

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN- TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EVALUACIÓN DE LA BIOOXIDACIÓN DE CONCENTRADO
ARSENOPIRÍTICO AURÍFERO POR PRETRATAMIENTO
CON BACTERIAS QUIMIOLITOTROFAS ACIDÓFILAS
QUE MEJOREN LA RECUPERACIÓN DEL ORO POR
CIANURACIÓN EN LA EMPRESA MINERA
EMINSOL S.A. BOLIVIA-2015**

TESIS

Presentada por:

Bach. Joel Mario Alvarez Cuarite

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA-PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN- TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EVALUACIÓN DE LA BIOOXIDACIÓN DE
CONCENTRADO ARSENOPIRÍTICO AURÍFERO POR
PRETRATAMIENTO CON BACTERIAS
QUIMIOLITOTROFAS ACIDÓFILAS QUE
MEJOREN LA RECUPERACIÓN DEL ORO POR
CIANURACIÓN EN LA EMPRESA
MINERA EMINSOL S.A.
BOLIVIA-2015**

Tesis sustentada el 23 marzo del 2016, estando integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE:
MSc. Edgardo Teófilo Valdez Cortijo

SECRETARIO:
Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco

MIEMBRO:
MSc. Nataniel Mario Linares Gutierrez

ASESOR:
Dr. Tolomeo Raúl Soto Perez

“A Dios, mi familia, profesores por su incondicional apoyo
Y ser un pilar fundamental, de los cuales forjaron
En mí los valores.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se evaluó el proceso de biooxidación de concentrados arsenopiríticos por cepas de *acidófilos puros compatibles con Acidithiobacillus ferrooxidans* y el consorcio *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *thiooxidans*, con porcentaje de sólidos de 8 y 12 % para cada prueba respectivamente, los ensayos se realizaron en reactores discontinuos, previa adaptación de los microorganismos al mineral y dos tamaños de partícula, pasante malla Tyler 200 (-75µm).el concentrado arsenopirítico se procesó con pre tratamiento y sin tratamiento con cianuro, para afrontar el consumo de reactivos y la recuperación de oro. Además se realizó observaciones del concentrado antes del pre tratamiento y después de ataque bacterial usando microscopía electrónica de barrido (SEM).La caracterización morfológica mostró una oxidación avanzada del concentrado arsenopirítico aurífero. Los resultados indican que el sistema del consorcio *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *thiooxidans* con porcentaje de sólidos de 8% alcanzó la máxima oxidación y por y tanto la mayor recuperación de oro del concentrado después de 10 días de operación en continuo, logrando una concentración de hierro férrico en solución de 9 g/L correspondiente a un porcentaje de extracción de oro hasta el 91,3 %

CONTENIDO

	<u>PÁGINA</u>
RESUMEN	III
INDICE DE FIGURAS	XV
INDICE DE TABLAS	XX
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1: GENERALIDADES	
1.1. Ubicación de La Mina	3
1.2. Geología y mineralogía	3
1.3. Breve descripción de planta	4
1.4. Producción de oro en Bolivia	4
1.5. Tendencias del precio a futuro	5
CAPITULO 2: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	
2.1. Identificación y descripción del problema	6
2.2. Formulación del problema	6
2.3. Justificación e importancia del problema	7
2.4. Objetivos	9
2.4.1. Objetivo General	10

2.4.2. Objetivos Específicos	10
2.5. Hipótesis	11
2.6. Antecedentes	11

CAPITULO 3: MARCO TEÓRICO

3.1. Propiedades del Oro	12
3.1.1. Propiedades Físicas	12
3.1.2. Propiedades Químicas	14
3.2. Mineralogía del Oro	16
3.2.1. Depósitos primarios o filonianos (vetas y/o filones)	16
3.2.2. Depósitos secundarios o aluviales (diseminados)	18
3.3. Flotación de Arsenopiritas auríferas	20
3.4. Factores que afectan la recuperación de oro	23
3.4.1. Tipo de mineral aurífero	23
3.4.2. Tamaño de partículas de oro	25
3.4.3. Minerales asociados al oro	28
3.4.3.1. <i>Asociación oro-pirita</i>	28
3.4.3.2. <i>Asociación oro-arsenopirita</i>	29
3.4.3.3. <i>Asociación oro-calcopirita</i>	30

3.4.3.4.	<i>Asociaciones pirita- calcopirita-oro</i>	30
3.4.3.5.	<i>Asociación de oro y otros sulfuros o sulfosales</i>	31
3.4.3.6.	<i>Asociación oro-óxidos de Hierro</i>	31
3.4.3.7.	<i>Asociación oro-minerales de uranio</i>	31
3.4.3.8.	<i>Asociación oro-silicatos y carbonatos</i>	32
3.4.3.9.	<i>Asociación oro-material carbonaceo</i>	32
3.4.3.10.	<i>Asociación oro-arena y grava (Placeres auríferos)</i>	33
3.4.3.11.	<i>Distribución en el mineral que lo contiene.</i>	34

3.5.	PROCESOS DE PRETRATAMIENTO DE MINERALES Y/O CONCENTRADOS	
	REFRACTARIOS	39
3.5.1.	Tostación	41
3.5.2.	Oxidación a Presión	48
3.5.3.	Oxidación química a presión	53
3.5.4.	Molienda ultrafina	56
3.5.5.	Bioliixiviación	57
	3.5.5.1. Microorganismos en la biooxidación	61
	3.5.5.2. Factores que afectan el proceso de bioliixiviación	67
	3.5.5.3. Mecanismo de ataque bacteriano al mineral	75
	3.5.5.3.1. Mecanismo de ataque a la Arsenopirita	77
	3.5.5.3.2. Cuantificación de bacterias.	88
3.5.6.	Problemas que presenta el pre tratamiento de biooxidación	98

3.6.	TEORIA DE LA CIANURACIÓN	99
3.6.1.	Cianuración del Oro	99
3.6.2.	Efectos de los variables importantes de la cianuración	105
3.6.2.1.	Efecto del tamaño de la partícula en la velocidad de disolución del oro	105
3.6.2.2.	Efecto del Oxígeno sobre la Cianuración del oro	104
3.6.2.3.	Efecto de la Concentración de Cianuro sobre la velocidad de disolución del Oro	107
3.6.2.4.	Efecto pH	110
3.6.2.5.	Efecto de Adiciones Alcalinas sobre la disolución del oro	113
3.6.2.6.	Efecto de la temperatura	116
3.6.3.	Cinética en la lixiviación de oro	117
3.6.3.1.	Modelo cinético del núcleo sin reaccionar	125
	A.Caso control difusional	129
	B.Caso control químico	130

C.Modelo mixto	132
----------------	-----

CAPITULO 4: MÉTODO EXPERIMENTAL

4.1.	Investigación Experimental	134
4.2.	Muestra y tamaño de la muestra	134
4.3.	Diseño de experimentos	135
4.4.	Equipos y materiales	137
4.5.	Procedimiento experimental	140
4.5.1.	Metodología	140
4.5.2.	Caracterización mineralógica de la Arsenopirita Aurífera	141
4.5.3.	Análisis químico de la Arsenopirita Aurífera (concentrado)	142
4.5.4.	Análisis físico de la Arsenopirita Aurífera (concentrado)	143
4.5.5.	Procedimiento experimental	144
A.	Cianuración directa de concentrado de arsenopirita sin pre tratamiento	145
B.	Cianuración con pre tratamiento Biológico	146

CAPITULO 5: RESULTADOS

5.1.	Pre-tratamiento de biooxidación de arsenopirita aurífera (Concentrado)	155
5.1.1.	Prueba de biooxidación de hierro por <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> en 8 y 12 % de concentrado	155
5.1.2.	Prueba de biooxidación de hierro por el consorcio de <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> y <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> en 8 y 12 % de mineral	162
5.1.3.	Comparativos de biooxidación entre <i>A. ferrooxidans</i> y el consorcio de <i>A. ferrooxidans</i> y <i>A. thiooxidans</i>	164
5.2.	Pruebas De Cianuración	172
5.2.1.	Pruebas de cianuración de la arsenopirita Aurífera sin tratamiento	172
5.2.2.	Pruebas de cianuración de la arsenopirita Aurífera sometido a pre tratamiento con <i>A. ferrooxidans</i>	175
a.	Pruebas de cianuración con 8 % de Arsenopirita Aurífera	175

b.	Pruebas de cianuración con 12% de Arsenopirita Aurífera	177
5.2.3	Pruebas de cianuración de la arsenopirita aurífera sometido a pre tratamiento por el consorcio compuesto de <i>A. ferrooxidans</i> y <i>A. thiooxidans</i>	179
a.	Pruebas de cianuración con 8 % de arsenopirita aurífera	179
b.	Pruebas de cianuración con 12% de arsenopirita aurífera	181
5.2.4.	Pruebas de cianuración del Concentrado biooxidado con el consorcio <i>A. ferrooxidans</i> y <i>A.</i> <i>thiooxidans</i> (8% de concentrado)	184

CAPITULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.2.	Pre-Tratamiento De Biooxidación Bacteriana	188
6.3.	Cianuración Directa Sin Tratamiento	196
6.4.	Cianuración De La Arsenopirita Aurifera Biooxidado Con El Consorcio <i>A. Ferrooxidans</i> Y <i>Thiooxidans</i> (8% De concentrado)	197

CONCLUSIONES	198
RECOMENDACIONES	200
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	201

NOMENCLATURA-LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

Los principales símbolos usados en este estudio se presentan a continuación, acompañados de una breve descripción y sus unidades.

°C	:	Grados Centígrados
J/k-K	:	Joule kg por grados kelvin
Ω/cm	:	Ohmios sobre cm
μm	:	Micrones
h.	:	Horas
Ppm	:	Partes por millón
g/t	:	Gramos por tonelada
mm	:	Milímetros
t/h.m ²	:	Tonelada hora por metro cuadrado
K	:	Grados kelvin
% P/V	:	Porcentaje peso sobre volumen

g/m^3	:	Gramos por metro cubico
mV.	:	Mini voltios
Bacterias/mL	:	Numero de bacterias por mililitro
mm^2	:	Milímetros cuadrados
mm^3	:	Milímetros cúbicos
Kg/m^2	:	Kilogramos por metro cuadrado
L	:	litros.
Moles/L	:	Moles por Litro.
T	:	Temperatura.
R	:	Constante general de los gases.
ρ_B	:	Densidad de partícula, mg/cm^3 .
b	:	Coeficiente estequiométrico de la fase sólida.
CAg	:	Concentración del reactivo en la fase líquida.
mg/L	:	Miligramos por litro.
De	:	Coeficiente de difusión efectivo.
Ks	:	Coeficiente cinético de reacción,
L/cm^2 días	:	Litros por centímetro cuadrado por días.
τ_1	:	τ de difusión en la ceniza, días.

Kg	:	Kilogramos.
r.p.m	:	Revoluciones por minuto.
%	:	Porcentaje.
mL	:	Mililitros.
μ L	:	Microlitros
nm	:	Nanómetro.
g/t	:	Gramos por tonelada métrica.
kg NaCN/t	:	Kilogramos de cianuro por tonelada métrica.

UNIDADES

La totalidad de magnitudes presentadas en este informe se basan en el Sistema Legal de Unidades de Medida del Perú vigente (Ley 23560), el cual está constituido básicamente por:

El sistema internacional de unidades, SI; y Las unidades fuera del SI, que se consideran necesarias y convenientes en el país, en concordancia con las resoluciones de la XI Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), realizada en Paris (Octubre 1960).

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Descripción de muestra en superficie mina Capillani.

ANEXO 2. Análisis por difracción y fluorescencia de Rayos X.

ANEXO 3. *Bacterias* y medios.

ANEXO 4. Análisis químico del concentrado de arsenopirita y las pruebas de ensayo.

ANEXO 5. Curvas de calibración.

ANEXO 6. Cinética de biooxidación del concentrado de arsenopirita.

ANEXO 7. Métodos analíticos

ANEXO 8. Proceso de fundición Emsudoeste s. a. la PAZ-BOLIVIA

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Oro en diferente rango de granulometría: (a) Oro nativo de placer aurífero, (b) Oro microscópico observado a luz reflejada (Guevara, 2006)	27
Figura 2. Grano de oro de 4 micras asociado a pirita (Guevara, 2006)	29

Figura 3. Oro asociado a arsenopirita: (a) Oro nativo encerrado en arsenopirita masiva, (b) Oro submicroscópico encerrado en cristales de arsenopirita.(Guevara,2006)	30
Figura 4. Oro ubicado en fracturas (Guevara, 2006)...	35
Figura 5. Oro ubicado en bordes de granos (Guevara, 2006)	36
Figura 6. Células de <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> visto con Microscopio electrónico de transmisión. Escala 500 nm (Journal of Bacteriology)...	60
Figura 7. Células de <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> (Journal of Bacteriology)	61
Figura 8. Mecanismos de ataque bacteriano a un sulfuro (Ballester, 2005)	77
Figura 9. Diagrama para la oxidación de la arsenopirita (modificado de Mandl <i>et al.</i> , (1992))... ..	82
Figura 10. Mecanismos de oxidación bacteriana propuestos por Silverman (1967). a) Mecanismo indirecto. b) Mecanismo de contacto indirecto. c) Mecanismo de contacto directo (modificado de Crundwell 2003)	83

Figura 11. Potential-pH equilibrium diagram for the system Au-H ₂ O-CN- at 25 °C.	111
Figura 12. Especiación de cianuro y el cianuro de hidrogeno en solución acuosa, en función del pH.	113
Figura 13. Modelo Electroquímico para la Cianuración del Oro	118
Figura 14. Esquema de un proceso heterogéneo sólido-fluido.	127
Figura 15. Esquema del modelo del núcleo sin reaccionar	127
Figura 16. Concentrado de arsenopirita urífera	135
Figura 17. Concentrado de arsenopirita aurífera	144
Figura 18. Activación de las cepas lixiviantes en medio líquido (Laboratorio de Microbiología - UNJBG)	148
Figura 19. Cinética de biooxidación de hierro por <i>A. ferrooxidans</i> con 8 % de mineral (FeT=Hierro total)	156
Figura 20. Cinética de biooxidación de hierro por <i>A. ferrooxidans</i> con 12 % de mineral (FeT=Hierro total)	158
Figura 21. Producción y solubilización de ion férrico a partir de arsenopirita por <i>A. ferrooxidans</i>	159

Figura 22. Crecimiento de <i>A. ferrooxidans</i> en 8 y 12 % de mineral	160
Figura 23. Evolución del pH en el proceso de biooxidación de hierro	161
Figura 24. Cinética de biooxidación de hierro por el consorcio de <i>A. ferrooxidans</i> y <i>A. thiooxidans</i> con 8 % de mineral	165
Figura 25. Cinética de biooxidación de hierro por el consorcio de <i>A. ferrooxidans</i> y <i>A. thiooxidans</i> con 12 % de mineral	166
Figura 26. Producción y solubilización de ion férrico a partir de arsenopirita por el consorcio de <i>A. ferrooxidans</i> y <i>A. thiooxidans</i> .	167
Figura 27. Crecimiento del consorcio de <i>A. ferrooxidans</i> y <i>A. thiooxidans</i> en 8 y 12 % de mineral	168
Figura 28. Evolución del pH en el proceso de biooxidación de hierro	169
Figura 29. Producción de ion férrico por <i>A. ferrooxidans</i> y el consorcio de <i>A. ferrooxidans</i> y <i>A. thiooxidans</i> a 8 y 12 % de mineral	170

Figura 30. Crecimiento bacteriano de <i>A. ferrooxidans</i> y el consorcio de <i>A. ferrooxidans</i> y <i>A. thiooxidans</i> a 8 y 12 % de mineral...	171
Figura 31. Cinética de cianuración de la arsenopirita aurífera sin tratamiento.	174
Figura 32. Recuperación de oro con diferentes pre tratamientos de Biooxidación	183
Figura 33. Cinética de cianuración de la arsenopirita aurífera con tratamiento.	187
Figura 34. Concentrado de arsenopirita antes del proceso de biooxidación.	194
Figura 35. Concentrado de arsenopirita después del proceso de biooxidación.	194

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis mineralógico del concentrado arsenopirita aurífera.	3
Tabla 2. Propiedades físicas del oro	14
Tabla 3. Propiedades químicas del oro	15
Tabla 4. Principales minerales portadores de oro	19
Tabla 5. Principales minerales asociados al oro.	19
Tabla 6. Minerales auríferos	25
Tabla 7. Clasificación de los diferentes tamaños oro en minerales	37
Tabla 8. Tipos de minerales y tratamientos convencionales.	38
Tabla 9. Resultados suficientes de ensayos de Biolixiviación...	.81
Tabla 10. Medio Nutriente para el Cultivo de <i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	90
Tabla 11. Efecto del oxígeno sobre la velocidad de disolución del oro.	107
Tabla 12. Cantidad de oro disuelto en una hora.	109
Tabla 13. Análisis mineralógico de la arsenopirita aurífera	141
Tabla 14. Análisis químico de la arsenopirita aurífera (concentrado)	142

Tabla 15. Análisis físico de la arsenopirita aurífera (concentrado)	143
Tabla 16. Composición del medio 9K para <i>A. ferrooxidans</i>	147
Tabla 17. Condiciones de la prueba sin tratamiento	172
Tabla 18. Cianuración de la arsenopirita aurífera sin tratamiento	173
Tabla 19. Condiciones de la prueba	175
Tabla 20. Resumen de pruebas de cianuración	176
Tabla 21. Condiciones de la prueba	177
Tabla 22. Resumen de pruebas de cianuración	178
Tabla 23. Condiciones de la prueba	180
Tabla 24. Resumen de pruebas de cianuración	180
Tabla 25. Condiciones de la prueba	181
Tabla 26. Resumen de pruebas de cianuración	182
Tabla 27. Condicion de las pruebas de Biooxidacion	184
Tabla 28. Condicion de las pruebas de cianuracion	185
Tabla 29. Cianuración de la arsenopirita aurífera con tratamiento	186

INTRODUCCIÓN

El uso de microorganismos para la descomposición de metales pesados ha atraído una atención creciente debido a su bajo costo y alta eficiencia en comparación con los métodos convencionales. Entre varios microorganismos, las bacterias oxidantes de hierro y azufre, como el *Thiobacillus ferrooxidans* y *Thiobacillus thiooxidans*, se consideran que son los mejores candidatos para la biolixiviación de sulfuros capaces de lixiviar u oxidar más de 50 % de los metales de las matrices contaminadas.

