

MODELO DE LA PREAIREACIÓN EN CONCENTRADO DE ORO PIRÍTICO, PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CIANURACIÓN

Vidal Sixto Aramburú Rojas*

RESUMEN

La muestra que es materia de estudio es un concentrado fundamentalmente de pirita aurífera producto del proceso de flotación, proveniente de la Empresa Minera Aurífera Calpa S.A.

La caracterización del concentrado en el microscopio óptico polarizado de la UNMSM se observa la presencia de pirita, esfalerita, calcopirita, electrum, marcasita, pirrotita, arsenopirita, rutilo y ganga. En la briqueta pulida correspondiente a la malla +100, se ha observado la presencia de electrum. En el Microscopio Electrónico de barrido que tiene la Universidad, se ha observado la presencia de partículas de oro, incluso en la pirita; dichas partículas presentan tamaños menores de 200 nanómetros, también se observan partículas de telururo de oro y plata entrelazadas con el electrum, cuyas partículas tienen tamaños menores de 2 micras. Estas características hacen que el concentrado sea refractario al tratamiento convencional por el proceso de cianuración, lo cual constituye un serio problema por el elevado consumo de cianuro de sodio y recuperaciones limitadas.

El presente trabajo de investigación está orientado a estudiar nuevos esquemas de pretratamiento como la preaireación con cal, que es un proceso previo a la cianuración.

El modelo matemático obtenido para el proceso de preaireación, utilizando el diseño hexagonal, indica que la variable que tiene mayor influencia es el pH, seguido del tiempo y su interacción correspondiente, manteniendo constante la concentración de oxígeno, granulometría del concentrado y la dilución de la pulpa, por tener poca incidencia en el proceso. Obteniéndose una respuesta con una recuperación aceptable en el proceso de cianuración, que es bastante significativo en comparación con la cianuración convencional. En resumen las ventajas de la preaireación es que en la cianuración se reduce el consumo de cianuro de sodio en un 55 % y mejora la recuperación en un 10,57 %, para este tipo de concentrados.

Palabras claves: Pirita aurífera, flotación, electrum, refractario, preaireación, cianuración.

ABSTRACT

The sample that is study matter, is concentrated of auriferous minerals, fundamentally pyrite and product of flotation process, originating of the Mining Company Aurífera Calpa S.A..

The characterization of the concentrated in the polarized optical microscope (UNMSM), it observed the pyrite presence, esfalerita, chalcopyrite, electrum, marcasite, pirrotita, arsenopirita, rutilo and gangue. In the polished briquet corresponding to mesh +100, the electrum presence has been observed. Also they have been observed the gold particle presence including in the pyrite; these particles present smaller sizes of 200 nanometers, also is observed particles telururo, gold and silver interlaced with electrum, whose particles have smaller sizes of 2 microns. These characteristics cause that the concentrated is refractory to the conventional treatment by the cyaniding process, constituting a serious problem by high cyanide consumption and limited recoveries.

The present work of investigation this oriented to study new schemes to pre-recovering for example the pre-ventilation with lime, that are previous processes to cyaniding.

* Docente de la EAP Ing. Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.



The mathematical model obtained for the pre-ventilation process, using the hexagonal design, indicates that the variable that has greater influence is pH, followed for time and its corresponding interaction, maintaining the constant concentration of oxygenate, dilution and granulometria concentrated of the pulp, to have little incidence in the process. Obtaining an answer with an acceptable recovery in the cyaniding process., that is quite significant in comparison with conventional cyaniding. In summary the advantages of the pre-ventilation are that in cyaniding the sodium cyanide consumption is reduced in 55 % and improves the recovery in 10.57 %, for this type of concentrated.

Key words: Auriferous pyrite, flotation, electrum, refractory, pre-ventilation, cyaniding.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, la industria minera-metalúrgica es fuente de riqueza de mayor importancia dentro del contexto socio-económico. A partir del siglo XVIII, se utilizó la lixiviación para la recuperación de minerales de cobre; posteriormente, se aplicó en la recuperación de oro y plata. Muchos yacimientos sulfurados de oro y plata que contienen fierro, considerados económicamente no rentables por las bajas recuperaciones mediante cianuración convencional y el alto consumo de cianuro, actualmente, pueden ser rentables aplicando el proceso de preaireación.

