

LIXIVIACION DE MINERAL AURIFERO DE VETAS SANTANDER, CON SALES OXIDANTES EN MEDIO ACIDO

RESUMEN

El trabajo de lixiviación para la extracción de oro se llevó a cabo con mineral aurífero concentrado proveniente de la Empresa Minera Rey de Oro, el cual se caracterizó para obtener la información mineralógica, geoquímica y fisicoquímica necesaria para el desarrollo del proceso. El medio lixivante utilizado se forma en la pulpa con el ácido sulfúrico concentrado adicionando sales oxidantes como el cloruro de sodio y el nitrato de sodio. La adición de sales a la pulpa ácida tiene por finalidad producir cloro y agua regia in situ, lixivante enérgico para recuperar elementos nobles de concentrados o mineral auríferos. Los resultados obtenidos en la investigación muestran que es posible lixiviar oro de mineral aurífero por el proceso de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido. Sin embargo los porcentajes de disolución alcanzados no superan el 20% esto es debido a la formación de jarosita fase mineralógica que actúa de forma negativa en el proceso de lixiviación.

PALABRAS CLAVES: Lixiviación, Sales Oxidantes, Concentrado

ABSTRACT

The leaching work for the gold was carried out with a auriferous mineral concentrated of the Mineral Company Gold King, which was characterized to obtain the mineralogy, geochemistry and physicochemistry data necessary for the development of the process. The leacher solution is obtain in the slurry for chemistry reaction of the sulphuric acid concentrated with oxidating salts like the sodium chloride and sodium nitrate. The addition of salts to the acid slurry has by purpose to produce chlorure and aqua regia in situ, energetic leacher to recover noble elements of concentrated or auriferous mineral by the leaching process with oxidating salts in the acid solution. Nevertheless the reached percentage of dissolution do not surpass 20%, this is due to the formation of mineralogy jarosite phase that acts of negative form in the leaching process.

KEYWORDS: *Leaching, salts oxidating, .concentred*

1. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de complejos mineros de metales preciosos que existen en nuestro país, como en la zona minera de Vetas (Santander), el cianuro es el medio lixivante utilizado por excelencia, debido a su alta extracción, fácil obtención y bajo costo. Sin embargo, en las últimas décadas se han realizado una serie de investigaciones con las cuales se buscan nuevos procesos de lixiviación, que sean capaces de competir con la cianuración, utilizando reactivos menos contaminantes y que a su vez sean regenerables.

Una de las mayores preocupaciones en los procesos hidrometalúrgicos, es el control ambiental, debido a la utilización de reactivos que en algunos casos no son reutilizables y son difícilmente reciclables. Este problema ha dado lugar al desarrollo de técnicas ecológicas que en muchos casos aumentan los costos de producción en una cantidad apreciable.

Una adecuada explotación de metales preciosos conlleva al mejoramiento continuo de los procesos y a un apropiado desarrollo tecnológico, que para el caso del departamento de Santander, constituye un campo de fortalecimiento económico, industrial y social. Por tal motivo, la presente investigación plantea un proceso innovador para la recuperación de oro de minerales auríferos provenientes de la Empresa Minera Reina de Oro.

El proceso con sales oxidantes en medio ácido, conocido como el proceso SEVERO, tiene como objetivo lixiviar mineral aurífero usando como medio lixivante el ácido sulfúrico concentrado y adicionando sales oxidantes como el cloruro y el nitrato de sodio en distintas proporciones; logrando de esta forma que se produzca

Muestra	Au g/t	Ag g/t
Cabeza	7.666	28.333
Concentrado	36.333	106.666

WALTER PARDAVE LIVIA

Ingeniero Metalúrgico, MSc
Profesor Cátedra Titular
Universidad Industrial de Santander
wpardave@uis.edu.co

ALEXANDER BELTRAN AGUILAR

Ingeniero Metalúrgico UIS.

cloro y agua regia *in-situ*, lixiviantes energicos para recuperar metales nobles como el oro.