En los concentrados de arsenopirita aurífera, el oro está directamente asociada a los sulfuros, bien por oclusión o por asociación similar al de los minerales, y en que las especies más comunes son la arsenopirita y la pirita, encontrándose arsénico y en menor cantidad sulfuros como la esfalerita y la galena, además de sulfosales de cobre y antimonio.

Se considera que en los países de Sud América como: Ecuador, Colombia, Perú y Bolivia, son comunes que los depósitos de oro filoniano muestren cierto grado de refractariedad, lo que afecta la extracción de este metal. Una alternativa biotecnológica para solucionar el problema de

la refractariedad es la utilización de una variedad de microorganismos *quimiolitotrofos acidófilos*.

Los minerales refractarios cada vez más complejos han generado el desarrollo y la aplicación de nuevas tecnologías que permitan mejorar la extracción de metales preciosos.

El presente trabajo hace el estudio a nivel de laboratorio de la acción de *Bacterias Quimiolitotrofas* referente a las cepas *Acidithiobacillus ferrooxidans* y el consorcio *acidófilos* compatibles *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*, como *pretratamiento* para mejorar la cianuración de concentrados de arsenopirita aurífera, sin tener que recurrir a procesos contaminantes como la tostación, que desprenden gas de antimonio, arsénico y azufre, que afectan al medio ambiente.

El presente trabajo está basado en una investigación que inicio el 2013 y concluyó a principios del año 2015, el desarrollo tecnológico del proceso bacteriano que se aplicó a concentrados de arsenopirita aurífera de la Empresa Minera EMINSOL S. A., La Paz Bolivia, de antes de la cianuración. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Microbiología de la UNJBG y en las instalaciones de la empresa mencionadas.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. UBICACIÓN DE LA MINA

La ubicación de la planta concentradora está a una altura de 3850 msnm, ubicada a 10 km al suroeste de la ciudad de Viacha, Distrito de Ingavi, Departamento de La Paz, Bolivia

1.2. GEOLOGÍA Y MINEROLOGÍA

La caracterización mineralógica se determinó por microscopia óptica (NIKON EPIPHOT) de luz reflejada en secciones pulidas, como se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Análisis mineralógico del concentrado arsenopirita aurífera

CONCENTRADO	FORMULAS	%
Pirita	FeS ₂	7
Calcopirita	CuFeS ₂	0,2
Esfalerita	ZnS	4,3
Galena	PbS	1,6
Arsenopirita	FeAsS	73,5
Ganga	---	13,4

Fuente: Empresa EMISOL S. A. - Bolivia

1.3. BREVE DESCRIPCIÓN DE PLANTA

La planta de flotación empezó sus operaciones el año 2010 con una producción inicial de 10 t/d de concentrado de Arsenopirita con una ley de (80 g/t), paralelamente se cuenta con una planta de lixiviación por agitación.

1.4. PRODUCCIÓN DE ORO EN BOLIVIA

En 2015, el volumen y el valor del oro metálico exportado reportaron un descenso del 42 % y 46,7 %, respectivamente, de acuerdo con un informe elaborado por el Instituto Boliviano de Comercio Exterior (IBCE), con los datos del INE (Instituto Nacional de Estadística).

Según los datos oficiales, el país exportó en 2014 un peso de 42 197 kilogramos brutos (unas 42 toneladas), pero el siguiente año vendió 24 444 kilogramos brutos (24 toneladas), lo que significó una reducción del 42 %.

1.5. TENDENCIAS DEL PRECIO A FUTURO

Las expectativas de una recuperación del precio de oro recién serían hacia el 2017. Scotiabank estima que la menor producción hacia ese año –debido a la menor oferta en el mercado físico del oro– y la culminación de subida de tasas de interés de la Fed fortalecerá el precio. El consenso de analistas de Bloomberg espera precios de 1 169 \$ - 1 226 \$ para el 2016 y el 2017.

CAPITULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Durante los últimos años el crecimiento vertiginoso de la tecnología enfocada a la extracción de metales (Au, Cu, Ag, etc.) ha hecho indispensable nuevos pre-tratamientos para la recuperación óptima de recursos dando como resultado tecnologías como la biolixiviación

Las bajas recuperaciones y minerales cada vez más complejos hacen plantear una nueva estrategia para el tratamiento de estos minerales.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El presente trabajo se busca evaluar en un nivel general, la mejora de recuperación de concentrados de oro mediante método de Biolixiviación, utilizando la acción de bacterias *Quimiolitotrofas*. Referente a las cepas *Acidithiobacillus*

ferrooxidans y el consorcio *acidófilos* compatibles
Acidithiobacillus ferrooxidans y *Acidithiobacillus thiooxidans*.

2.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROBLEMA

En la actualidad 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 piro químicos 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 pretratamientos a la cianuración y fundición, encontramos 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 los concentrados y materiales con altos contenidos de oro (Doré). Asimismo, busca la mitigación de la contaminación ambiental.

2.4. OBJETIVOS

2.4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la biooxidación del concentrado arsenopirítico aurífero por pre tratamiento con bacterias quimiolitotrofas acidófilas que mejore la recuperación del oro por cianuración.

2.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar la acción biooxidante de las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans*.
- Investigar la acción biooxidante del consorcio de bacterias propuesto.
- Determinar la recuperación del oro por cianuración después de la biooxidación con los dos tipos de bacterias.

2.5. HIPÓTESIS

Aplicar Bacterias Quimiolitotrofas como pretratamiento a concentrados auríferos refractarios para mejorar la recuperación de oro, considero las variables como: porcentaje de sólidos, granulometría, temperatura, agitación y tiempo.

2.6. ANTECEDENTES

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 bioremediación, 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.

CAPITULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. PROPIEDADES DEL ORO

3.1.1. Propiedades físicas

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 (1063 °C) y el de volatilización 2873 K (2 600 °C).

El número y peso atómicos son 79 y 197,0 respectivamente. La densidad del oro es de 19,42 g/cm³, 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 103 J/cm s °C (según Depretz, 98 J/cm s °C según Calvet y Johnson y 60 J/cm s °C según Wiedeman y Franz. El calor específico está entre 0,0298 J·kg⁻¹·K⁻¹ (Dulong y Petit y 0,03244 Regnaut). Su conductividad eléctrica es 73 a 294,8 K (21,8 °C) (Matthiesen) en comparación con la plata que tiene un valor de 100 a la temperatura de 273 K o 0 °C.

El oro hace aleación 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 2
Propiedades Físicas

PROPIEDADES FÍSICAS	VALORES
Brillo	Metálico amarillo
Maleabilidad	Maleable y dúctil
de fusión	1336 K (1063 °C)
Punto de ebullición	3129 K (2856 °C)
Peso atómico	197,2
Nº atómico	79
Densidad	19,3 g/mL
Conductividad térmica	103 J/cm s °C
Conductividad eléctrica	73 ohmios ⁻¹ cm ⁻¹

Fuente: Mendoza W.E, 2010

3.1.2. Propiedades químicas

Ninguno de los ácidos corrientes ataca el oro, no es soluble en ácido sulfúrico, sulfato férrico, ácido clorhídrico o cloruro férrico. Se disuelve en una mezcla de ácido nítrico y clorhídrico concentrado (aguaregia) 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.

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 rojo vivo.

Tabla 3
Propiedades químicas

PROPIEDADES QUÍMICAS

- El oro es fácilmente soluble en agua regia que produce cloro nascente.
 - El oro se 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.
-

Fuente: Mendoza W. E, 2010

3.2. MINERALOGÍA DEL ORO

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

3.2.1. 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 vetas de cuarzo y oro, "Mother Lode", Filones de oro arcaico (Alldrick, 1996).

Estos depósitos se encuentran presentes en diferentes litologías con edades desde el Precámbrico hasta el Mesozoico (Goldfarb *et al.*, 2001), 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 (Groves *et al.*, 1998). 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 (Alldrick, 1996). Ver cuadro 4 y 5, los principales minerales portadores de oro y minerales asociados al oro respectivamente.

3.2.2. Depósitos Secundarios o aluviales (diseminados).

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).

Si las acumulaciones se sitúan al pie 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.

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.

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.

Tabla 4
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	4AuAg ₁₀ Te	31-41 %.
Silvanita	AuAg ₂ Te	19-25 %

Fuente: Mendoza W. E, 2010.

Tabla 5
Principales minerales asociados al oro.

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

Fuente: Mendoza W. E, 2010.

3.3. FLOTACIÓN DE ARSENOPIRITAS 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 flotación y/o gravimetría preceden el tratamiento de un mineral de oro refractario. Los tipos más comunes de refracteriedad se deben al oro fino adherido ó encapsulado en arsenopirita, pirita u otros sulfuros (ver tabla 5).

Cuando el oro está atrapado ó 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 han reportado hasta 90 % -325 mallas en el rebalse del ciclón, lo cual se alimenta a flotación.

La arsenopirita tiene propiedades similares a la pirita 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 arsenopirita y pirita. El concentrado rouger a menudo necesita remolienda antes de la limpieza. La flotación de menas refractarias de oro debe ser diseñadas para alcanzar altas recuperaciones de oro si es necesario incluir con un concentrado relativamente bajo en ley.

Muchas pruebas de laboratorio y pilotaje, junto con un análisis económico riguroso de los resultados experimentales, debe predecir cualquier decisión que se haga sobre la

concentración de menas refractarias de oro. 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 norteamericana, una mena con 1,5 % de pirita (conteniendo virtualmente todo el oro y la plata) es tratada por flotación, el concentrado de limpieza tiene 25 % FeS, con un 99 % de recuperación de pirita; la flotación se la hace a pH natural (6,5 - 7,5), con xantato isopropílico 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.

3.4. 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.

3.4.1. 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 5).

Adicionalmente se han encontrado trazas de oro en soluciones sólidas reemplazando a la plata, a minerales del grupo del platino o al cobre, e incluso con los sulfuros más comunes. Solamente se asume la presencia de la mayoría de soluciones sólidas reportadas, ya que no han sido realmente identificadas ni siquiera usando microonda electrónica, pero el contenido de oro ha sido confirmado por vía química.

Se ha registrado la presencia de trazas de oro incluido en telurio nativo, en minerales como atokita $(Pt, Pd)_3Sn$, atheneite $(Pd,Hg)_3As$ y zvyagintsevite Pd_3Pb , también en antimonio, arsénico, selenio, hierro, zinc, plomo, bismuto, y azufre.

Cantidades mayores de oro han sido encontradas en asociación con el cobre (Au-Cu), registrándose contenidos que van del 3 al 60 %. Existen además aleaciones de oro y mercurio (Au-Hg), con contenidos de hasta el 20 % de mercurio.

Tabla 6
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: Gasparrini C, 1993, Gold and Other Precious Metals.

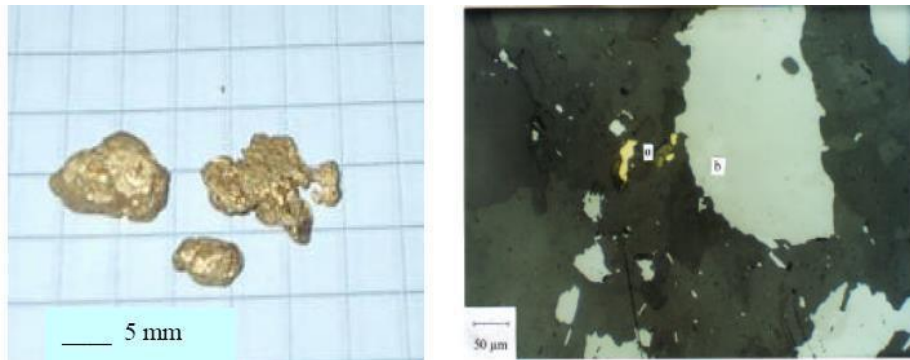
3.4.2. Tamaño de partículas de oro

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 μm , mientras que en “placeres 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 placeres 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 que procesos de molienda fina pueden alcanzar un máximo de alrededor de 15 μm de tamaño, por tanto partículas de oro inferiores a este tamaño no podrán ser liberadas.



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

3.4.3. 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.

3.4.3.1. 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: Guevara, 2006.

3.4.3.2. 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 (Guevara, 2006).

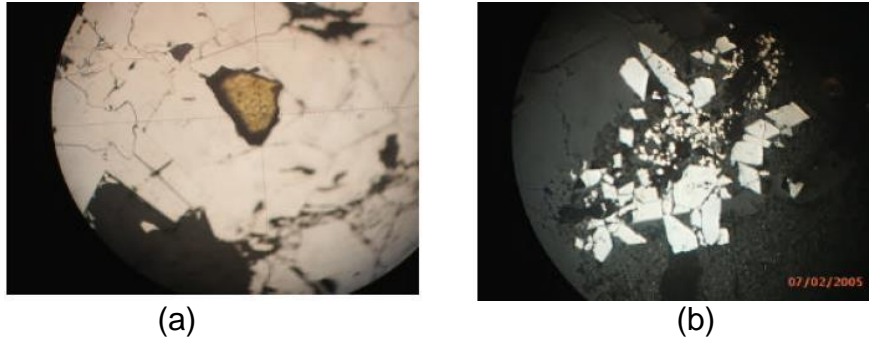


Figura 3. Oro asociado a arsenopirita: (a) Oro nativo encerrado en arsenopirita masiva, (b) Oro submicroscópico encerrado en cristales de arsenopirita
Fuente: Guevara, 2006.

3.4.3.3. 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 (Guevara, 2006).

3.4.3.4. 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.

3.4.3.5. 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.

3.4.3.6. 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.

3.4.3.7. 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.

3.4.3.8. 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 (muscovita, 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.

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

3.4.3.10. 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 monazita, casiterita, óxidos de hierro, staurolita, 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 semiconsolidada 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.

3.4.4. 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 (Figura 4). El contenido de oro en las menas explotadas de éste tipo está en el orden de 4 – 10 g/t.

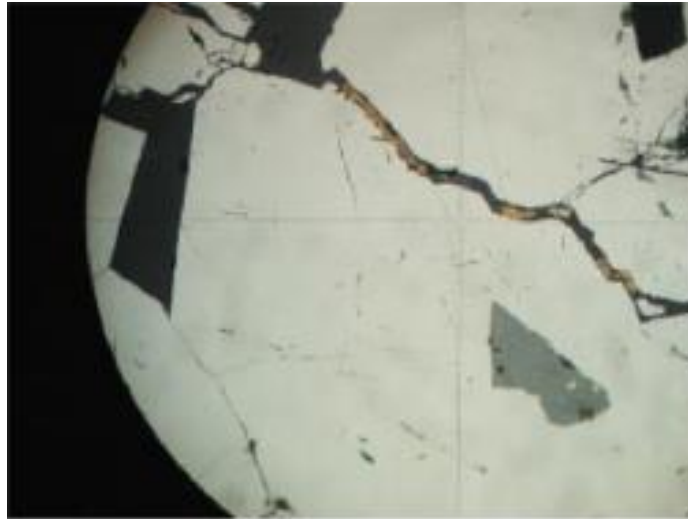


Figura 4. Oro ubicado en fracturas (Guevara, 2006).
Fuente: Guevara, 2006.

- 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.

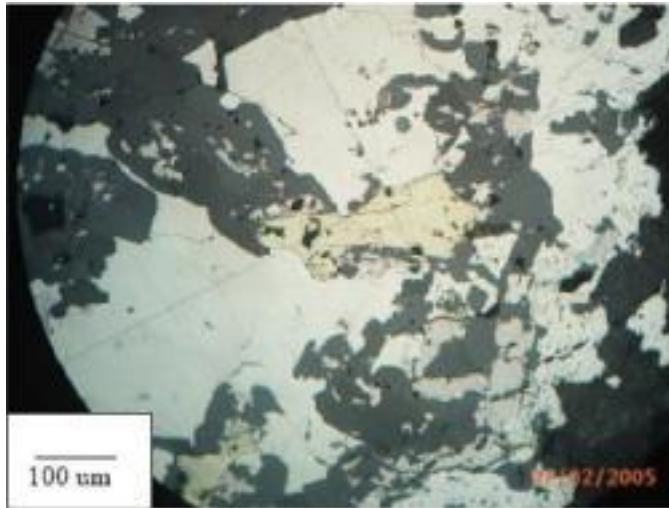


Figura 5. Oro ubicado en bordes de granos
Fuente: Guevara, 2006.

- 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 ($0,01 - 10 \mu\text{m}$). 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 7) se observa diferentes tamaños oro en minerales, (en la tabla 8) muestra los tratamientos más empleados para diferentes tipos de minerales refractarios.

Tabla 7

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. PAVEZ O.

Tabla 8

Tipos de minerales y tratamientos convencionales.

TIPO DE MINERAL	TRATAMIENTO
Oro libre	Concentración gravimétrica, cianuración.
Oro con sulfuros	Flotación, reacción con cal, tostación, calcinación y cianuración.
Oro con minerales de arsénico y antimonio.	Flotación, tostación, lixiviación y cianuración.
Oro en telurios	Flotación, tostación, oxidación química, y cianuración
Oro en pórfidos de cobre	Fusión para el cobre, Oro en barras anódicos
Oro con minerales de plomo y cinc	Flotación en escorias o residuos de la electrolisis del cinc. Cianuración de residuos de flotación
Minerales carbonáceos	Oxidación, flotación, tratamiento superficial antes de la cianuración

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

3.5. PROCESOS DE PRETRATAMIENTO DE MINERALES Y/O CONCENTRADOS REFRACTARIOS

El término *refractario* se aplica a minerales o concentrados 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 por ciento empleando procesos de cianuración convencional, aún después de molienda ultrafina.

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, Linge (1991) sugirió la clasificación en la tabla 7.

3.5.1. Tostación

La tostación de minerales refractarios permite romper el encapsulamiento del oro en minerales del tipo de pirita y arsenopirita, pues transforma los sulfuros en óxidos de gran porosidad, la tostación especialmente en sistemas enriquecidos en oxígeno, también elimina el fenómeno de "pre-roobinq" por presencia de materia carbonácea.