Las dificultades en la cianuración convencional se presentan principalmente porque el oro está finamente encapsulado y diseminado en minerales sulfurados, con tamaños menores a 20 micras, inclusive encontramos la presencia de oro submicroscópico; el tratamiento para estos minerales o concentrados refractarios se realiza en determinadas condiciones, donde la tendencia es romper los enlaces que impiden la liberación de los metales preciosos.

I.1 Descripción del problema

En la actualidad la cianuración es el proceso más empleado en la extracción del oro y plata, pero no siempre es posible aplicarlo exitosamente en forma directa si no se tienen en cuenta las características del mineral o concentrado. La dificultad en aplicar la cianuración convencional es que el oro está finamente diseminado en forma libre o encapsulado en minerales sulfurados; la presencia de minerales como Fe, Cu, As, Sb, Bi, etc. complica el proceso, por eso se les denomina cianicidas.

El problema de la cianuración es que los elementos componentes de los minerales sulfurados, reaccionan con el cianuro y el oxígeno causando un excesivo consumo y reducen la velocidad de disolución del oro.

1. 2 Objetivos

✍️ Objetivos generales

- ? Establecer la relación que existe entre la recuperación de oro en función de las variables en estudio, para obtener un modelo matemático que represente dicho fenómeno.

✍️ Objetivos específicos

- ? Establecer la influencia del proceso de preaireación, como etapa previa al proceso de cianuración.
- ? Determinar la influencia de las variables (pH y t) en el proceso de preaireación.
- ? Incrementar la recuperación de oro aplicando un modelo matemático que represente los procesos de pretratamiento y cianuración.

II. MÉTODOS Y RESULTADOS

2.1 Variables operacionales

Para el tratamiento de los datos se aplicará la técnica del Diseño hexagonal para procesar e identificar la influencia de las variables en estudio (pH y tiempo). En el análisis de los datos se utilizará el Software Estadístico Statgraphics Plus Versión 4.1, para evaluar, interpretar y optimizar las variables en estudio. En la realización de este trabajo de investigación, se han estudiado las siguientes variables:

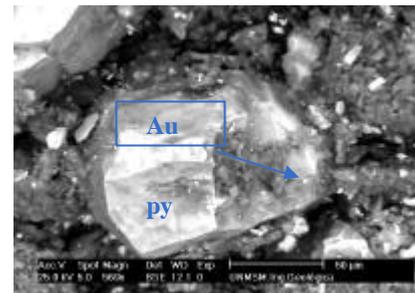
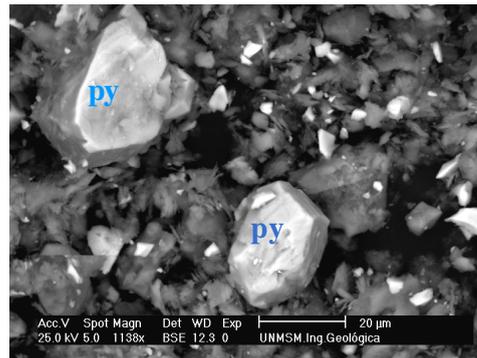
- a) Variables independientes (Xi)
 - ? Tiempo de preaireación
 - ? pH de preaireación
- b) Variable dependiente (Yi)
 - ? Porcentaje de recuperación de oro
- c) Variables controladas
 - ? Consumo de cianuro
 - ? Consumo de óxido de calcio (cal)

- ? Concentración de oxígeno en pulpa
- ? Velocidad de agitación
- ? Relación L/S

2.2 Principio fundamental de la preaireación

La preaireación con cal, como etapa previa al circuito de cianuración, consiste en oxidar la piritita, pirrotita y otros minerales o concentrados auríferos sulfurados. Como consecuencia de la oxidación se forman sulfatos de calcio, sulfatos de sodio, hidróxido férrico, tiosulfato de sodio, tiosulfato de calcio, sulfato ferroso, hidróxido ferroso, etc.

En esta etapa es necesario realizar una oxidación, manejando las variables principales como: tiempo de preaireación, pH de preaireación y concentración de oxígeno. Sin la preaireación tendremos formaciones de ferrocianuros, tiocianatos, etc, que consumen innecesariamente cianuro y también producen interferencias en la disolución del oro.



