

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE RELAVES
DE PIRITAS AURÍFERAS**

TESIS

Presentada Por:

Bach. Fredy Romero Aliaga

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**“RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE RELAVES DE
PIRITAS AURÍFERAS”**

TESIS

La tesis sustentada el 27 de octubre del dos mil diecisiete por el bachiller Fredy Romero Aliaga, siendo jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE :


.....

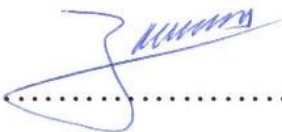
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

SECRETARIO :


.....

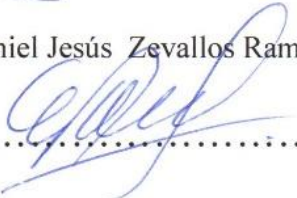
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

VOCAL :


.....

Ing. Daniel Jesús Zevallos Ramos

ASESOR :


.....

Ing. Zoilo Edgardo Valdivia Infantas

DEDICATORIA

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo y a mi hermano por su apoyo.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

AGRADECIMIENTO

A Dios, a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, a mi asesor de tesis el Ing. Zoilo Valdivia, a las personas que colaboraron de una u otra forma para la realización de este trabajo, por todo su apoyo y la oportunidad de poder estudiar.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I:	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. Descripción del problema de investigación	2
1.1.1 Antecedentes del problema	2
1.1.2 Problemática de la investigación	3
1.2 Formulación del problema	4
1.3 Justificación e importancia	5
1.4 Alcances y limitaciones	6
1.5 Objetivos	7

1.5.1	Objetivos generales	7
1.5.2	Objetivos específicos	7
1.6	Hipótesis	8
CAPÍTULO II:		
MARCO TEÓRICO		
2.1.	Antecedentes del estudio	9
2.2.	Bases teóricas	9
2.2.1	Generalidades	9
2.2.2	Mineralogía del oro	13
2.2.3	Factores que afectan la recuperación de oro	17
2.2.4	Flotación de piritas auríferas	28
2.2.5	Proceso de biolixiviación	31
2.2.5.1	Biolixiviación	33
2.2.5.2	Microorganismos en la biooxidación	38
2.2.5.3	Factores que afectan el proceso de biolixiviación	42
2.2.5.4	Mecanismo de ataque bacteriano al mineral	50
2.2.5.5	Cuantificación de bacterias	59
2.2.5.6	Coloración de Gram	67
2.2.6	Teoría de la cianuración	68
2.2.6.1	Cianuración del Oro	68
2.2.6.2	Efectos de los variables importantes de la cianuración	73
2.2.6.3	Cinética en la lixiviación de oro	84
2.3.	Definición de términos	92

CAPÍTULO III:

MARCO METODOLÓGICO	99
3.1. Tipo y diseño de la investigación	99
3.2. Muestras	99
3.2.1 Propiedades físicas y químicas	100
3.2.2 Caracterización mineralógica	102
3.3. Operacionalización de variables	103
3.3.1 Reactivos, materiales biológicos – químicos y equipos	103
3.4. Procesamiento y análisis de datos	105
3.4.1 Biolixiviación de relaves	105
3.4.2 Cianuración de los relaves biooxidados cianuración de la pirita aurífera biooxidada con <i>a. ferrooxidans</i>	113
3.4.3 Pruebas de lixiviación sin tratamiento	116
3.4.4 Flotación	118

CAPÍTULO IV:

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	120
4.1. Resultados	120
4.1.1 Biooxidación	120
4.1.2 lixiviación con tratamiento biooxidación	125
4.1.3 Lixiviación sin tratamiento	126
4.1.4 Flotación	128
4.2. Discusión	128

CONCLUSIONES	130
RECOMENDACIONES	132
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas	11
Tabla 2. Propiedades químicas	13
Tabla 3. Principales minerales portadores de oro	15
Tabla 4. Minerales auríferos	18
Tabla 5. Clasificación de los diferentes tamaños de oro en minerales	27
Tabla 6. Tipos de minerales y tratamientos convencionales	28
Tabla 7. Principales minerales asociados al oro	29
Tabla 8. Resultados suficientes de ensayos de biolixiviación	53
Tabla 9. Medio Nutriente para el Cultivo de <i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	61
Tabla 10. Efecto del oxígeno sobre la velocidad de disolución del oro	76
Tabla 11. Cantidad de oro disuelto en una hora	78
Tabla 12. Densidad real y aparente del concentrado	100
Tabla 13. Porcentaje pasante mallas de corte	101
Tabla 14. Contenido de oro en relaves	101
Tabla 15: Medio de cultivo 9K-Fe para reactivar a <i>A. ferrooxidans</i> (Kim y cols.2002)	106
Tabla 16: Medio de cultivo para la biooxidación	108
Tabla 17. Diseño de los experimentos	113
Tabla 18. Condiciones experimentales de las pruebas de lixiviación férrica	114
Tabla 19: Pruebas de lixiviación N° 01	115
Tabla 20: Pruebas de lixiviación N° 02	116
Tabla 21: Pruebas de lixiviación N° 03	117

Tabla 22: Pruebas de lixiviación N° 04	118
Tabla 23. Variables operativas	119
Tabla 24. Dosificación en Laboratorio	119
Tabla 25. Pruebas de lixiviación N° 01: TIEMPO LIX 20 HORAS	125
Tabla 26. Pruebas de lixiviación N° 02: TIEMPO LIX 08 HORAS	126
Tabla 27. Pruebas de lixiviación N° 03: TIEMPO LIX 24 HORAS	127
Tabla 28. Pruebas de lixiviación N° 04: TIEMPO LIX 48 HORAS	127
Tabla 29. Prueba flotación BATCH N°5	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Oro en diferente rango de granulometría: (a) Oro nativo de placer aurífero, (b) Oro microscópico observado a luz reflejada	19
Figura 2. Grano de oro de 4 micras asociado a pirita	21
Figura 3. Oro asociado a arsenopirita: (a) Oro nativo encerrado en arsenopirita masiva, (b) Oro submicroscópico encerrado en cristales de arsenopirita	22
Figura 4. Oro ubicado en fracturas (Guevara, 2006)	26
Figura 5. Oro ubicado en bordes de granos (Guevara, 2006)	26
Figura 6. Células de <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> visto con microscopio electrónico de transmisión. Escala 500 nm (Journal of Bacteriology)	36
Figura 7. Células de <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> (Journal of Bacteriology)	38
Figura 8. Mecanismos directo e indirecto de biolixiviación	51
Figura 9. Mecanismos de oxidación bacteriana propuestos a) Mecanismo indirecto. b) Mecanismo de contacto indirecto. c) Mecanismo de contacto directo	54
Figura 10. Recuento de bacterias en microscopio	66
Figura 11. Diagrama de estabilidad Eh - pH para el sistema Au-H ₂ O-CN ⁻ a 25 °C	79
Figura 12. Especiación de cianuro y el cianuro de hidrogeno en solución acuosa, en función del pH (Barbosa et al 1988)	81
Figura 13. Modelo Electroquímico para la Cianuración del Oro	85
Figura 14. Relaves de pirita antes del proceso de biooxidación	105
Figura 15. Relaves de pirita después del proceso de biooxidación	105

Figura 16. Cinética de crecimiento microbiano	120
Figura 17. Variación del pH en el tiempo de los cultivos	121
Figura 18. Variación de la concentración de Fe^{+2} en solución en el tiempo del cultivo	122
Figura 19. Variación de la concentración de Fe^{+3} en solución con el tiempo para la biolixiviación de pirita por <i>At. Ferrooxidans</i> con 5 g/l de ión férrico inicial en solución a pH 1,5 con 200 rpm de agitación y 298 K de temperatura	124
Figura 20. Cinética de extracción del oro	127
Figura 21. Extracción de oro: cianuración con biooxidación, cianuración directa y flotación de relaves piritas auríferas	129

RESUMEN

La Biooxidación ha demostrado ser un proceso viable para el tratamiento previo por oxidación de sulfuros auríferos refractarios. En general, la velocidad de oxidación es máxima a 25 % de sólidos para los materiales de alto contenido de sulfuro.

En el presente proyecto de investigación se concluye que la biooxidación es un pretratamiento eficaz para este tipo de relaves refractarios de oro, aplicando bacterias como *Thiobacillus Ferrooxidans* que es un bacilo corto, de aproximadamente 0,5 x 1 jxm, logrando recuperaciones superiores al 88 % en tiempos menores a las 20 horas después de la biooxidación, superando al proceso de flotación con 47,75 % y a la cianuración directa que obtiene una recuperar de 61,1 % a las 48 horas.

INTRODUCCIÓN

Se sabe que muchos de los depósitos de oro y plata a menudo se asocian con minerales de sulfuro, especialmente pirita y arsenopirita. Algunos de los metales preciosos en dichos minerales se encuentran a menudo en forma de partículas muy finamente diseminados en la matriz de sulfuro. La encapsulación de las partículas de metales preciosos de esta manera hace que su extracción directa por cianuración sea muy difícil, ya que estos metales son inaccesibles a las soluciones de lixiviación. Tales minerales se conocen como minerales refractarios (Attia y El-Zeky, 1989). Diversos métodos de pre-oxidación de minerales refractarios y concentrados se utilizan comúnmente para mejorar la recuperación de metales preciosos. Entonces una técnica alternativa y eficaz para tratar dichos minerales refractarios es biolixiviación antes de la cianuración. Este proceso de lixiviación descompone la matriz de sulfuro, exponiendo así los metales preciosos encapsulados a la solución de lixiviación. Varios investigadores han defendido el uso de bacterias *Thiobacillus ferrooxidans* para la biolixiviación de minerales sulfurados y concentrados antes de la lixiviación del oro con soluciones de cianuro.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema de investigación

1.1.1 Antecedentes del problema

En el mundo, grandes cantidades de sulfuros provenientes de la explotación minera con características refractarias y/o con iones, en su estructura cristalina, nocivos al medio ambiente y a la salud humana, han sido acumulados en el tiempo. Dichos sulfuros presentan contenidos de oro relevantes en la mayoría de los casos, el tratamiento de estos materiales no es factible por métodos convencionales, lo cual incrementa el costo de la recuperación de los valores metálicos presentes. Es así como, en las últimas décadas, la bio hidrometalurgia, se ha convertido en una tecnología comercialmente viable para la extracción de metales preciosos. Además, es bien conocida por su utilización en la biorremediación, residuos industriales, degradación de cianuro, biodesulfuración de carbones y adecuación de concentrados para separación por flotación espumante. En este trabajo se presenta el principal fundamento de la oxidación bacteriana de la

arsenopirita.

1.1.2 Problemática de la investigación

La actual tecnología utilizada en la producción de cobre blister es muy similar en la gran mayoría de las fundiciones del mundo, una importante fracción de los costos del mantenimiento de los reactores pirometalúrgicos de fusión de cobre, tales como los hornos y convertidores CT y CPS, proviene del reemplazo de los ladrillos refractarios, particularmente en sus zonas críticas de mayor desgaste. Lo anterior es el problema y la justificación del estudio continuo de las características físicas, químicas y mecánicas de estos materiales. Además, en forma complementaria se requiere ver los métodos de mantención de estos reactores pirometalúrgicos, en cuanto al reemplazo de los refractarios. Particularmente, se avanza en la caracterización de los diferentes tipos de fallas asociadas con choque térmico, erosión, abrasión, escorificación. Además, se cubren los métodos alternativos y complementarios de mantenimiento usados comúnmente para optimizar los procesos de fusión, aumentando los periodos de sus campañas operacionales, asociados a la reducción del desgaste en las zonas críticas.

1.2 Formulación del problema

En el Perú se encuentran muchos yacimientos mineros polimetálicos acompañados de minerales de oro y plata, donde en algunos casos el mayor componente es el cuarzo en los cuales el oro y plata se encuentran finamente diseminados, y son explotados en diferentes lugares del país. Debido a que a lo largo y ancho del país existe mucha actividad que se dedica a la pequeña y mediana minería, que en gran parte procesan su mineral en plantas convencionales propios de la zona, realizando procesos no adecuados obteniéndose bajas recuperaciones en oro y plata, no resultando rentable el proceso de extracción. Por lo cual, varios yacimientos mineros con contenidos apreciables de oro y plata se encuentran en espera de un proceso metalúrgico apropiado. Los minerales de oro y plata, acompañados de minerales sulfurados como la pirita donde el mayor componente es el cuarzo, en la mayoría de los casos presentan resistencia a la recuperación del metal valioso, debido a que los elementos se encuentran encapsulados dentro de la estructura del mineral. Esto requiere una mayor liberación para obtener una buena recuperación pues en algunos casos existe oro libre que está fuertemente diseminado, por lo que se requiere un proceso de pre concentración o pre tratamiento, previo al proceso convencional, que permita extraer el oro encapsulado. Es conveniente desarrollar procesos alternativos

de solución como el uso de pre tratamientos o pre concentraciones, que permiten incrementar su rentabilidad.

1.3 Justificación e importancia

Una cantidad significativa de oro puede estar íntimamente asociada con sulfuros y/o arseniuros, por lo cual recibe el nombre de mineral refractario. La mayoría de las veces, la cianuración de estos minerales requiere largos periodos de lixiviación y, desafortunadamente, bajas recuperaciones de oro.

Los concentrados refractarios de oro también son sometidos a tratamientos piroquímicos de tostación, calcinación y fusión para lograr la oxidación y reducción de sus componentes, acarreando problemas de baja recuperación, prolongados periodos de tratamiento, contaminación al medio ambiente, alto consumo de reactivos, alto costo operativo; entre otros.

El conocimiento del uso de otras tecnologías para el tratamiento de los llamados concentrados refractarios nos ayudará a reducir y/o a minimizar dichos problemas.

Dentro de las tecnologías que se pueden usar como pre tratamientos a la cianuración y fundición, se encuentra la tostación, la lixiviación ácida básica, disolución en autoclave, electro oxidación, ultrasonido y la biolixiviación. Dichas tecnologías de una u otra manera facilitan la conversión de los compuestos presentes que acompaña al oro en las especies refractarias, de manera que faciliten la liberación de las partículas metálicas de oro; para luego, entrar en contacto íntimo con la solución cianurada y/o ser colectado en un lecho de fusión.

Razón por la cual, este trabajo de investigación tiene como objetivo facilitar el conocimiento de las tecnologías para el tratamiento adecuado de relaves y materiales que aún tiene contenidos apreciables de oro. Asimismo, busca la mitigación de la contaminación ambiental.

1.4 Alcances y limitaciones

El fin fundamental consiste básicamente en la recuperación de oro a partir de relaves piriticos que contienen oro en su estructura, los resultados de este estudio incentivara a la pequeña y mediana minería a considerar como alternativa estas pruebas de gran éxito para su aplicación, así lograr una actividad económica de la pequeña minería. En estos estudios no se puede

hablar de limitaciones ya que existen mucha tecnología en el mundo, solo hay que hacer lo correcto, lo apropiado para la pequeña minería dedicada a la extracción del mineral aurífero, para evitar la contaminación del medio ambiente.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivos general

El objetivo del presente trabajo de investigación es el estudio de procesos adecuados para el tratamiento de relaves de piratas auríferas, considerando mejorar la recuperación del oro.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el proceso de cianuración después de pre tratamiento bacterial con *Thiobacillus ferrooxidans* y *thiooxidans*.
2. Estudiar la cinética de consumo de cianuro y disolución del oro del relave.
3. Evaluar los relaves mediante el proceso de cianuración directa.
4. Evaluar los relaves mediante proceso de flotación.

1.6 Hipótesis

Es posible mejorar la recuperación de oro, si se emplea diferentes procesos metalúrgicos a los relaves de piratas auríferas, como la cianuración directa, biolixiviación o flotación para mejorar la recuperación del oro.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.3. Antecedentes del estudio

2.4. Bases teóricas

2.2.1 Generalidades

En todos los tiempos, el oro ha concitado el interés humano porque este metal ha sido empleado principalmente con fines monetarios o decorativos. Su rareza e inalterabilidad han hecho un símbolo de riqueza y poder.

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

FÍSICAS

Es maleable y dúctil, es blando, su dureza es 3, la gravedad específica es 19,3, su símbolo es Au, su número atómico es 79, su peso atómico es 197,2, su punto de fusión es 1336 °K, su punto de ebullición es 3243 °K y se cristaliza en el sistema cúbico.

Es un metal amarillo brillante por la luz reflejada. Es el más maleable y dúctil de todos los metales. En estado puro es demasiado blando para ser usado en joyería y para acuñar monedas por lo que se alea siempre para tales fines con la plata o cobre. Su punto de fusión es de 1336 °K y el de volatilización 2873 °K.

El número y peso atómicos son 79 y 197,0 respectivamente. La densidad del oro es de 19,42 g/mL. Es más liviano a medida que contiene mayor proporción de plata. Cristaliza en el sistema cúbico. Su ductilidad es grandemente disminuida por la presencia de pequeñas cantidades de otras impurezas especialmente de plomo. A elevadas temperaturas se volatiliza como vapor rojizo. La volatilidad es incrementada por la presencia de metales extraños.

La conductividad térmica del oro es de 103 según Depretz, 98 según Calvet y Johnson y 60 según Wiedeman y Franz. El calor específico está entre 0,0298 (Dulong y Petit) y 0,03244 (Regnaut). Su conductividad eléctrica es 73 a 567,95 °K (Matthiesen) en comparación con la plata que tiene un valor de 100 a la temperatura de 273 °K.

El oro se alea con la plata, cobre, paladio y otros metales. La cantidad en estas aleaciones se expresa generalmente en quilates. El oro puro es de 24 quilates. Las monedas de oro inglesas son de 22 quilates (91,66 % de oro). Y las norteamericanas de 21,6 quilates (90 % de oro y 10 % de cobre).

Tabla 1

Propiedades físicas del oro.

PROPIEDADES FÍSICAS	VALORES
Tenacidad	Muy maleable y dúctil
Brillo	Metálico amarillo
Color de la raya	Amarillo brillante
Punto de fusión	1609,15 °K
Punto de ebullición	3129 °K
Peso atómico	197,2
Nº atómico	79
Densidad	19,3 g/mL
Conductividad térmica	103 cal/cm.s.°C
Conductividad eléctrica	73 ohmios ⁻¹ cm ⁻¹
Cristales	Octaédricos

Fuente: **Patricio Navarro Donoso, 2006**

QUÍMICAS

El oro es fácilmente soluble en agua regia, que produce cloro nascente. Entonces se disuelve en una mezcla de ácido nítrico y clorhídrico concentrado (agua regia) y en ácido selénico. También en

soluciones de ácido sulfúrico que contienen cloruros y bióxido de manganeso y en tiosulfatos de sodio, potasio, calcio y magnesio.

El oro disuelve en ácido clorhídrico en presencia de sustancias orgánicas. El oro es disuelto por cloruros férricos u cúpricos.

El oro es algo soluble en una solución de carbonato de sodio al 10 %. El oro es soluble en soluciones cianuradas.

Ninguno de los ácidos corrientes ataca el oro. No es soluble en ácido sulfúrico, sulfato férrico, ácido clorhídrico o cloruro férrico.

Las soluciones que llevan oro al estado de cloruro atacan a los carbonatos, calcosina y muchos otros minerales que reducen la acidez y pasando hacia abajo el oro es generalmente depositado como oro amarillo de gran pureza.

El oro no se oxida a la temperatura ordinaria ni al color rojo.

Tabla 2

Propiedades químicas del oro.