La tostación se emplea desde 1898 o quizás antes como método de tratamiento antes de la cianuración ya en 1904, James Park afirmaba que concentrados con los que se alcanzaban rendimientos del 30 %, tras la tostación llegaban hasta el 90 % de recuperación de oro con un menor consumo de cianuro. Hasta hace unos 15 años, el proceso estándar para pretratamiento de materiales refractarios de oro, era la tostación en un rango de temperaturas de, 723 K a 1023 K (450 a 750 °C) debido al aumento de restricciones medioambientales, y a la aparición de procesos alternativos, se ha producido un descenso en la aplicación de la tostación.

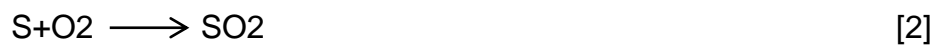
Equipamiento

Como equipos para la tostación de minerales refractarios de oro se han utilizado o se utilizan hornos de lecho fluidizado, hornos de pisos, hornos rotatorios, siendo el más importante de todos el de lecho fluidizado. Las variaciones de los tipos básicos de hornos se deben a diferencias en la velocidad superficial de gas, y también al nivel de fluidización. A bajas velocidades: aplicables si se utiliza oxígeno como agente fluidizante, se obtiene un lecho burbujeante. A elevadas velocidades las partículas son completamente transportadas desde el lecho. En los sistemas de lechos fluidizados con recirculación (CFB), el horno está conectado con un ciclón que captura los sólidos y los retoma al lecho.

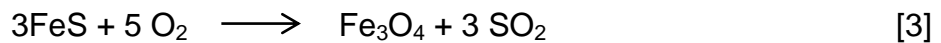
Los hornos de lecho fluidizado que tratan en la actualidad minerales o concentrados de oro refractario, tienen un diámetro en el rango de 3 a 9 m, La capacidad de tratamiento varía ampliamente con el análisis de concentrado o mineral. El tamaño de partícula, y tipo de horno. Un horno típico de una etapa para tostar pirita/arsenopirita puede tratar una alimentación de 0,3 a 0,4 t/m²h.

Reacciones de tostación

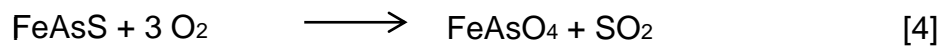
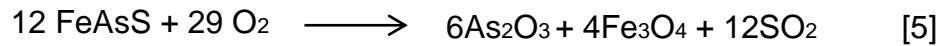
Los cambios químicos y mineralógicos que sufren las especies minerales cuando se someten a un proceso de tostación son bien conocidos. La pirita pierde progresivamente azufre que es oxidado hasta dióxido de azufre. (1 y 2)



La pirrotina se oxida hasta hematita pasando por magnetita (3 y 4).



La arsenopirita se oxida según las reacciones (5), (6) y (7). Bajo condiciones oxidantes el arsénico de la arsenopirita es oxidado hasta pentaóxido de arsénico, que no es volátil (Guevara, 2006).



pentóxido de arsénico puede combinarse con óxidos de hierro para dar arseniatos de hierro como se muestra en la reacción (8).



Los arseniatos presentan el problema de que confieren una baja porosidad a los calcinados y producen la solubilización del arsénico en el circuito de cianuración. Bajo condiciones reductoras, el arsénico de la arsenopirita se oxida hasta el volátil trióxido que deja el horno con los gases de salida y elimina un problema en la recuperación del oro. Sin embargo, las condiciones reductoras no permiten eliminar todo el azufre. Esto ha hecho que se desarrolle una tostación en dos etapas (en la cual el arsénico es eliminado en la primera y todo el azufre residual es oxidado en la segunda (Guevara, 2006).

Un efecto interesante observado en muchas plantas de tostación es la difusión y agregación de oro en partículas grandes. Esto permite una recuperación parcial de oro por técnicas gravimétricas, a pesar de haber utilizado previamente separación gravimétrica (espirales y mesas de sacudidas). En 1989, Campbell Red Lake recuperó el 43 % de oro usando jibs y mesas de sacudidas en el circuito de molienda. Además, recuperó un 11 % más a partir del residuo de tostación usando mesas y espirales.

Gases de salida

Los gases de salida de los hornos suelen contener partículas en suspensión, productos de la combustión y oxidación, y especies volatilizadas. La eliminación de componentes indeseados requiere la utilización de circuitos de lavado. Los sólidos se pueden retirar usando ciclones, lavadores o precipitadores electrostáticos.

En algunos casos, el dióxido de azufre se puede convertir en ácido sulfúrico, La producción de ácido se hace más factible cuanto mayor es la concentración de SO_2 ; en cualquier caso hay

que asumir el problema de saturación del mercado de este ácido. En el caso de menas pobres en azufre, es inevitable la depuración de gases de salida (Guevara, 2006).

Los hornos de tostación que emplean concentrados arsenicales producen compuestos volátiles de arsénico especialmente trióxido (As_2O_3). Estos compuestos pueden ser condensados por enfriamiento del gas y recogida de los sólidos producidos en un reposador o en filtros electrostáticos. El trióxido de arsénico puede ser comercializado si su riqueza es superior al 97 %. No obstante, lo más habitual es que el grado no supere el 95 %, esto unido a la abundancia de arsénico en el mundo, hace que este subproducto tenga muy poco valor. En algunas plantas se guarda el trióxido de arsénico en recipientes especiales y se almacena, en otras se han instalado circuitos de purificación para conseguir vender el producto.

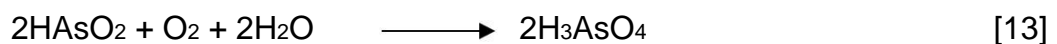
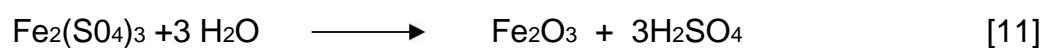
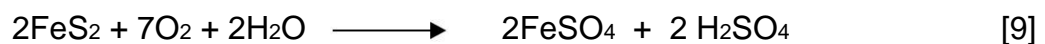
Problemas que presenta este pre tratamiento

Si el suministro de oxígeno está en exceso sobre el estequiométrico (tostación a muerte), el principal producto debe ser hematita (Fe_2O_3) que no tiene ningún efecto negativo sobre la cianuración, No obstante, debido a la inevitable aparición de cortocircuitos, propia de la operación en continuo en un sólo reactor, una fracción variable de alimentación sólida escapa del horno antes de que se complete su combustión. Esto hace que la conversión en las reacciones 3 y 4 no sea del 100 %; lo que ocasiona que las cenizas de tostación, debido a la presencia de materia reductora tal como la magnetita y a la existencia de compuestos con sulfuro residual tostable como la pirrotina, sigan siendo refractarias en cierta extensión, al proceso de cianuración convencional. Además, la generación de gases conteniendo S, As, Sb y Hg provoca graves problemas medioambientales que exigen el complejo tratamiento del afluente gaseoso (Torre, 2006).

Hay que señalar también que uno de los principales problemas que presenta la tostación es la fusión y formación de clinker durante la operación, que conduce a importantes pérdidas de plata.

3.5.2. Oxidación a Presión

La oxidación a presión es uno de los procesos hidrometalúrgicos de pre tratamiento que actúan por destrucción química de los minerales que encapsulan el oro y/o por la descomposición de componentes nocivos del mineral. Varias publicaciones describen la química y el desarrollo del proceso.



En una planta típica, el mineral o concentrado es procesado en continuo en autoclaves a temperaturas de 200 °C, y con sobrepresiones de oxígeno de más de 500 000 N/m² (500 kPa). Los tiempos medios de residencia están en el rango de 45 a 200 minutos.

Equipamiento

Los recipientes comúnmente utilizados en los procesos de oxidación a presión son autoclaves horizontales con varios compartimentos, también se han utilizado recipientes verticales en algunas aplicaciones. En general, las autoclaves suelen estar forradas con plomos, membranas orgánicas y ladrillos para proteger al acero de procesos de erosión y corrosión. La parte más difícil de proteger son las boquillas del eje de agitación y de entrada de tuberías.

Condiciones de oxidación

La oxidación a presión normalmente se realiza en medio ácido aunque ocasionalmente puede ser efectiva en medio neutro o alcalino.

Si un mineral se oxida bajo condiciones neutras entonces es suficiente con introducirlo en el autoclave para proceder a la reacción. Para aquellos minerales que sólo se oxidan en medio ácido, es esencial que el primer compartimento del autoclave tenga condiciones ácidas, En algunos casos en los que el mineral contiene calcita o dolomita, es necesario añadir ácido para destruir los carbonatos y mantener las condiciones ácidas en el autoclave. El ácido se puede añadir en forma de ácido fresco o puede ser recuperado de la descarga del autoclave y reciclado.

Los minerales o concentrados con más de un 5 % de azufre suelen ser procesados auto térmicamente. Esto significa que se genera suficiente calor en el primer compartimento como para subir la temperatura de la alimentación hasta la temperatura de operación deseada. Para que el procesado autotérmico tenga éxito, hay que considerar la cinética de la oxidación el tamaño del primer compartimento, la mineralogía del mineral, y el contenido de sólidos en la alimentación del autoclave.

Altos contenidos de plata en el mineral es más una desventaja que una ventaja. Sin embargo, en ciertos yacimientos el valor de plata puede ser muy significativo, Si se usa un pretratamiento en autoclave, la mayor parte de la plata se combina en forma de argentojarositas refractarias, esos compuestos se pueden destruir por lixiviación a altas temperaturas con un álcali fuerte, por ejemplo hidróxido cálcico.

Sí el contenido en azufre del mineral es menor del 4 %, se suele precalentar la alimentación con los vapores de despresurización de la descarga del autoclave, El diseño de esta etapa del proceso es muy delicado y puede afectar seriamente a la operación, principalmente en su periodo inicial (I. Nagy et al., 1993).

En todos los casos, la descarga del autoclave se lleva a presión atmosférica y temperatura de 100 °C. Esta temperatura es muy alta para los circuitos de cianuración, que operan normalmente a menos de 50 °C para evitar pérdidas de cianuro.

Algunos sulfuros metálicos no férricos que contienen oro son refractarios a los métodos tradicionales de procesamiento.

Cuando minerales de este tipo son sometidos a lixiviación a presión, los sulfuros de zinc y cobre son solubilizados; por lo cual la solución debe separarse del residuo que contiene oro, ya que la cianuración posterior podría verse afectada por la cianuración de complejos cianurados de estos metales, la separación sólido-Líquido se puede realizar en circuitos de lavado en contracorriente o de filtración. El lico con alta concentración en metales puede ser procesado hasta alcanzar niveles ambientalmente aceptables por precipitación selectiva, extracción con disolventes, e intercambio iónico, obteniendo productos que además pueden ser comercializados.

Problemas que presenta este pre tratamiento

Se trata de un proceso caro puesto que se opera en reactores herméticos y en condiciones de presión y temperatura elevadas. Un problema adicional es la posibilidad de formación de azufre elemental fundido en la etapa inicial de reacción, El azufre fundido tiene nefastas propiedades geológicas y provoca problemas de taponamiento en los autoclaves.

3.5.3. Oxidación química a presión

Consiste en la transformación de los sulfuros minerales en sulfato o azufre elemental. Se han usado varios agentes oxidantes para la lixiviación de menas refractarias como oxígeno, agua oxigenada, ácido de Caro (ácido peroximonosulfúrico) hipoclorito, ion férrico, cloro y ácido nítrico.

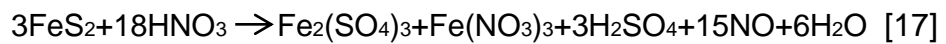
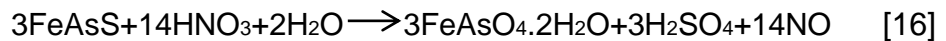
El pre-aireación con aire u oxígeno es un proceso estándar para la cianuración de menas de oro no refractarias. Normalmente con una etapa de aireación de 4 a 6 horas de curación es posible desactivar trazas de especies reductoras que ocasionarían problemas en la cianuración. No obstante esta etapa no es suficiente en el caso de minerales refractarios, los cuales requieren la oxidación de la matriz que encapsula el oro o que impide su cianuración.

Se ha encontrado que el efecto del ion férrico es pequeño sobre la calcopirita y la pirita. Además, las partículas de oro pueden quedar atrapadas en el precipitado de arseniato férrico que se produce en la oxidación de la arsenopirita.

Lakshmanan y Childs, demuestran que si el ácido H_2SO_5 , pre oxida minerales de arsenopirita, colas o concentrados, mejora la extracción de oro, Sin embargo estos autores ponen de manifiesto que la economía de este proceso es más favorable para concentrados que para el todo uno. El Proceso ORF que ha sido desarrollado por "The Ontario Research Foundation", consiste en la oxidación del mineral o del concentrado de arsenopirita con H_2SO_5 (ácido peroximonosulfúrico) a $pH = 1,5$ y condiciones ambientales de presión y temperatura. Sin embargo en estas condiciones la pirita permanece sin atacarse.

Las soluciones de cloro actúan como lixiviante para As, Sb, Cu, Fe, Ag y Au. También se ha demostrado que la oxidación con situaciones de cloro o de hipoclorito es un pre tratamiento efectivo para minerales refractarios del tipo carbonáceos Scheiner y Col, han demostrado en ensayos de laboratorio y a escala piloto que la lixiviación de minerales carbonáceos con hipoclorito (generado por la electrolisis de la salmuera) seguida de cianuración mejora los resultados de extracción hasta más 90 %, en lugar del 6 - 32 % que se obtenía solo con cianuración directa.

El proceso Nitrox, utiliza ácido nítrico para oxidar sulfuros minerales tales como arsenopirita y pirita, según las reacciones:



Sin embargo, este proceso aún no ha progresado en planta piloto.

Problemas que presenta este pre tratamiento

Puede decirse que, con excepción del ion férrico y del oxígeno, todos los agentes lixiviantes citados son bastante caros. Por ello, la aplicación de estas técnicas está limitada por los costes de operación que no están pagados por la economía del proceso. Una limitación no menos importante para la aplicación de estos procesos es el problema medioambiental que conllevan.

3.5.4. Molienda Ultrafina

Una molienda fina en una planta de producción de oro significa una distribución de tamaños en la cual el 80 % del mineral es menor de 44 μm . La molienda ultrafina significa que se produce un 80 % menor de 20 μm ó menos. Dependiendo de la distribución por fracciones del oro; una molienda ultrafina puede ser suficiente para mejorar los resultados de la lixiviación. También se puede utilizar la molienda ultrafina como etapa previa, para otro tipo de procesos de pre tratamiento.

Sin embargo, la molienda ultrafina presenta una serie de graves inconvenientes: en primer lugar, las necesidades de energía eléctrica en estos procesos suelen ser extremadamente elevadas; por otra parte, la distribución de la alimentación también complica el diseño y la operación en plantas de gran tonelaje. Además, existe una complicación adicional cuando se realizan procesos de separación por tamaños, ya que son necesarios un gran número de pequeños ciclones, que son difíciles de instalar y de mantener.

3.5.5. Biolixiviación

Los microorganismos que participan en procesos de biolixiviación son bacterias acidófilas, 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* reclasificadas por Kelly & Wood, 2000). Dentro de este grupo se encuentran las bacterias mesófilas que viven a temperaturas que oscilan entre los 20 - 30 °C, obtienen su fuente de energía del hierro y/o azufre, *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*. Éstas con las moderadamente termófilas (30 - 45 °C) como *At. Caldus*, pertenecen a las Gram-negativas y σ -proteobacterias. También se encuentran bacterias pertenecientes a las Gram-positivas como las moderadamente termófilas, ó 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 hidrogeno 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 ó 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 K 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} mL de pulpa.

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

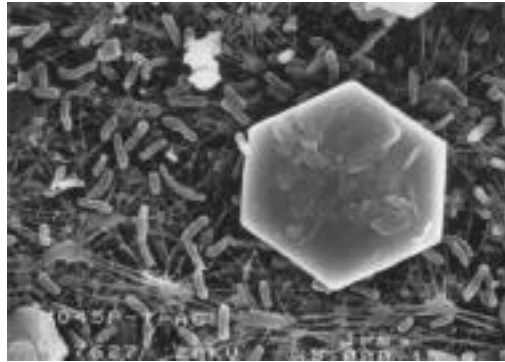


Figura 6. Células de *Acidithiobacillus ferrooxidans* visto con microscopio electrónico de transmisión. Escala 500 nm
Fuente: Journal of bacteriology,2011.

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*.

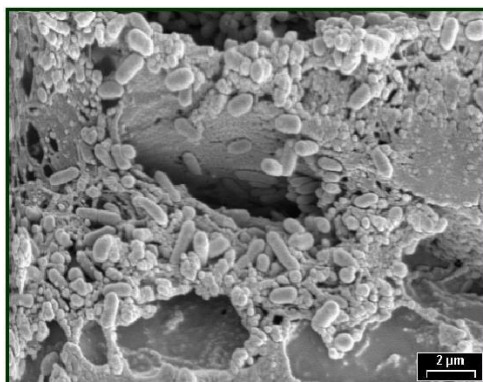


Figura 7. Células de *Acidithiobacillus thiooxidans*
Fuente: Journal Bacteriology.

3.5.5.1. Microorganismos en la biooxidación

La arsenopirita (FeAsS) es la principal fuente de arsénico. Este mineral bajo condiciones oxidantes, como las que se presentan en ambientes mineros, inicia su proceso de disolución liberando arsénico, hierro y azufre al ambiente, generando drenajes ácidos con altas concentraciones de arsénico. 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 K y 303 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 este 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 para *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Braddock et al., (1984) determinaron que el As^{3+} no puede ser oxidado, por éstas bacterias, hasta As^{5+} y en etapas sucesivas de crecimiento con concentraciones entre 1,33 y 2,67 mM de As^{3+} 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 de As^{3+} y 40 g/L de As^{5+} .

Barretetal.,(1993)encontraronque concentraciones de As^{3+} cercanas a 30 mM limitaba el crecimiento de microorganismo mesófilosy concentraciones cercanas a 90 mM de As^{3+} resultaba ser nocivo. Attia & Zeky (1989) trabajaron con minerales refractarios, principalmente pirita y arsenopirita, previa adaptación de *Acidithiobacillus ferrooxidans* sobre el mineral. Ellos encontraron que el proceso de adaptación, previo al proceso de biooxidación, aumenta la velocidad de lixiviación hasta cuatro órdenes de magnitud con relación a los microorganismos sin adaptación en el proceso de disolución. Shahverdi et al., (2001) y Xia et al., (2008) también reportaron que la eficiencia en el proceso de disolución de un concentrado pirítico por *Acidithiobacillus ferrooxidans*, después de un proceso de adaptación, se ve favorecido. Datos reportados por Shi & Fang (2004) sobre *Acidithiobacillus ferrooxidans*, previa adaptación sobre un concentrado de marmatita, muestran como la velocidad de disolución del mineral se ve favorecida compara con los microorganismos sin adaptar.