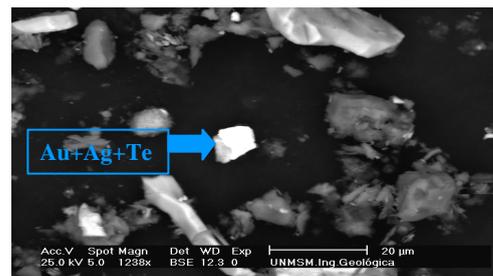
2.3 Caracterización del concentrado

Resultados de la observación microscópica óptica

- La muestra es un concentrado del proceso de flotación, proveniente de la Empresa Minera Aurífera Calpa S.A.
- Se han preparado briquetas pulidas, correspondientes a las mallas +100, +200, +325 y -325.
- Entre los minerales observados tenemos electrum, esfalerita, calcopirita, piritita, marcasita, arsenopirita, pirrotita y gangas. Las gangas están constituidas por silicatos y carbonatos.

Resultados de la observación con el microscopio electrónico

- Lo importante en el microscopio electrónico es que se han detectado partículas y elementos no observados en el microscopio óptico.
- Se ha observado la presencia de partículas de oro incluido en la piritita con tamaños menores de 200 nanómetros (Ver Foto).
- También se han observado partículas de telururo de oro y plata entrelazada con el electrum, con tamaños menores de 2 micras (Ver Foto).



Fotos del microscopio electrónico

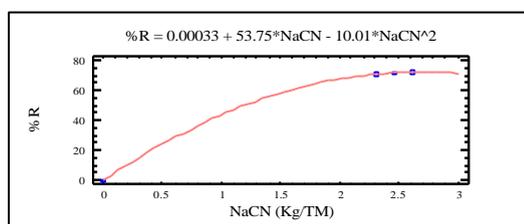
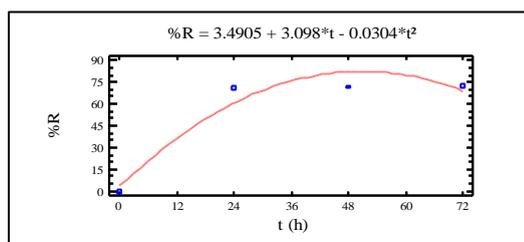
2.4 Pruebas metalúrgicas de cianuración directa de concentrados

La muestra es un compuesto del concentrado de flotación de la planta de beneficio de la Empresa Minera Calpa S.A., después de la remolienda. Estas pruebas se corrieron sin la preaireación, con la finalidad de comprobar si en el laboratorio se reflejaban los resultados de planta.

Condiciones de operación en la prueba de cianuración directa

Cabeza Au (g/TM)	26,0
Peso concentrado compuesto (g)	400,0
Gravedad específica (G.e.)	4,2
Granulometría del concentrado	75% -200 malla
Dilución (L/S)	2/1
pH cianuración	10,5
Tiempo de cianuración (h)	24. 48 v 72

Resultados de la cianuración directa					
Tp (h)	Sol. Rica Au (g/cm ³)	Relave Au (g/TM)	Recup.(%)	Consumo NaCN (Kg/TM)	Consumo CaO (Kg/TM)
24	9,50	7,60	70,77	2,31	8,43
48	10,00	7,40	71,54	2,46	10,43
72	10.45	7.25	72.12	2.62	10.67



Durante la etapa de preaireación, se realiza la oxidación manteniendo constante la concentración de oxígeno en 5 mg/l, en esta etapa se han estudiado las variables de mayor influencia: tiempo y pH de preaireación. Una vez efectuada la oxidación, el concentrado es sometido al lavado de la pulpa.

Los resultados de la preaireación en base al arreglo matricial del diseño hexagonal

Tiempo (X ₁)		pH (X ₂)		Y (%Au)
Codificado	Natural	Codificado	Natural	
1,0	14,0	0	10,0	83,0
0,5	11,5	0,866	11,7	80,0
-0,5	6,5	0,866	11,7	78,0
-1,0	4,0	0	10,0	75,0
-0,5	6,5	-0,866	8,2	76,0
0,5	11,5	-0,866	8,2	72,0
0	9,0	0	10,0	83,1
0	9,0	0	10,0	83,4
0	9,0	0	10,0	83,0

2.5 Pruebas de preaireación con cal

Composición química del concentrado

Au (g/TM)	26,0
Ag (g/TM)	30,0
Cu (%)	0,50
Fe (%)	40,0
S (%)	32,0
Insol. (%)	10,0
Al (%)	6,8

El concentrado es sometido a la preaireación con el fin de producir sulfatos, hidróxidos solubles, etc., los cuales son separados, teniendo en cuenta el principio fundamental de la preaireación, para evitar interferencias en la siguiente etapa que es la cianuración.