2. CONTENIDO

2.1 Metodología experimental

La presente investigación se realizó en tres etapas, entre las cuales se encuentra el trabajo experimental. A su vez este está estructurado en tres actividades que se desarrollaron para alcanzar los objetivos propuestos en el plan de trabajo, y son descritas en este capítulo con los respectivos ensayos realizados.



Figura 1. Diagrama de flujo de las actividades desarrolladas en la etapa de trabajo experimental

La metodología experimental se basó en la etapa de trabajo experimental y comprende, como primera actividad la caracterización mineralógica, geoquímica y fisicoquímica; como segunda actividad pruebas de lixiviación y selección de variables del proceso y una última actividad que comprendió el análisis gravimétrico

e instrumental elemental. El diagrama se muestra en la Figura 1.

Tabla 1. Tenor de la muestra aurífera utilizada.

La empresa minera proporcionó dos muestras. La primera era mineral de cabeza con trituración primaria y la segunda era concentrado gravimétrico de mesa *Wilfley*. Cada una de las muestras se sometieron a un adecuado cuarteo y posteriormente se molieron (200 malla Tyler), con la finalidad de realizarles un “ensayo al fuego” para obtener su tenor, los datos obtenidos son mostrados en la Tabla 1.

2.2 Procedimiento experimental.

El desarrollo del procedimiento experimental se planteó con base en los datos obtenidos en la actividad de caracterización mineralógica, geoquímica y fisicoquímica, propuesta en la etapa de estudio de laboratorio, al mineral proveniente del proceso de concentración gravimétrica por mesa *Wilfley*. El procedimiento experimental se describe a continuación y el montaje utilizado se muestra en la Figura 2.

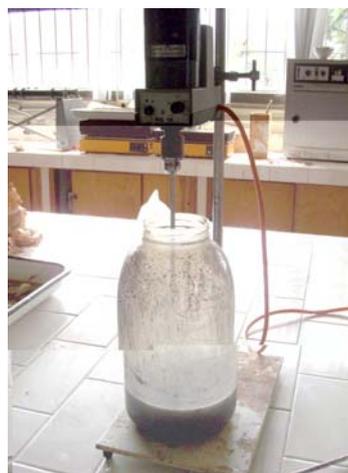


Figura 2. Esquema del montaje experimental de Lixiviación por agitación

En la primera parte del desarrollo se llevó el mineral concentrado a un secado al aire durante un día, para realizar un adecuado cuarteo. Posteriormente se sometió el material a molienda en un molino de bolas, esto se realizó con el fin de garantizar un tamaño de partícula apropiado para la etapa de lixiviación por agitación mecánica, debido a que se obtuvo del análisis de la distribución granulométrica del oro y la plata, que la mayor parte de mineral valioso se encontraba después de la malla 100 (Tyler).

2.3 Definición de las variables

Teniendo en cuenta la selección de una serie de variables que influían en el proceso de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido, el procedimiento experimental, anteriormente planteado fue aplicado para analizar cada una de las variables estudiadas.

Las variables analizadas fueron temperatura, tiempo, porcentaje de pulpa, concentración de ácido sulfúrico, nitrato de sodio y de cloruro de sodio; en un sistema de lixiviación por agitación, donde no se estudió la influencia de la velocidad de agitación, el pH y la granulometría (variables fijas).

2.4 Resultados y análisis de resultados

Los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación se presentan en este capítulo, el cual comprende la caracterización mineralógica, caracterización geoquímica, caracterización fisicoquímica, pruebas preliminares, diseño experimental estadístico y pruebas experimentales complementarias.

En el análisis mineralógico cualitativo se observó pirita fase mineralógica de mayor importancia para el desarrollo del presente estudio, también se observó

cuarzo, moscovita y feldespato que hacen parte de la ganga del mineral concentrado.