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 testeado este parámetro en

sus experimentos. Los intervalos pueden variar desde 1 hasta 5 % P/V (Zhen et al., 2009; Shi et al., 2006; Shi & Fang, 2005; Deveci et al., 2004; Mason & Rice, 2002).

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.

Algunos criterios diferentes empleados en los procesos de adaptación son los empleados por Xia et al., (2008) para *Acidithiobacillus ferrooxidans* sobre un concentrado de calcopirita, el cual consistía en la medición de la concentración celular durante el proceso, considerando una buena población bacteriana una densidad de 10^7 células/mL. Astudillo & Acevedo (2008) para un proceso de biooxidación de un concentrado pirítico relacionaban la eficiencia en la adaptación y el proceso cuando la razón Fe^{3+}/Fe^{2+} era más baja que uno y Mason & Rice (2002) garantizaban una adecuada adaptación de *Acidithiobacillus ferrooxidans* midiendo la concentración de níquel disuelto durante dos procesos sucesivos de crecimiento bacteriano.

3.5.5.2. 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 entre 308 K a 313 K para casi todos los minerales, para otros casos como calcopirita temperaturas en el intervalo 318 K a 353 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/m^3 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 a 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 $\text{MFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, 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 Fe^{3+}/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 suministrarle, 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 microorganismos 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

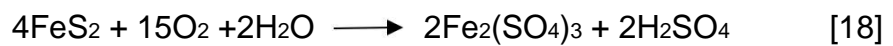
de lixiviación sea proporcional a los pocos sitios activos de dicho sulfuro. A medida que el tamaño de partícula decrece, aumenta el área superficial y por ende el número de sitios activos, por lo que se cree que aumenta la eficiencia del proceso. Sin embargo, varios investigadores han encontrado que 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.

3.5.5.3. 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 15 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, según la reacción 18;



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 ligandos orgánicos.

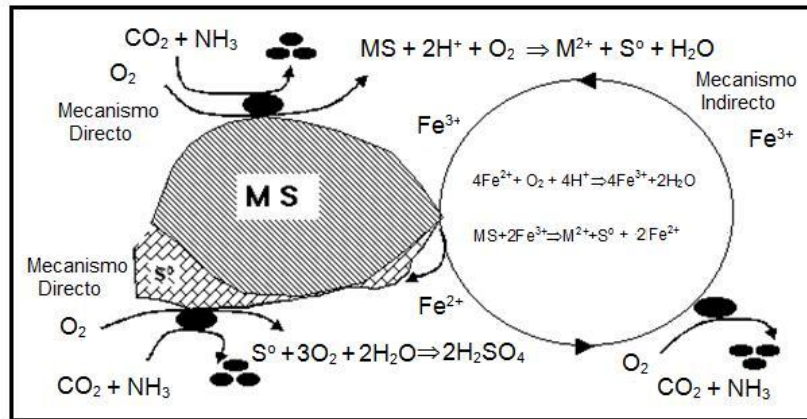
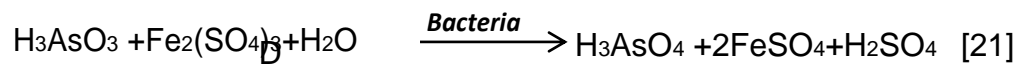
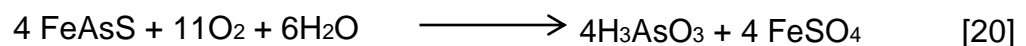
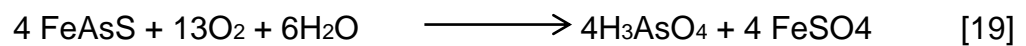


Figura 8. Mecanismos de ataque bacteriano a un sulfuro.
Fuente: Ballester, 2005.

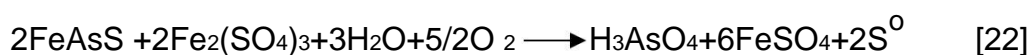
3.5.5.3.1. Mecanismo de ataque a la arsenopirita

El mecanismo de contacto directo a la arsenopirita sigue la reacción 19, aunque algunos autores sugieren la formación de ácido arsenioso. Que en presencia de sulfato férrico se oxida hasta ácido arsénico.

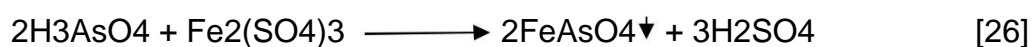


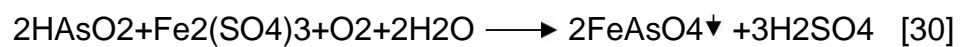
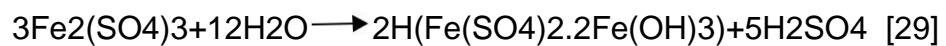
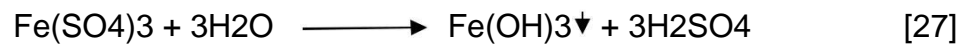
de acuerdo con el mecanismo de contacto indirecto, las reacciones posibles para la arsenopirita

reacciones (22) y (23), siendo más probable la primera de ellas en la que se forma azufre elemental. El ciclo se cierra con la oxidación bacteriana del ion ferroso producido y del azufre elemental formado según (24) y (25)

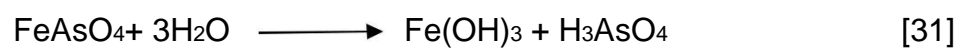


Además, independiente ente del tipo de mecanismo que se dé, tiene lugar un conjunto de reacciones adicionales, dependiendo de las características del medio, especialmente del pH, de la razón (Fe)/(As) y de la presencia de cationes monovalentes (NH_4^+ , K^+ , Na^+) que pueden favorecer la formación de jarosita. Estas reacciones, que se exponen a continuación, conducen a la formación de precipitados:





A pH 3 o superior el arseniato férrico producido se hidroliza de acuerdo con:



En la Tabla 9, 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 bólixiviación. 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 9
Resultados suficientes de ensayos de Biolixiviación.

		Ensayos de Biolixiviación				Recuperación Au		
		%						
Matriz	Bacteria	Temp. (°C)	Modo de Operación	sólidos (WW%)	Tiempo (d)	Oxido. Fe (%)	Sin tratamiento (%)	Con tratamiento (%)
	T.f	35	Discontinuo	20	35	87	24	81
	T.f	30-35	Discontinuo	-	30	60	25	90
	T.f	30-35	Continuo	-	12			
Pirita				15	14	45	7	70
	T.f	35	Discontinuo	15	33	85	7	94
				15	70	100	7	100
	T.f	30-35	Discontinuo	15	30	90	10	95
	T.f	30	Continuo	18	5	90	21	95
				10	30	65		90
	T.f	30	Discontinuo	10	16	50		90
	T.f	30	Discontinuo	5	8	29	6	56
	S161	50	Discontinuo	5	8	47	6	56
	Sulfato	60	Discontinuo	5	8	84	6	91
Arsenopirita	T.f	35	Continuo	12	2	70(As)	15	73
	Termof.	43	Continuo	3	7		27	88
	T.f	35	Continuo	15	6	31	55	90
				15	10	80	55	99
	T.f + T.t	35	Continuo	12	7	80	71	92
	T.f		Discontinuo	20	7	80	54	85

T.f . : *Thiobacillus ferrooxidans*

T.t . : *Thiobacillus thiooxidans*

Fuente: Iglesia Gonzalez Nieves, Octubre 1999

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.

Mandl *et al.*, 1992, discutió la migración del arsénico durante la oxidación bacteriana de la arsenopirita y propuso el siguiente esquema de reacción:

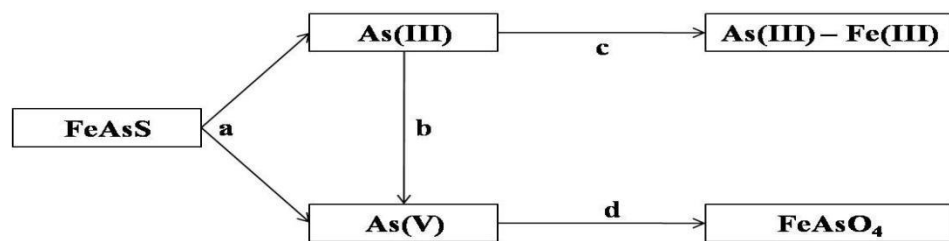


Figura 9. Diagrama para la oxidación de la arsenopirita.

Fuente: Mandl *et al.*, (1992).

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.

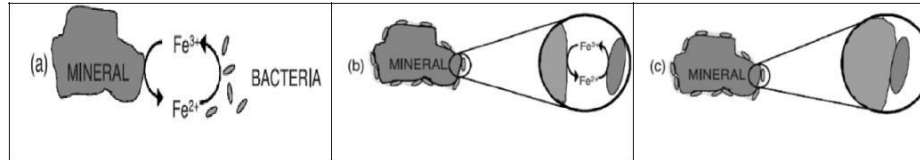


Figura 10. Mecanismos de oxidación bacteriana propuestos por Silverman (1967). a) Mecanismo indirecto. b) Mecanismo de contacto indirecto. c) Mecanismo de contacto directo.

Fuente: Crundwell 2003.

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

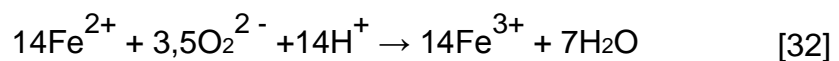
acuerdo con McGuire *et al.*, (2001b) quienes sugirieron que la adherencia celular debería ser controlada por las zonas de acumulación de azufre sobre la superficie del mineral.

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 este 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 este 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 esta 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 aún 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.

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 bioreactores, 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 10
Medio Nutriente para el Cultivo de *Thiobacillus ferrooxidans*

Constituyente	Leadhen et al. (1951)	Medio 9K (1959) Silverman&Lundgren	Mihaylov et al. (1991)
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,15 g	3,0 g	-----
CO(NH ₂) ₂	-----	-----	3,0 g
K ₂ HPO ₄	0,05 g	0,5 g	0,5 g
MgSO ₄ 7 H ₂ O	0,5 g	0,5 g	0,5 g
Ca(NO ₃) ₂	0,01 g	0,01 g	0,01 g
KCl	0,05 g	0,10 g	0,10 g
agua destilada	1000 ml	700 ml	700 ml
10 N H ₂ SO ₄	-----	1,0 ml	1,0 ml
FeSO ₄ 7 H ₂ O	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 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ /L en vez de 44,22 g/L); pH= 2,5.

3. Se incuban 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 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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.

Podemos 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.

$$N = (X_{400})(400)(10^4)$$

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.

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.

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.

3.5.6 Problemas que presenta el pre tratamiento de biooxidación

La biolixiviación presenta grandes ventajas frente a los demás pre tratamientos ya sean piro o hidrometalúrgico. Se trata de una alternativa con un bajo coste de reactivos y de instalaciones. Se realiza en condiciones de presión atmosférica y temperatura moderada, lo que provoca un abaratamiento adicional en los costes de operación y un menor impacto ambiental.

Sin embargo, la biooxidación de estas menas requiere tiempos de operación del orden de días, para conseguir una extracción de oro en el posterior proceso de cianuración del orden del 90 %. Esta cinética tan lenta influye negativamente en los costes de operación, por este motivo, es deseable mejorar la velocidad del proceso para extender su aplicación a nivel industrial.

Una alternativa a estos métodos puede ser la biolixiviación, proceso biológico en el que los sulfuros son oxidados por la acción de microorganismos.

La aplicación de la biolixiviación al tratamiento de menas refractarias es un concepto relativamente nuevo en comparación con la tostación y la oxidación química, y se está estableciendo rápidamente como una alternativa viable. Este tema será desarrollado en el siguiente subcapítulo.

3.6. TEORÍA DE LA CIANURACIÓN

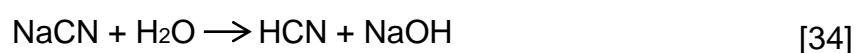
3.6.1. Cianuración del Oro

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

La adición de la cal a la pulpa con cianuro es una práctica universal, no solamente para evitar pérdidas de cianuro por hidrolisis sino también para neutralizar cualquier constituyente ácido del mineral que de otro 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:

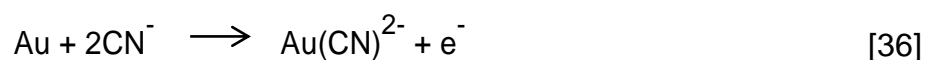


Esta reacción también puede evitarse con el uso de cal u otros álcalis.

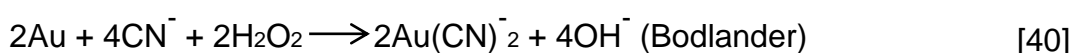
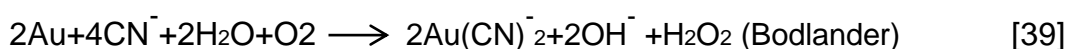
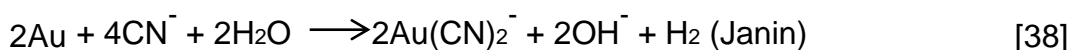
DISOLUCIÓN DE LOS METALES PRECIOSOS

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 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.



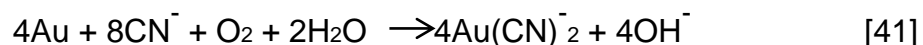
Barsky, Swainson y Hedley determinaron la energía libre de formación de iones complejos de oro cianuro y plata-cianuro. De los datos obtenidos ellos calcularon los cambios de energía libre en las diferentes reacciones sugeridas y puntualizaron cuales de ellas son teóricamente posibles bajo condiciones corrientes de cianuración. Para la energía libre del ion aurocianuro $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ encontraron un valor de $289 - 171 \text{ kg.m}^2/\text{s}^2$. 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 $K = 10^{16} \text{ Y } 10^{12.1}$

Elsner, reconoció que el oxígeno era esencial para la disolución de oro, de acuerdo a la Ecuación 41. Sus resultados demostraron que 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.

3.6.2. Efectos de los variables importantes de la cianuración

3.6.2.1. 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 $0,0325 \text{ kg/m}^2$ en una hora.

3.6.2.2. Efecto del Oxígeno sobre la Cianuración del Oro

La importancia del oxígeno en la disolución de oro no puede ser súper resultado, 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 de partícula.

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 se 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 11
Efecto del oxígeno sobre la velocidad de disolución del oro

Oxígeno (%)	Oro disuelto en 1 hora (kg/m ²)
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

3.6.2.3. 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 12
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.

3.6.2.4. Efecto de pH

El diagrama Eh—pH para el sistema oro-cianuro (Figura 11) 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.

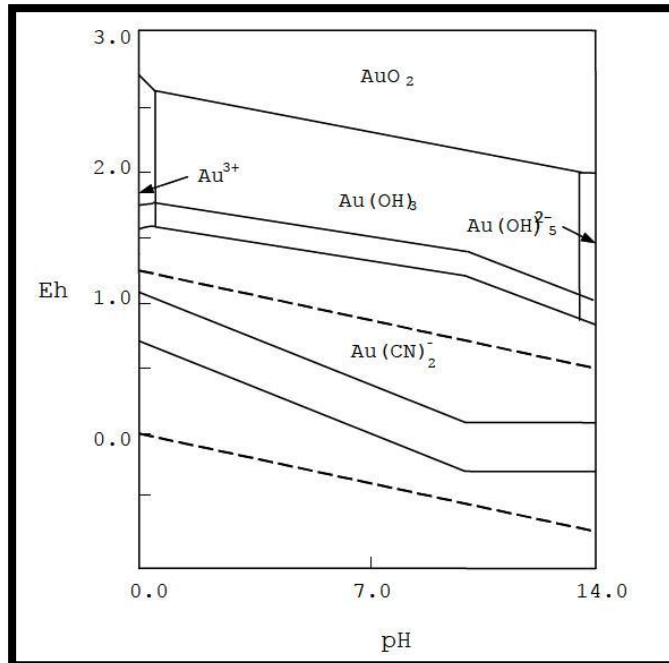


Figura 11. Potential-pH equilibrium diagram for the system Au-H₂O-CN⁻ at 25°C. Concentrations of all soluble gold species = 10⁻⁴ M [6]. [CN⁻]_{total} = 10⁻³ M, pO₂ = pH₂ = 1 atm, log ([H₂O₂] ± [HO₂⁻])/pO₂.

Fuente: Iglesia Gonzales Nieves, 1999

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 $\text{Au}^\circ \rightarrow \text{Au}^{+3}$ está bien por debajo del límite de estabilidad de la reacción $\text{Au}^\circ \rightarrow \text{Au}^+$. 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 .

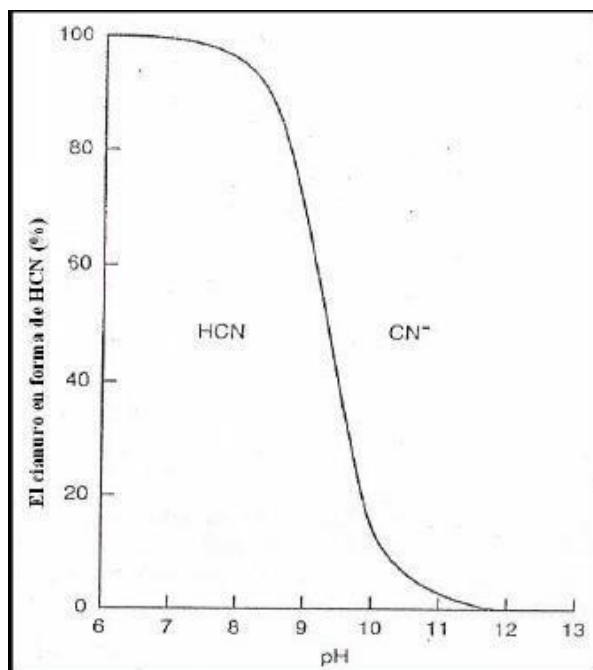


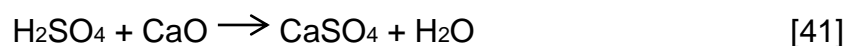
Figura 12. Especiación de cianuro y el cianuro de hidrogeno en solución acuosa, en función del pH
Fuente: Iglesia Gonzalez Nieves

3.6.2.5. 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 ecuación.