PROPIEDADES QUÍMICAS
El oro se disuelve en ácido clorhídrico en presencia de sustancias orgánicas.
El oro es fácilmente soluble en agua regia que produce cloro nascente.
El oro es soluble en soluciones cianuradas.
El oro es algo soluble en una solución de carbonato de sodio al 10 %.
El oro es disuelto por cloruros férricos u cúpricos.

Fuente: **Patricio Navarro Donoso, 2006**

2.2.2 Mineralogía del oro.

El oro es un metal inactivo, por lo que se encuentra en su mayor parte en estado natural. En ocasiones se encuentra como telururo de oro. Debido a su alta densidad, el oro metálico puede concentrarse en charolas. En esta operación, la arena y la grava que contienen oro se agitan con agua en una charola. Las partículas más ligeras se derraman y las densas pepas de oro permanecen en el fondo. El oro se concentra filtrando grava molida en una corriente de agua sobre una mesa de agitación ligeramente inclinada que contiene diversas barreras bajas. Estas impiden el descenso de las partículas de oro más pesadas, pero permiten el paso de las partículas más ligeras. A continuación, se

forma una aleación de oro con mercurio y se retira. En la etapa posterior se destila el mercurio dejando atrás el oro puro.

Existen diversas clasificaciones de los yacimientos de oro, pero en general están agrupados en dos grandes tipos:

Depósitos primarios o filonianos (vetas y/o filones).

Durante varias décadas el estudio del origen de los depósitos minerales ha ocupado un campo de las investigaciones geológicas y mineras, en especial las mineralizaciones auríferas correspondientes a los denominados depósitos de oro mesotermal, también conocidos como venas de cuarzo y oro, “Mother Lode”, Filones de oro arcaico.

Estos depósitos se encuentran presentes en diferentes litologías con edades desde el Precámbrico hasta el Mesozoico, emplazados en un amplio rango de profundidades. Con base a esto el término “mesotermal” no es aplicable en su totalidad, siendo su vinculación más acorde con las orogenias, por lo cual, es más conveniente denominarlos depósitos de oro orogénico. Se caracterizan por sistemas hidrotermales que representan un fluido regional inherente a un tectonismo a lo largo de márgenes convergentes, que a diferencia de

otros sistemas béticos de oro como el epitermal de baja sulfuración y son de sistemas extensivos locales, asociados con aguas magmáticas y meteóricas.

Las ocurrencias minerales son filones en rocas competentes y lentes en litologías menos competentes. Aparecen típicamente como un sistema de venas en “echelon”, caracterizadas por estilos de mineralización de bajo tonelaje y relacionadas con amplias áreas de fracturamiento con oro y sulfuros asociados a redes de lentes de cuarzo. Ver Tabla 3 y 4, los principales minerales portadores de oro y minerales asociados al oro respectivamente.

TABLA 3

Principales minerales portadores de oro

Mineral	Composición	Contenido en Oro
Oro natural	Au	Más de 75 %
Electrum	Au, Ag	45-75 %
Calaverita	Au ₂ Te	44 %
Krenerita	4AuAg10Te	31-41 %.
Silvanita	AuAg ₂ Te	19-25 %

Fuente: A. Guevara, 2006

Depósitos secundarios o aluviales (diseminados).

a. Los placeres eluviales son aquellos que se desarrollan a partir de un área enriquecida o pre-enriquecida junto con un componente ambiental de tipo climático. En ellos predominan los fenómenos químicos sobre los físicos con lo que sus efectos resultantes tienen un carácter netamente residual. Si el material disgregado, caso de un depósito eluvial, sufre un desplazamiento gravitacional, acumulándose en algunos puntos de una ladera, dará lugar a un tipo de placer denominado diluvial. El origen de estos placeres tendrá una componente química (eluvial) y una componente física (transporte y en parte clasificación).

b. Si las acumulaciones se sitúan al pié de la pendiente los placeres formados se les denomina de tipo pro-aluviales y en ellos la componente física (transporte y clasificación) es superior a la componente química.

c. Cuando las acumulaciones, o parte de ellas de los placeres eluviales, diluviales y/o pro-aluviales, son removilizadas, transportadas y clasificadas por las aguas, y depositadas en los ríos (lecho vivo), en sus márgenes y/o en sus terrazas, los placeres resultantes se denominarán aluviales.

d. Cuando la acción la producen los hielos a estos placeres se les denominarán morrénicos y fluvioglaciares cuando la componente sea mixta. En dichos placeres la componente física es la predominante.

2.2.3 Factores que afectan la recuperación de oro

Los factores que afectan la recuperación de oro tienen naturaleza mineralógica e incluyen:

- ✚ El tipo del mineral aurífero.
- ✚ El tamaño de partícula que posee.
- ✚ Los minerales con los que se encuentra asociado.
- ✚ La distribución en el mineral que lo contiene.

A continuación se analiza cada uno de estos factores.

Tipo de mineral aurífero

El oro aparece principalmente en forma de metal nativo que puede contener hasta un 5 % de plata, o como electrum, con contenidos de plata que van del 18-36 %, se puede considerar que el 80 % de los yacimientos auríferos se encuentran en esta categoría. El 20 % restante lo constituyen los teluros de oro y minerales menos

frecuentes, ver Tabla 4.

Tabla 4

Minerales auríferos

MINERAL	FÓRMULA	CONTENIDO Au (%)	GRAVEDAD ESPECÍFICA
Oro nativo	Au	> 75	16 -19,3
Electrum	(Au-Ag)	45 -75	13 -16
Calaverita	AuTe ₂	39,2 - 42,8	9,2
Silvanita	AuAgTe ₄	24,2 - 29,9	8,2
Petzita	Ag ₃ Au Te ₂	19 - 25,2	9,1
Hessita	Ag ₂ te	< 4,7	8,4
Kostuvita	CuAuTe ₄	25,2	8,5
Aurostivita	AuSb ₂	43,5 - 50,9	9,9

Fuente: C. Gasparini, 1993, Gold and Other Precious Metals

Tamaño de partículas de oro

Se encuentra oro en una variedad de tamaños que van desde granos y venas fácilmente visibles (varios milímetros), a partículas de fracciones de micrómetros, vistos con la ayuda de la microscopía electrónica (scanning electron microscope, SEM). El oro se ha reportado también como soluciones sólidas de sustitución, como se ha mencionado anteriormente.

Varios yacimientos de oro nativo registran tamaños de grano

que van desde algunas micras hasta alrededor de 50 micrones, mientras que en “placeros auríferos” se encuentran especímenes que miden varios milímetros (Ver Figura 1: a y b). Se han reportado además especímenes espectaculares que incluyen “pepitas”, grandes cristales e inclusive incrustaciones dendríticas.

El oro se encuentra libre en placeros auríferos, mientras que en el resto de yacimientos es necesario efectuar procesos de reducción de tamaño para lograr liberar a las partículas del metal precioso y exponerlas a los tratamientos hidrometalúrgicos de recuperación. Es importante señalar qué procesos de molienda fina pueden alcanzar un máximo de alrededor de 15 micras de tamaño, por tanto partículas de oro inferiores a este tamaño no podrán ser liberadas.

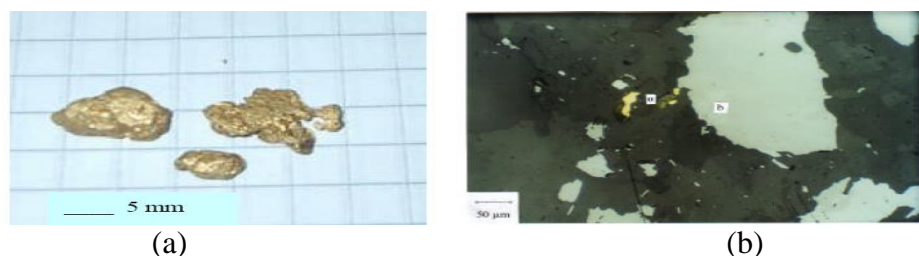


Figura 1. Oro en diferente rango de granulometría: (a) Oro nativo de placer aurífero, (b) Oro microscópico observado a luz reflejada.
Fuente: A. Guevara, 2006.

En la práctica se denomina oro grueso a las partículas de oro que son susceptibles de liberación y extracción, y se denomina oro fino a

las partículas de tamaño inferior a los 20 micrones, que requieren procesos especiales de tratamiento para la extracción del metal precioso.

El proceso metalúrgico empleado para la extracción de oro dependerá en gran medida de su tamaño de partícula. En procesos lixiviación se debe considerar que la disolución de oro es relativamente lenta, de este modo una partícula de oro de 45 micras se demoraría aproximadamente 13 horas en disolverse totalmente.

Minerales asociados al oro

El oro se asocia con mayor frecuencia con gangas cuarcíferas asociadas a su vez a sulfuros como la pirita, la arsenopirita y la calcopirita que es una asociación frecuente de sulfuros. El oro se puede asociar adicionalmente a sulfosales, óxidos, silicatos carbonatos, sulfatos, carbón y minerales de uranio.

Asociación oro-pirita: La pirita es el más común de los sulfuros, y es el mineral al que se asocia el oro con mayor frecuencia. Esta asociación puede ser en forma de oro nativo o electrum presente en un amplio rango de granulometría, que va desde granos fácilmente

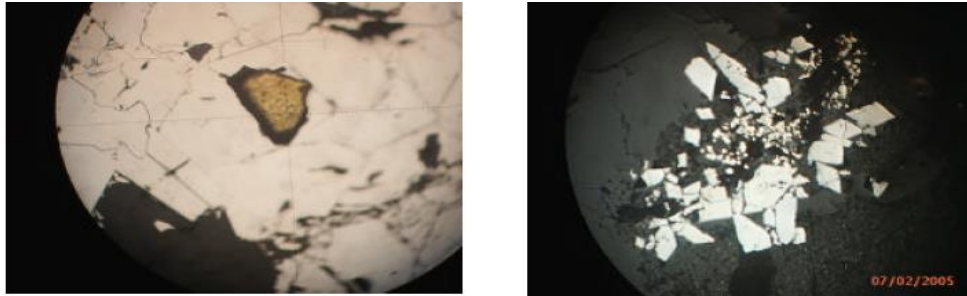
visibles (Figura 1: a) hasta fracciones de micras, (Figura 2), e incluso formando soluciones sólidas. Así por ejemplo se ha encontrado 0,2 ppm de oro en solución sólida con la pirita.



Figura 2. Grano de oro de 4 micras asociado a pirita

Fuente: A. Guevara, 2006.

Asociación oro-arsenopirita: La arsenopirita es un mineral que se asocia al oro con frecuencia, probablemente es el segundo sulfuro después de la pirita. Las asociaciones encontradas son similares a las que suceden en el caso de la pirita, con un amplio rango de granulometría (ver Figura 3: a y b), y de igual manera se han encontrado soluciones sólidas por reemplazamiento de oro en la estructura cristalina del arsénico, llegando incluso a concentraciones de 158 ppm de oro en solución sólida con la arsenopirita.



(a)

(b)

Figura 3. Oro asociado a arsenopirita: (a) Oro nativo encerrado en arsenopirita masiva, (b) Oro submicroscópico encerrado en cristales de arsenopirita

Fuente: A. Guevara, 2006.

Asociación oro-calcopirita: Esta asociación se encuentra en depósitos porfíricos de cobre y depende principalmente de la textura de dicho depósito. El oro puede encontrarse asociado a minerales secundarios de cobre como bornita, chalcocita, covelita, digenita, djurleta, azurita y malaquita, especialmente en zonas de fractura.

Asociaciones pirita-calcopirita-oro: Son más frecuentes, aquí el oro se ubica en los límites de granos de pirita o calcopirita o está totalmente encerrado en esta estructura en forma de finas partículas.

Asociación de oro y otros sulfuros o sulfosales: El oro puede estar asociado a la pirrotina, galena, esfalerita, sulfuros de níquel,

arseniuros o sulfoarseniuros, antimonio y antimonio-arsénico-bismuto-plomo y sulfosales, con asociaciones semejantes a las que presenta en el caso de la asociación con la pirita.

Asociación oro-óxidos de hierro: La asociación de oro con magnetita, hematita y óxidos secundarios de hierro como goetita y limonita, es relativamente común en ambientes oxidantes, la forma de asociación es variada, encontrándose incluso granos de oro recubiertos de finas capas de óxido secundarios de hierro.

Asociación oro-minerales de uranio: Esta asociación es más común de lo que se cree, en este caso los granos de oro están completamente encerrados en minerales de uranio, o a su vez o ubicado en los bordes de dichos minerales que están asociados a gangas cuarcíferas.

Asociación oro-silicatos y carbonatos: El cuarzo al igual que la pirita son minerales asociados con mayor frecuencia al oro. El metal precioso puede distribuirse en los límites de granos o encerrado en la ganga cuarcífera. Si además de la ganga silícica se encuentran óxidos o sulfuros en el mineral, el oro se encontrará ubicado preferencialmente cerca a estos grupos.

En el caso de los filosilicatos (moscovita, biotita, clorita) el oro se puede ubicar entre las capas del mineral en forma de venas. Se ha encontrado adicionalmente oro asociado a baritina y también oro directamente asociado a arcillas, en tamaños similares al de las arcillas o prácticamente invisible.

Asociación oro-material carbonaceo: El oro se ha encontrado finamente diseminado en el grafito y otros yacimientos minerales ricos en carbón.

Asociación oro-arena y grava (placeres auríferos): El oro aparece en sedimentos de variable mineralogía y composición, puede estar junto a la ilmenita, el rutilo, la monacita, casiterita, óxidos de hierro, estauroлита, minerales del grupo del platino, etc.

Se puede presentar en forma de granos masivos e irregulares y ocasionalmente como “pepitas” de gran tamaño dispuestas a través de la arena, los principales placeres auríferos son los siguientes:

- ***Placeres jóvenes:*** Están compuestos primeramente por areniscas y

grava no consolidada o semi-consolidada con bajos contenidos de oro nativo y otros minerales pesados. Algunos están en los cauces actuales de los ríos, bancos y terrazas de ríos pre-existentes.

- *Placeres antiguos:* Son aquellos que han sido latificados o conglomerados, estos conglomerados consisten en fragmentos bien redondeados de cuarzo dentro de una matriz de pirita y minerales micaceos, contienen minerales pesados y resistentes como oro-uraninita y metales del grupo del platino.
- *Placeres marinos:* Se sabe de sedimentos del fondo marino de varias partes del mundo que tienen cantidades pequeñas de oro, pero no han sido explotados todavía. Sin embargo, se tiene información de la producción de oro como subproducto de la extracción del estaño en Malasia.

Distribución en el mineral que lo contiene

Se han reportado varias formas en las que el oro se distribuye dentro del mineral que lo contiene, a continuación se señalan las más usuales:

- Oro distribuido en las fracturas o entre los bordes de granos del mismo mineral, granos de oro rellenan los espacios a lo largo de zonas de fractura en rocas volcánicas y sedimentarias que han

sufrido metamorfismo (ver Figura 4). El contenido de oro en las menas explotadas de este tipo está en el orden de 4 – 10 g/t.

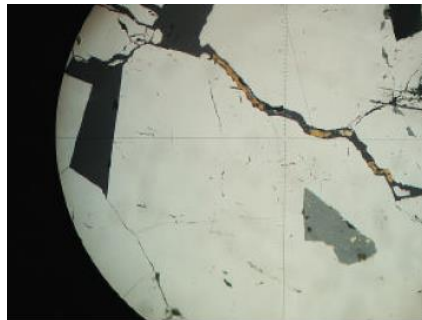


Figura 4. Oro ubicado en fracturas.

Fuente: A. Guevara, 2006.

- Oro distribuido en los bordes de granos de dos diferentes minerales, por ejemplo dos sulfuros, un sulfuro y un silicato, o un sulfuro y un óxido, en este caso la extracción de oro no es fácil, generalmente se requieren procesos de molienda fina.

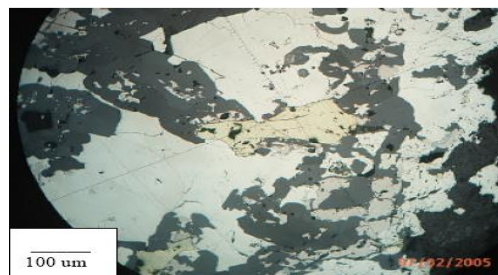


Figura 5. Oro ubicado en bordes de granos

Fuente: A. Guevara, 2006.

- Oro totalmente encapsulado o diseminado en minerales portadores, que no permite la recuperación de oro ni con proceso de molienda ultra fina, en este caso se requieren otro tipo de procesos metalúrgicos previos. En este tipo de yacimientos las rocas asociadas son calizas dolomíticas y carbonosas, en donde el oro se encuentra diseminado en granos muy pequeños (0,01-10 micrones). El oro está acompañado por sílice, granos de pirita y otros sulfuros, la ley está en el orden de 5 g/t.

En la Tabla 5 se observa diferentes tamaños oro en minerales, en la Tabla 6 muestra los tratamientos más empleados para diferentes tipos de minerales refractarios.

Tabla 5

Clasificación de los diferentes tamaños oro en minerales

TAMAÑO (MALLA ASTM)	MEDIDA
Malla 10	Grueso
Malla 10 a 20	Mediano
Malla 20 a 40	Fino
Malla menos de 40 (0,425 mm)	Harina

Fuente: Apuntes concentración de minerales I, Dr. Ing. O. PAVEZ

Tabla 6

Tipos de minerales y tratamientos convencionales.

TIPO DE MINERAL	TRATAMIENTO
1) Oro libre	Concentración gravimétrica, cianuración
2) Oro con sulfuros	Flotación, reacción con cal, tostación, calcinación y cianuración
3) Oro con minerales de arsénico y antimonio.	Flotación, tostación, lixiviación y cianuración.
4) Oro en telururos	Flotación, tostación u oxidación química, y cianuración
5) Oro en pórfidos de cobre	Fusión para el cobre, Oro en barras anódicas
6) Oro con minerales de plomo y cinc	Flotación en escorias o residuos de la electrolisis del cinc. Cianuración de residuos de flotación
7) Minerales carbonáceos	Oxidación, flotación, tratamiento superficial antes de la cianuración

Fuente: Linge, Review of Gold Extraction from Ores, Minerals Engineering

2.2.4 Flotación de piritas auríferas

Este método de concentración se basa en que las partículas de oro asociadas a otras partículas de diversos sulfuros tienden a flotar dada las propiedades hidrofóbicas de estos últimos. Se aplica casi en su totalidad a los minerales de oro provenientes de vetas o filones ya que allí es frecuente su asociación con sulfuros tales como Pirita, Arsenopirita, Chalcopirita, Galena, Blenda, Argentita, Esfalerita, etc.

A menudo la pre-concentración por gravimetría y/o flotación preceden el tratamiento de un mineral de oro refractario. Los tipos más comunes de refracteriedad se deben al oro fino adherido o encapsulado en arsenopirita, pirita u otros sulfuros, ver Tabla 7.

Tabla 7

Principales minerales asociados al oro.

Mineral	Composición
Pirita	FeS ₂
Arsenopirita	FeAsS
Chalcopyrita	CuFeS ₂
Galena	PbS
Esfalerita	ZnS

Fuente: A. Guevara, 2006

Cuando el oro está atrapado o asociado con sulfuros, se deben considerar seriamente la concentración de sulfuros por flotación. Después de separar los sulfuros gruesos de la descarga de los ciclones por concentración gravimétrica, se requiere una molienda fina, como regla general, para la liberación completa del oro contenido en los minerales sulfurosos. Corporaciones Mineras ha reportado hasta 90 % -325 mallas en el rebalse del ciclón, lo cual se alimenta a flotación.