Las condiciones de las pruebas de preaireación

Peso concentrado (g)	400,0
Gravedad específica (G.e.)	4,2
Granulometría del Conc.	75% - 200 Malla
Dilución (L/S)	2-ene

Porcentaje de recuperación en función del consumo de cianuro

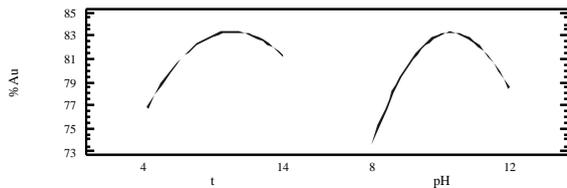
Los resultados obtenidos nos indican que la mayor parte de la recuperación se tiene dentro de las 24 h de lixiviación; después la cinética ya es lenta. Se llega a una recuperación de 72,12% con 72 h de lixiviación.

La recuperación es relativamente baja, además ratifica las características de refractariedad del concentrado. Los resultados de laboratorio concuerdan con los balances metalúrgicos mensuales de planta.

Estimaciones de efectos e interacciones

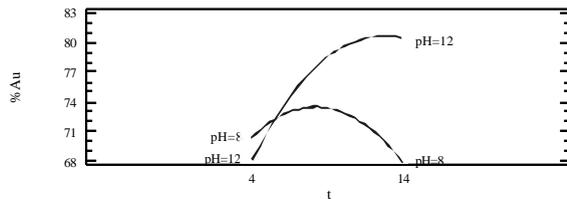
Factores	Efectos
X ₁ : Tiempo	47,256
X ₂ : pH	4,988
X ₁ *X ₂ : Tiempo*pH	7.071
X ₁ ²	-8.333
X ₂ ²	-14.519

Analizando estadísticamente podemos establecer el efecto del tiempo y pH, llegando a la conclusión que ambos factores tienen efectos significativos en el proceso de cianuración, incluso, podemos notar que los signos de ambos factores son positivos, lo cual significa que tienen influencia directa. El que tiene mayor efecto significativo es el pH, seguido del tiempo de preaireación.



Estimación de efectos medios

La figura nos muestra que el proceso es cuadrático



Interacción de factores

Como consecuencia de la variación del tiempo y pH en la preaireación y la recuperación de oro como respuesta se ha establecido el siguiente modelo matemático cuadrático:

$$Y = - 96,727 + 0,0629*t + 34,36*pH - 0,166*t^2 + 0,3535*t*pH - 1,82*pH^2$$

El modelo se desarrolló en base a la información obtenida en el laboratorio y utilizando el Programa Estadístico Statistic Graphic Plus, para el set de datos de Diseño Hexagonal.

El modelo es válido en el siguiente nivel de factores:

Factores	Nivel Inferior	Nivel Superior
X ₁ : Tiempo	4,0	14,0
X ₂ : pH	8,0	12,0

Analizando el modelo matemático podemos llegar a las siguientes conclusiones:

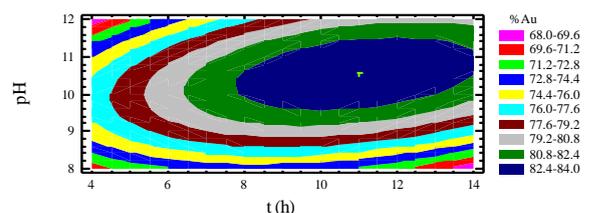
- Si t = 0 y pH = 0, podemos establecer que la recuperación de oro está en su valor máximo, es decir, no se puede extraer más del 96,727%.
- Ambos factores cuadráticos tienen signos iguales pero constantes diferentes, por lo tanto se establece que es una elipse o cáscara de huevo en el espacio.
- Para maximizar la recuperación de oro, notamos que depende fundamentalmente de la variable pH.
- Cuantitativamente la influencia de las variables tiempo y pH en el proceso de preaireación y consecuentemente en la lixiviación de oro ha demostrado ser complejo, ya que ambos factores son influyentes en el proceso.