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 telurios, plata roja ó rocicler que se descomponen más rápidamente a una mayor alcalinidad.

3.6.2.6. Efecto de la temperatura

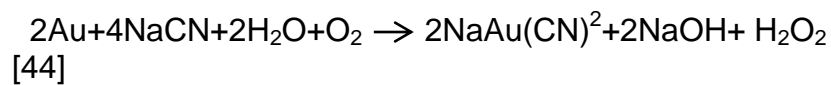
Cuando se aplica a una solución de cianato que contiene oro metálico, dos factores opuestos influyen en la velocidad de disolución de la temperatura agiliza la actividad de la solución y consiguientemente acelera la velocidad de disolución del oro. Al mismo tiempo la cantidad de oxígeno en la solución 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.

3.6.3. 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 lixiviante usado para separar al oro contenido en el mineral es el cianuro de sodio, se esquematiza en la Figura 13 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.

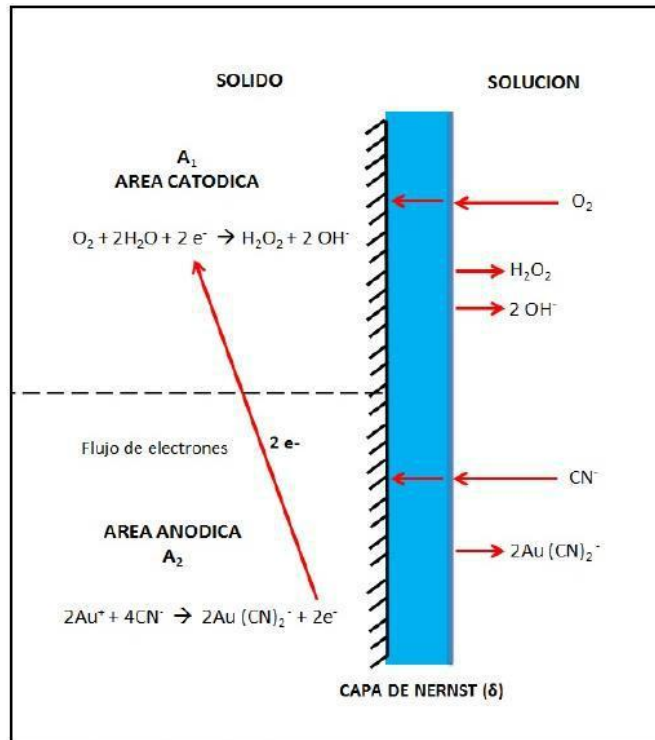
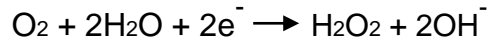


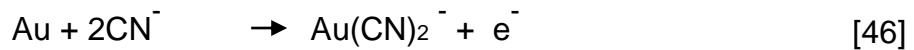
Figura 13. Modelo Electroquímico para la Cianuración del Oro
Fuente: Principles of Extractive Metallurgy, F. Habashi, Vol 2

Las reacciones electroquímicas generadas son las siguientes:

Área catódica:



Área anódica



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 nos da:

$$\frac{d(\text{O}_2)}{dt} = \frac{D_{\text{O}_2}}{\delta} A_1 \{ [\text{O}_2] - [\text{O}_2]_i \} \quad [47]$$

$$\frac{d(\text{CN}^-)}{dt} = \frac{D_{\text{CN}^-}}{\delta} A_2 \{ [\text{CN}^-] - [\text{CN}^-]_i \} \quad [48]$$

Dónde:		
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 interface de reacción, respectivamente en moles/litro
$[CN^-] - [CN^-]_i$		son las concentraciones del ión $[CN]^-$ en el seno de la solución y la interface de reacción, respectivamente en moles/L
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 limite, 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

limite. De esta forma, las concentraciones de la interface del sólido pueden ser consideradas como cero.

$$[O_2]_i = 0 \quad [CN^-]_i = 0 \quad [49]$$

Por lo tanto, tenemos:

$$\frac{d(O_2)}{dt} = \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 [O_2] \quad y \quad \frac{d(CN^-)}{dt} = \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 [CN^-] \quad [50]$$

$$velocidad \ de \ Disolución = \frac{2A D_{O_2} D_{CN^-} [O][CN^-]}{\{D_{CN^-} [CN^-] + 4D_{O_2} [O_2]\}} \quad [51]$$

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:

$$Tasa \ de \ disolución = 2 \frac{d(O_2)}{dt} = 2 \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 [O_2] \quad [52]$$

$$\text{Tasa de disolución} = \frac{1}{2} \frac{d(CN^-)}{dt} = \frac{1}{2} \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 [CN^-] \quad [53]$$

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:

$$2 \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 [O_2] = \frac{1}{2} \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 [CN^-] \quad [54]$$

Si consideramos 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:

$$\text{Tasa de disolución} = \frac{2A D_{O_2} D_{CN^-} [O_2] [CN^-]}{\delta \{D_{CN^-} [CN^-] + 4D_{O_2} [O_2]\}} \quad [55]$$

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:

$$Tasa\ de\ disolución = K_1[CN^-] \rightarrow Tasa\ de\ disolución = \frac{1A D_{CN^-}[CN^-]}{2\delta} \quad [56]$$

Esta última relación nos 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 de nominador de la ecuación general se elimina quedando por lo tanto:

$$Tasa\ de\ disolución = 2 \frac{A D_{O_2}[O_2]}{\delta} \rightarrow Tasa\ de\ disolución = K_2[O_2] \quad [57]$$

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:

$$\frac{1A D_{CN^-}[CN^-]}{2\delta} = 2 \frac{A D_{O_2}[O_2]}{\delta} \quad [58]$$

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

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 4 \frac{D_{O_2}}{D_{CN^-}} \quad [59]$$

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:

$$D_{O_2} / D_{CN^-} = 1,5 \quad [60]$$

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.

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 6 \quad [61]$$

3.6.3.1. Modelo cinético del núcleo sin reaccionar

El comportamiento parabólico de la lixiviación está relacionado con las etapas involucradas en el mecanismo de lixiviación de una partícula de mineral o concentrado. Estas etapas se esquematizan en la siguiente figura para el caso de las dos reacciones vistas (Ballester et al., 2000).

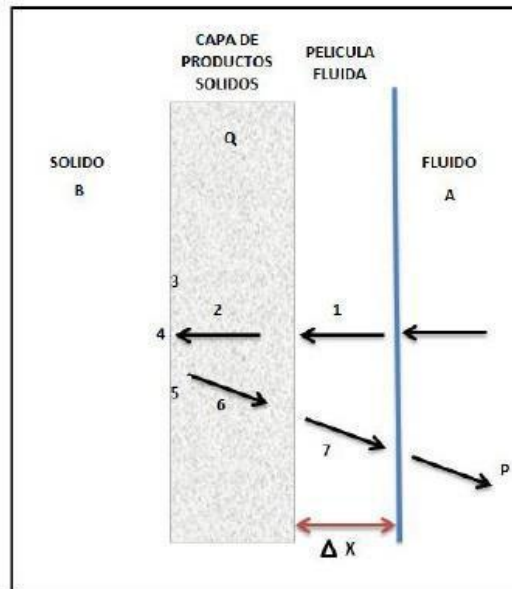


Figura 14. Esquema de un proceso heterogéneo sólido-fluido.
Fuente: Metalurgia Extractiva de Ballester, Verdeja y Sancho.

Las etapas identificadas de la **Figura 14** son las siguientes:

1. Transporte de A a la superficie del sólido (difusión de A a través de una película fluida de espesor X).
2. Transporte de A a través de la capa de productos sólidos Q.
3. Adsorción de A en la interfase.
4. Reacción química en la interfase.
5. Desorción de los productos de reacción.
6. Transporte de productos fluidos de reacción a través de la capa Q de productos.
7. Transporte de productos fluidos de reacción a través de la

película fluida.

La velocidad de lixiviación es inicialmente alta ya que el reactivo ataca directamente a las especies de oro presentes en la superficie de la partícula. Con el tiempo la velocidad de lixiviación decae porque la superficie de reacción está cada vez más alejada de la superficie de la partícula y entonces los reactivos y productos toman más tiempo en desplazarse al interior de la partícula. Esto se esquematiza en la siguiente figura 15:

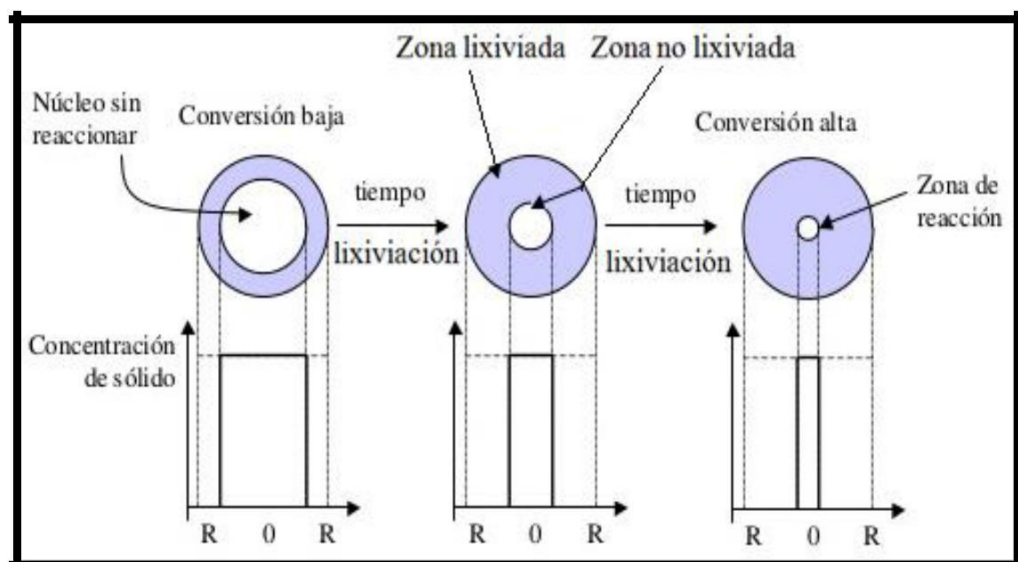
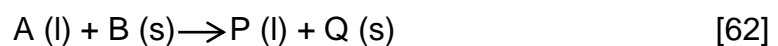


Figura 15. Esquema del modelo del núcleo sin reaccionar
Fuente: Ballester, 2000.

Se puede demostrar matemáticamente que este mecanismo de reacción es el origen del comportamiento parabólico observado en la lixiviación. Se muestra a continuación la deducción de la ecuación de la velocidad de lixiviación de una partícula de mineral para dos casos extremos: a) el caso en que la velocidad de lixiviación está controlada por la velocidad de difusión del reactivo lixivante a través del sólido (etapa 2); b) el caso en que la velocidad de lixiviación está controlada por la velocidad de reacción entre el reactivo lixivante y la especie mineral (etapa 3).

La nomenclatura a usar se basa en considerar la cinética de la siguiente reacción de lixiviación general relacionado la Figura 15:



Dónde:

A = Líquido (Fluido) = Solución Lixivante de Cianuro de Sodio.

B = Sólido = Mineral de Oro.

P = Producto Líquido o Solución Lixiviada con Oro.

Q = Producto Sólido o Residuos Lixiviados

A. CASO CONTROL DIFUSIONAL

Lo que da finalmente:

$$t = \frac{\rho_B R^2}{6bD_{eff} C_{As}} \left[1 - 3\left(\frac{r_c}{R}\right)^2 + 2\left(\frac{r_c}{R}\right)^3 \right] \quad [63]$$

La razón r_c/R se puede relacionar con el grado de conversión X_B , o sea la fracción de B que ha sido lixiviada, mediante la

Expresión:

$$1 - X_B = \frac{\frac{4}{3}\pi r_c^3 (\text{vol. núcleo sin reaccionar})}{\frac{4}{3}\pi R^3 (\text{vol. partícula total})} = \left(\frac{r_c}{R}\right)^3 \quad [64]$$

Luego, reemplazando en ecuación:

$$61 t = \frac{\rho_B R^2}{6bD_{eff} C_{As}} \left[1 - 3(1 - X_B)^2 + 2(1 - X_B)^3 \right] \quad [65]$$

Si τ es el tiempo necesario para lixiviar todo el B presente, o sea para que $X_B = 1$, de la expresión anterior se obtiene que:

$$\tau = \frac{\rho_B R^2}{6bD_{eff} C_{As}} \quad [66]$$

Luego se puede reescribir la expresión (63) como:

$$\frac{t}{\tau} = \left[1 - 3(1 - X_B)^2 + 2(1 - X_B)^3 \right] \quad [67]$$

B. CASO CONTROL QUÍMICO

Integrando:

$$-\rho_B \int_R^{r_c} dr_c = bK_s C_{AL} \int_0^t dt \quad [68]$$

O bien:

$$t = \frac{\rho_B}{bK_s C_{AL}} (R - r_c) \quad [69]$$

El tiempo τ para lixiviar toda la partícula ($r_c=0$), es:

$$\tau = \frac{\rho_B R}{bK_s C_{AL}} \quad [70]$$

Incorporando la expresión de τ en la ecuación 68 y reordenando se tiene:

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \frac{r_c}{R} \quad [71]$$

Finalmente, reemplazando r_c/R de ecuación 64, se llega a:

$$\frac{t}{\tau} = \left[1 - 3(1 - X_B)^2 + 2(1 - X_B)^3 \right] \quad [72]$$

C MODELO MIXTO

Corresponde a casos en que hay más de una etapa controlante. Se modela mediante la siguiente ecuación:

$$t = y * \tau_1 * \left(1 - 3(1 - x)^{2/3} + 2(1 - x)\right) + (1 - y) * \tau_2 * \left(1 - (1 - x)^{1/3}\right)$$

Donde:

t: tiempo de conversión total del sólido, días. x:

conversión, disolución de cobre.

R: radio inicial de partícula, cm.

ρ_B : densidad de partícula, mg/cm³.

b: coeficiente estequiométrico de la fase sólida.

C_{Ag} : concentración del reactivo en la fase líquida, mg/mL.

D_e : coeficiente de difusión efectivo.

ks: coeficiente cinético de reacción, mL/cm²*días.

τ_1 : τ de difusión en la ceniza, días.

Estas técnicas están limitada por los costes de operación que no están pagados por la economía del proceso. Una

limitación no menos importante para la aplicación de estos procesos el problema medioambiental que conllevan.

CAPITULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

En esta tesis se realiza una investigación experimental para evaluar un sistema de biooxidación para mineral refractario de oro usando un consorcio *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*, observar y determinar los cambios de pretratamiento que conlleven a una mejora en la recuperación del metal precioso.

4.2. MUESTRA Y TAMAÑO DE LA MUESTRA

La muestra, materia de estudio, es la arsenopirita aurífera conocida como concentrado refractario por presentar baja recuperación y alto consumo de reactivos; básicamente está compuesto de arsenopirita y en menores cantidades pirita. Este concentrado fue enviado por la Empresa Minera Solitario S. A., La Paz - Bolivia (EMISOL S. A.). La muestra de concentrado fue

tomada de 12 sacos, muestreando 4 kilos de cada uno, la toma de muestra fue al azar de un total de 70 sacos de 50 kg. c/u. Ver Figura 16.



Figura 16. Concentrado de arsenopirita aurífera
Fuente: Elaboración propia

4.3. DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS

Las pruebas realizadas en el presente estudio de investigación aplicando la biooxidación como pre tratamiento antes del proceso de lixiviación con cianuro al concentrado de “arsenopirita aurífera”, es obtenido del proceso de flotación en la Empresa EMILSOL S. A., La Paz Bolivia. Estas pruebas fueron realizadas en el Laboratorio de Metalurgia y Biología de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann Tacna (UNJBG), durante un periodo aproximado de dos años (2013 - 2014). Las pruebas se pueden resumir de la siguiente forma:

primeramente realizar el proceso de pre tratamiento de la arsenopirita aurífera mediante la biooxidación bacteriana antes de ser lixiviado con cianuro, luego efectuar el proceso directo de cianuración de la arsenopirita aurífera (sin tratamiento), así poder evaluar la disolución de oro en soluciones cianuradas mediante la recuperación.

Los resultados del presente estudio serán de utilidad para hacer pruebas a nivel piloto en La Paz -Bolivia. También se quiere indicar que se hicieron otras pruebas de pre tratamiento de los concentrados como: Tostación, con sobre molienda y tostación a nivel de laboratorio y piloto en la Plata Metalúrgica EMILSOL S. A, La Paz Bolivia, obteniendo recuperaciones del 70 y 80 % respectivamente, no se consideró los resultados de pruebas, por no estar dentro de los fines del presente trabajo.

4.4. EQUIPOS Y MATERIALES

Equipos, materiales y reactivos de laboratorio para el desarrollo de la investigación:

4.4.2. EQUIPOS

- Chancadora de quijada
- Molino de bolas
- Horno de mufla
- Horno de crisol Incubadora
- Microscopia Electronica de Barrido (SEM) o Espectrofotometro de absorción atómica
- Rop-TAp
- Bombas
- Bandejas de acero
- Balanza
- pH metro marca Hanna Instrument y Waterproof
- Picnometro
- Camara de Petroff-Hauser
- Colorimetro BAUCH & LOMB

4.4.3. MATERIALES:

- Mesa de trabajo
- Pinzas para crisol y copela
- Lingotera
- Vasos, pizetas, buretas,matraz
- Recipiente para el agua
- Recipiente para cianuro de acero inoxidable
- Tanque distribuidor de solución rica
- Tanque de solución Barren Malla Tyler #200
- Crisoles de arcilla
- Copelas
- Crisol de porcelana

4.4.4. MATERIAL BIOLÓGICO

Bacterias Acidithiobacillus ferrooxidans DSM 11477
y *Acidithiobacillus thiooxidans DSM 14887* donadas por
Laboratorio de Lixiviación Bacteriana de Minerales de
la Escuela de Ingeniería Bioquímica, Pontificia
Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

4.4.5. MATERIAL QUIMICO

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

4.4.6. REACTIVOS

- Cal
- Cianuro
- Nitrato de plata
- Ioduro de potasio
- Hidróxido de sodio
- Bórax
- Litargirio
- Carbonato de sodio
- Salitre
- Polvo de cinc
- Acetado de plomo
- Ácido nítrico
- Hidróxido de amonio
- Acido sulfúrico

- Fluoruro de sodio
- Orto-fenantrolina
- $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
- Hidroxilamina

4.5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.5.1. Metodología

El presente trabajo de investigación consiste en realizar pruebas experimentales primeramente hacer un pre tratamiento al concentrado de arsenopirita aurífera ricos en metales preciosos antes del proceso de lixiviación con cianuro y luego evaluar la cianuración directa. En el primer tratamiento se evaluaron la biooxidación bacterias A.f y el consorcio A.f y At, variando el porcentaje de sólidos del concentrado, considerando los valores de las soluciones impregnadas de oro, en función de la recuperación.