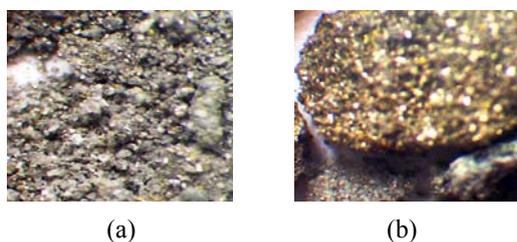


Figura 3. Imagen del mineral concentrado
a) observado con lupa b) observado con microscopio

La identificación de la pirita, el cuarzo y la moscovita (mica), por medio de la inspección visual se realizó de manera rápida y eficaz siendo éstas especies mineralógicas abundantes y con una formación cristalina bien definida. De igual forma la observación al microscopio reveló con mayor claridad estas especies, así como la presencia de feldespato que no se identificó por el análisis macroscópico.

Por medio del análisis cuantitativo de difracción de rayos x, se observó que la pirita constituye una cantidad apreciable (18.16%), sin ser la especie más abundante en el mineral concentrado. El cuarzo (26.13%) y la moscovita (20.94%), representan las especies cristalinas más abundantes en el mineral.

Tabla 2. Caracterización mineralógica por difracción de rayos x

Fase	Nombre	Cuantitativo
SiO ₂	Cuarzo	26.13%
FeS ₂	Pirita	18.16%
(SO ₄) ₂ (OH) ₆	Jarosita	1.5%
₃ Al(OH) ₁₀ (F) ₂	Moscovita	20.94%
KAlSi ₃ O ₈	Ortoclasa	11.16%
Amorfos		22.10%

La caracterización geoquímica se completó con una caracterización metalúrgica por medio de un análisis de distribución granulométrica de oro y plata. Este análisis se realizó para encontrar el mayor tenor de oro y plata por fracción y de esta forma llevar el mineral a una granulometría adecuada para el proceso de lixiviación por agitación. Los tenores de oro y plata por fracción se pueden observar en la tabla 3.

Tabla 3. Distribución de oro y plata en fracciones granulométricas

Según los resultados de la Tabla 3, el rango de fracción granulométrica donde se encuentra la mayor cantidad de oro y plata está entre la malla 100 y 200 (Tyler); siendo

Malla (Tyler)	Porcentaje peso (%)	Au (gr/T)	Ag (gr/T)
-20/+35	18.70	15	45
-35/+48	8.00	14	42
-48/+65	11.20	16	48
-65/+100	11.50	24	68
-100/+150	24.00	36	106
-150/+200	19.40	34	95
-200	7.20	30	92

éstas fracciones las que contienen la mayor cantidad de oro fino en el mineral concentrado.

Para desarrollar las pruebas preliminares de lixiviación por agitación, se establecieron los siguientes parámetros según la caracterización realizada en éste trabajo y la literatura consultada.

- Granulometría.....- 100 Mallas (Tyler)
- pH.....<1.5
- RPM.....750
- Peso de la muestra.....222 gramos

Influencia del porcentaje de pulpa en la lixiviación de oro.

A medida que el porcentaje de sólidos en la pulpa aumenta la disolución de oro disminuye de una manera casi lineal y con una baja pendiente, como se aprecia en la Figura 4, esto indica un cambio no muy marcado en la disolución de oro entre los porcentajes de pulpa entre 60%, 40% y 20 %.

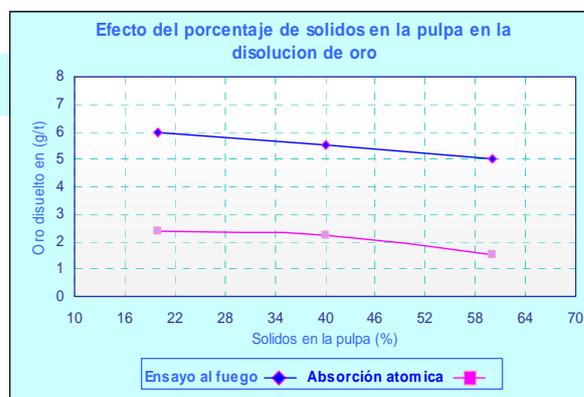


Figura 4. Efecto del porcentaje de pulpa en la lixiviación de oro con sales oxidantes en medio ácido

Influencia de la temperatura en la lixiviación de oro.

