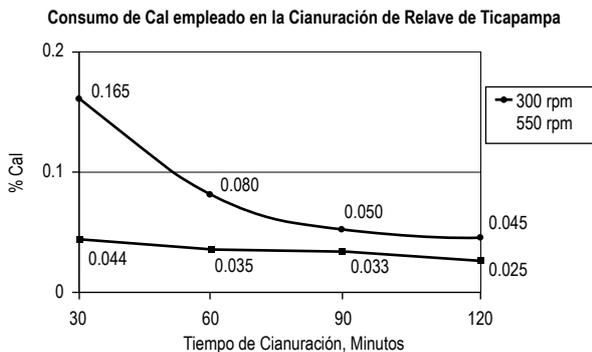


Figura N.º 7. Consumo de cal para velocidades de agitación de 300 rpm y 550 rpm.

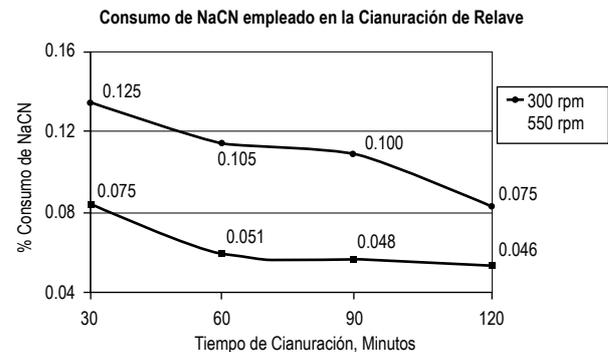


Figura N.º 8. Consumo de cianuro de sodio para velocidades de agitación de 300 rpm y 550 rpm.

horas, empleando una velocidad de agitación de 300 rpm, siendo el valor de la recuperación de oro máxima, el valor de 95.70%.

Las curvas de recuperación de oro del punto de relave demuestran que la muestra de relave al ser sometida a la cianuración por agitación durante dos horas, con una velocidad de agitación de 550 rpm, siendo el valor de la recuperación de oro, fluctúa entre los valores de 90.64%.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Guevara Caiquetán A, De la Torre Chauvin E. *Lixiviación con Cianuro-Cianuración*.
2. Marsden J. y House I. (1992). *The chemistry of the gold extraction*. Ellis Horwood, New York,.
3. Guevara Caiquetán A.(2005) De la Torre Chauvin Ernesto. *Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados*. Quito-Ecuador.