4.5.2. Caracterización mineralógica de la arsenopirita aurífera

La caracterización mineralógica se determinó por microscopía óptica (NIKON EPIPHOT) de luz reflejada en secciones pulidas, como se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13
Análisis mineralógico de la arsenopirita aurífera

CONCENTRADO	FORMULAS	%
Pirita	FeS ₂	7
Calcopirita	CuFeS ₂	0,2
Esfalerita	ZnS	4,3
Galena	PbS	1,6
Arsenopirita	FeAsS	73,5
Ganga	---	13,4

Fuente: Empresa EMISOL S. A. – Bolivia

Donde la mineralización del oro está predominantemente asociada a la arsenopirita.

4.5.3. Análisis químico del Concentrado de arsenopirita aurífera

La lectura para cada metal base se realizó por barrido electrónico. Los metales preciosos se determinaron por fusión copelación, disgregación ácida del doré y lectura por espectrofotometría de Absorción Atómica. Los resultados se muestran en la tabla 14.

Tabla 14
Análisis químico de la arsenopirita aurífera (concentrado)

Leyes g/t y en %													
Au	Ag	As	Bi	Cd	Co	Fe	Ni	Pb	Sb	Zn	Cu	Al	SiO ₂
g/t	g/t	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
81,5	154	33,8	1,84	0,01	1,4	27,9	1,72	1,21	0,22	2,88	0,07	0,21	5,15

Fuente: Laboratorio SGS Bolivia S. A.

4.5.4. Análisis físico del Concentrado de arsenopirita aurífera

Para ver la granulometría del concentrado se hizo el análisis granulométrico considerando la Malla 200 (75 μ m) mediante un Ro-Tap (TYLER RO-TAP® 8" RX-29). El peso específico se determinó por el método del picnómetro y el control de pH con pH metro digital (WATERPROOF), los resultados se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15
Análisis físico de la arsenopirita aurífera

Parámetros	Valores
Granulometría	82 % < malla 200
Peso específico (g/mL)	4,7
pH (30 % sólidos)	6,5

Fuente: Laboratorio de Metalurgia - UNJBG

4.5.5. Procedimiento experimental

La muestra, materia de estudio, es la arsenopirita aurífera conocida como concentrado refractario por presentar baja recuperación y alto consumo de reactivos; básicamente está compuesto de arsenopirita y en menores cantidades pirita. Este concentrado fue enviado por la Empresa Minera Solitario S. A., La Paz - Bolivia (EMISOL S. A.). La muestra de concentrado fue tomada de 12 sacos, extrayendo 4 kilos de cada uno, la toma de muestra fue al azar de un total de 70 sacos de 50 kilos c/u. Ver Figura 17.



Figura 17. Concentrado de arsenopirita aurífera
Fuente: Elaboración Propia

A. Cianuración directa de concentrado de arsenopirita sin pre tratamiento

Las condiciones operacionales de la lixiviación fueron:

Se determinó el pH natural y luego, mediante la adición de CaO, se llevó el pH a 11,5. Sin embargo, como se verá el nivel de pH varió llegando a alcanzar el valor de 9,8 a 9,9 en la mayoría de las muestras.

La concentración de cianuro de sodio considerada es de 2,5 g/L, para la prueba.

Tiempo de contacto. El tiempo considerado por la lixiviación de diagnóstico es de 72 horas, durante este tiempo fueron tomadas muestras de licor para leer por Absorción Atómica, adicionalmente se medía el pH a cada muestra, el resto del licor se usó para determinar el consumo de cianuro por medio de titulación con nitrato de plata 4,33 g/L empleando yoduro de potasio, como indicador.

Tipo de contacto: agitación mecánica (180 r.p.m).

Una vez terminada la prueba, se filtró para separar la fracción sólida y se enjuaga el sólido con la solución de lavado de cianuro en concentración de 0,1 g/L. este enjuague se realizó 2 veces para garantizar que todo el oro que ha sido extraído sea filtrado. La fracción sólida es secada en estufa a 40 °C hasta sequedad y se somete a ensaye al fuego para determinar el nivel valioso en las colas.

B. Cianuración con pre tratamiento biológico

1. Activación y preparación de inóculos de microorganismo biooxidantes.

Las bacterias fueron donadas del Laboratorio de Lixiviación Bacteriana de minerales de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso-Chile. Para la activación de la cepa de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, se tomó un inóculo de 2 mL (10 %) y se llevó a un matraz

Erlenmeyer de 50 mL de volumen, el cual tuvo 25 mL de medio de cultivo cuya composición es la que se muestra en la Tabla 15, para la cepas *A. ferrooxidans*. En el caso de *A. thiooxidans* se preparó un medio similar al 9K, con la diferencia que se sustituyó $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ por 5 g/L de azufre elemental.

La activación consistió en realizar sub-cultivos consecutivos de las cepas. La preparación del inoculo y los sub-cultivos se realizaron a 30 °C, 200 rpm y pH inicial de 1,8.

Tabla 16
Composición del medio 9K para *A. ferrooxidans*
Medio 9K (Silveran y Lundgren, 1959)

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	3,00 g/L
$\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	0,50 g/L
K_2HPO_4	0,50 g/L
$\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	7,5 %
Agua destilada	1000 mL

El pH fue ajustado a 1,8 con H_2SO_4 10 N

Fuente: Mario Esparza Mantilla PhD, MSc.

Para la preparación de los inóculos, estos fueron tomados de los cultivos activados hasta alcanzar volúmenes de 150 mL para el inóculo de *A. ferrooxidans* y 50mL para *A. thiooxidans*. Los inóculos tuvieron una concentración de 10^8 células por mililitro. Al inocular a los matraces experimentales, se incubaron por 72 horas a 30 °C, 200 rpm de agitación, y pH ajustado de 1,8 con H₂SO₄.

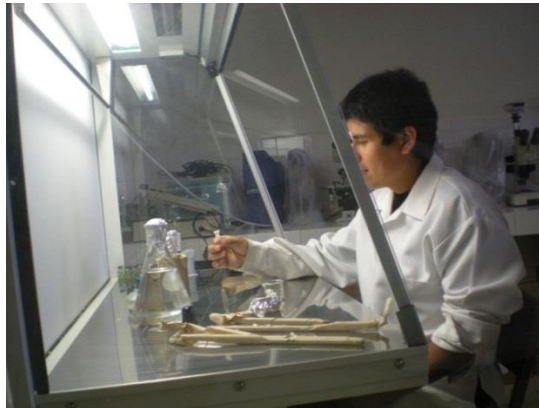


Figura 18. Activación de las cepas lixiviantes en medio líquido
(Laboratorio de Microbiología - UNJBG)
Fuente: Elaboración Propia

Determinación del Crecimiento Bacteriano

Para caracterizar la cinética de *A. ferrooxidans*, se preparó un matraz Erlenmeyer de 50 mL, con un medio fermentativo de 25 mL, este fue inoculado en 10 % y fue incubado a 30 °C, 200 rpm, y pH inicial de 1,8. El crecimiento bacteriano se monitoreo cada 12 horas, en la cual se tomó muestras por triplicado de 1 mL, por un tiempo total de 80 horas.

A cada muestra se realizó las siguientes determinaciones analíticas: recuento bacteriano mediante una cámara de Petroff-Hausser, determinación de ión ferroso, ión férrico, fierro total en solución, pH.

3. Diseño experimental

BIOOXIDACIÓN

Se evaluó la biooxidación de la arsenopirita aurífera (concentrado) catalizado por *A. ferrooxidans* y por un consorcio: *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans*, a concentración de pulpa del 8 y 12 % de concentrado (malla 200, 82 % pasante). Los ensayos fueron realizados en matraces

Erlenmeyer de 500 mL, con un volumen fermentativo de 250 mL de medio 9K sin hierro ferroso al que se le denominó 0K, el inóculo fue de 10 % y ajustado a un pH inicial de 1,8. El ensayo fue incubado a 22 °C, 175 rpm. Los ensayos se realizaron por duplicado.

METODOLOGÍA ANÁLITICA

Conteo de células mediante la cámara de Petroff-Hausser:

Se tomó 1,5 µL de la muestra y se cargó a la cámara de *Petroff-Hausser*, el recuento se realizó en un microscopio de campo claro.

La concentración de células se obtuvo mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{\text{Número total de microorganismos}}{\text{ml}} = \frac{\text{Bacterias contadas} \cdot 1/\text{dilución}}{\text{Número de cuadrados contados} \cdot \text{Volumen del cuadrado}}$$

Cuantificación de ión ferroso

Se agregó 0,1 mL de la muestra con una concentración de Fe^{+2} en el rango 10 - 100 mg/L. Para muestras más concentradas se diluirá con agua pH 2. A continuación se adicionó 1 mL de NaF, 1 mL del reactivo de trabajo (orto-fenantrolina) y 1 mL de agua pH 2. La mezcla se deja a temperatura ambiente por 5 minutos y se medirá la absorbancia a 510 nm (Abs < 0,800) contra blanco de agua pH 2. La concentración de ión ferroso se determinó por comparación con curva de calibrado de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Cuantificación hierro total

Se agregó 0,1 mL de la muestra con una concentración de Fe_{Total} en el rango 10 - 100 mg/L. Para muestras más concentradas se diluirá con agua pH 2. A continuación se adicionará 0,1 mL del reactivo hidroxilamina y 1 mL de NaF. Seguido de esto se agregó 1 mL del reactivo de trabajo y 1 mL de agua pH 2. La mezcla se dejó a temperatura ambiente por 5 minutos y se midió la absorbancia a 510 nm (Abs < 0,800) contra

blanco de agua pH 2. La concentración de fierro total se determinó por comparación con curva de calibrado de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Determinación de pH

Para la determinación de pH, se utilizará un electrodo de vidrio conectada a un pH-metro marca HANNA Instruments. Este será calibrado con disolución tampón pH 4 y 7 antes de realizar las medidas

Cianuración de la arsenopirita aurífera(concentrado)

biooxidada con *a. ferrooxidans* y el consorcio *a. ferrooxidans* y *a. thiooxidans* 8 y 12% de concentrado

Las condiciones operacionales de la lixiviación se realizó en condiciones similares a la cianuración sin tratamiento, en esta ocasión se consideró para las pruebas de lixiviación con cianuro la arsenopirita aurífera biooxidada por las bacterias tales como el consorcio (Af + At) y la bacteria Af, concentraciones de sólidos del 8 y 12% respectivamente.

Cianuración de la arsenopirita aurífera biooxidada

La arsenopirita aurífera pre tratada u oxidada considerada como residuos oxidados es después recogido, lavado y molido y luego se sometió a lixiviación con cianuro.

Condiciones experimentales

Todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente (20 - 25 °C). El pH se ajustó a 11,5 con CaO y se corrigió hasta este valor durante el transcurso de cada prueba. Durante la cianuración se suministró aire.

En este tipo de pruebas, una de las variables más importantes es la concentración de cianuro. Ésta fue calculada en cada prueba, estimando la concentración de cianuro para acomplejar todo el oro del concentrado, así disolviendo gran cantidad del metal precioso, considerando un exceso de 200 ppm de cianuro libre.

Se controló periódicamente el pH y la concentración de cianuro libre. En los estudios cinéticos se controló la concentración de oro en disolución.

Al final de cada prueba, se analizó la concentración de oro en las soluciones cianuradas, así como la de otros cationes específicos de cada prueba como hierro, arsénico y cobre. Los ripios o residuos sólidos se secaron en una estufa a 105 °C y se analizó el contenido de oro por el método de ensayo al fuego.

La concentración de cianuro libre se determinó con una solución de 4,33 g AgNO₃/L de solución. La concentración de oro en la solución cianurada se analizó mediante el método Chiddy y/o adsorción atómica.

CAPITULO V

RESULTADOS

5.1. PRE TRATAMIENTO DE BIOOXIDACIÓN DE ARSENOPIRITA AURÍFERA (CONCENTRADO)

5.1.1 Prueba de biooxidación de hierro por *Acidithiobacillus ferrooxidans* en 8 y 12 % de concentrado.

Las pruebas de biooxidación con *A. ferrooxidans* fue realizado a dos porcentajes diferentes de concentrado, estas fueron a 8 y 12 %. En la Figura 19 muestra la cinética de biooxidación a 8 % de arsenopirita, la cinética completa tuvo una duración de 240 horas, en ella se puede observar que el ion ferroso se consumió aproximadamente a las 100 horas, mientras el ion férrico iba en incremento por la oxidación, mientras el hierro total se mantiene. En la parte final del ensayo se puede notar un incremento del ion ferroso, posiblemente al desprendimiento del concentrado. Se evidencia que el máximo de hierro férrico presente en el ensayo fue de 1,6 g/L aproximadamente.

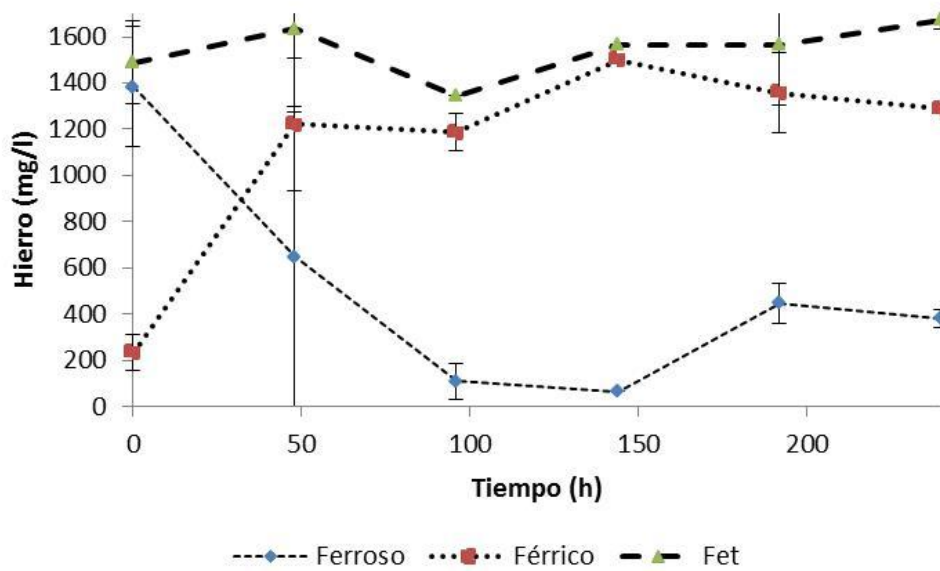


Figura 19. Cinética de biooxidación de hierro por *A. ferrooxidans* con 8 % de mineral (FeT=Hierro total)

Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 20 se muestra la biooxidación a 12 % de arsenopirita, en esta se muestra un consumo del ion ferroso similar al de la Figura 19, la cinética fue de 240 horas, en este se puede evidenciar un consumo completo del ion ferroso, y también se puede observar que en el último punto un incremento de ion férrico.

Al comparar la producción de ion férrico (Figura 19) para muestras de arsénico al 8 y 12 %, se evidenció, que las concentraciones máximas con respecto al tiempo, es similar entre los dos. Llegando los dos hasta máximo de 1,6 g/L de ion férrico.

En la Figura 19 se muestra el crecimiento de *A. ferrooxidans* en los dos ensayos, en ella se puede observar que se obtuvo un mayor crecimiento en el ensayo a 8 % de concentrado. La diferencia entre ellos fue de hasta 30 %, a las 240 horas de iniciado el ensayo.

Con respecto al pH (Figura 20), en el ensayo se muestra un incremento del pH, incrementándose desde 1,5 hasta 1,7 aproximadamente.

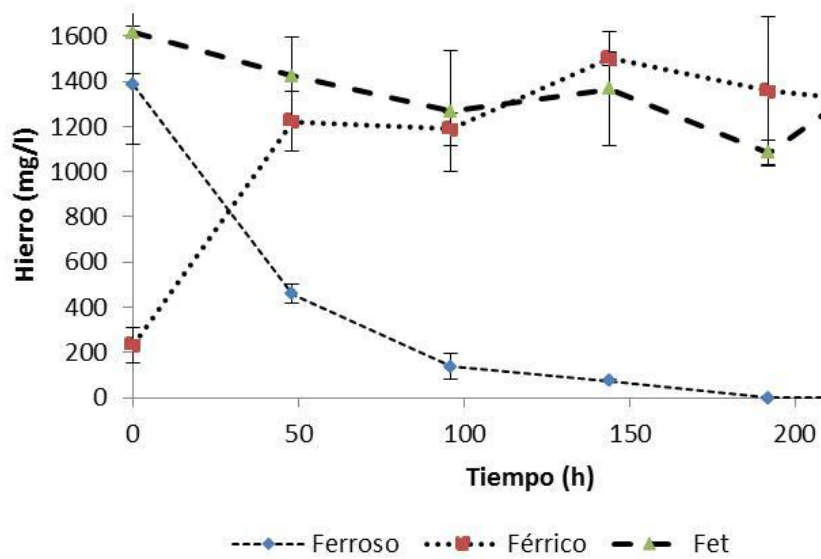


Figura 20. Cinética de biooxidación de hierro por *A. ferrooxidans* con 12 % de mineral (Fet=Hierro total).
Fuente: Elaboración Propia.