La pirita tiene propiedades similares a la arsenopirita y las condiciones de flotación también son similares. Por esta razón no es posible obtener una buena separación de estos dos minerales. Comúnmente se usan reactivos para acondicionamiento, especialmente con menas parcialmente oxidadas. La alcalinidad de la pulpa se regula con soda cáustica, ya que la cal actúa como un depresor del oro libre e inhibe la flotación de la pirita. El sulfato de cobre puede ser útil para acelerar la flotación de la pirita. El concentrado rougher a menudo necesita remolienda antes de la limpieza. La flotación de menas refractarias de oro debe ser diseñada para alcanzar altas recuperaciones de oro si es necesario incluir con un concentrado relativamente bajo en ley.

Las recuperaciones en flotación varían entre 90 a 95 %, con algo de oro remanente en las colas no sulfurosas se puede recuperar por lixiviación con cianuro y es prudente chequear y estimar los costos de tal recuperación (secundaria).

En una operación, con contenidos de 1,5 % de pirita (conteniendo virtualmente todo el oro y la plata) es tratada por flotación. El concentrado de limpieza llega a 25 % FeS, con un 99 %

de recuperación de pirita. La flotación se la hace a pH natural (6,5-7,5), con xantato isopropilico de sodio como colector primario, Aerofroth 76 como espumante y Aerofloat 208 como colector secundario. Los concentrados rougher-scavenger son combinados y limpiados en un solo banco de celdas de 1,7 m³. Las colas de limpieza son recirculadas al comienzo de la flotación rougher.

La mayoría de las causas de la refractariedad pueden ser eliminadas por un tratamiento de oxidación. En la práctica, las menas refractarias se someten, como regla, a algún tratamiento de oxidación antes de la cianuración.

2.2.5 Proceso de biolixiviación

El término refractario se aplica a minerales o relaves auríferos que no permiten obtener valores rentables de recuperación de oro por el método usual de cianuración. En términos cuantitativos un mineral aurífero se considera refractario cuando la recuperación de oro es menor al 80 % empleando procesos de cianuración convencional, aún después de molienda ultra fina.

Minerales refractarios son de origen hidrotermal y son depositados por las soluciones acuosas calientes obtenidas de una fuente externa como una intrusión volcánica. Las soluciones hidrotermales también pueden llevar varios componentes minerales disueltos como sulfuros, telurios y arseniuros. Estos minerales asociados generalmente que el mineral de oro no susceptible a la extracción por los métodos convencionales. El término refractario así se aplica cuando una proporción significativa del oro no puede ser recuperada por concentración de gravedad convencional o directa cianuración incluso después de moler fino.

La naturaleza del oro con minerales y los minerales de la ganga presente son los dos principales factores mineralógicos que determinan la refractariedad de minerales de oro.

Otros minerales de oro que causan refractariedad incluyen sulfuros, silicatos, materia carbonosa y compuestos de bismuto. La oclusión y la inclusión de partículas de oro coloidales o bien en la matriz de estos minerales causan refractariedad física ya que esta asociación hace imposible liberar completamente oro por medios mecánicos.

Refractariedad de minerales es causada por reaccionar, agotan el cianuro libre y disuelto de oxígeno necesario para la disolución de oro o mediante la adsorción de oro de la solución. Estos minerales también pueden apaciguar la superficie evitando contacto con la solución de cianuro de oro. Basado en el grado de refractariedad, Lingé (1991) sugirió la clasificación en la Tabla 7.

2.2.5.1 Biolixiviación

Los microorganismos que participan en procesos de biolixiviación son bacterias ácidofilas, por su capacidad de generar ambientes ácidos (pH menores a 3) por la producción de ácido sulfúrico. Además, son capaces de oxidar compuestos inorgánicos como azufre y/o hierro ferroso, siendo esta una de las principales razones para que los minerales se conviertan en recursos energéticos para ellas. Las bacterias comúnmente usadas pertenecen al género *Acidithiobacillus* (anteriormente *Thiobacillus*). Dentro de este grupo se encuentran las bacterias mesófilas que viven a temperaturas que oscilan entre los 293,15-303,15 °K,

obtienen su fuente de energía del hierro y/o azufre, *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*. Éstas con las moderadamente termófilas (303,15-318,15 °K) como *At. Calvus*, pertenecen a las Gram-negativas y σ -proteo bacterias. También se encuentran bacterias pertenecientes a las Gram-positivas como las moderadamente termófilas. O del género *Leptospirillum*, *Acidimicrobium*, *Ferromicrobium* y *Sulbocacillus* y las termófilas *Sulfolobus*, *Archeabacteria*, *Metallosphera* entre otras. En general, todas estas bacterias tienen un espectro limitado, es decir, pueden crecer sólo en condiciones aeróbicas oxidantes del hierro ferroso en contraste con *Acidithiobacillus ferrooxidans* que está dotado con una amplia capacidad metabólica siendo capaz de obtener su energía de compuestos reducidos del azufre, además, de tener la habilidad de oxidar hidrógeno molecular, ácido fórmico, hierro ferroso y otros iones metálicos.

Acidithiobacillus ferrooxidans

Son las bacterias más ampliamente estudiadas en procesos de biolixiviación. Fue aislada por Colmer y Hinkle

(1947) de drenajes ácidos en minas de carbón. Son bacterias no patógenas, Gram-negativas que no forma esporulación, tiene forma de bastón y tamaño promedio de 0,5 a 0,6 μm de ancho y 1 a 2 μm de largo, con extremos redondeados. Ocurren por separado o en parejas, muy rara vez en cadenas cortas. Son autotróficas, obtienen su fuente de carbono para la síntesis celular del dióxido de carbono atmosférico, además, requieren nitrógeno (como amonio), azufre (como sulfato o compuestos reducidos de él) y fósforo (fosfatos), junto con trazas de metales como: hierro, potasio, magnesio, sodio, calcio y cobalto. Son quimiolitotróficas, es decir, obtienen la energía necesaria para su crecimiento de la oxidación de hierro ferroso y compuestos reducidos del azufre, utilizando el oxígeno como último aceptor de electrones. Son bacterias mesófilas, crecen en condiciones de temperatura entre 301 y 306 °K, dependiendo de la concentración de hierro disuelto y el pH. Posee un pH óptimo de crecimiento entre 2,0 y 2,5, en la oxidación de sulfato ferroso, sin embargo, cuando oxida compuestos de azufre, puede mantener altas actividades a pH superiores a 4.

El *T. ferrooxidans* prolifera, en cuestión de horas, dividiéndose en dos bastoncillos idénticos. Estos, a su vez, aumentan de tamaño y vuelven a dividirse y así continúa la proliferación en forma exponencial. Normalmente, en un sistema en actividad, las poblaciones bacterianas alcanzan cifras de 10^9 a 10^{10} por mililitro de pulpa.

Generalmente, estas bacterias trabajan en ambientes de calor y acidez tan hostiles que no se produce contaminación por otros organismos.

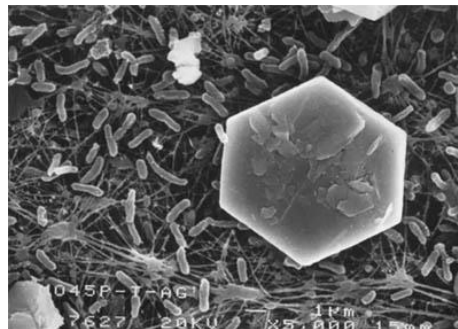


Figura 6. Células de *Acidothiobacillus ferrooxidans* visto con microscopio electrónico de transmisión. Escala 500 nm

Fuente: Journal of Bacteriology

Acidithiobacillus thiooxidans

Morfológicamente tiene las mismas características que

Acidithiobacillus ferrooxidans. También posee capacidad para oxidar azufre elemental y compuestos reducidos del azufre, sin embargo, no es capaz de oxidar hierro ferroso, el cual se cree es el responsable de la rápida disolución de sulfuros metálicos. Por esta razón la acción de *Acidithiobacillus thiooxidans* en procesos de biolixiviación ha sido estudiada parcialmente. *Acidithiobacillus thiooxidans* es mucho más efectivo para la oxidación de azufre elemental que *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Se caracteriza por alcanzar altos niveles de acidez, pH ~0,5. Su temperatura óptima de crecimiento es muy similar a la *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

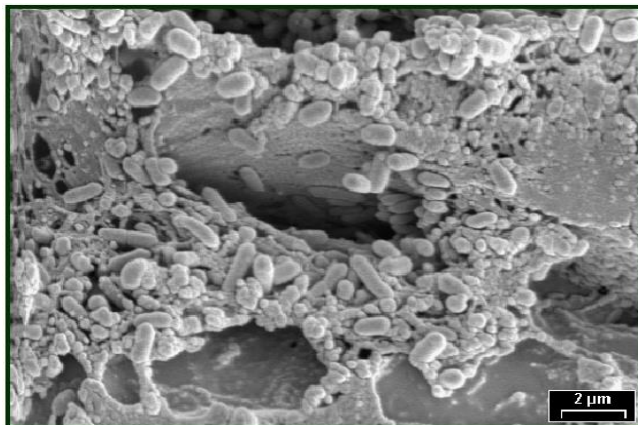


Figura 7. Células de *Acidithiobacillus thiooxidans*

Fuente: Journal of Bacteriology.

2.2.5.2 Microorganismos en la biooxidación

La pirita (FeS_2) es el sulfuro de mayor abundancia sobre la superficie terrestre y su reactividad es de gran importancia para el entendimiento de procesos como drenajes ácidos de minería, desulfurización de carbones y recuperación de oro.

Los microorganismos comúnmente presentes en este tipo de ambientes son acidófilos, viven en ambientes cuya acidez puede bajar hasta $\text{pH} < 1$, mesófilos, se presentan en intervalos de temperatura entre los $293 \text{ }^\circ\text{K}$ y $303 \text{ }^\circ\text{K}$ y quimiolitótrofos, los cuales derivan la energía para llevar a cabo sus procesos metabólicos de la oxidación de compuestos reducidos del azufre y/o del ion ferroso, como *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*.

La exposición de éste tipo de microorganismos a ambientes ricos en sulfuros metálicos resulta en la disminución o inhibición de la actividad de éstos, las razones

para esto han sido diversas, reducción de la cantidad de oxígeno disuelto, daño a la pared celular como resultado de la fricción entre las partículas minerales y los microorganismos y al efecto nocivo de los iones metálicos como el As^{3+} , As^{5+} y Fe^{3+} , entre otros. Sin embargo, microorganismos como *Acidithiobacillus ferrooxidans* pueden ser adaptados para incrementar su tolerancia a estos ambientes y disminuir los efectos inhibitorios sobre los microorganismos.

Uno de los factores principales a tener en cuenta en procesos de biooxidación son las altas concentraciones de arsénico provenientes de la disolución de la arsenopirita y, en menor cantidad, la pirita, responsables en gran medida de la disminución de la actividad bacteriana debido a la interferencia en el proceso de formación de ATP por la formación de un complejo ADP-arsénico inestable, generando la inhibición en la velocidad de crecimiento.

Tuovinen et al., (1971) encontraron que el arsénico es tóxico entre 50 y 100 mg l^{-1} para *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Braddock et al., (1984) determinaron que el

As³⁺ no puede ser oxidado, por estas bacterias, hasta As⁵⁺ y en etapas sucesivas de crecimiento con concentraciones entre 1,33 y 2,67 mM de As³⁺ no se observó variaciones en las velocidades de crecimiento. Collinet & Morin (1990) determinaron que la velocidad de crecimiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans* se ve inhibida a concentraciones de 5 g.L⁻¹ de As³⁺ y 40 g.L⁻¹ de As⁵⁺.

Das et al., (1998) en un proceso de adaptación permitieron que *Acidithiobacillus ferrooxidans* continuara utilizando energía del ciclo de oxidación del hierro ferroso a férrico mientras se incrementaba la concentración de iones metálicos pesados en solución. De esta manera, durante la fase lag encontrada en sus experimentos, los microorganismos se adaptaban a este ambiente. La metodología comúnmente empleada en los procesos de adaptación, a la presencia de iones metálicos pesados, de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans* consiste en una serie de cultivos sucesivos en los cuales los microorganismos son crecidos progresivamente,

incrementándose la concentración de iones metálicos pesados en el medio. El principal inconveniente de esta metodología es que no se sigue un protocolo determinado, siendo necesario periodos de adaptación de hasta años en algunos casos. Las densidades de pulpa, también juegan un papel importante en el proceso de adaptación de microorganismos, mesófilos, puros o en consorcios, aunque algunos investigadores no han testado este parámetro en sus experimentos. Los intervalos pueden variar desde 1 hasta 5 % P/V (Zhen et al., 2009).

Otro punto importante es determinar cuándo los microorganismos están adaptados a una determinada densidad de pulpa o concentración de iones metálicos pesados. En los trabajos antes mencionados el criterio empleado para esto fue la velocidad de oxidación del hierro ferroso, cuando éste alcanzaba valores aproximados a los obtenidos en medios de cultivo libres de iones metálicos pesados, se consideraba que los microorganismos estaban adaptados.

2.2.5.3 Factores que afectan el proceso de biolixiviación

La actividad que presentan los microorganismos en el proceso de biolixiviación depende, en gran medida, de las condiciones ambientales a las que son sometidos. Dentro de estos factores, los más importantes son: pH, potencial redox, concentración de nutrientes, concentración de iones metálicos, tamaño de partícula.

Temperatura

Actualmente se entiende que la descomposición de minerales es un proceso químico donde el rol principal de los microorganismos es producir hierro férrico y protones (ácido). Estudios indican que, como regla general, la velocidad de las reacciones químicas se duplica con el aumento en 283°K en la temperatura. A pesar que la velocidad de descomposición es lo suficientemente rápida en $308 - 313^{\circ}\text{K}$ para casi todos los minerales, para otros casos como calcopirita temperaturas en el intervalo $318 - 353^{\circ}\text{K}$ son indispensables para hacer que el proceso sea económicamente viable. Sin embargo, la disponibilidad de

oxígeno disuelto en la lixiviación bacteriana de sulfuros es un factor indispensable, ya que la bacteria necesita oxígeno durante la oxidación de las especies reducidas del hierro y azufre. La solubilidad del oxígeno en agua a 308 °K es 8 g/m³ y disminuye con el aumento en la concentración de iones en la solución y la temperatura, por lo que un aumento de esta, puede hacer necesario un suministro externo de oxígeno. Por lo tanto, los procesos de biooxidación tienen un máximo de temperatura por encima del cual las reacciones de oxidación se inhiben. Para los microorganismos del género *Acidithiobacillus*, la temperatura máxima es de alrededor 316 °K, con un intervalo óptimo entre 298 °K y 308 °K, estos microorganismos son denominados mesófilos, mientras que para microorganismos termófilos el rango de temperatura va 323 °K – 353 °K.

PH

El pH influye de forma significativa en la velocidad de crecimiento de los microorganismos, debido a que afecta a los grupos ionizables presentes en las enzimas situadas en el citoplasma y periplasma de la célula. Dichos grupos deben

encontrarse en la forma iónica más adecuada para mantener la conformación del centro activo de la célula y así enlazarse a los sustratos y catalizar la reacción. Los microorganismos que participan en la lixiviación bacteriana de sulfuros son acidófilos, ya que son activos a pH por debajo de 3,0; con un pH óptimo para *Acidithiobacillus ferrooxidans* en el intervalo de 1,5 a 2,5 (Das et al., 1999). Valores de pH cercanos a 1,0 presentan una fuerte inhibición del crecimiento del *A. ferrooxidans*, lo que no ocurre con *A. thiooxidans*, que presenta caídas en el pH de sus cultivos incluso hasta menos de 1,0, debido a la producción de ácido sulfúrico y a su capacidad de tolerar una mayor acidez. La formación de precipitados en la biooxidación de sulfuros depende del valor de pH de la solución. A valores de pH por encima de 2,5 el hierro férrico tiene una baja solubilidad, ocasionando la formación de hidroxisulfatos básicos de Fe^{3+} , con fórmula general $MFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, donde M es K^+ (jarosita), Na^+ (natrojarosita), NH_4^+ (amoniojarosita), H_3O^+ (hidroniojarosita), Ag^+ (argentojarosita), Pb^{2+} (plumbojarosita), entre otros. Esta precipitación depende fundamentalmente del pH, la composición iónica y la

concentración del medio. La precipitación de Fe^{3+} ocurre incluso a bajos valores de pH, sin embargo, se observa que medios con valores de pH menores de 1,8 son efectivos para limitar la extensión de la precipitación de estos compuestos. Hayward et al., (1997) recomiendan que para mantener la actividad bacteriana en un proceso de biooxidación de sulfuros en reactores de tanque agitado el pH de operación debe mantenerse en el intervalo de 1,6 – 1,8.

Potencial redox

El potencial redox de la solución es un indicador indirecto del metabolismo energético o actividad de la bacteria en el proceso de biolixiviación, debido a que es una medida de la tendencia de la solución a ser oxidada o reducida, que en estos procesos se mide la relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$. Durante la fase de crecimiento exponencial, el Eh de los medios con *A. ferrooxidans* se caracteriza por estar entre 320–580 mV. Normalmente, la extracción de los iones alcanza sus mayores velocidades cuando el Eh de la solución ácida ha superado los 400–450 mV.

Concentración de iones metálicos

La presencia de compuestos tóxicos o inhibitorios en el mineral puede causar serios problemas en la biolixiviación. Se presentan algunos niveles de toxicidad por cationes y aniones para *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Una solución atractiva a este problema es la selección de cepas con cierta resistencia a estos iones, aisladas en los sitios donde se extrae el mineral a tratar, o, bien, la construcción artificial de cepas con estas características.

Nutrientes

La mayoría de los microorganismos que participan en la lixiviación bacteriana de sulfuros son autotróficos, es decir, obtienen el carbono necesario para su desarrollo del dióxido de carbono atmosférico y la energía de la oxidación de un compuesto inorgánico (Fe^{2+} ó S^{2-}). Los otros elementos básicos para la nutrición de estos microorganismos deben estar en cantidades proporcionales a su composición celular en el medio de cultivo en forma de sales. Los más importantes cuantitativamente, son el nitrógeno, generalmente como sal de amonio, el magnesio (sulfato de

magnesio), el fósforo (fosfato ácido de potasio) e iones metálicos pesados en menor cantidad. El magnesio es necesario para la fijación del CO₂ y el fósforo se requiere para el metabolismo energético y para las primeras etapas de oxidación del hierro. El sulfato es importante al ser un componente de algunos aminoácidos necesarios para estos microorganismos. El nitrógeno es el nutriente más importante para los *Acidithiobacillus* y es posible que los heterótrofos que habitan con él en los medios naturales puedan suminístrale, total o parcialmente este nutriente. Si un nutriente está presente en bajas concentraciones o es suministrado a bajas velocidades, el crecimiento celular ocurrirá a una menor velocidad. Los medios de cultivo, 9K y T&K, son los medios más empleados para el crecimiento de los *Acidithiobacillus*.

Actividad de los microorganismos y concentración bacteriana

La adaptación al medio ambiente es un fenómeno natural que toma lugar en animales, plantas y microorganismos. En la industria biohidrometalúrgica, la

adaptación de micro organismos en medios de cultivo selectivos es un método comúnmente usado para aumentar la eficiencia en la biolixiviación y biooxidación. Los microorganismos utilizados en estos procesos son generalmente pre-adaptados en repetidas ocasiones a fin de aumentar la velocidad disolución de los metales presentes en los sulfuros. La bacteria tiene la habilidad de adaptarse a condiciones cambiantes. Cuando un cultivo de bacterias es introducido a un nuevo tipo de fuente de energía, como los sulfuros, necesitan tiempo para adaptarse al nuevo material. Los *Acidithiobacillus* y otros microorganismos acidófilos tienen la capacidad de crecer en presencia de varios tipos de iones metálicos después de la adaptación. La etapa de adaptación ayuda a reducir la fase lag, aumentar la actividad bacteriana y reforzar, de esta forma, la cinética global de lixiviación.