La superficie respuesta nos muestra claramente el área de máxima extracción de oro variando en los siguientes niveles óptimos.

Factores	Nivel inferior	Nivel superior
X ₁ : Tiempo	8,0	14,0
X ₂ : pH	9,6	11,4

Análisis gráfico de superficie respuesta en la extracción de oro

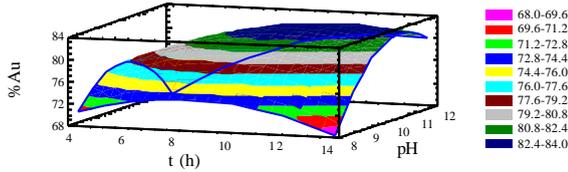
Podemos establecer que los parámetros óptimos de la preaireación para el tiempo y para el pH de 9,6 a 11,4 se encuentran en el rango de 8 a 14 horas; y se logra una recuperación de oro por cianuración en el rango de 82,4 a 84,0 % en comparación a 72,12 % en la cianuración directa sin preaireación.



Recuperación de oro en función de factores influyentes (superficie)

Análisis gráfico espacial de respuesta en la extracción de oro

En la siguiente figura, podemos establecer que la máxima recuperación de oro es de 83,97% (máxima pendiente espacial) para condiciones óptimas de la preaireación de tiempo y pH que es de 10,99 y 10,54 respectivamente.



Recuperación en función de factores influyentes

Las condiciones óptimas operativas del proceso de la preaireación se establecen aplicando la técnica de máximo ascenso.

Factores	Nivel inferior	Nivel Superior	Nivel Óptimo
X ₁ : Tiempo (h)	4,0	14,0	10,99
X ₂ : pH	8,2	11,7	10,54

Establecemos el valor óptimo del proceso aplicando la técnica de la pendiente ascendente descendente.

% recuperación Au (óptimo) = 83,97

2.6 Pruebas de cianuración con preaireación

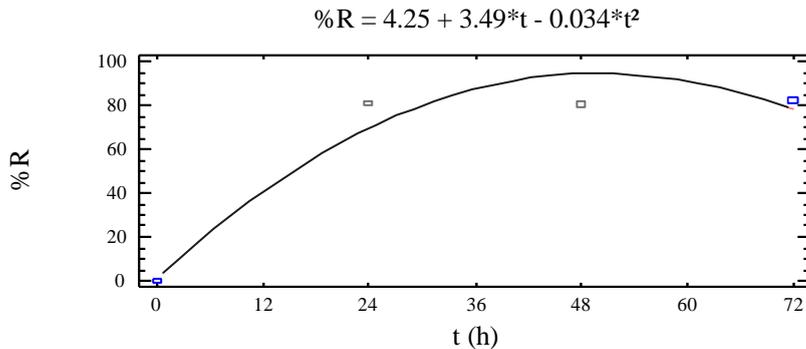
Pruebas de cianuración con preaireación con intercambio de solución

Condiciones operativas de cianuración con preaireación y con cambio de solución

Cabeza Au (g/TM)	26,0
Peso concentrado compuesto (g)	400,0
Gravedad específica (G.e.)	4,2
Granulometría del concentrado	75% - 200 malla
Dilución (L/S)	02-Ene
pH preaireación óptimo	10,54
Tiempo preaireación óptimo (h)	10,99
pH cianuración	10,5
Tiempo de cianuración (h)	24, 48 y 72

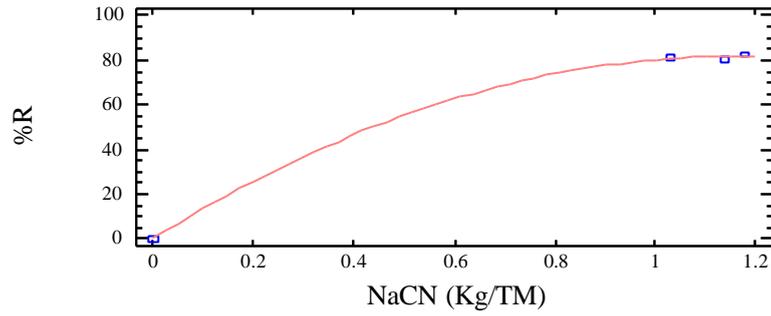
Resultados del proceso de cianuración con preaireación y con cambio de solución