El aumento de la temperatura en la disolución de oro afecta de manera negativa el proceso, como se puede observar en la figura 5 a temperaturas mayores a 25°C la disolución desciende de forma drástica; este comportamiento se debe en mayor parte a un descenso en la concentración del ácido por evaporación, así como la presencia de óxido nítrico (NO) inestable.

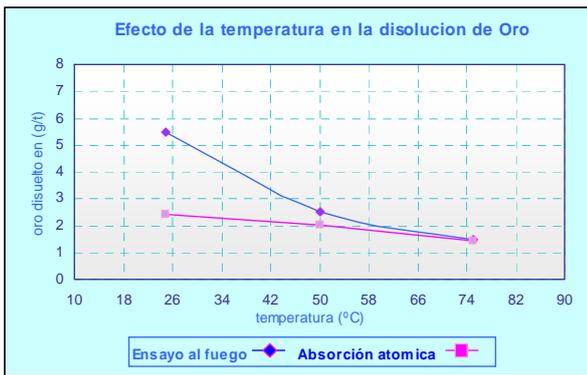


Figura 5. Efecto de la temperatura en la lixiviación de oro con sales oxidantes en medio ácido

Influencia del tiempo en la lixiviación de oro.

En la variable tiempo, se observó un aumento en la disolución de oro entre las 8 y 13 horas de lixiviación, sin embargo se apreció una mayor disolución de oro entre las 8 y 10 horas que entre las 10 y 13 horas de lixiviación, mostrando en éste último intervalo una disminución de la cinética del proceso, ver figura 6

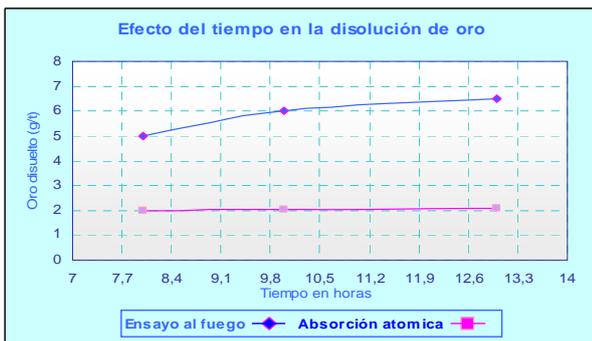


Figura 6. Efecto del tiempo en la lixiviación de oro con sales oxidantes en medio ácido

2. 5 Diseño experimental estadístico

Con la ayuda de un paquete estadístico, se realizó el diseño experimental utilizando un diseño central rotacional compuesto para tres variables, con $\alpha = 1.682$.

VARIABLES UTILIZADAS.

De acuerdo con los datos obtenidos en las pruebas preliminares de lixiviación, las variables que se seleccionaron para el desarrollo del diseño experimental son:

- Concentración de ácido sulfúrico [Kg/t] (X1)
- Concentración de cloruro de sodio [Kg/t] (X2)
- Concentración de nitrato de sodio [Kg/t] (X3)

Se escogió como variable respuesta el porcentaje de disolución de oro (Y). Los resultados de los ensayos se obtuvieron por la técnica de ensayo al fuego. Estas

pruebas se realizaron con valores constantes establecidos de:

- Granulometría.....- 100 Mallas (Tyler)
- pH.....<1.5
- RPM.....750
- Peso del sólido.....222 gramos
- % de pulpa.....20% de sólidos
- Temperatura.....25°C (temperatura ambiente)
- Tiempo.....10 Horas

Modelo matemático para porcentaje de oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido

El modelo matemático relaciona los valores de los datos obtenidos y de ésta manera establece un valor para la variable respuesta. La constante es el promedio de los valores del vector respuesta, así mismo el valor inicia del proceso en estudio.

En la tabla 4. Se aprecia que los signos de los valores A, B y C son positivos, por lo tanto son variables en el proceso. De la misma forma, en el modelo matemático el valor de la constante tiene signo negativo, lo que indica que está en un mínimo, debiendo ser maximizado.