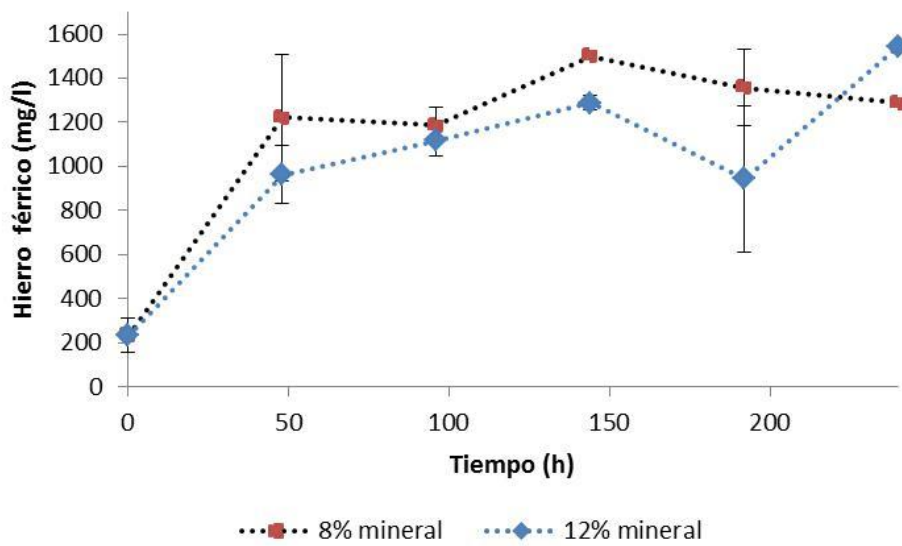


Figura 21. Producción y solubilización de ion férrico a partir de arsenopirita por *A. ferrooxidans*.
Fuente: Elaboración Propia.

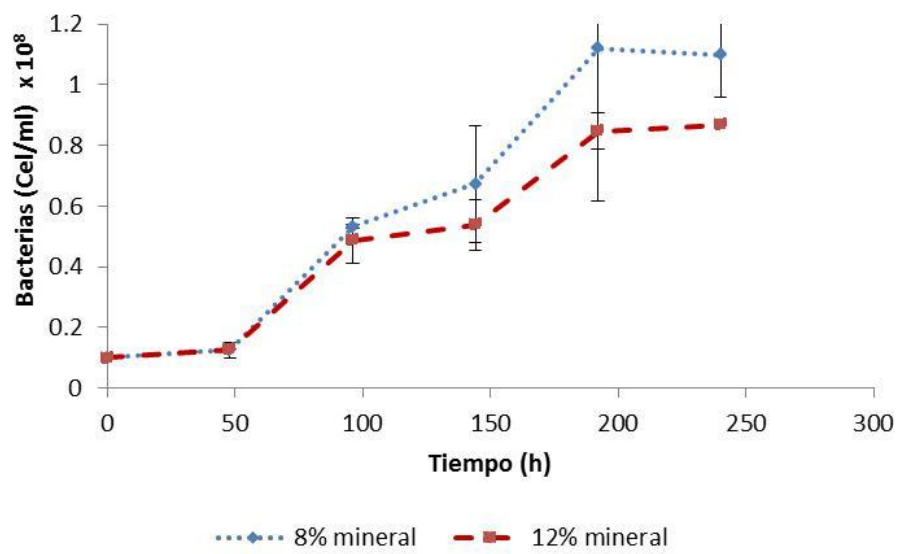


Figura 22. Crecimiento de *A. ferrooxidans* en 8 y 12 % de Mineral
Fuente: Elaboración Propia

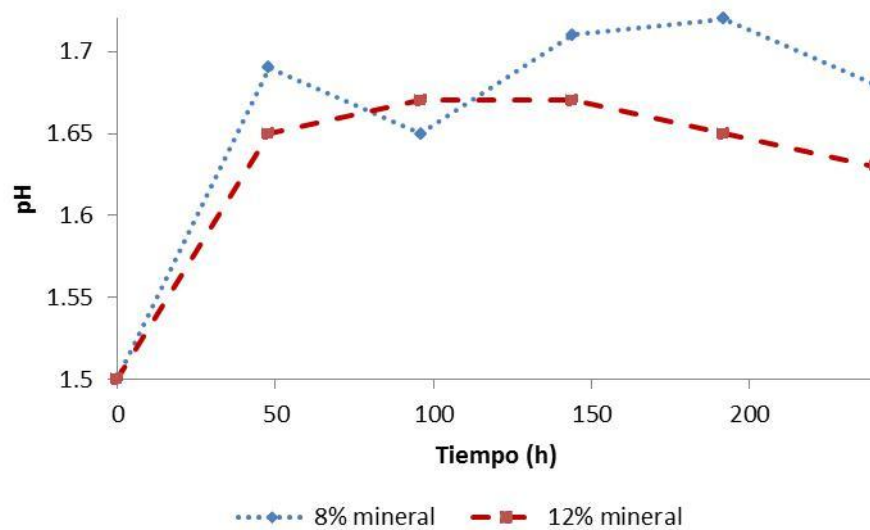


Figura 23. Evolución del pH en el proceso de biooxidación de hierro
Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Prueba de biooxidación de hierro por el consorcio de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans* en 8 y 12 % de mineral

La cinética de biooxidación por el consorcio presento una biooxidación máxima cerca de 9 g/L, la cinética fue monitoreada cerca de 240 horas. En la figura 24 se muestra que cerca a las 100 horas de biooxidación la producción de ion férrico disminuye, llegando este a estabilizarse. El ion ferroso no fue detectado. La máxima concentración de ion férrico encontrado fue de 9 g/L, que al final de la prueba comenzó a declinar, posiblemente a la producción de jarosita en el ensayo.

La Figura 25 muestra una concentración máxima de ion férrico de 8 g/L, en este ensayo no se pudo evidenciar el ion ferroso. La producción de ion férrico a 8 y 12 % de concentrado (Figura 24) son similares entre ellos, sin embargo se puede evidenciar una biooxidación mayor a 8 % de concentrado, sin embargo, en la última etapa de la experimentación, se observa una disminución en el hierro férrico, este posiblemente a la formación de jarosita en el ensayo.

La producción de ion férrico a 8 y 12 % de concentrado son similares entre ellos (Figura 24), se puede evidenciar una biooxidación mayor a 8 % de concentrado, sin embargo en la última etapa de la experimentación, se observa una disminución en el hierro férrico, este posiblemente a la formación de jarosita en el ensayo.

En la Figura 24, el crecimiento bacteriano fue mayor a 12 % de concentrado, los dos presentan una extensa fase de latencia. En la Figura 23 el pH fue en incremento mientras el ensayo se lleva a cabo. Observándose un incremento de pH de 1,5 a 2,0 aproximadamente.

5.1.3 Comparativos de biooxidación entre *A. ferrooxidans* y el consorcio de *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans*.

Al comparar la biooxidación entre la cepa pura y el consorcio (Figura 24), se observó que el consorcio presento una mayor conversión de ion ferroso a ion férrico, con una diferencia de hasta 7 g/L.

El crecimiento bacteriano en la Figura 25, fue mayor en el consorcio que en la cepa sola. La diferencia entre los dos fue el doble que la bacteria sola.

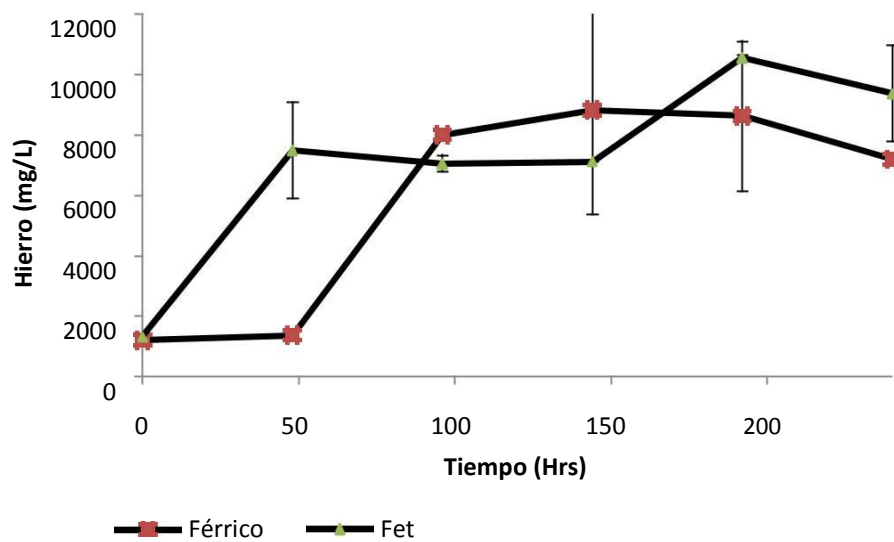


Figura 24. Cinética de biooxidación de hierro por el consorcio de *A.ferrooxidans* y *A. thiooxidans* con 8 % de mineral
Fuente: Elaboración propia

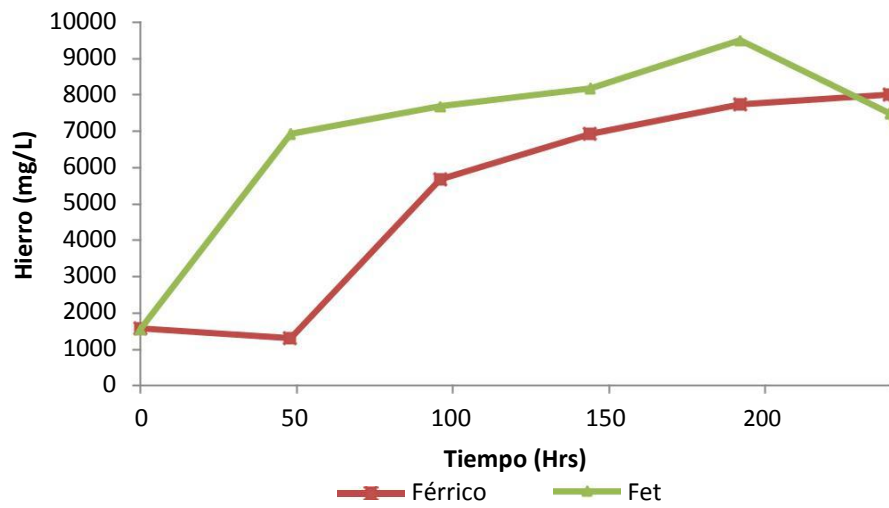


Figura 25. Cinética de biooxidación de hierro por el consorcio de *A.ferrooxidans* y *A. thiooxidans* con 12 % de mineral.
Fuente: Elaboración propia.

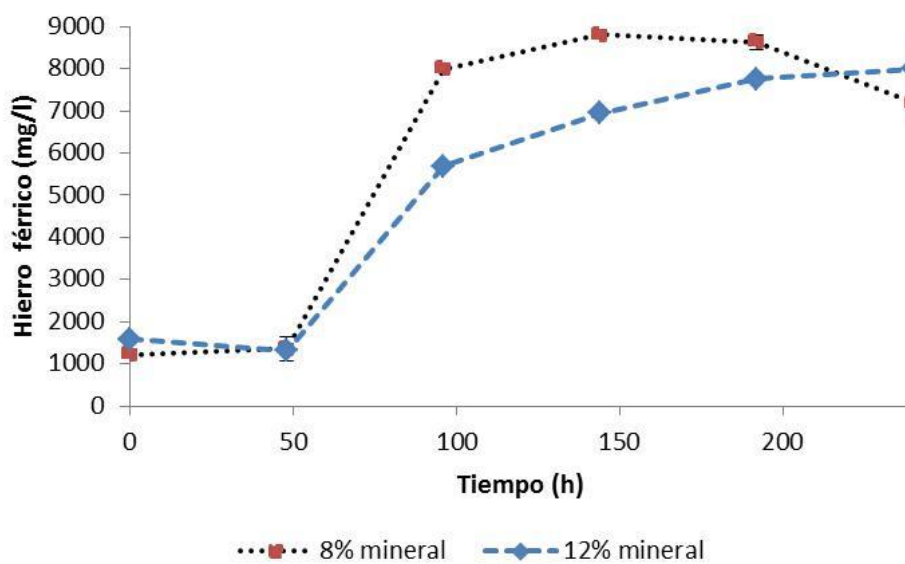


Figura 26. Producción y solubilización de ion férrico a partir de arsenopirita por el consorcio de *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans*
Fuente: Elaboración propia

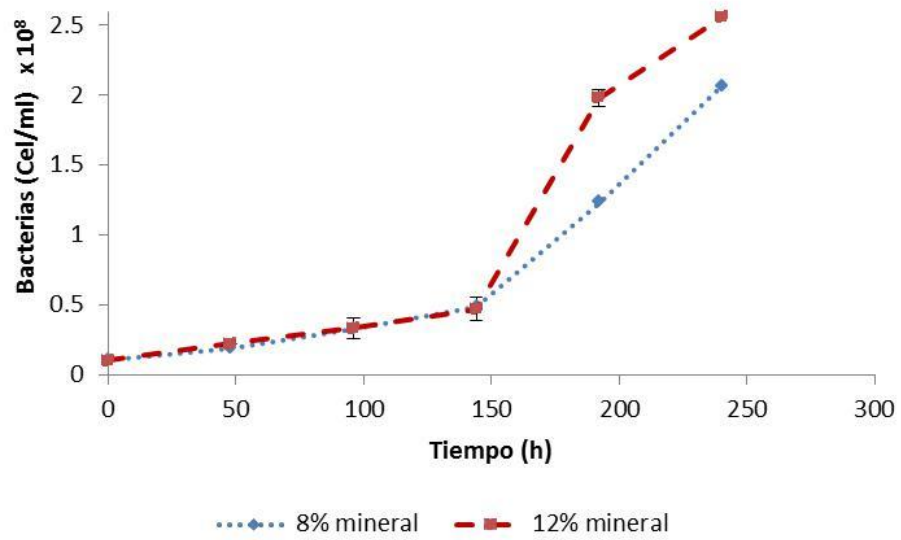


Figura 27. Crecimiento del consorcio de *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans* en 8 y 12 % de mineral
 Fuente: Elaboración propia.

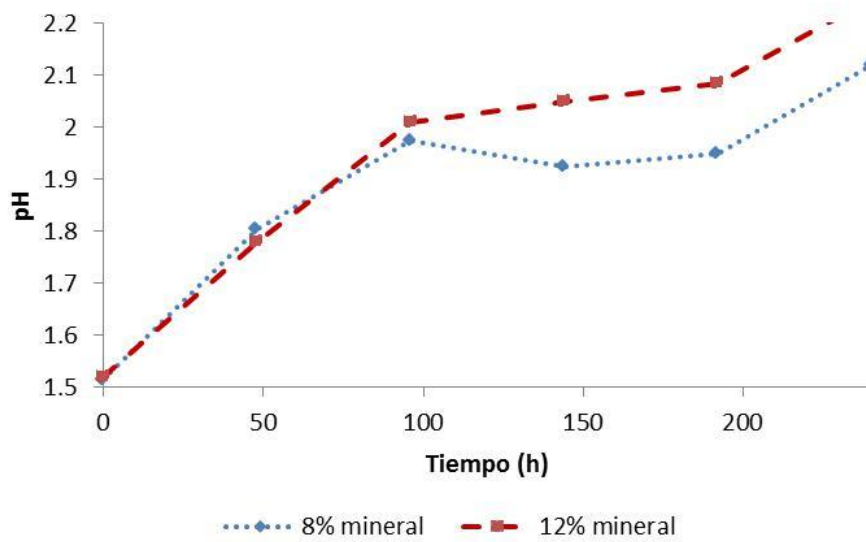


Figura 28. Evolución del pH en el proceso de biooxidación de Hierro
Fuente: Elaboración propia

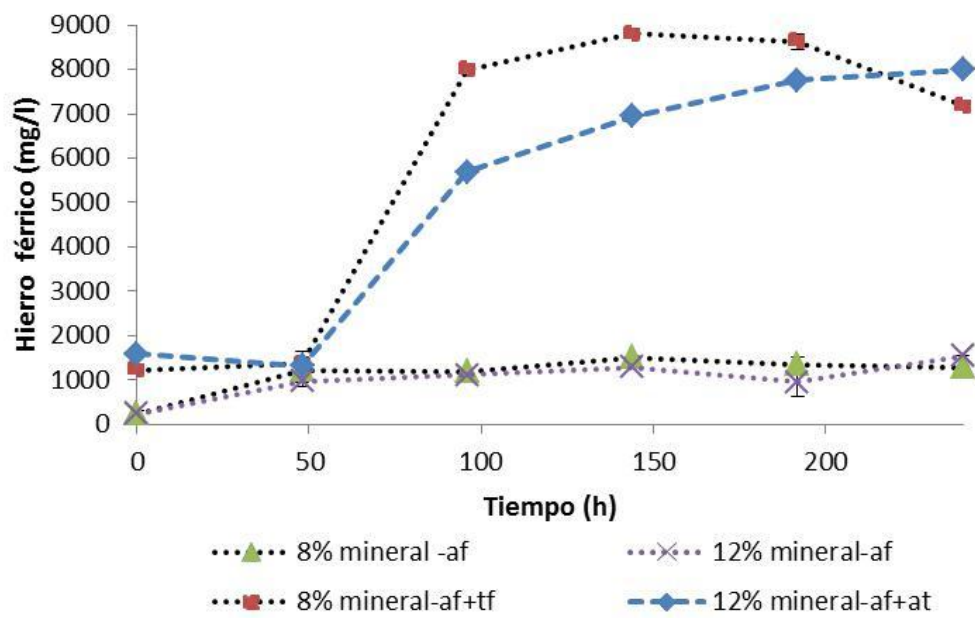


Figura 29. Producción de ion férrico por *A. ferrooxidans* y el consorcio de *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans* a 8 y 12 % de mineral
Fuente: Elaboración propia

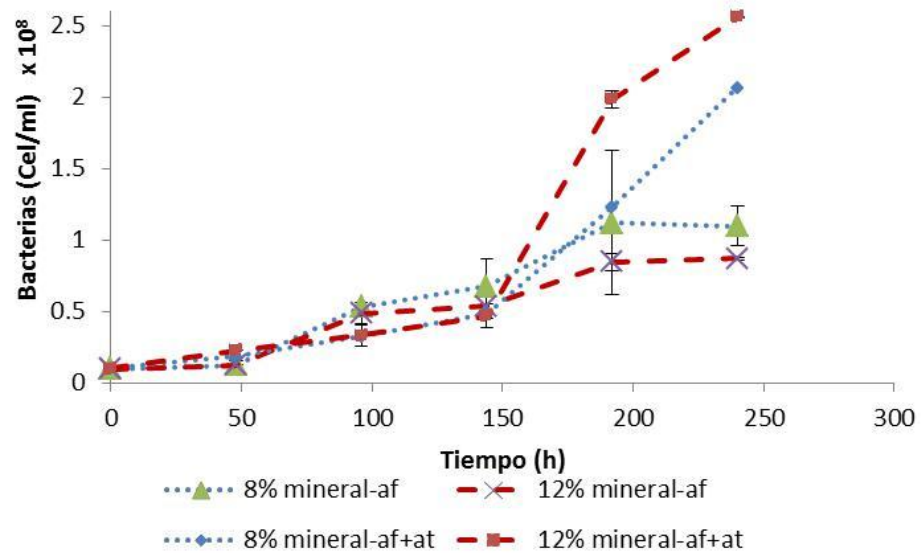


Figura 30. Crecimiento bacteriano de *A. ferrooxidans* y el consorcio de *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans* a 8 y 12 % de mineral
Fuente: Elaboración propia.