Tamaño de partícula

El área específica superficial es uno de los factores importantes que afectan el proceso de oxidación bacteriana. Generalmente, en los minerales refractarios, la fracción del

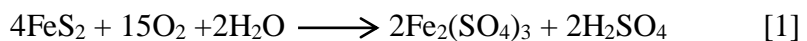
área superficial ocupada por el sulfuro de interés es pequeña y se podría esperar que la velocidad de lixiviación sea proporcional a los pocos sitios activos de dicho sulfuro. A medida que el tamaño de partícula decrece, aumenta el área superficial y por ende el número de sitios activos, por lo que se cree que aumenta la eficiencia del proceso. Sin embargo, varios investigadores han encontrado que al disminuir el tamaño de partícula se generan factores inhibitorios, como efectos mecánicos, ya que se aumenta la posibilidad de colisión entre las partículas y las células y se genera estrés metabólico causado por concentraciones inhibitorias de metales pesados. Lo anterior, genera un efecto global negativo.

2.2.5.4 Mecanismo de ataque bacteriano al mineral

La biolixiviación puede seguir dos mecanismos: el mecanismo de contacto directo, que requiere un íntimo contacto físico entre la bacteria y el mineral a lixiviar, y el de contacto indirecto en el que el sulfuro es oxidado por el ion

férrico que la bacteria genera. En la Figura 8 se observa un esquema de los dos mecanismos de ataque posible a un sulfuro genérico, donde M es un metal divalente. Las reacciones que tienen lugar deben ser estudiadas por separado, según al sulfuro al que correspondan, y según el mecanismo de ataque bacteriano sea directo o indirecto.

En el caso de la pirita, el ataque se da, casi exclusivamente a través de un mecanismo de contacto directo:



El sulfato férrico producido en esta reacción carece de sus propiedades oxidantes, ya que se encuentra como precipitado coloidal formando parte de un complejo con ligados orgánicos.

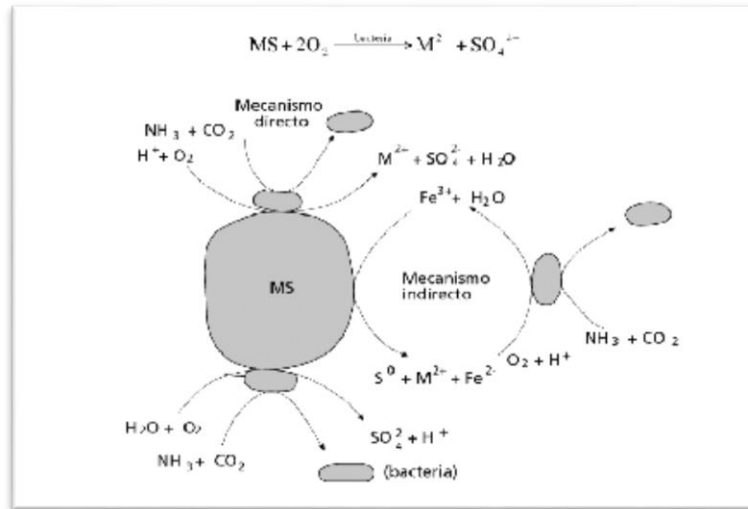


Figura 8. Mecanismos directo e indirecto de biolixiviación

Fuente: Rodríguez et al., 2001.

En la Tabla 8 se presentan los resultados de las experiencias de biolixiviación de menas refractarias de oro reportados en los últimos años en laboratorio. En todos los casos el contacto entre la mena, el medio de cultivo, los microorganismos se ha llevado a cabo de forma simultánea. El microorganismo más empleado, con mucha diferencia, es la bacteria *thiobacillus ferrooxidans*, siendo muy limitado número de trabajos realizados con termófilos. En general, el uso de termófilos no está justificado ni desde el punto de vista energético ni desde el punto de vista cinético.

Prácticamente en todas las experiencias se observan espectaculares aumentos de nivel de extracción de oro por cianuración tras la etapa de biónixiviación. Sin embargo, desde el punto de vista cinético los resultados son pobres, siendo necesario asumir tiempos de reacción que oscilan entre una y varias semanas.

En general, no se necesita una biodegradación total del sulfuro presente para conseguir elevados rendimientos de extracción de oro. En muchos casos oxidaciones del orden del 60 % conducen a extracciones de más de 90 % de oro, efecto que se debe a la corrosión preferencial en zonas de unión oro-sulfuro, donde el sulfuro actúa como ánodo y se corroe. Además, la inclusión de oro en la red cristalina del sulfuro produce dislocaciones en ésta que facilitan su corrosión selectiva.

Tabla 8

Resultados suficientes de ensayos de biolixiviación

Matri z	Bacteria	Temperatura. (°K)	Modo de Operación	% solid os (W/ W%))	Tiempo (t)	Oxid . Fe (%)	Recuperac ión Au	
							Pre* (%)	Post** (%)
Pirita	T.f	308,15	Discontinuo	20	35	87	24	81
	T.f	303,15 – 308,15	Discontinuo	-	30	60	25	90
	T.f	303,15 – 308,15	Continuo	-	12			
				15	14	45	7	70
	T.f		Discontinuo	15	33	85	7	94
				15	70	100	7	100
	T.f	303 –308,15	Discontinuo	15	30	90	10	95
	T.f	303,15	Continuo	18	5	90	21	95
		303,15	Discontinuo	10	30	65		90
	T.f			10	16	50		90
Arsen o- pirita	T.f	303,15	Discontinuo	5	8	29	6	56
	S161	323,15	Discontinuo	5	8	47	6	56
	Sulfato	333,15	Discontinuo	5	8	84	6	91
	T.f	308,15	Continuo	12	2	70(A s)	15	73
	Termof.	43		3	7		27	88
	T.f	308,15	Continuo	15	6	31	55	90
				15	10	80	55	99
	T.f + T.t	308,15	Continuo	12	7		71	92
	T.f		Discontinuo	20			54	85

Fuente: Nieves Iglesia Gonzalez, Octubre 1999

Observaciones:

Pre* = recuperación de oro por cianuración directa

Post** = recuperación de oro después de biooxidación

T.f = *Thiobacillus ferrooxidans*

T.t = *Thiobacillus thiooxidans*

Se tiene conocimiento de un número considerable de operaciones a escala planta piloto e incluso a escala semi-industrial para la biolixiviación de estas menas.

Donde (a) hace referencia a la lixiviación bacteriana, (b) hace referencia a la oxidación del arsénico por el Fe (III) en la presencia de bacterias, (c) hace referencia a la formación de precipitados de hierro y (d) hace referencia a la producción de arsenatos férricos.

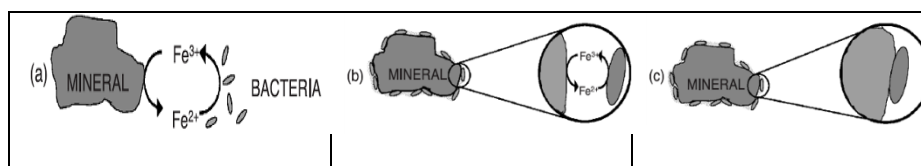


Figura 9. Mecanismos de oxidación bacteriana propuestos a) Mecanismo indirecto. b) Mecanismo de contacto indirecto. c) Mecanismo de contacto directo.

Fuente: Silverman, 1967.

En el mecanismo indirecto, o de no contacto, la función de las bacterias presentes en la solución es la de oxidar los iones Fe (II) a Fe (III), este ion resultante entra en

contacto con la superficie del mineral donde es reducido a expensas de la salida de un nuevo ion Fe (II) y regenerar el ciclo de una forma exponencial.

En el mecanismo de contacto indirecto, la mayoría de los microorganismos están adheridos a la superficie del mineral, lo que implica que los procesos bioquímicos de transferencia electrónica, responsables de la disolución del mineral, toman lugar en la interface entre el mineral y la pared celular de la bacteria, en ambos mecanismos, contacto indirecto y directo, la contribución de la bacteria a la disolución del mineral es la regeneración del agente oxidante, el ion Fe (III) y la subsecuente oxidación de los compuestos resultantes de la disolución.

Varios autores han observado que la disolución de algunos minerales puede ser controlada por la estructura cristalográfica del mineral y ésta determinar la adherencia de los microorganismos a la superficie de la arsenopirita. Por ejemplo, Sampson *et al.* (2000) observó que las células de *A. ferrooxidans* se adhieren a la superficie de

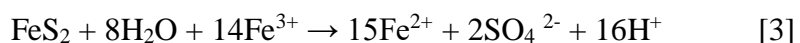
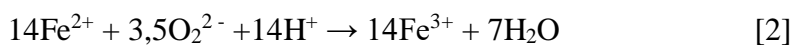
arsenopiritas y loellingitas a lo largo de defectos cristalinos. Edwards *et al.*, (2000) investigó que la adherencia de *Acidithiobacillus caldus* en agregados masivos de arsenopirita y encontraron que la disolución ocurría en forma preferencial. Ellos sugirieron que esto podría deberse a que las células se adhieren a lo largo de *pits* y defectos en la estructura del material o en zonas ricas en azufre. Estos resultados están de acuerdo con McGuire *et al.*, (2001b) quienes sugirieron que la adherencia celular debería ser controlada por las zonas de acumulación de azufre sobre la superficie del mineral.

Edwards *et al.*, (2001) observó *pits* de disolución del tamaño de células bacterianas sobre la superficie oxidada de la arsenopirita en la presencia de *Ferroplasma acidarmanus* a 310 °K. El tamaño de los *pits* fue asociado con el incremento en la velocidad de disolución del mineral.

Harneit *et al.*, (2005) observaron la ubicación preferencial de *Acidithiobacillus ferrooxidans* sobre una superficie mineral con defectos visibles y atribuyeron éste

comportamiento a una mayor viabilidad de azufre y de Fe (II). Células individuales fueron difíciles de detectar después de 120 horas de experimentación debido a la formación de *biofilms* sobre la superficie.

En ambientes con, relativamente, bajos pH como los encontrados en los AMD la oxidación del Fe (II), es relativamente baja, comparado con ambientes en los que hay presencia de bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, estudios muestran que en la presencia de éste microorganismo la oxidación del Fe (II) a Fe(III) es acelerado por un factor de 10^6 comparado con circunstancias abióticas. El mecanismo por el cual se asume una acción directa por parte de las bacterias sobre el mineral se resume en las siguientes ecuaciones:



Donde la velocidad de oxidación del Fe (II) es acelerada en la presencia de bacterias y el Fe (III) es el

responsable por la oxidación superficial de la pirita. Acá, el papel de la bacteria es la regeneración del Fe (III), la velocidad de regeneración de este ion es relativamente lenta a pH ~3 o en ausencia de microorganismos.

Uno de los mecanismos por el cual los microorganismos aceleran ésta transformación es la generación de sustancias poliméricas extracelulares que ayudan a la adherencia. Se ha postulado que es dentro de estas sustancias poliméricas extracelulares o EPS donde se genera la transformación del Fe^{2+} a Fe^{3+} .

Fowler et al., (2001) observó que el orden de la reacción con respecto a los Fe^{3+} era el mismo aun en la ausencia de bacterias. Ellos anotaron que el orden de la reacción con respecto a H^+ era 0,5 en ausencia de bacterias y 0,39 en la presencia de *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Por lo tanto, se propuso que estos microorganismos al interior de sus EPS consumían protones y regeneraban el ciclo de transformación de ferroso a férrico, generando un aumento local del pH.

2.2.5.5 Cuantificación de bacterias

Para la estandarización de las pruebas a nivel de laboratorio en este campo de la biohidrometalurgia es necesario, especialmente durante el inicio de una prueba de lixiviación bacteriana en suspensiones (inoculación), conocer la cantidad de bacterias presentes en un mililitro de cultivo, o sea su población. Curvas de crecimiento de los microorganismos que caracterizan por ejemplo los biorreactores, describen las poblaciones versus tiempo y demandan métodos rápidos para las determinaciones correspondientes.

El método más exacto para la determinación de la población es el método del número más probable (MPN: Most Probable Number). Un método más rápido resulta por el conteo de las bacterias con la cámara de “Neubauer”, facilitado por el contraste de fases como accesorio de un microscopio.

Número más probable

El grado de dilución, una tabla estadística y una comprobación visual son las necesidades e informaciones para averiguar el número más probable de la cantidad de células o bacterias en un cultivo o en una dilución.

McGrady ha desarrollado tablas estadísticas, por ejemplo para tres o cinco pruebas paralelas que sirven para encontrar el MPN de la cantidad de bacterias por mililitro; es necesaria una secuencia de diluciones del cultivo en investigación hasta que resulten pruebas que no contengan bacterias.

La *Thiobacillus ferrooxidans* utilizan la oxidación de ferroso a férrico como fuente de energía para su metabolismo. Esta oxidación se muestra en un cambio de color de la solución nutriente y comprueba de éste modo el límite de la concentración para la dilución de un cultivo.

La determinación del “título de gérmenes” se realiza rutinariamente de igual forma como el método para el MPN,

con una secuencia de diluciones; pero el resultado lleva una gran desviación estándar. Unas tres o cinco pruebas (tubos) para cada dilución, permite reducir éste error notablemente y con tres diferentes grados de diluciones se encuentra el MPN (Tabla de McGrady) de las bacterias por mililitro en la solución de cultivo, es decir, la población respectiva. La influencia de la casualidad que juega el rol decisivo en el “título de gérmenes” no domina tanto el método del número más probable.

Tabla 9

Medio Nutriente para el Cultivo de *Thiobacillus ferrooxidans*

Constituyente	Leadhen et al.(1951)	Medio 9K(1959) Silverman& Lundgren	Mihaylov etal.(1991)
$(NH_4)_2 SO_4$	0,15 g	3,0 g	-----
$CO(NH_2)_2$	-----	-----	3,0g
$K_2 HPO_4$	0,05g	0,5g	0,5g
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0,5 g	0,5g	0,5 g
$Ca(NO_3)_2$	0,01g	0,01g	0,01g
KCl	0,05 g	0,10 g	0,10 g
Agua destilada	1000 ml	700 ml	700 ml
10 N NH_2SO_4	-----	1,0 ml	1,0 ml
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	10 ml de solución al 10 % p/v	300 ml de solución al 14,47% p/v	300 ml de solución al 14,47% p/v

Fuente: Leadheb et al. 1951, Silverman & Lundgren, 1959.

Procedimiento:

1. Se prepara una secuencia de diluciones de la solución del cultivo con la solución nutriente 9K (sin sulfato ferroso).
2. De cada dilución se preparan cinco tubos con solución nutriente 9K (10 g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ /litro en vez de 44,22 g/L); pH= 2,5.
3. Se incuba los tubos con las diferentes diluciones hasta que se muestran por coloración el desarrollo de bacterias (hasta el límite de la dilución); temperatura 303 - 308 °K.
4. Se evalúa el crecimiento de *Thiobacillus ferrooxidans* por medio de la oxidación de ferroso a férrico, o sea por el cambio de color de la solución nutriente a amarillo o marrón (efecto de concentración).
5. Los resultados en los límites de las diluciones que se recibe después de la incubación, se utilizan para la búsqueda del MPN según las Tablas respectivas de McGrady.

Ejemplo:

- Se tienen 5 tubos paralelos de cada dilución ($1:10^6=10^{-6}$)

del cultivo original; $1:10^7 = 10^{-7}$ del cultivo original; $1:10^8 = 10^{-8}$ del cultivo original).

- Incubados durante un tiempo con $308,15\text{ }^\circ\text{K}$, muestran los resultados siguientes:

* 5 tubos positivos de la dilución 10^{-6}

* 2 tubos positivos de la dilución 10^{-7}

* 0 tubos positivos de la dilución 10^{-8}

El agrupamiento de los números de los resultados es [5 2 0].

Con éste número compuesto se entra en la tabla correspondiente de McGrady y se encuentra el número más probable: 5,0.

Se puede interpretar que en la dilución 10^{-6} del cultivo original se encuentran como número más probable 5,0 bacterias por mililitro. El cálculo del MPN para el cultivo original se realiza por la división por el factor de la dilución, es decir, 10^{-6} :

$$\text{MPN} = 5,0/10^{-6} = 10^6 \text{ bacterias/ml}$$

Cámara de Neubauer

Con una pipeta Pasteur cargar la muestra y depositarla en la cámara de Neubauer. El número de células se obtendrá de la siguiente ecuación.

$$N = (X_{400})(400)(10^4) \quad [4]$$

Contar las células presentes en los extremos de los cuadrados extremos presentes en las cuadrículas de cada una de las 5 cuadrículas consideradas, cuando se realice un conteo en las cuadrículas de área de $1/400\text{mm}^2$. Anotar los conteos, que tienen que ser en un número de 20 ya que es un total de 20 cuadrículas de área de $1/400\text{ mm}^2$ a contar. Determinar el promedio de células por cuadrícula de $1/400\text{ mm}^2$. Para esto se divide el número total de células contadas en las 20 cuadrículas entre 20. Este valor está representado por X_{400}

Cámara Petroff Hausser

Se determina directamente el número de células contándolas al microscopio con la ayuda de cámaras

especiales que albergan un volumen conocido de líquido (Hemocitómetros, Cámara de Petroff- Hausser). El recuento directo al microscopio es tedioso, pero es una forma rápida de estimar el número de células microbianas. Sin embargo, presenta algunas limitaciones:

- No se pueden distinguir las células vivas de las células muertas.
- Las células muy pequeñas son difíciles de contar.
- La precisión es difícil de lograr
- El método no es adecuado para suspensiones celulares de baja densidad, es decir, las soluciones deben contener aproximadamente 10^7 células/ml o más.

A continuación se desarrolla, como ejemplo, el recuento directo al microscopio utilizando la cámara de Petroff-Hausser. En este método la suspensión de la muestra se coloca en la cavidad cuadrículada de dimensiones conocidas de la cámara, y se tapa con el cubre objetos. Como se conoce el área de las cuadrículas y la altura de la cámara de recuento, el volumen ocupado por la suspensión en cada

cuadrícula queda determinado. Por tanto, para obtener el número de bacterias por mililitro de suspensión, todo lo que se requiere es contar el número de microorganismos en varias cuadrículas, calcular el promedio de recuento por cuadrícula y multiplicar este promedio por el factor correspondiente.