Tabla 4. Coeficiente de regresión para porcentaje de oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido

Coeficiente de regresión para % oro disuelto	
Constante	-105.48
A: Ácido sulfúrico	0.950949
B: Cloruro de sodio	0.336188
C: Nitrato de sodio	4068104
AA	-0.00364689
AB	0.0
AC	-0.00222222
BB	-0,00196391
BC	0,0
CC	-0,102133

A continuación se presenta la ecuación del modelo matemático obtenido por el paquete estadístico. En caso de que los valores de los factores de la ecuación cuadrática tiendan a cero, el valor del modelo es el valor de la constante.

$$\% \text{ Oro disuelto} = -105,48 + 0,950949 * \text{Ácido sulfúrico} + 0,336188 * \text{Cloruro de sodio} + 4,68104 * \text{nitrato de sodio} - 0.00364689 * \text{Ácido sulfúrico}^2 + 0,0 * \text{Ácido sulfúrico} * \text{Cloruro de sodio} - 0,00222222 * \text{Ácido sulfúrico} * \text{Cloruro de sodio}$$

sulfúrico * Nitrato de sodio – 0.00196391 * Cloruro de sodio² + 0,0 * Cloruro de sodio * Nitrato de sodio – 0.102133 * Nitrato de sodio²

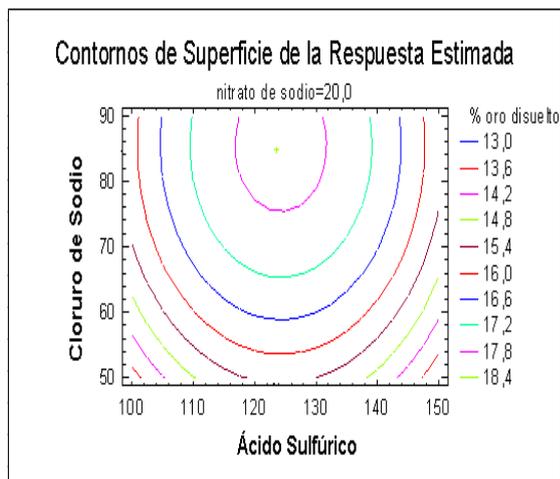


Figura 7. Contorno de superficie respuesta para porcentaje de oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido.

En la figura 7 se aprecia el contorno de la superficie respuesta, el cual indica por medio de isocurvas circunferenciales, que la máxima recuperación de oro disuelto es 18,4% y se encuentra señalada por el signo más (+) de color verde, que está dentro de la zona de mayor influencia.

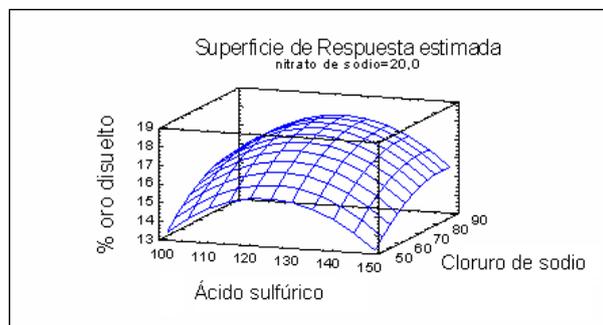


Figura 8. Superficie respuesta estimada para oro disuelto en la lixiviación con sales oxidantes en medio ácido.

La superficie respuesta a nivel espacial de la figura 8, ilustra la forma como están ubicados los puntos experimentales, así mismo la dirección en la cual se orienta el proceso.

Maximización de los valores de porcentaje de oro disuelto para el proceso de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido

El punto máximo del presente proceso se establece de la misma forma como fue planteado en el análisis de resultados, siendo éstos valores mínimos, debiendo ser maximizados, es decir, que son variables y su tendencia es subir de nivel y avanzar al máximo.