Tiempo (h)	Sol. Rica Au (g/m ³)	Relave Au (g/TM)	Recup. %	Consumo NaCN (Kg/TM)	Consumo CaO (Kg/TM)
24	14,24	4,90	81,15	1,03	13,05
48	15,28	5,10	80,38	1,14	13,50
72	15,80	4,50	82,69	1,18	13,24

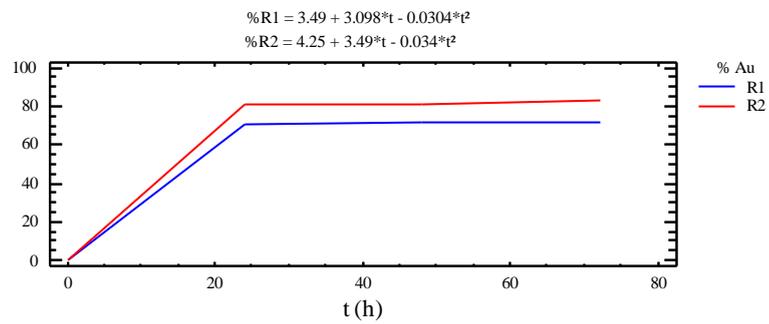


Porcentaje de recuperación en función del tiempo

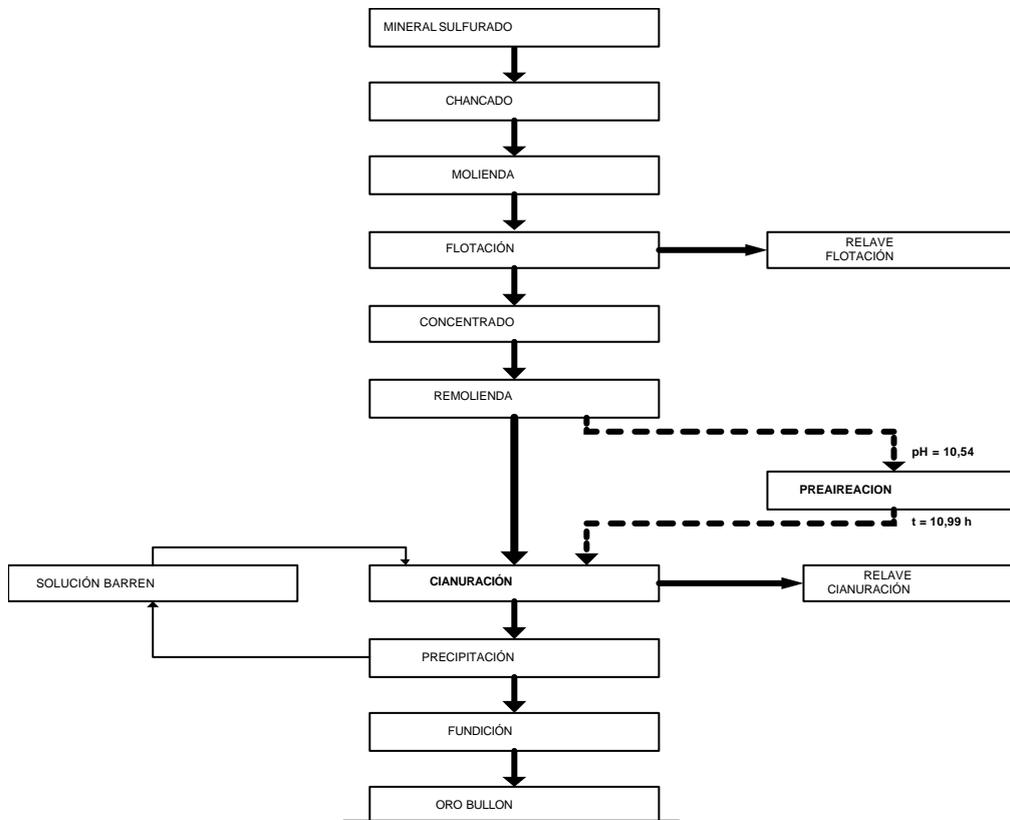
$$\%R = 0.0049 + 141.12 * \text{NaCN} - 60.9 * \text{NaCN}^2$$