Ejemplo:

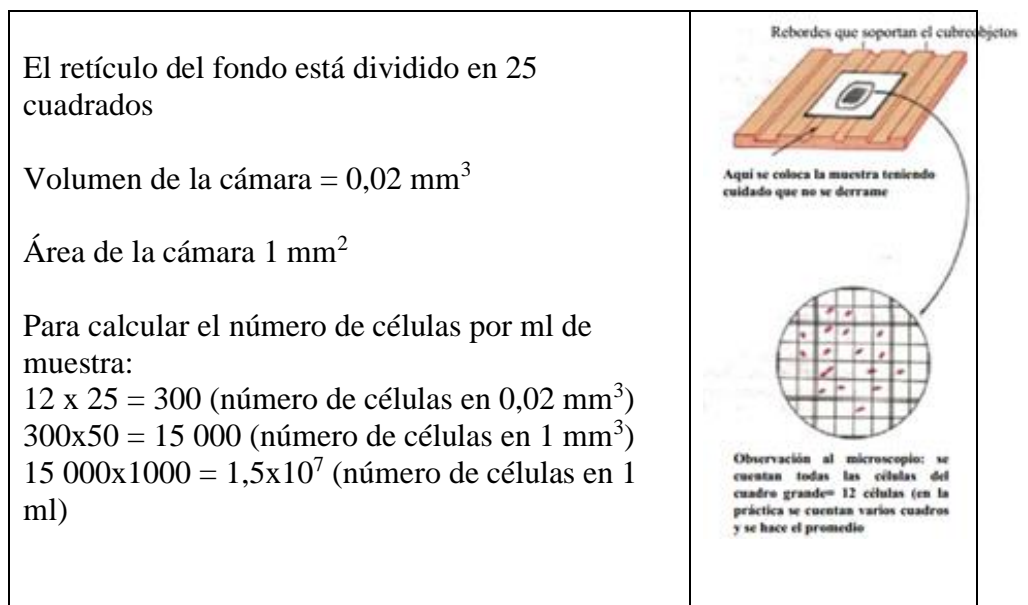


Figura 10. Recuento de bacterias en microscopio

Fuente: Elaboración propia

Identificación de bacterias

Para realizar la identificación de bacterias es importante hacer uso de coloraciones del cuerpo del microorganismo para

observar su estructura interna o externa, puesto que las bacterias son incoloras.

Las coloraciones pueden ser simples, cuando sólo interviene un colorante o bien compuesta, cuando intervienen dos o más colorantes y se efectúan en varios tiempos.

2.2.5.6 Coloración de Gram

Es una coloración indispensable en bacteriología, la que es diferencial para los microorganismos.

Gram Positivas: Son aquellas bacterias que retienen el colorante violeta de genciana y no se decoloran por el alcohol, toman un color violeta.

Gram Negativas: Son aquellas bacterias que pierden el colorante violeta de genciana por decoloración con alcohol y necesitan ser teñidas por un colorante de contraste que es la safranina: adquieren una coloración roja.

Mediante esta técnica, es posible diferenciar en dos grupos a las bacterias de acuerdo a la constitución de su cubierta o membrana celular.

Procedimiento

1. Preparar un frotis.
2. Fijar la preparación a la llama.
3. Hacer actuar violeta de genciana más cinco gotas de bicarbonato de sodio en solución durante unos minutos.
4. Lavar con agua corriente y cubrir la preparación con lugol por tres minutos.
5. Lavar con agua corriente y decolorar con alcohol de 95° durante 8 segundos.
6. Cubrir el frotis con safranina, 3 minutos.
7. Lavar con agua corriente, secar y observar al microscopio.

2.2.6 Teoría de la cianuración

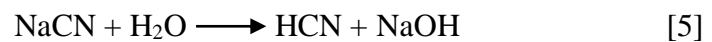
2.2.6.1 Cianuración del Oro

De acuerdo a *Mellor* (1923), los alquimistas del siglo XVIII disolvieron oro en una solución acuosa de KCN, también se menciona que *Scheele* (1783) y después

Bagration (1843) notaron la acción solvente de soluciones acuosas de cianuro alcalino sobre el oro. En 1887 los señores *MacArthur* y *Forrest* observaron y reconocieron todo lo anteriormente expuesto y aplicaron la disolución, pero para menas auríferas, proceso que revolucionó la industria minera en cuanto al oro.

Los cianuros más importantes en este procedimiento son: el de sodio y el potasio. Este último se expende en una forma impura que contiene cerca del 50 % de KCN equivalente. El de sodio se expende de varias concentraciones desde el 85 hasta el 98 % de NaCN.

Una solución de cianuro alcalino en agua se hidroliza como sigue:

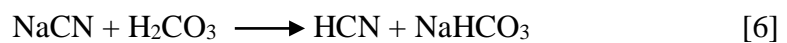


La extensión hasta donde prosigue esta hidrólisis en las soluciones de cianuro comercial en agua depende principalmente de la cantidad de álcali libre en el cianuro. Si

este álcalis es apreciable, entonces la descomposición del cianuro podría ser despreciable. En ausencia de álcali libre apreciable la hidrólisis puede retardarse mediante al adición de cal.

La adición de cal a la pulpa con cianuro es una práctica universal, no solamente para evitar pérdidas de cianuro por hidrólisis sino también para neutralizar cualquier constituyente ácido del mineral que de otra manera liberaría ácido cianhídrico.

EL ácido carbónico que es más fuerte que el cianhídrico descompone las soluciones de cianuro alcalinos de acuerdo a la siguiente reacción química:

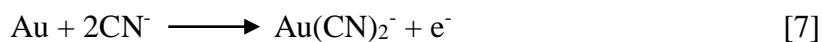


Esta reacción también puede evitarse con el uso de cal u otros álcalis.

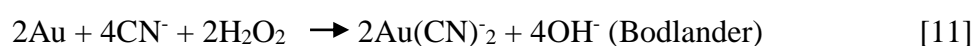
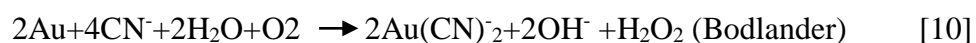
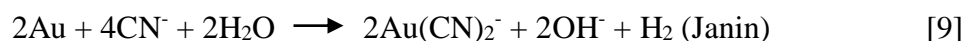
DISOLUCIÓN DE LOS METALES PRECIOSOS

Las operaciones para la disolución del oro mediante el uso de cianuros alcalinos se viene aplicando desde casi un siglo con mucho éxito. Aunque en el pasado se decía que las operaciones de cianuración no tenían altas recuperaciones, los hechos demuestran que cuando el oro es liberado las recuperaciones metalúrgicas son aceptables. Así en operaciones de cianuración por agitación alcanzan recuperaciones de más de 90 %, también se alcanzan similares recuperaciones en plantas de cianuración Vat Leaching con tiempos de tratamiento más prolongados.

En su forma más simple la reacción para la disolución de oro metálico en una solución de cianuro es:



Se ha observado en la práctica que el oro no se disuelve sin aireación intensa consecuentemente las siguientes reacciones han sido propuestas para la disolución del oro en soluciones diluidas de cianuro.



Barsky, Swainson y Hedley determinaron la energía libre de formación de iones complejos de oro cianuro y plata-cianuro. De los datos obtenidos ellos calcularon los cambios de energía libre en las diferentes reacciones sugeridas y puntualizaron cuales de ellas son teóricamente posibles bajo condiciones corrientes de cianuración. Para la energía libre del ion aurocianuro $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ encontraron un valor de 289 171 $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$. Con otros datos disponibles fueron calculadas las constantes de equilibrio para las ecuaciones propuestas anteriormente:

Para la ecuación de Elsner $K = 10^{66}$

Para la ecuación de Jannin $K = 10^{9,9}$

Para la ecuación de Bodlander $K = 10^{16}$ y $10^{12,1}$

Elsner reconoció que el oxígeno era esencial para la disolución de oro, de acuerdo a la Ec. 12. Sus resultados

demonstraron que para la reacción continua hasta su terminación, es decir, hasta que prácticamente todo el cianuro es consumido o todo el metal es disuelto. Consecuentemente la ecuación de Elsner es la que realmente expresa la reacción de la disolución del oro en soluciones de cianuro o sea (Habashi, 1993):



Entre 1888 - 1892, Janin sugirió que la reacción involucraba la evolución de hidrógeno.

El mecanismo Bodlander, sugerido en 1896 establece que la cianuración de oro se produce en dos pasos, donde el peróxido de hidrógeno es un producto intermedio.

2.2.6.2 Efectos de los variables importantes de la cianuración

Efecto del tamaño de la partícula en la velocidad de disolución del oro.

Cuando se presenta oro grueso libre en la mena la práctica generalizada por medio de Jigs, trampas etc. Antes de la cianuración ya que las partículas gruesas podrían no disolverse en el tiempo disponible de cianuración.

Bajo condiciones consideradas ideales con respecto a la aireación y agitación, Barski encontró que la velocidad máxima de disolución del oro llega a ser de 0,0325 kg/m² en una hora.

Efecto del Oxígeno sobre la Cianuración del Oro

La importancia del oxígeno en la disolución de oro no puede ser súper resaltado. Aunque se han usado agentes oxidantes como el peróxido de sodio, permanganato de potasio, bromo, y cloro, la aireación adecuada dará resultados tan buenos como aquellos de los oxidantes químicos a un costo más bajo. La cantidad de oxígeno disuelto en la solución de cianuro diluida depende de cuatro parámetros.

- La altitud (presión barométrica)
- La temperatura de la solución
- El tipo e intensidad de agitación

- La fuerza iónica de la solución

A una concentración baja de cianuro, la presión del oxígeno no tiene efecto sobre la velocidad de disolución del oro. Sin embargo, a una concentración alta de cianuro, donde la velocidad de disolución es independiente de la concentración del solvente, la velocidad de reacción es dependiente de la presión de oxígeno.

Se ha encontrado que la influencia principal sobre la velocidad de transferencia de masa del oxígeno (a la solución) es la velocidad del aire superficial (definido como la velocidad del flujo de aire por unidad de área transversal del tanque). La velocidad de transferencia de masa de oxígeno disminuye con el aumento de la densidad de pulpa y con la disminución del tamaño.

Barsky Swainson y Hedley determinaron la velocidad de disolución del oro en soluciones de 0,10 % de NaCN usando nitrógeno, oxígeno y mezclas de ambos. Las pruebas de efectuaron sobre 0,1 L de solución de cianuro a 298 K de

temperatura y con iguales volúmenes de gas para cada prueba.

Los resultados de la velocidad de disolución del oro durante la primera media hora de cada prueba están registrados en la tabla que sigue:

Tabla 10

Efecto del oxígeno sobre la velocidad de disolución del oro

Oxígeno (%)	Oro disuelto en 1 hora (Kg/m²)
0	0,0004
9,6	0,0103
20,9	0,0236
60,1	0,0762
99,5	0,1262

Fuente: Jeremiah Peterson on May 19, 2013

Efecto de la concentración de Cianuro sobre la velocidad de disolución del oro.

De acuerdo con J.S. Mac Laurin, la rapidez de disolución del oro en las soluciones de cianuro alcanza un máximo pasando de soluciones concentradas a diluidas. En su investigación demostró que este máximo es alcanzado a una concentración de 0,25 % de KCN en la solución o un equivalente de 0,19 % de la NaCN. Christy encontró que las

soluciones más débiles que 0,001 % de KCN no disuelven el oro.

White encontró que la velocidad máxima de disolución es cuando la concentración de la solución es de 0,027 % KCN o 0,020 % NaCN y cuando dicha solución está saturada de oxígeno.

Julian y Smart demostraron que la velocidad con que se disuelven el oro se agiliza rápidamente con el aumento de la concentración de la solución hasta 0,10 % de KCN.

Barsky Swainson y Hedley comprobaron que la concentración de la solución para una rápida disolución es de 0,05 % de NaCN.

Tabla 11

Cantidad de oro disuelto en una hora.

NaCN sol. %	Au disuelto en 1 hora kg/m ²
0,500	0,02943
0,250	0,03007
0,100	0,02986
0,050	0,03251
0,025	0,02513
0,010	0,00338

Fuente: Jeremiah Peterson on May 19, 2013

A presión atmosférica, la cianuración no es dependiente de la concentración de cianuro. A temperatura ambiente y presión atmosférica, 0,0082 kg/m³ de oxígeno se disuelve en el agua, equivalente a $0,26 \times 10^{-3}$ moles/L. Ahora, la concentración del cianuro de sodio requerido (peso molecular 49) debe ser por lo menos igual a $4 \times 0,26 \times 10^{-3} \times 49 = 0,051$ g/L. Concentraciones superiores de 0,05 g/L de cianuro de sodio no pueden afectar la velocidad de la disolución de oro, ya que a la presión atmosférica está controlada por la

concentración constante del oxígeno en la solución.

Efecto de pH

El diagrama Eh - pH para el sistema oro-cianuro, indica que el impulso electroquímico para la disolución, es decir, la diferencia de potenciales entre las líneas que representa la oxidación del oro y las reacciones de reducción del oxígeno, se maximiza a valores de pH entre 9 y 9,5 aproximadamente.

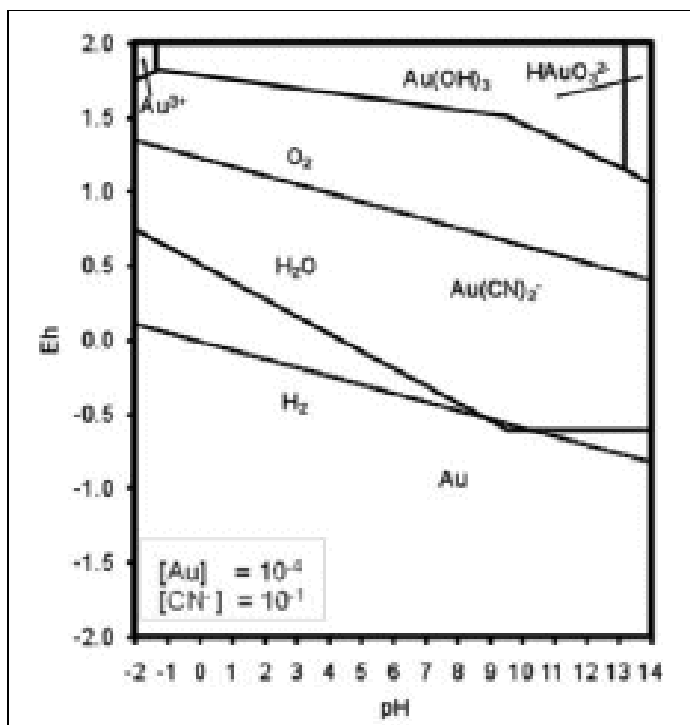


Figura 11. Diagrama de estabilidad Eh - pH para el sistema Au-H₂O- CN⁻ a 25°C

Fuente: Barbosa et al 1988

El ion cianuro auroso $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ en el sistema oro-cianuro-agua (Figura 11), hasta aproximadamente pH 1. El ion de oro predominante es el aúrico (Au^{+3}), y no el auroso (Au^+) porque la reacción $\text{Au}^\circ = \text{Au}^{+3}$ está bien por debajo el límite de estabilidad de la reacción $\text{Au}^\circ = \text{Au}^+$. El campo de estabilidad del oro metálico, a potenciales de reducción relativamente bajos, cubre el rango del pH completo.

Normalmente, la lixiviación con cianuro se realiza en los valores de $\text{pH} > 9,4$ para evitar la pérdida excesiva de cianuro por hidrólisis. La lixiviación con cianuro a bajo pH que se ha investigado será un medio para reducir la cal, y reducir la escala de consumo. Sin embargo, a medida que disminuye el pH, la proporción de cianuro presente en una solución, pasará a aumentar la concentración del cianuro de hidrógeno (Figura 11) y en un sistema de lixiviación cerrada debe ser usado para prevenir la pérdida excesiva de cianuro por volatilización de HCN.

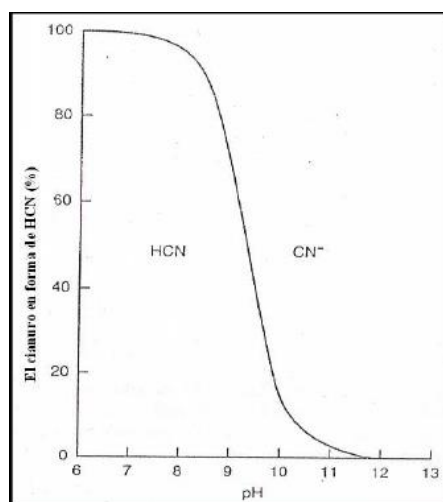


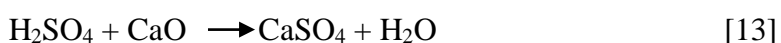
Figura 12. Especiación de cianuro y el cianuro de hidrogeno en solución acuosa, en función del pH

Fuente: Barbosa et al 1988.

Efecto de Adiciones Alcalinas sobre la disolución del oro

En la práctica se usa soda cáustica o cal, pero por su bajo costo se prefiere la cal para neutralizar la acidez de la mena y contrarrestar los efectos dañinos expresada en términos de kilogramos de óxido de calcio por tonelada de mena tratada se llama "alcalinidad protectora"; aunque un exceso de cal protege al cianuro de la hidrólisis, pero si está presente en grandes cantidades puede retrasar la velocidad de disolución del oro especialmente si se trata de menas sulfurosas. Por tanto, la alcalinidad debe ser controlada cuidadosamente y en general es mejor mantener en un punto lo más bajo posible para lograr una buena recuperación.

La acción de la cal en la neutralización de los productos de descomposición se muestran las siguientes ecuaciones.



La adición de bases (CaO, NaOH o Na₂CO₃) al proceso de cianuración tiene los siguientes objetivos:

1. Evitar pérdidas de cianuro por hidrólisis.
2. Prevenir pérdidas de cianuro por la acción del anhídrido carbónico del aire.
3. Neutralizar los componentes ácidos tales como las sales ferrosas, férricas y el sulfato de magnesio contenidos en el agua del ingenio antes de agregar al circuito de cianuración.
4. Descomponer los bicarbonatos del agua del ingenio antes de su uso en la cianuración.
5. Neutralizar la acidez de los constituyentes de la mena.
6. Neutralizar los componentes ácidos resultantes de la descomposición de los diferentes minerales de la mena en

las soluciones de cianuro.

7. Facilitar el asentamiento de las partículas finas de modo que pueda separarse la solución rica de la mena cianurada.
8. Mejorar la extracción cuando se tratan menas que contiene telururos, plata roja o rocicler que se descomponen más rápidamente a una mayor alcalinidad.

Efecto de la temperatura

Cuando se aplica a una solución de cianato que contiene oro metálico, dos factores opuestos influyen en la velocidad de disolución de la temperatura agiliza la actividad de la solución y consiguientemente acelera la velocidad de disolución del oro. Al mismo tiempo la cantidad de oxígeno en la solución disminuye porque la solubilidad de los gases decrece con el aumento de la temperatura.

En la práctica, el uso de soluciones calientes para la extracción del oro de una mena presenta muchas desventajas tales el costo de calentamiento de la pulpa el aumento de la descomposición del cianuro debido al calor y el consumo excesivo de cianuro a causa de la reacción acelerada entre los

cianicidas de la mena (sulfuros de cobre, de hierro, etc.) y el cianuro.

2.2.6.3 Cinética en la lixiviación de oro

La disolución de oro está relacionada, por lo general, al transporte de masa en condiciones normalmente controladas y se aplica en la lixiviación con cianuro, por lo que la velocidad depende del espesor de la capa de difusión y las características de la mezcla o pulpa. El aumento de la agitación aumenta la velocidad de disolución hasta un máximo, a partir del cual la agitación tiene poco o ningún efecto.

El lixivante usado para separar al oro contenido en el mineral es el cianuro de sodio, se esquematiza en la Figura 9 y su química responde a la siguiente reacción:



Estudios de la cinética de la reacción indica que el

proceso electroquímico ocurre en la interfase de las áreas anódica y catódica. En donde la corriente anódica está limitada por la difusión del CN^- a la superficie y en la corriente catódica está limitada por la velocidad de difusión del oxígeno.