El valor máximo de porcentaje de oro disuelto es de 18,2582, la dosificación adecuada debe ser 123,809 Kg/T de ácido sulfúrico, 85,5943 Kg/T de cloruro de sodio, 21,5706 Kg/T de nitrato de sodio.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Por medio de la caracterización mineralógica se obtuvo un análisis cualitativo y cuantitativo de las especies minerales presentes en el concentrado aurífero, con el cual se determinó la presencia de pirita, especie de mayor importancia en el concentrado y otras especies como cuarzo, ortoclasa, moscovita y jarosita que hacen parte de la ganga.
- En las pruebas preliminares se observó que el aumento de la temperatura actúa de forma negativa en el proceso de lixiviación disminuyendo el oro disuelto en la solución, confirmando las consideraciones termodinámicas del proceso de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido, expuesta en el fundamento teórico donde se hacía notar que las reacciones eran exotérmicas por lo tanto no era necesario someter el proceso a cambios de temperatura.
- En las pruebas realizadas para diferentes porcentajes de sólidos en la pulpa se encuentra que la mayor disolución de oro se obtuvo con un porcentaje de pulpa del 20%. De igual manera la mayor disolución de oro se obtuvo en un tiempo de 13 horas, sin embargo no muy distante al que se obtuvo a las 10 horas de lixiviación, con una diferencia en disolución de oro tan solo de 0,05 g/T entre los tiempos.
- Los resultados de oro disuelto obtenidos en las pruebas preliminares no superan el 20 % de eficiencia, indicando una baja recuperación de oro en el proceso de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido aplicado a este tipo de mineral concentrado.
- Con los resultados mostrados, en la tabla 17 y la figura 20 se estableció que el factor de mayor influencia en el proceso es la concentración de nitrato de sodio, siguiendo en su orden por la concentración de cloruro de sodio y por último la concentración de ácido sulfúrico. De igual manera se establecieron las interacciones entre los diferentes factores, siendo la interacción entre el nitrato de sodio y el ácido sulfúrico la que ejerce más influencia en el proceso.
- Por medio del presente trabajo de grado se demuestra que se puede recuperar parcialmente oro con el proceso de lixiviación con sales oxidantes en medio ácido. Sin embargo los porcentajes de disolución alcanzados en la lixiviación no superan el 20% indicando que el proceso por el momento no es económicamente viable.
- Realizar estudios sobre la influencia de las velocidades de agitación para la lixiviación de mineral aurífero con sales oxidantes en medio ácido y de igual forma compararla con procesos como la lixiviación por percolación y en autoclave.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1]. CASTRO, D y TARAZONA, P. Estudio del proceso de refinación de oro mediante el uso de agua regia para su aplicación en los talleres de Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 2004
- [2]. DOMIC, Esteban. Hidrometalurgia fundamentos, procesos y aplicaciones, Andros Impresores, Santiago de Chile, 2001
- [3]. MARTINEZ, Susana. Estudio de sistemas de extracción con disolventes de Au (III) en medio clorhídrico con aminas y derivados organofosforados neutros, Universidad Complutense de Madrid, 1996
- [4]. SCHNABEL, C. Handbook of Metallurgy, Vol 1, 3ra Edición, Editorial Macmillan, Londres, 1921
- [5]. SHOEMAKER, R. Precious metals: mining, extraction and processing, Editorial Kudry, 1948
- [6]. ALFONSO, G y FABREGAS, L. Oxidación en autoclave y tioureación de concentrados de colas auroargentíferas de la mina reina de oro (Vetas Santander), Universidad Industrial de Santander, 1991
- [7]. LIDDELL, D, M. Handbook of non-ferrous metallurgy, Vol 2, Recovery of Metals, Editorial McGraw-Hill, New York, 1945
- [8]. DADGAR, A. Journal of Metals, páginas 37-41, diciembre de 1989
- [9]. AZAÑERO, A y NUÑEZ, P. Recuperación de la plata a partir de relaves de flotación mediante lixiviación ácido-clorurante, Revista del Instituto de Investigación, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, junio de 2001
- [10]. VIÑALS, J. Leaching of gold and palladium with aqueous ozone in dilute chloride media, Hidrometallurgy, 2005
- [11]. PALACIOS, C. Proceso Severo. Lixiviación de menas auríferas con sales oxidantes en medio ácido. "Proceso Severo". Consultor EDELMIN, 2001