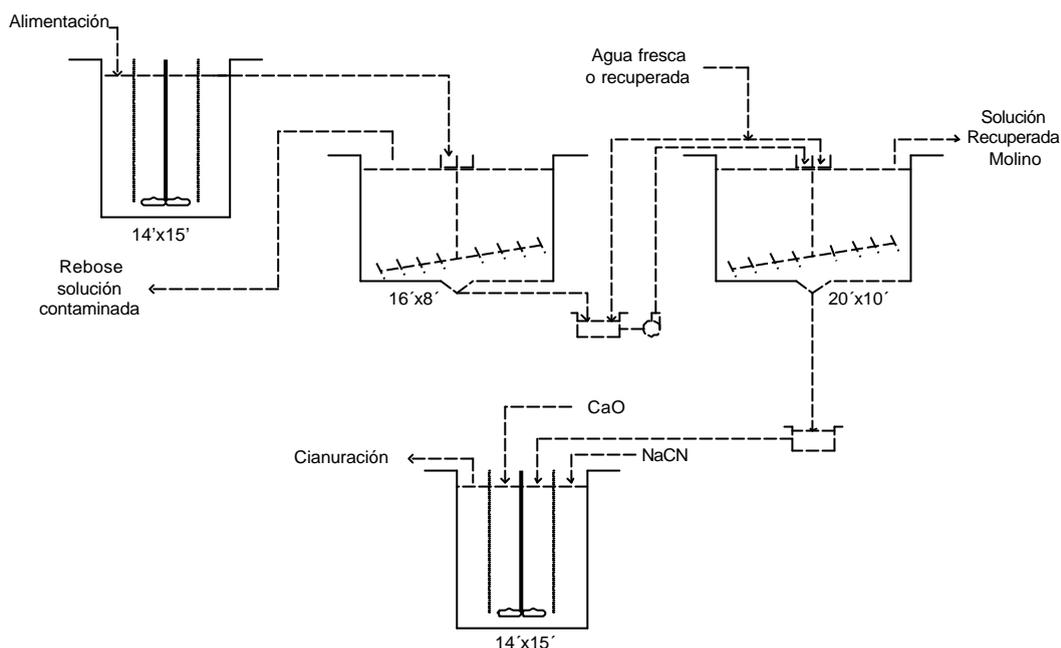
Porcentaje de recuperación en función del consumo de cianuro



Gráfica comparativa cianuración convencional y la cianuración con Preaireación



Flujograma del proceso de Preaireación propuesto para la Empresa Minera Calpa S.A.



Flow Sheet de la Preaireación Planta de Cianuración

III. CONCLUSIONES

- Se demuestra técnicamente que la preaireación, como etapa previa al proceso de cianuración, es importante porque reduce el consumo de cianuro en un 55 % y se incrementa la recuperación de oro en un 10,57 %.
- La aplicación de la preaireación a nivel industrial incide en la reducción de costos, aumenta la producción de oro y disminuye la contaminación ambiental.
- El modelo matemático obtenido es:

$$Y = -96.727 + 0,0629 * t + 34.36 * pH - 0,166 * t^2 + 0,3535 * t * pH - 1,82 * pH^2$$

donde se observa que la variable principal de la preaireación es el pH(X1), seguido del tiempo(X2) y se tiene la interacción entre ambas variables.

- Los parámetros optimizados en el presente estudio del concentrado de oro pirítico son una base sólida para el inicio de otras operaciones que tengan una mineralización similar.
- La recuperación de oro en un 83,97 % según el modelo matemático se ha obtenido bajo las siguientes condiciones operacionales:

Tiempo de Preaireación (h)	10,99
pH de preaireación	10,54
Consumo de NaCN (kg/TM)	1,18
Granulometría del concentrado	75% - 200 malla
Consumo de cal (kg/TM)	13,24
Concentrado de oxígeno (mg/l)	5,0

- La preaireación es un proceso hidrometalúrgico simple y económico, que se puede introducir en el mismo circuito de cianuración después de la remolienda, dependiendo de las características de la muestra.

IV. RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar agentes oxidantes en el proceso de preaireación como el peróxido de hidrógeno, el peróxido de calcio y el hidróxido de amonio en las posteriores investigaciones.
- Desarrollar pruebas con otro tipo de concentrados, en base a los resultados obtenidos en el presente estudio.

- El presente trabajo también puede ser aplicado a minerales sulfurados; los cuales tienen que ser estudiados en función de la influencia de las variables en estudio.
- Se recomienda realizar el estudio de la solución evacuada producto de la preaireación y el tratamiento respectivo, a fin de retornar al circuito.