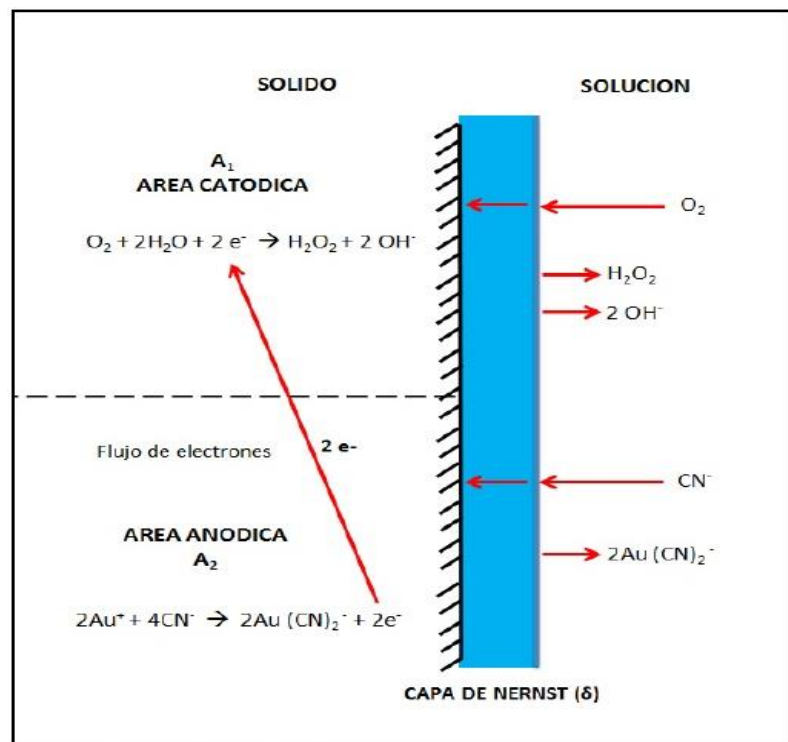
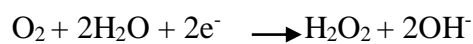


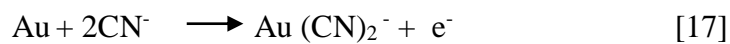
Figura 13. Modelo Electroquímico para la Cianuración del Oro
Fuente: Principles of Extractive Metallurgy, F. Habashi, Vol 2.

Las reacciones electroquímicas generadas son las siguientes:

Área catódica:



Área anódico



Para el desarrollo de las ecuaciones, se parte de la aplicación de la **ley de Fick** para la difusión del oxígeno y el cianuro hacia la superficie del oro (interfase) bajo condiciones de estado estacionario y según lo descrito en la figura anterior, lo que da:

$$\frac{d(O_2)}{dt} = \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 \{ [O_2] - [O_2]_i \} \quad [18]$$

$$\frac{d(\text{CN}^-)}{dt} = \frac{D_{\text{CN}^-}}{\delta} A_2 \{ [\text{CN}^-] - [\text{CN}^-]_i \} \quad [19]$$

Donde:

D_{O_2}, D_{CN^-} :	Son los coeficientes de difusión del O_2 y CN^-
$\frac{d(O_2)}{dt}, \frac{d(CN^-)}{dt}$	Son las velocidades de difusión de O_2 disuelto y CN^-
:	
$[O_2] - [O_2]_i$:	Son las concentraciones de O_2 disuelto en el seno de la solución y la interfase de reacción, respectivamente en moles/litro.
$[CN^-] - [CN^-]_i$:	Son las concentraciones del ión $[CN^-]$ en el seno de la solución y la interfase de reacción, respectivamente en moles/litro.
A_1, A_2 :	Son las áreas superficiales en las cuales ocurren las reacciones catódicas y anódicas, respectivamente.
$\delta = d$:	Es el espesor de la capa límite, en cm.

Para el caso de control difusional (en que la difusión es el mecanismo limitante o el paso más lento), es posible asumir que las reacciones químicas en la superficie del oro

son muy rápidas comparadas con las velocidades de las cuales los iones oxígeno y cianuro difunden a través de la capa límite. De esta forma, las concentraciones de la interfase del sólido pueden ser consideradas como cero.

$$[O_2]_i = 0 \quad [CN^-]_i = 0 \quad [20]$$

Por lo tanto, se tiene:

$$\frac{d(O_2)}{dt} = \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 [O_2] \quad y \quad \frac{d(CN^-)}{dt} = \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 [CN^-] \quad [18] \text{ y } [19]$$

Más aún, inspeccionando las reacciones catódicas y anódicas y la consecuente reacción global, se puede ver que se requieren 4 moles del ión cianuro y un mol de oxígeno para disolver para disolver 2 moles de oro. Entonces, la velocidad de disolución del oro estará dada por:

$$\text{Velocidad de disolución} = 2 \frac{d(O_2)}{dt} = 2 \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 [O_2] \quad [21]$$

$$\text{Velocidad de disolución} = \frac{1}{2} \frac{d(CN^-)}{dt} = \frac{1}{2} \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 [CN^-] \quad [22]$$

Además, en condiciones de estado estacionario la velocidad de la reacción catódica debe ser igual a la velocidad de la reacción anódica, por lo tanto:

$$2 \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 [O_2] = \frac{1 D_{CN^-}}{2 \delta} A_2 [CN^-] \quad [23]$$

Si se considera que el área de interfase total relevante para la disolución de oro, es: $A = A_1 + A_2$. Reemplazando en la expresión de la velocidad de disolución, finalmente resulta:

$$\text{Velocidad de disolución} = \frac{2A D_{O_2} D_{CN^-} [O_2] [CN^-]}{\delta \{D_{CN^-} [CN^-] + 4D_{O_2} [O_2]\}} \quad [24]$$

Esta es la ecuación cinética general de la cianuración y la que hay que saber interpretar. Cuando la concentración de cianuro es muy baja, en la ecuación general el primer término del denominador puede ser desechado, por lo tanto, la ecuación de disolución se simplifica:

$$\text{Velocidad de disolución} = \frac{1A D_{CN^-} [CN^-]}{2\delta} \rightarrow$$

$$\text{Velocidad de disolución} = K_1[\text{CN}^-] \quad [25]$$

Esta última relación indica que a bajas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución depende solo de la concentración de cianuro, lo cual es apoyado por datos experimentales. Por otro lado; si la concentración de cianuro es alta, el término de la derecha del denominador de la ecuación general se elimina quedando por lo tanto:

$$\text{Rate de disolución} = 2 \frac{A D_{O_2} [O_2]}{\delta} \rightarrow \text{Rate de disolución} = K_2 [O_2] \quad [26]$$

De acuerdo a esto a altas concentraciones de cianuro el rate depende de la concentración de oxígeno, el cual también coincide con la experiencia. También se puede deducir para que ocurra una máxima velocidad de disolución se tiene que cumplir que:

$$\frac{1 A D_{\text{CN}^-} [\text{CN}^-]}{2\delta} = 2 \frac{A D_{O_2} [O_2]}{\delta} \quad [27]$$

Entonces, la velocidad limite máxima para la disolución del oro ocurre cuando:

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 4 \frac{D_{O_2}}{D_{CN^-}} \quad [28]$$

Ahora bien, se ha determinado que la difusión de la molécula de cianuro hacia la interfase es más dificultosa, primero, ya que al tener carga negativa tiende a asociarse en su movimiento con los protones presentes y, segundo, por ser de un tamaño, mayor que la del oxígeno. Entonces, no es extraño descubrir que la molécula de oxígeno, al ser un gas disuelto, presente una movilidad mayor, cerca de 1,5 veces más rápida que la del cianuro. Por lo tanto, al medir experimentalmente los coeficientes de difusión respectivos, para 298 K, se tiene aproximadamente los siguientes valores (Domic, 2001):

$$D_{O_2} = 2,76 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad \text{y} \quad D_{CN^-} = 1,83 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Se mantiene la relación:

$$D_{O_2} / D_{CN^-} = 1,5 \quad [29]$$

Reemplazando estos valores resulta que: la mayor velocidad para la disolución del oro ocurre cuando se cumple

que las concentraciones del cianuro y del oxígeno disuelto se encuentran en una razón molar de aproximadamente seis.

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} \quad [30]$$

2.3. Definición de términos

Veta

Una veta es un cuerpo tabular, o en forma de lámina, compuesto por minerales que han sido introducidos en las rocas por una diaclasa o fisura, o por sistemas de diaclasas y fisuras. La mayoría de las vetas (filones) son directa e indirectamente de origen ígneo, aunque en ciertas circunstancias las fisuras pueden llegar a rellenarse como consecuencia de procesos sedimentarios; p. ej., vetas de calcita rellenando fisuras en una caliza. Las vetas son distintas a los diques ígneos, aunque el término se aplica a menudo a pequeños de dos o lenguas de roca ígnea intrusiva. Sin embargo, la utilización más importante del término veta está en conexión con los yacimientos, y gran parte de la terminología asociada con las vetas deriva de la industria minera. (Debido a que muchas vetas ocupan fallas, mucha de su

terminología se ha usado y definido como fallas). Una venilla es una veta pequeña.

Flotación

Se define la **flotación** como un proceso de **concentración de minerales** en el cual se procura separar las partículas de menas útiles de estériles o gangas, mediante un tratamiento físico químico que modifica su tensión superficial para lograr que burbujas de aire finamente divididas se adhieran a las primeras y las enriquezca en una espuma.

En vista de esta última característica, este proceso recibe también el nombre de **flotación de espuma (froth flotation)**. Tiene sobre otros procedimientos de concentración, puramente físicos, la ventaja de:

- Tener flexibilidad suficiente para **concentrar selectivamente**, es decir, con producción de concentrados limpios y de alta ley, todos los sulfurados y la mayoría de los no sulfurados y oxidados. Mediante combinaciones (o formulaciones) adecuadas de aditivos, o reactivos de flotación.
- Adaptarse fácilmente al **tratamiento en gran escala** y con ayuda de técnicas automáticas de control y medición, a pulpas de mineral con

granulometría de amplia gama: entre 48 mallas/pulgadas hasta unos pocos micrones.

- Integrarse fácilmente con **técnicas modernas de molienda y clasificación**, así como con medios mecanizados de manejo de productos, tales como bombeo separación sólido/líquido

La biominería

Proceso de recuperación de cobre eficaz donde es necesario además de agua, la presencia de ciertos microorganismos. De allí surge el término de **biominería**, que es el uso de microorganismos en diferentes aspectos de la explotación de los minerales, abarcando desde la concentración de las especies de interés (a través de la *bioflotación*), la recuperación de los elementos presentes en ellas (*biolixiviación* y *biooxidación*), hasta su acción en tareas de remediación ambiental.

La **biolixiviación** suele hacerse regando “pilas” (acumulaciones de mineral previamente triturado) con soluciones de ácido sulfúrico. Las bacterias existentes en los minerales liberan al metal del mineral que finalmente es recuperado a partir de las soluciones que emergen de la parte inferior de la pila. El cobre es el metal que se recupera en mayor medida por esta metodología, pero además se utiliza para extraer cobalto, níquel, cinc,

entre muchos otros.

La **biooxidación** es aplicable a minerales refractarios de oro en los cuales éste se encuentra incluido dentro de una matriz mineral de sulfuros lo cual dificulta su posterior recuperación. La acción de las bacterias elimina esta matriz liberando al oro y haciendo así más eficaz su recuperación.

Bacterias mineras

Las bacterias mineras logran hacer solubles los minerales. Los microorganismos realizan esta tarea como parte de sus procesos metabólicos, simplemente alimentándose de los minerales (son quimiolitautotróficas o quimioautótrofos).

Durante el proceso, las bacterias “comen” electrones, los cuales son extraídos de los minerales. Estos electrones forman una especie de batería dentro de la bacteria, creando una diferencia de potencial que genera energía, al igual que en una pila. Esta energía es almacenada para luego utilizarla en los distintos procesos metabólicos. Además, estos microorganismos necesitan carbono, pero lo obtienen del aire en forma de CO₂, no de los hidratos de carbono.

A este tipo de microorganismos se los llama "bacterias oxidantes" porque al obtener los electrones oxidan ciertos minerales. La utilización de bacterias permite explotar recursos minerales que son muy difíciles y costosos de lixiviar químicamente. En cambio estos microorganismos son muy eficientes y económicos ya que crecen naturalmente en estos medios.

La primera bacteria identificada capaz de lixiviar fue *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Fue en 1947 cuando se descubrió que era la responsable del gran deterioro que sufrían los equipos metálicos en las instalaciones de una mina española, debido a su gran capacidad de oxidación de las aguas. Diez años más tarde se encontró la misma bacteria en drenajes ácidos de minas de carbón a cielo abierto.

El cianuro

El cianuro como elemento es un producto químico industrial muy útil; utilizado por numerosas industrias que consumen más de un millón de toneladas cada año en procesamiento de metales, la producción de productos químicos orgánicos y plásticos, aplicaciones fotográficas, así como en la minería.

El cianuro ha sido utilizado por la industria minera para separar las partículas de oro y plata por más de 120 años, representando menos del 20% de la demanda global de cianuro industrial. Con una gestión adecuada, el cianuro puede ser utilizado con seguridad y sin perjudicar el medio ambiente a pesar de su toxicidad.

El proceso utilizado para extraer oro usando cianuro se desarrolló en Escocia en 1887, y fue utilizado por primera vez en la minería a gran escala comercial por la Nueva Zelanda Corona Mines Company en Karangahake en 1889. El proceso de lixiviación con cianuro es una alternativa mucho más segura a la extracción con mercurio líquido que anteriormente era el principal método de separación de oro del mineral

Cinética

La termodinámica predice las condiciones de equilibrio a que debe llegar una reacción química en ciertas condiciones dadas, es decir, mide la tendencia de una reacción a ocurrir. Sin embargo, la termodinámica no dice nada acerca de la velocidad con que el sistema procederá hacia el equilibrio ni tampoco nada respecto, al mecanismo de las reacciones. La cinética, por lo tanto, dará información muy valiosa, tanto para la ingeniería de un proceso, como para predecir velocidades en una gran variedad de condiciones. Esto es importante

porque el metalurgista necesita lograr un rendimiento óptimo en el menor tiempo posible. En general, un estudio cinético puede aportar dos tipos de información importantes para:

- Diseño de quipos y proceso.
- Determinación de mecanismos.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

La investigación está enmarcada en la investigación aplicada, trata de solucionar una dificultad en la industria metalúrgica.

Se consideraron las siguientes variables independientes y dependientes:

Variables independientes:

- Temperatura
- Dilución
- Tiempo de Cianuración
- Grado de biooxidación
- RPM
- Granulometría
- pH

Variables dependientes:

- Recuperación del oro

3.2. Muestras

Las muestras son piritas auríferas, producto de la flotación, denominadas relaves, cuya procedencia de las muestras son de las zonas mineras de la franja de Nazca.

3.2.3 Propiedades físicas y químicas

Caracterización Física

Durante la caracterización física se determinaron algunos parámetros importantes para el proceso o bien si es necesario para el diseño de los equipos de la planta de procesamiento.

En la *determinación de densidades*, se determinaron dos tipos de densidades: densidad aparente y densidad real por desplazamiento de volumen. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12

Densidad real y aparente del concentrado.

Densidad (g/mL)	100 Tyler (150 µm)	200 Tyler (75 µm)
Densidad real	2,1	2,9
Densidad aparente	1,2	0,8

Fuente: Elaboración propia

En la determinación del análisis granulométrico se considera la malla de corte 100 y 200, ver Tabla 13.

Tabla 13

Porcentaje pasante mallas de corte.

Mallas	100 Tyler (150 µm)	200 Tyler (75 µm)
Porcentaje pasante	55	47,2

Fuente: Elaboración propia

Caracterización Química

En la determinación de oro de los concentrados de piritas auríferas, se determinaron mediante método de análisis químico de copelación, los resultados se muestran en la Tabla 14:

Tabla 14

Contenido de oro en relaves.

N°	g/t
Muestras	Au
1	2,9
2	2,6
3	2,8
PROMEDIO	2,8
Au	

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Caracterización Mineralógica

El oro es susceptible de existir en cercanías geológicas relativamente variadas (rocas sedimentarias, vetas intra plutónicas o peri plutónicas).

El oro es químicamente inerte en ambientes naturales y es poco afectado durante el intemperismo y descomposición de la roca que lo contiene.

Los relaves de piritas auríferas contienen una gran cantidad de ganga como sílice, galena, blenda, cantidades de arsénico y otros.

Los resultados obtenidos indican que el oro presente en el mineral se presenta en un tamaño muy fino (menor 75 micrones), y que la gran mayoría está como encapsulado. Por tal motivo, se requiere que el mineral sea molido finamente para su posterior tratamiento de cianuración convencional por agitación.

3.3. Operacionalización de variables

3.3.1 Reactivos, materiales biológicos - químicos y equipos

REACTIVOS QUÍMICO:

- Cal
- Cianuro
- Nitrato de plata
- Ioduro de potasio
- Hidróxido de sodio
- Bórax
- Litargirio
- Carbonato de sodio
- Salitre
- Polvo de cinc
- Acetato de plomo
- Ácido nítrico
- Hidróxido de amonio
- Ácido sulfúrico
- Fluoruro de sodio
- Orto-fenantrolina
- $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
- Hidroxilamina

MATERIAL BIOLÓGICO:

Bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*.

MATERIAL QUÍMICO:

- Medio líquido 9K-Fe
- Medio líquido 9K-S
- Medio líquido 0K

EQUIPOS:

- Chancadora de quijada
- Molino de bolas
- Horno de mufla
- Horno de crisol
- Incubadora
- Microscopía electrónica de barrido (SEM)
- Espectrofotómetro de absorción atómica
- Ro-Tap
- Bombas
- Bandeja de acero
- Balanza
- Microscopio de campo claro
- Cámara de flujo laminar
- Autoclave
- Material de vidrio
- Material fungible
- Biorreactores aireado

3.4. Procesamiento y análisis de datos

3.4.1 Biolixiviación de relaves

A) Evaluación de la estructura de la pirita

Se realizó antes y después del proceso de biooxidación, para ello se empleó un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).

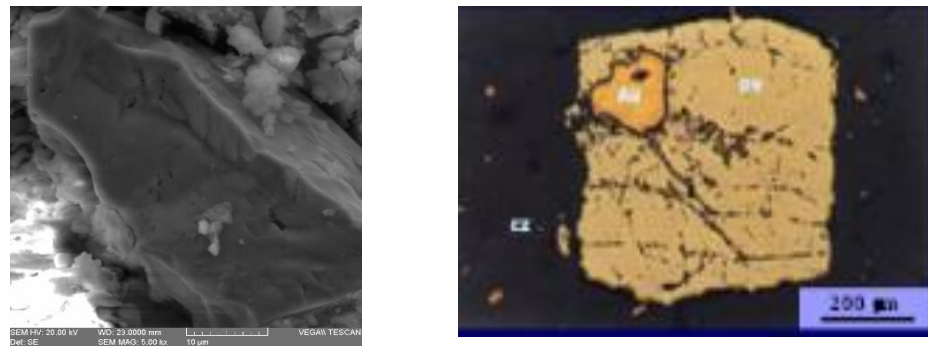


Figura 14. Relaves de pirita antes del proceso de biooxidación

Fuente: Elaboración propia

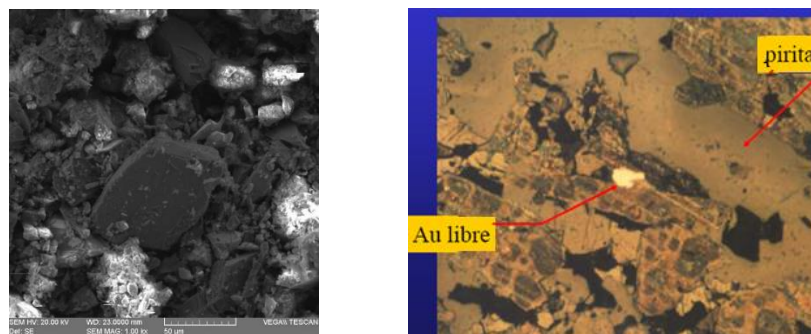


Figura 15. Relaves de pirita después del proceso de biooxidación

Fuente: Elaboración propia

B) Activación de los cultivos

2 mL del cultivo microbiano puro se llevó a un matraz Erlenmeyer de 50 mL, el cual contendrá 25 mL de medio de cultivo; cuya composición es la que se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15

Medio de cultivo 9 K-Fe para reactivar a *A. ferrooxidans*

Componentes	g/L
K_2HPO_4	0,04
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0,4
$(NH_4)SO_4$	0,1
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	33,3

Fuente: Kim y cols.2002.

El cultivo microbiano en el medio de cultivo se incubó a 298 °K, con aireación, a un pH de 1,5 ajustado con H_2SO_4 . Se realizó recuentos microbianos mediante una cámara de Petroff-Hausser para determinar, que al fin de la incubación se llegue a una concentración de 10^8 cel/mL.

C) Masificación de los cultivos puros activados

Se incorpora 25 mL de cultivo microbiano puro activado (10 %), a 225 mL de medio de cultivo contenido en un matraz, manteniendo la cepa en su medio correspondiente. Se incubó en un matraz a 298 °K con aireación que permitió alcanzar una concentración de 10^8 cel/mL.

D) Adaptación de los cultivos microbianos puros activados

Se preparó para cada cultivo microbiano puro 600 mL de sus correspondientes medios de cultivo por separado en matraces; a cada medio de cultivo se agregó pirita adecuadamente, e independientemente se le inoculó el cultivo microbiano puro masificado en un volumen del 10 %. Finalmente, se incubaron los matraces a 298 °K hasta que se alcanzó una concentración microbiana de 10^8 cel/mL.

E) Biooxidación de la pirita en biorreactores por cultivo microbiano puro:

Se agregó 630 mL de medio de cultivo (Tabla 15) en un biorreactor con capacidad de 1000 mL, luego se adicionó 70 mL de inóculo proveniente del cultivo microbiano puro adaptado. En un biorreactor, por duplicado, se incorporó el relave, en una la cantidad de entre el

10 - 12 % (w/v). Cada biorreactor tuvo dos repeticiones y fueron incubados a 298 °K con aireación hasta que después de incrementarse la biomasa microbiana se observó una disminución de la misma.

F) Biooxidación de la pirita en biorreactores por los cultivos microbianos:

Se agregó 630 mL de medio de cultivo (Tabla 15) en un biorreactor con capacidad de 1000 mL, luego se adicionó 35 mL de inóculo de cada uno de los dos cultivos microbianos puros adaptados en un biorreactor, por duplicado, se incorporó la arsenopirita, en la cantidad de entre 10 - 12 % (w/v). Cada biorreactor tuvo dos repeticiones y fueron incubados a 298 °K con aireación hasta que después de incrementarse la biomasa microbiana se observó una disminución de la misma.

Tabla 16

Medio de cultivo para la biooxidación

Composición	[g/L]
K ₂ HPO ₄	0,04
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,4
(NH ₄)SO ₄	0,1

Fuente: Kim y cols.2002.

G)Evaluación del proceso biooxidación con la pirita en los biorreactores

El pH se evaluó periódicamente con un pHmetro digital marca HANNA Instruments; la biomasa mediante la cámara de Petroff Hausser y un microscopio compuesto.

Se utilizó la cámara de Petroff Hausser y un microscopio compuesto; y la concentración de hierro total (Fe_{TOTAL}) y hierro III (Fe^{+3}) en solución.

Para la determinación de fierro se hizo lo siguiente:

Preparación de la curva de calibración:

Se preparó una solución madre de 100 ppm de Fe^{+3} . Se pesó 0,00244 g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, y se le introdujo en una fiola de 50 mL de capacidad. El cual se enrazó a 50 mL con agua destilada; a partir de la solución madre se preparó diluciones en tubos de ensayo de 2, 4, 6, 8 y 10 ppm.

Para 5 tubos de ensayo se tomaron 0,5 mL de cada dilución preparada de la solución madre. Para un sexto tubo se agregó 0,5 mL de agua destilada, este fue tomando como blanco; a cada uno de los 6 tubos se le agregó 0,5 mL de H_2SO_4 3M, luego 1-2 gotas de KMnO_4 0,1N y finalmente se agregó 3 mL de KSCN 2M, luego fue enrazado con agua destilada hasta 10 mL.

Se procedió a la lectura en espectrofotómetro a 478 nm de longitud de onda.

Las lecturas de las diluciones de la solución madre en el espectrofotómetro fueron llevadas al Excel, para determinar la curva de calibración.

Determinación de fierro total:

Se colocó en tubos de ensayo 0,5mL de la muestra (fierro en solución, presente en el biorreactor producto de la biooxidación) y se le adicionó 0,5 mL de H_2SO_4 3M, 1-2 gotas de KMnO_4 0,1N y 3 mL de KSCN 2M.

Luego se enrazó a 10 mL de agua destilada y se realizó la lectura en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 477 nm de longitud de onda. Estas lecturas se llevaron a la curva de calibración para determinar la concentración de fierro total.

Determinación de ión férrico:

En tubos de ensayo se colocó 0,5 mL de la muestra (fierro en solución, presente en el biorreactor producto de la biooxidación) y se le adicionó 0,5 mL de H₂SO₄ 3M y 3ml de KSCN 2M.

Luego se enrazó a 10 mL de agua destilada y se realizó la lectura en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 478 nm de longitud de onda. Estas lecturas se llevaron a la curva de calibración para determinar la concentración de hierro III.

Determinación de ión ferroso:

Las lecturas que se obtuvieron de las dos pruebas anteriores (Fe_{total} y Fe⁺³) sirven para la obtención de Fe⁺² por diferencia, como indica la siguiente expresión matemática:

$$\text{Fe}^{+2} = \text{Fe}_{\text{total}} - \text{Fe}^{+3}$$

[31]

H) Determinación de la biooxidación de la pirita por el cultivo microbiano:

Las muestras biooxidadas según la Tabla 17, considerando el ensayo III presenta mayor grado de biooxidación. Estas muestras pre tratadas son cianuradas y cuantificadas mediante el análisis del porcentaje de oro recuperado.

Se verá posteriormente en la Figura 6 y 7, el comportamiento del hierro Fe^{+3} y Fe^{+2} versus el tiempo de biooxidación en los biorreactores. Este valor constituirá el grado de biooxidación de la pirita por el cultivo microbiano correspondiente.

Análisis estadístico:

Tabla 17

Diseño de los experimentos

Parametro	Ensayos		
	I	II	III
Inóculo	10%	10%	15%
Inóculo inicial	$1,3 \times 10^8$	$1,3 \times 10^8$	$1,3 \times 10^8$
Sustrato (mineral)	10 %	10 %	10 %
Agitación	sí	sí	sí
Aireación	No	sí	sí
Temperatura	25 °C	25 °C	25 °C
Volumen	250 ml	250 ml	250 ml
Medio de cultivo	9 K	9 K	9 K

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Cianuración de los relaves biooxidados cianuración de la pirita aurífera biooxidada con *a. ferrooxidan*.

Los relaves “pirita aurífera” pre tratadas u oxidadas, consideradas como residuos oxidados son lavados, secados, pesados y molidos, para ser cianurados. Condiciones de la biooxidación aplicado a los relaves, en la Tabla 18.

TABLA 18

Condiciones experimentales de las pruebas de lixiviación férrica

[Fe (III)]	8,5 g/L
pH inicial	1,6 (ajustado con ácido)
Volumen de reacción	630 - 1000 mL
Densidad de pulpa	10 %, p/v
Temperatura	25 °C
Agitación	200 rpm

Fuente: Elaboración propia

CIANURACIÓN DE LA PIRITA AURÍFERA BIOOXIDADA

Condiciones experimentales para la cianuración:

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN CON PRE TRATAMIENTO (BIOOXIDACIÓN)

Tabla 19**PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN N° 01**

LEY DE CABEZA DEL RELAVE	0,09	Onz/t
Peso de relave biooxidado	300	g.
Agua en proceso	690	mL
Dilución	2,3	
PH natural del relave	6,5	
PH de cianuración	10,6	
G.E.	2,9	
Densidad aparente		
% Malla - 200	71	
Tiempo de cianuración	20	H
Pruebas de consumo		
Cianuro de sodio	2,2	kg/t
Cal	8,5	kg/t
Resultados		
Ley de los ripios	0,01	Onz/t
Recuperación de oro	88,9	%

Fuente: Elaboración propia

3.4.3 PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN SIN TRATAMIENTO

Tabla 20

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN N° 02

Pruebas de lixiviación n° 01		
Ley de cabeza del relave	0,09	Onz/t
Peso del mineral	1 000	G
Agua en proceso	2 276	MI
Dilución	4,7	
Ph natural del relave	6,5	
Ph de cianuración	11	
G.e.	2,9	
Densidad aparente		
% malla - 200	71	
Tiempo de cianuración	8	H
Pruebas de consumo		
Cianuro de sodio	9,4	kg/t
Hidróxido de sodio	5,4	kg/t
Resultados		
Ley de los rípios	0,05	Onz/t
Recuperación de oro	44,4	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21

Pruebas de lixiviación n° 03

LEY DE CABEZA DEL RELAVE	0,09	Onz/t
Peso del mineral	1000	G
Agua en proceso	2276	mL
Dilución	2,3	
PH natural del relave	6,5	
PH de cianuración	11	
G.E.	2,9	
Densidad aparente		
% Malla - 200	71	
Tiempo de cianuración	24	G
Pruebas de consumo		
Cianuro de sodio	10,1	kg/t
Cal	5,2	kg/t
Resultados		
Ley de los ripios	0,04	Onz/t
Recuperación de oro	55,6	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN N° 04

LEY DE CABEZA DEL RELAVE	0.09	Onz/t
Peso del mineral	1000	G
Agua en proceso	2276	mL
Dilución	2,3	
PH natural del relave	6,5	
PH de cianuración	11	
G.E.	2,9	
Densidad aparente		
% malla - 200	71	
Tiempo de cianuración	48	H
Pruebas de consumo		
Cianuro de sodio	10,9	kg/t
Cal	5,31	kg/t
Resultados		
Ley de los rípios	0,035	Onz/t
Recuperación de oro	61,1	%

Fuente: Elaboración propia

3.4.4 FLOTACIÓN

Condiciones de las variables operativas del proceso.

Tabla 23

VARIABLES OPERATIVAS

Ley cabeza (relaves)	2,8 g/t
RPM	1200
MALLA 200	65 % PASANTE
pH	5,6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24

DOSIFICACIÓN EN LABORATORIO

Dosificación en Laboratorio				
Peso de Muestra (gramos)				1200
Reactivo		Sol. %	mL	Dosificación (kg/t)
Modificadores y Depresores	Sulfuro			
	Sodio			
	Cianuro			
	Sodio			
	Hidróxido de Sodio	Puro		
	Xantato	5	3	0,150
Colectores y Promotores	AP- 3473		2	
Espumante	F- 507	Puro	0,3	0,004

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1 Biooxidación

Se observa una clara diferencia en la velocidad de crecimiento entre los ensayos con aireación y si ellos, obteniendo un mayor crecimiento en los ensayos con aireación y mayor Inóculo (Tabla 18)

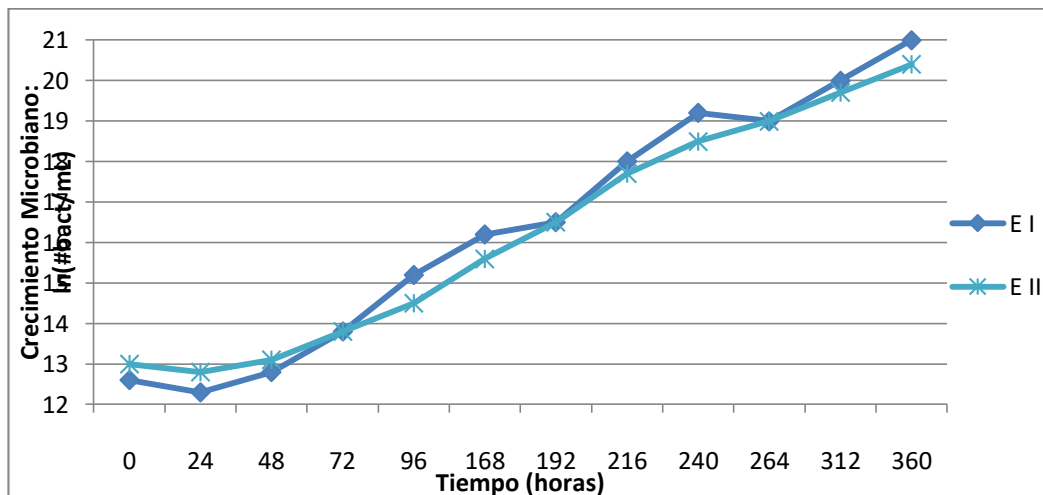


Figura 16. Cinética de crecimiento microbiano

Fuente: Elaboración propia

La variación de pH en los ensayos, se observó el cambio de acidez esperada, más aun en el ensayo III, fue la que tuvo mayor cambio en la acidez y por ende mayor biooxidación

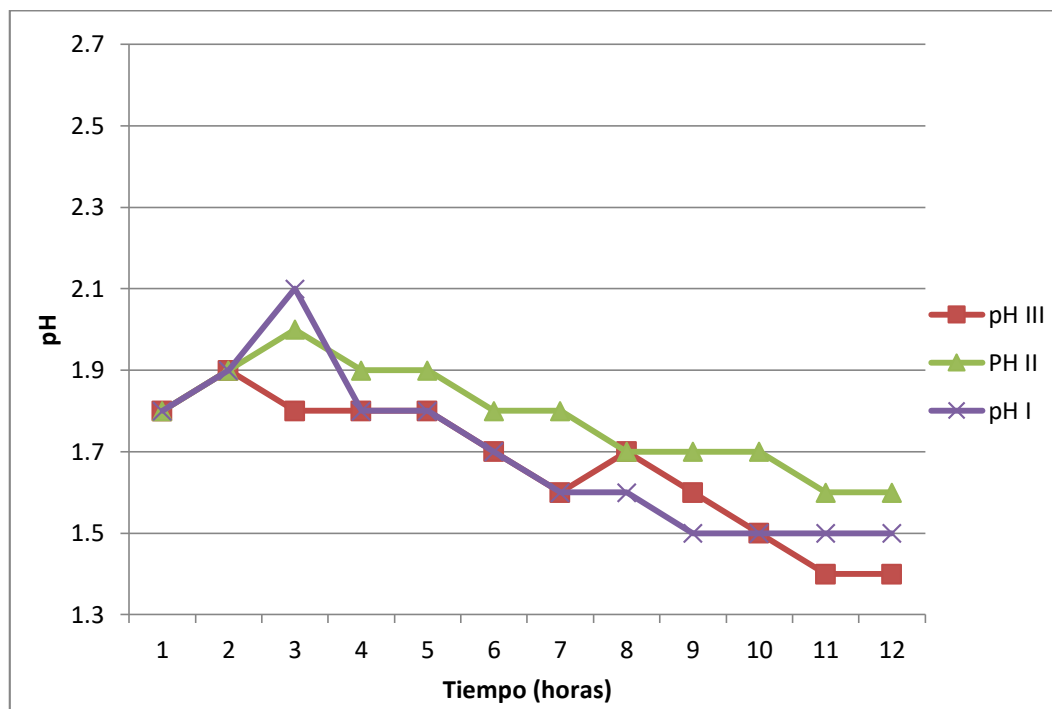


Figura 17. Variación del pH en el tiempo de los cultivos

Fuente: Elaboración propia

El Fe^{+3} aumenta cuando hay oxidación del hierro ferroso por el consorcio bacteriano (*Thiobacillus ferrooxidans* y *thiooxidan*) a

bajos pH, la mayor oxidación se obtuvo en el ensayo III con un valor de 80 % de oxidación, y el menor fue en el ensayo II, este con respecto al Fe^{+2} del medio de cultivo (ver figura 17 y 18).

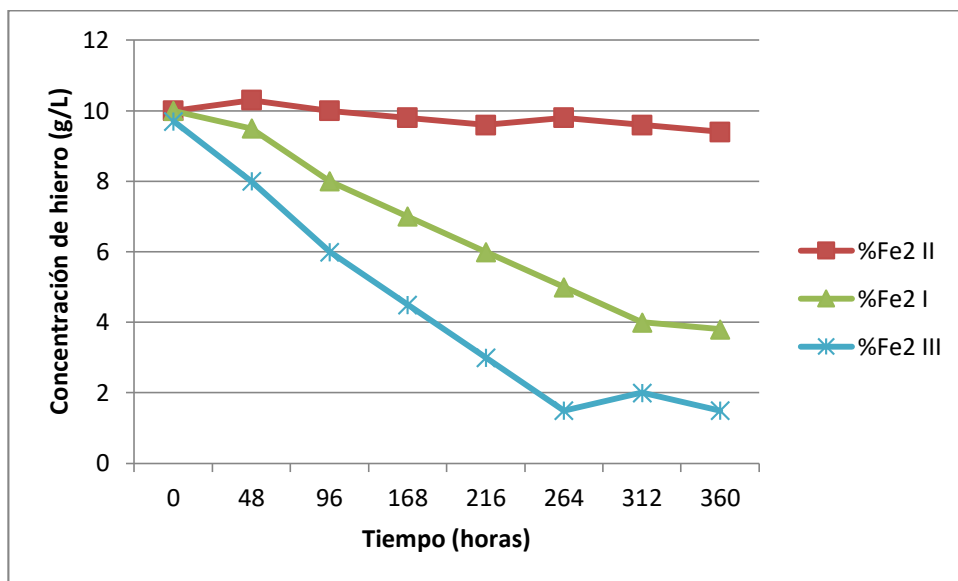


Figura 18. Variación de la concentración de Fe^{+2} en solución en el tiempo del cultivo

Fuente: Elaboración propia

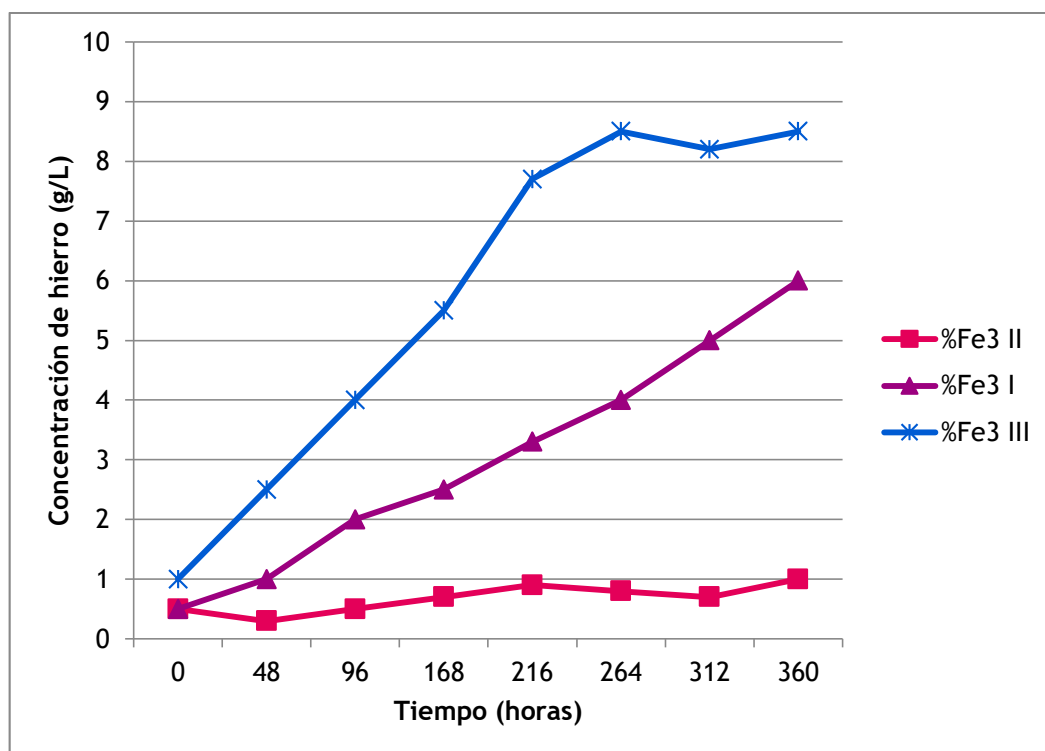


Figura 19. Variación de la concentración de Fe^{+3} en solución con el tiempo para la biolixiviación de pirita por *At. Ferrooxidans* con 5 g/l de ión férrico inicial en solución a pH 1,5 con 200 rpm de agitación y 298 K de temperatura

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 LIXIVIACIÓN CON TRATAMIENTO BIOOXIDACIÓN

Tabla 25

Pruebas de lixiviación n° 01: tiempo lix 20 horas

PRUEBAS DE CONSUMO		
Cianuro de sodio	2,2	kg/t
Cal	8,5	kg/t
Resultados		
Ley de los ripios	0,01	onz/t
Recuperación de oro	88,9	%

Fuente: Elaboración propia

Los consumos de cianuro son los adecuados para un proceso de cianuración, con respectos a los costos de reactivos.