V. BIBLIOGRAFÍA

1. Barrios G., (1992). *Importancia del control de molienda en minerales auríferos*. Taller de metalurgia extractiva. Tepsup, Lima.
2. Barsky, G.; Swaison, S.J. y Easley, N. (1935). «Dissolution of gold and silver in cyanide solutions». *Tras. Am. Inst. Min.- Metal. Engrs.* 112: 660-667,
3. Canchaya S. y Cardoso M. III Congreso Nacional de Geología, Lima, 1978.
4. Canepa C. (1992). *La mineralogía del oro y su significación en metalurgia*. Taller de metalurgia extractiva de minerales auríferos. Tepsup, Lima.
5. Canseco D.E. 1978, *Metalurgia del oro y la plata*. Editorial UNI, Lima, pp. 44-147.
6. Comité Aurífero, Sociedad Nacional de Minería y Petróleo. Curso: *Metalurgia y Cianuración*, Lima.
7. Curso Internacional del Oro. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 2000.
8. Dorr, J.V.N. y Bosqui F.L. (1950). *Cyanidation and concentration of Gold and Silver Ores*.
9. Demopoulus G.P. (1987). *Mineralogical and Technological Aspects of Gold Extraction from Refractory Ores*, Proc 2° Colloquia sur l'Or, CRM, pp. 273-326
10. Gardiner R.L. (1933). *Trans. Am. Inst. Min. Engrs*, 42:251
11. II Simposium Nacional de Ingeniería Metalúrgica. *Trabajos Técnicos*. Centro Cívico. Lima, 1983.
12. JHA, M.C. (1984). «Recovery of Gold and Silver from Cyanide Solutions: a Comparaty Study of Various Processes». *First International Symposium of precious Metal Recovery*. Reno – Nevada.
13. Lemmon, R.J. (1933). Discussion by French, J.H. and Jones, H. *Reduction Works practice at Morro Velho, Brazil*. *Trans. Inst. Min. Met*, 42:247-251.
14. Macassi, J. y Rivas, E. (1989). Nueva técnica hidrometalúrgica, para mejorar la extracción de oro en materiales piríticos. I Simposio Internacional de Metalurgia, Tepsup, Lima.
15. Misari CH, F. (1994). *Metalurgia del oro*, Vol. II, Centros de Estudios y Promoción en Ciencias de la Tierra. CEPECT, Lima.
16. Mundo Minero (2002). *La microscopía electrónica en la búsqueda de minerales portadores de oro*, Edición 211, 15 julio, pp. 38-39.
17. Nagy, I.; Mrkusic, P. y Mcculloch, H.W. «Chemical Treatment of Refractory Gold Ores». National Institute for Metallurgy, Ran Burg – South Africa, 124,1966.
18. Palacios C.S., (1998). *Diseño experimental (análisis e interpretación)*, Edit. Educación y Cultura, Cochabamba (Bolivia).
19. Palacios C.S., (1998). *Workshop práctico del oro*, Edit. Educación y Cultura, Cochabamba (Bolivia).
20. Pérez, L. *Molienda factor decisivo en la recuperación de oro*, V Convención Regional de Ingenieros de Minas, 1995.
21. Ponciano, F.J. *Tratamiento de materiales refractarios conteniendo metales preciosos por métodos convencionales y no convencionales*. I Simposium Internacional de Metalurgia. Tepsup, Lima, 1989.
22. Ralston, O.C. *et al.*, «Reducing and oxing agents and lime consumption inflation pulp». *Trans , Am .Inst. Min.* 1930, Engrs, 87: 369-383.
23. Sobral S., L. G. Curso: *Tecnología actual de los procesos de recuperación de oro y plata*, U.I.S. Colombia, setiembre, 1994.
24. Tremolada, J. *Optimización del proceso de recuperación de oro por cianuración mediante variantes hidrometalúrgicas en el tratamiento de concentrados piríticos refractarios*. II Simposium de Geología, Minas y Metalurgia del oro. Lima, 1993.
25. V Simposium Nacional de Minería Aurífera. *Trabajos Técnicos*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, 1999.
26. Villanueva, R.; Alvarado, H. y Vitteri, J. (1988). *Informes de los estudios realizados en la planta de cianuración Mina Calpa*.