Las recuperaciones son las adecuadas, obteniéndose el 88,9 % en tiempo de cianuración < 20 h, cuando los relaves son pre tratados mediante la biooxidación.

4.1.3 LIXIVIACIÓN SIN TRATAMIENTO

Tabla 26

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN N° 02: TIEMPO LIX 8 HORAS

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN N° 01		
LEY DE CABEZA DEL RELAVE	0,09	Onz/t
PESO DEL MINERAL	1000	g
AGUA EN PROCESO	2276	mL
DILUCION	4,7	
pH NATURAL DEL RELAVE	6,5	
pH DE CIANURACIÓN	11	
G.E.	2,9	
DENSIDAD APARENTE		
% MALLA - 200	71	
TIEMPO DE CIANURACIÓN	8	h
PRUEBAS DE CONSUMO		
CIANURO DE SODIO	9,4	kg/t
HIDRÓXIDO DE SODIO	5,4	kg/t
RESULTADOS		
LEY DE LOS RIPIOS	0,05	Onz/t
RECUPERACIÓN DE ORO	44,4	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN N° 03: TIEMPO LIX 24 HORAS

PRUEBAS DE CONSUMO		
CIANURO DE SODIO	10,1	kg/t
CAL	5,2	kg/t
RESULTADOS		
LEY DE LOS RIPIOS	0,04	Onz/t
RECUPERACIÓN DE ORO	55,6	%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28

PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN N° 04: TIEMPO LIX 48 HORAS

PRUEBAS DE CONSUMO		
CIANURO DE SODIO	10,9	kg/t
CAL	5,31	kg/t
RESULTADOS		
LEY DE LOS RIPIOS	0,035	Onz/t
RECUPERACIÓN DE ORO	61,1	%

Fuente: elaboración propia

Los consumos de cianuro se incrementan entre 9,4 a 10,9 kg/t, en la cianuración directa, por la presencia de elementos cianicidas en el relave, incrementado los costos de tratamiento.

Cuando los relaves son cianurados directamente, se llega a recuperaciones de 61,1 % en 48 horas de cianuración (ver Figura 19).

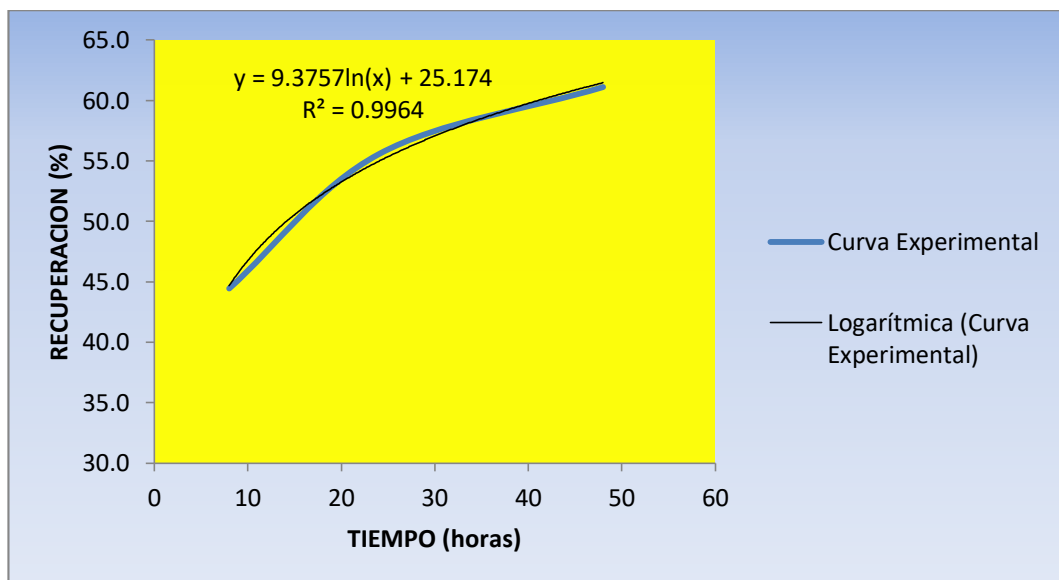


Figura 20. Cinética de extracción del oro

Fuente: Elaboración propia

4.1.4 FLOTACIÓN

Tabla 29

PRUEBA FLOTACIÓN BATCH N°5

PRODUCTO	PESO kg	%Peso	LEY		CONTENIDOS		DISTRIBUCIÓN %		Ratio de Concentración
			Au (g/t)	Ag (oz/t)	Au	Ag	Au	Ag	
CABEZA	1,200	100,00	2,80		2,564		100,00		
Concentrado	0,126	10,50	9,30		1,172		45,71		
Au									9,52
Medios	0,042	3,50	1,20		0,050		1,97		
Cleaner Au									
Relave de	1,032	86,00	1,30		1,342		52,33		
Flotación.									
CABEZA			2,87		2,564		100,00		
analizada									

Fuente: Elaboración propia

4.2. Discusión

Resultados de recuperación de los procesos de cianuración con tratamiento, cianuración directa y flotación.

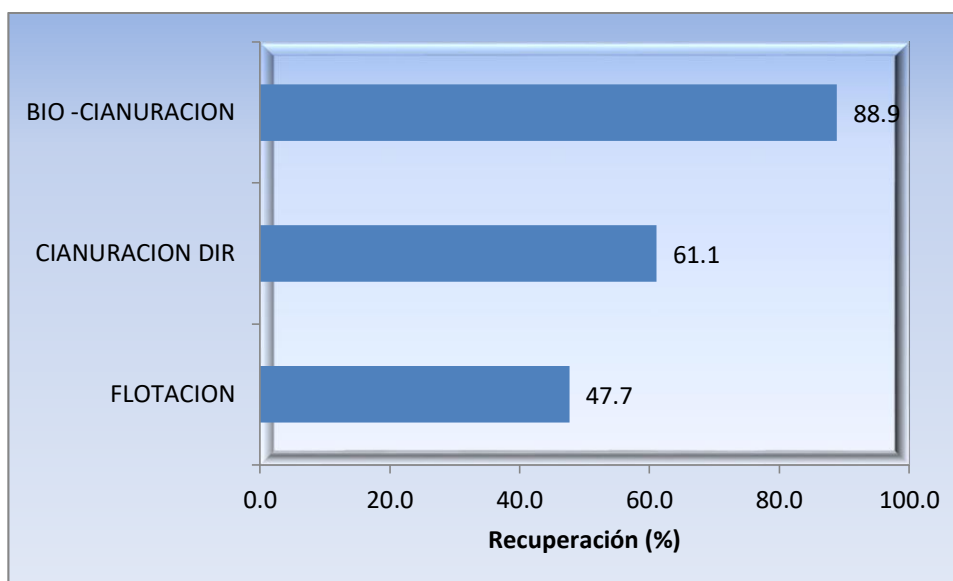


Figura 21. Extracción de oro: cianuración con biooxidación, cianuración directa y flotación de relaves piritas auríferas

Fuente: Elaboración propia

Se puede ver en la Figura 20 el resultado de las pruebas metalúrgicas de tres procesos aplicados a los relaves, en donde, la mayor recuperación corresponde al relave pre tratado mediante la biooxidación (88,9 %).

CONCLUSIONES

Se utilizó un medio de cultivo empleando una cepa de *Acidithiobacillus ferrooxidans* variando las proporción Fe^{+3}/Fe^{+2} . De acuerdo con los resultados obtenidos, los ensayos 20,80, mostraron mayor eficiencia, presentando los mayores porcentajes de biolixiviación de hierro en solución, alcanzando el 80 % de oxidación de la pirita después de 14 días de pruebas.

La cianuración directa, sin tratamiento de la pirita aurífera, presenta una máxima recuperación del 61,1 % a las 48 horas del proceso, debido a que un porcentaje de oro aún se encuentra encapsulado dentro de la matriz de la pirita. Al realizar el pre tratamiento de biooxidación se logra beneficiar la recuperación del oro.

El consumo de cianuro de sodio en las pruebas de cianuración sin tratamiento llegan hasta 9,4 kg/t, disminuyendo significativamente en muestras de *relaves con tratamiento* considerado < 2,2 kg/t incrementándose el consumo cal hasta 8,5 kg/t, debido a la acidificación de los relaves en la etapa de biooxidación. El consumo de cianuro se redujo entonces de 9,4 kg / t a 2,2 kg / t en los relaves oxidados.

En cianuración con tratamiento se lograron recuperaciones de oro por encima del 88 %, con tiempo de cianuración menor a 20 horas.

RECOMENDACIONES

A pesar de las numerosas ventajas de la lixiviación bacteriana, que es actualmente el proceso de elección para sólo el 22 % de las plantas de tratamiento de oro refractarios en todo el mundo, un desarrollo que puede disminuir aún más los costos operativos y de capital y aumentar las aplicaciones comerciales. El éxito en estas aplicaciones promete extender la utilización de lixiviación bacteriana, aumento de la eficiencia de lixiviación, y mejorar la competitividad de la tecnología.

Por lo comentado se sugiere implementar el proceso a nivel piloto.

El proceso a nivel piloto, se propone realizar el proceso de heap leaching, este método de lixiviación es de baja inversión. El costo operativo se determinará en esta etapa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Oscar Benavente. “Proceso Lixiviación” Antofagasta, 2004. Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

F., Missari Chuquipoma, “Metalurgia del Oro”, Primera Edición, Editorial San Marcos, Lima-Perú 2010. Pp 25 - 29.

Rohwerder, T.; Gehrke, T.; Kinzler, K.; Sand, W. Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation, *Appl Microbiol Biotechnol*, v. 63, p. 239-248, 2003.

Mular, A.L., y R.B. Bhappu, editors. 1980. *Mineral Processing Plant Design*. 2nd edition. Nueva York: SNE_AIME.

Adamson, R. J. 1972. *Gold Metallurgy in South Africa*. Johannesburgo: Chamber of Mines of South Africa.

M. Taxiarchou, K. Adam, A. Kontopoulos, Bacterial oxidation conditions for

gold extraction from Olympias refractory arsenical pyrite concentrate.
Volumen 36, Issue 2, September 1994, Pages 169–185.

Rossi, G. (2001). The design of bioreactors. *Hydrometallurgy*, vol. 59, no. 2-3,
p. 217-231.

Bosecker, K. (2001). Microbial leaching in environmental clean-up
programmes. *Hydrometallurgy*. 59, 245-248.

Kelly, D.P., and Wood, A.P. (2000). "Reclassification of some species of
Thiobacillus to the newly designated genera *Acidithiobacillus* gen. nov.,
Halothiobacillus gen. nov. and *Thermithiobacillus* gen. nov.". *Int. J. Syst. Evol.*
Microbiol. 50 (2): 511–6.

Bosecker, K. (2001). Microbial leaching in environmental clean-up
programmes. *Hydrometallurgy*. 59, 245-248.

ROSSI, G. (2001). The design of bioreactors. *Hydrometallurgy*, vol. 59, no. 2-
3, p. 217-231.

Meruane G., Salhe C., Wiertz J., Vargas T. Novel electrochemical-

enzymatic model which quantifies the effect of the solutions Eh on the kinetic of ferrous iron oxidation with *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Biotech Bioeng.* 2002;80:280–288.

Corkhill C.L., Vaughan D.J. 2009. Arsenopyrite oxidation - A review. *Applied Geochemistry.* doi:10.1016/j.apgeochem.2009.09.008.

Murphy, R., Strongin, D.R., 2009. Surface reactivity of pyrite and related sulfides. *Surface Science Reports.* Vol 64. Pp 1-45.

Daoud J, Karamanev D (2005) Formation of jarosite during Fe² oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Min Eng* 19:960–967.

Rawlings D.E., Tributsch H., Hansford G.S. 1999. Reasons why 'Leptospirillum'-like species rather than *Thiobacillus ferrooxidans* are the dominant iron-oxidizing bacteria in many commercial processes for the biooxidation of pyrite and related ores. *Microbiology.* 145: 5-13.

Bozdemir, T., Durusoy, T., Erincin, E., Yürüm, Y. 1996. Biodesulfurization of Turkish lignites. *Fuel.* 75 (13): 1596-1600.

Gomez, C., Blazquez, M.L., Ballester, A., 1999. Bioleaching of a Spanish complex sulphide ore bulk concentrate. *Minerals Engineering*. Vol 12. Pp 93–106.

Collinet, M.N., Morin, D., 1990. Characterization of arsenopyrite oxidizing *Thiobacillus*. Tolerance to arsenite, arsenate, ferrous and ferric iron. *Antonie van Leeuwenhoek*. Vol 57. Pp 237-244.

Barrett, J., Ewart, D.K., Hughes, M.N. & Poole, R.K., 1993. Chemical and biological pathways in the bacterial oxidation of arsenopyrite. *FEMS Microbiol Rev*. Vol 11. Pp 57-62.

Shi, S., Fang, Z., 2005. Bioleaching of marmatite flotation concentrate by adapted mixed.

Shi, S., Fang, Z., Ni, J., 2006. Comparative study on the bioleaching of zinc sulphides. *Process Biochemistry*. Vol 41. Pp 438–446.

Mason, L.J., Rice, N.M., 2002. The adaptation of *Thiobacillus ferrooxidans* for the treatment of nickel–iron sulphide concentrates. *Minerals Engineering*. Vol 15. Pp 795–808.

Xia, L., Liu, X., Zeng, J., Yin, C., Gao, J., Liu, J., Qiu, G., 2008. Mechanism of enhanced bioleaching efficiency of *Acidithiobacillus ferrooxidans* after adaptation with chalcopyrite. *Hydrometallurgy*. Vol 92. Pp 95–101.

Astudillo, C., Acevedo, F. 2008. Adaptation of *Sulfolobus metallicus* to high pulp densities in the biooxidation of a flotation gold concentrate. *Hydrometallurgy* 92, 11-15.

Acevedo F. 2000. The use of reactor in biominig proceses. *Electric Journal of Biotechnology*. 3 184- 190. Disponible en internet:<http://ejbiotechnology.uvc.cl/content/vol13/issue3/full/4/>.

Gómez, J.M. y Cantero D. 2005. Biooxidación del ión ferroso. In: Fernando Acevedo y Juan Carlos Gentina (Editores). *Fundamentos y Perspectivas de las Tecnologías Biomineras*. 25-43.

Valencia, P., Acevedo, F. 2008. Are bioleaching rates determined by the available particle surface area concentration?. *World J Microbiol Biotechnol*. 25 101–106.

Rawlings, D.E. 2003. *Biomineralization of metal-containing ores and*

concentrates. *TRENDS in Biotechnology*. 21 38-45.

Rawlings, D.E. 2004. Bioleaching, the improvement of bioleaching organisms and the molecular biology of *Acidithiobacillus Ferrooxidans*. *International biodeterioration & biodegradation*. 37, Issues 1-2 133.

Das T, Ayyappan S, Chaudhury G.R. 1999. Factors affecting bioleaching kinetics of sulfide ores using acidophilic micro-organisms. *BioMetals*, 12. 1-10.

Hayward, T., Satalic D.M., Spencer, P.A. 1997. Engineering, equipment and materials: Developments in the design of a bacterial oxidation reactor. *Minerals Engineering*, 10, 10. 1047-1055.

Ossa M. 2004. Biolixiviación de sulfuros (pirita-arsenopirita) utilizando cepas nativas de acidófilos como pretratamiento, para el beneficio de metales preciosos, mina El Zancudo, Titiribí, Antioquia. Tesis de Maestría, Biotecnología. Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín.

Gómez, J.M. y Cantero D. 2005. Biooxidación del ión ferroso. In: Fernando Acevedo y Juan Carlos Gentina (Editores). *Fundamentos y Perspectivas de las Tecnologías Biomineras*. 25-43.

Acevedo, F., Gentina, J.C., Valencia, P. 2004. Optimization of pulp density and particle size in the biooxidation of a pyritic gold concentrate by *Sulfolobus metallicus*. *World J Microbiol Biotechnol* 20 865–869.

Crundwell, F., 1996. The formation of biofilms of iron-oxidising bacteria on pyrite. *Minerals Engineering*. 9, 91081–1089.

Sand, W., Gehrke, T., Hallmann, R., Schippers, A., 1995. Sulfur chemistry, and the (In)direct attack mechanism- a critical evaluation of bacterial leaching. *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol 43. 961–966.

Sampson, M.I., Philips, C.V., Ball, A.S., 2000. Investigation of the attachment of *Thiobacillus ferrooxidans* to mineral surfaces using scanning electron microscopy analysis. *Miner. Eng.* 13, 643–656.

Murphy, R., Strongin, D.R., 2009. Surface reactivity of pyrite and related sulfides. *Surface Science Reports*. Vol 64. Pp 1-45.

Sand, W., Gehrke, T., Hallmann, R., Schippers, A., 1995. Sulfur chemistry, and the (In)direct attack mechanism- a critical evaluation of bacterial leaching.

Applied Microbiology and Biotechnology. Vol 43. 961–966.

Crundwell, F., 1996. The formation of biofilms of iron-oxidising bacteria on pyrite. *Minerals Engineering*. 9, 91081–1089.

Instituto de Ingenieros de minas del Perú, Revista Minería, N° 424 año LX Enero 2013/www.iimp.org.pe. pp50-56.

W. E. Mendoza, *Metalurgia del Oro y Plata Publicado*, 2010, pp.1

S. Thompson, *Gold dissolution and activation in cyanide solution: kinetics and mechanism*, 2000, pp 57.

Ballester; J. Sancho; L. F. Verdeja , *metalurgia extractiva: fundamentos* (vol. I) 2000, pp 360-371, 381-387.

Arima, H. (2003) *Gold Extraction and Recovery by Using Ammonium Thiosulfate Solution*. Department of mining engineering. Kingston, Ontario, Canada, Queen´s University. Ref. Oraby, E.A. (2009).

Aylmore, M.G. & Muir, D.M. (2001) Thiosulfate Leaching of Gold – A Review. *Minerals Engineering*, Vol 14, pp. 135-174.

Buisman, C.J.N. & Picavet, M.A. (2004) Process for Regenerating Thiosulphate from a Gold Leaching Stream. U.S. Pat. No. 0151657 A1.