5.2 Pruebas de cianuración

Se realizaron pruebas de lixiviación con NaCN a la arsenopirita aurífera (concentrado) antes y después del tratamiento de biooxidación. Las primeras pruebas, tuvieron por objeto caracterizar los respectivos grados de refractariedad, y las posteriores, comprobar la efectividad del pre tratamiento elegido.

5.2.1 Pruebas de cianuración de la arsenopirita

aurífera sin tratamiento

En estas pruebas los concentrados fueron lixiviados directamente sin tratamiento bajo las siguientes condiciones:

Tabla 17

Condiciones de la prueba sin tratamiento

Condición de las pruebas	
Ley cabeza concentrado	81,5 Au g/t
Peso del concentrado	120 g 82 % - m 200 (75 µm)
Dilución S/L	1/3
Tiempo de agitación	72 horas
Volumen de CN	360 mL
Fuerza Cianuro	2 g/L

Fuente:Elaboracion Propia

Resultados:

Tabla 18
Cianuración de la arsenopirita aurífera sin tratamiento

Tiempo (h)	Fuerza		Solución Au mg/L	Solución Au g/t	Ripios Au g/t	Recuperación de oro (%)
	CN (g/L)	pH				
0	2,5	11,5				0
4	1,8	10,2	10,3	30,9	50,6	38,0
12	1,3	10,5	12,7	38,0	43,5	46,7
24	1,3	10,4	13,2	39,7	41,8	48,8
48	0,4	10,1	13,9	41,6	39,9	51,1
72	0,4	9,8	14,0	42,0	39,5	51,6

Fuente: Elaboración propia.

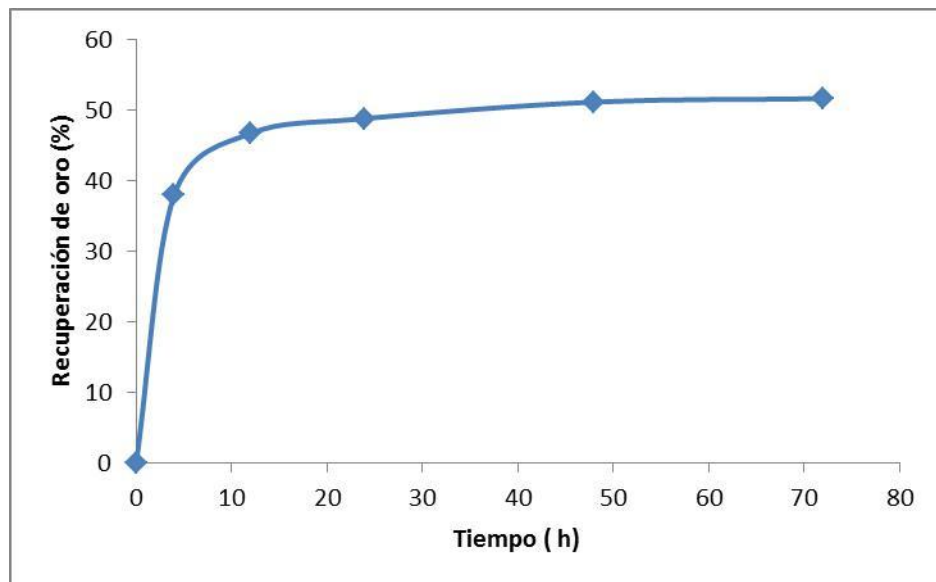


Figura 31. Cinética de cianuración de la arsenopirita aurífera sin tratamiento.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Pruebas de cianuración de la arsenopirita aurífera sometido a pre tratamiento con *A. ferrooxidans*

a. Pruebas de cianuración con 8 % de arsenopirita aurífera

En esta etapa de evaluación la muestra oxidada por consorcio de bacterias por 240 horas, se procedió a la lixiviación del oro por agitación en vaso en el Laboratorio Metalurgia-FAIN, bajo las siguientes condiciones operativas:

Tabla 19
Condiciones de la prueba

Condiciones de la prueba	
Peso concentrado (g)	50,00 g
Dilución (L/S)	3/1
pH cianuración	10,0 -10,5
Tiempo lixiviación (h)	24
Tamaño de partícula	82 % -m200
Equipo:	Agitador de velocidad variable con aireación

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 20
Resumen de pruebas de cianuración

Producto	Au	Recuperación %	Tiempo		Consumos	
			Cianuración (h)	82% m -200	NaCN kg/t	CaO kg/t
Concentrado g/t	81,5					
		82,9				
S. Rica (g/m ³)	--		24	88	2,66	7
Ripios (g/t)	13,1					

Fuente: Elaboración propia

b. Pruebas de cianuración con 12% de la arsenopirita aurífera

En esta etapa de evaluación la muestra biooxidada por el consorcio de bacterias durante 9 días, se procedió a la lixiviación por agitación en vaso en el Laboratorio Metalurgia-FAIN, bajo las siguientes condiciones operativas:

Tabla 21
Condiciones de la prueba

Condiciones de la Prueba	
Peso concentrado (g)	50,00 g
Dilución (L/S)	3/1
pH cianuración	10,0 -10,5
Tiempo de lixiviación (h)	24
Tamaño de partícula	82% -m 200
Equipo:	Agitador de velocidad variable con aireación

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22
Resumen de pruebas de cianuración

Producto	Au	% Recuperación	Tiempo		Consumos	
			Cianuración (h)	82% m-200	NaCN kg/t	CaO kg/t
Concentrado (g/tn)	81,5					
S. Rica (g/m ³)	--	74,9	24	88	2,76	7,2
Ripios (g/tn)	20,49					

Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Pruebas de cianuración de la arsenopirita aurífera sometido a pre tratamiento por el consorcio compuesto de *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans*

a. Pruebas de cianuración con 8 % de la arsenopirita aurífera

En esta etapa de evaluación la muestra biooxidada por el consorcio de bacterias por 240 horas, se procedió a la lixiviación por agitación en vaso en el Laboratorio Metalurgia-Facultad de Ingeniería U.N.J.B.G., bajo las siguientes condiciones operativas:

Tabla 23
Condiciones de la prueba

Condiciones de la prueba	
Peso concentrado (g)	50,00 g
Dilución (L/S)	3/1
pH cianuración	10,0 -10,5
Tiempo de lixiviación (h)	24
Tamaño de partícula	82% -m 200
Equipo:	Agitador de velocidad variable con aireación

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24
Resumen de pruebas de cianuración

Producto	Au	% Recuperación	Tiempo	Consumos		
			Cianuración (h)	82% - m 200	NaCN kg/t	CaO kg/t
Concentrado (g/t)	81,5	90,4				
S. Rica (g/m ³)	0		24	88	2,79	7,2
Ripios (g/t)	7,82					

Fuente: Elaboración propia

b. Pruebas de cianuración con 12 % de la arsenopirita aurífera

En esta etapa de evaluación la muestra biooxidada por consorcio de bacterias por 9 días, se procedió a la lixiviación por agitación en vaso en el Laboratorio Metalurgia-FAIN, bajo las siguientes condiciones operativas:

Tabla 25
Condiciones de la prueba

Condiciones de la prueba	
Peso concentrado (g)	50,00 g
Dilución (L/S)	3/1
pH cianuración	10,0 -10,5
Tiempo de lixiviación (h)	24
Tamaño de partícula	82% -m 200
Equipo:	Agitador de velocidad variable con aireación

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26
Resumen de pruebas de cianuración

Producto	Au	% Recuperación	Tiempo	Consumos		
			Cianuración (h)	82% - m 200	NaCN kg/t	CaO kg/t
Concentrado (g/t)	81,5					
		83,39				
S. Rica (g/m ³)	0		24	882,75		7,2
Ripios (g/t)	13,54					

Fuente: Elaboración Propia

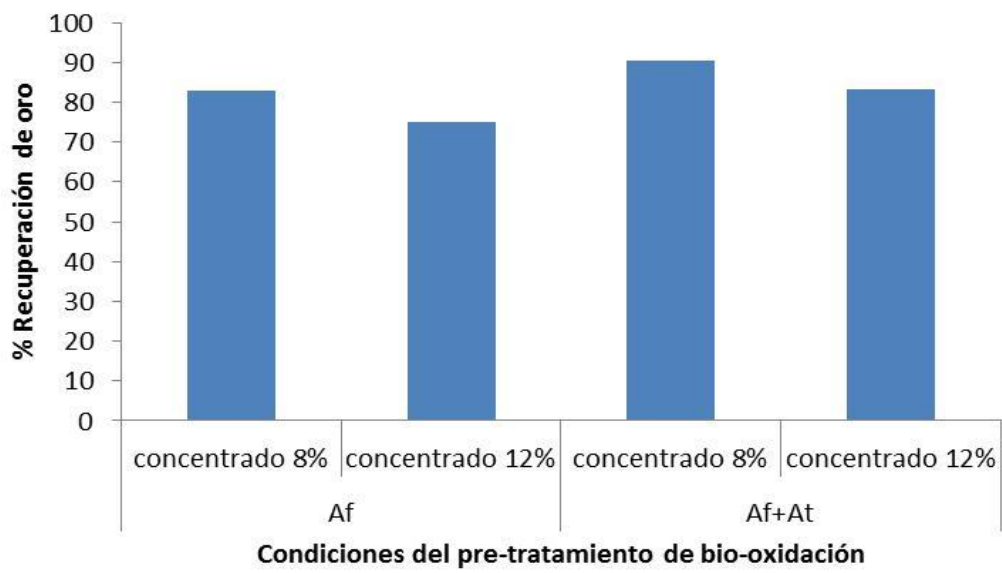


Figura 32. Recuperación de oro con diferente pre tratamientos de Biooxidación
Fuente: Elaboración propia.

5.2.4 Pruebas de cianuración del concentrado biooxidado con el consorcio *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans* (8% de concentrado)

Se trató de considerar la mejor prueba experimental ocurrida en el proceso de biooxidación y cianuración tal como se observa en la Figura 33, donde la recuperación de oro es de 90,4 %, considerando el 8 % de sólidos y el consorcio de bacterias.

Tabla 27
Condición de las pruebas de biooxidación

Condiciones de pruebas de biooxidación	
Ley cabeza concentrado	81,5 Au g/t
Peso del concentrado	120 g 82 % - m 200 (75 µm)
Consortio Bacteria	Af+At
% de sólidos de la arsenopirita aurífera	8 %
Población bacterias	1×10^7 Bacterias/mL
pH	1,8 - 2
Tiempo de oxidación	9-10 Días
Agitación y aireación	Si

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28

Condición de las pruebas de cianuración

Condiciones de Pruebas de Cianuración	
Ley cabeza concentrado	81,5 Au g/t
Peso del concentrado oxidado	100 g
Dilución S/L	1/3
Tiempo de agitación	24 horas
Volumen de CN	360 mL
Fuerza Cianuro	2 g/L
pH inicial	11,0
pH final	10,4

Fuente: Elaboración Propia

Resultados:

Tabla 29

Cianuración de la arsenopirita aurífera con tratamiento

Fuerza						
Tiempo (h)	CN (g/L)	pH	Solución Au mg/L	Solución Au g/t	Ripios Au g/t	Recuperación Del oro (%)
0	2.0	11.5				0
2	1.4	10.2	4.78	14.35	67.15	17.6
4	1.3	10.5	11.14	33.42	48.08	41.0
6	1.2	10.4	15.18	45.55	35.95	55.9
12	1.2	10.1	24.22	72.65	8.85	89.1
24	1.0	9.8	24.60	73.80	7.70	90.6

Fuente: Elaboración Propia

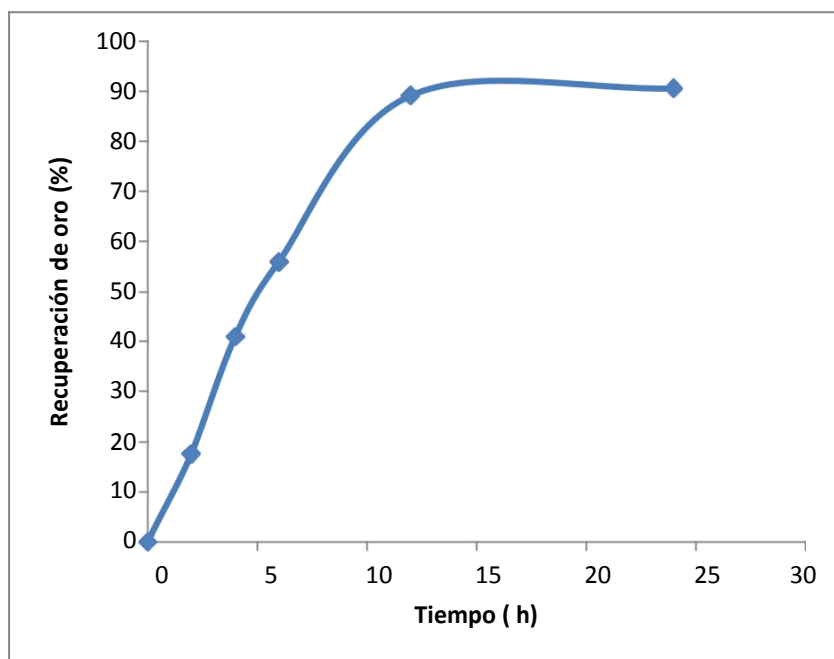


Figura 33. Cinética de cianuración de la arsenopirita aurífera con tratamiento.
Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan el análisis de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales:

6.1. PRE TRATAMIENTO DE BIOOXIDACIÓN BACTERIANA

Los ensayos presentaron una mayor biooxidación con el consorcio que con la bacteria que participo sola, este puede deberse a que *A. ferrooxidans* puede biooxidar el hierro y azufre, en cambio el consorcio puede complementar al biooxidar también el azufre por *A. thiooxidans*, La arsenopirita dentro de su composición posee hierro, azufre y arsénico, los microorganismos con las cuales se trabajó obtienen su energía al oxidar hierro y azufre, tomándolo del concentrado.

También se puede observar que al experimentar a 8 y 12 % de pulpa (concentrado), a 8 % se observa una mayor biooxidación y crecimiento bacteriano, éste puede deberse a que los microorganismos presentan menor estrés que a una alta densidad de pulpa. Es conocido que los microorganismos biolixivantes deben adaptarse a ciertas condiciones de trabajo para que puedan realizar su labor sin problemas (Mason y Rice, 2002), en nuestro estudio es correlativo con los estudios realizados por diversos investigadores, donde indican que a mayor pulpa, menor es la solubilización, así como a mayor tamaño de partículas (Rossi, 2001), esto es debido a que las condiciones agrestes del proceso, indicaría la necesidad de una excelente adaptación en los microorganismos, este se consigue mediante múltiples cultivos en laboratorio, aunque es más factible encontrar este tipo de microorganismos adaptados en aislados de mina.

Es de importancia mencionar que al trabajar con el consorcio se obtuvo una solubilización de hierro de más de 30 % mayor que con la cepa tratada sola. Las cinéticas con el consorcio muestra un incremento progresivo de ion férrico, mas el ion ferroso no se detectó en el análisis, este puede haberse debido a que fue

consumido rápidamente o que mientras extraía la bacterias del mineral el hierro, este era biooxidado instantáneamente. El monitoreo de hierro durante el proceso es sumamente importante, al igual que el potencial redox, ya que es un indicador de que se la biolixiviación se está realizando. La presencia de ion ferroso en el procesos podría indicar que los microorganismos están siendo inhibidos por alguna motivo, por ello es importante siempre monitorear que se encuentre en muy bajas concentraciones.

Para los cultivos puros de *A. f.* se observan diferencias claras entre los ensayos, con concentración del 8 % y 12 %, se ven más afectadas lo cual se ve reflejado en el comportamiento del pH, ya que esto está directamente relacionado con el tiempo que tarda el sistema en adquirir un pH ácido; interfieren tanto los carbonatos presentes en el concentrado, los cuales se disuelven en ambientes ácidos entre pH de 0 a 2,5, como el estrés causado a las bacterias por las condiciones más drásticas a las que fueron sometidas. De otro lado, estos cultivos alcanzan valores de pH menores en comparación con los cultivos puros de *A. f.*, llegando en todos los casos a un pH de 1,4, como es de esperarse para los medios donde se encuentra activo *A. t.*, ya que esta bacteria se especializa en

oxidar compuestos reducidos del azufre hasta sulfatos, en una serie de reacciones intermedias donde se genera gran cantidad de ácido sulfúrico (Brock y Madigan 1998; Schippers y Sand, 1999). En este trabajo se obtuvo un leve incremento en el pH. El pH es un parámetro a monitorear, ya que es un indicador indirecto de que el sistema de biolixiviación se encuentra activo, ya que los microorganismos al biooxidar el azufre, esta forma sulfatos y los sulfatos a la vez forman algunos compuesto de interés para su recuperación y ácido sulfúrico. Este ácido sulfúrico reduce el pH del proceso, mas no es el único parámetro que hace que se reduzca el pH, sino también la acumulación de ion férrico también puede hacerlo, pero con consecuencias muy graves. Los microorganismos biolixivantes pueden trabajar muy bien a pH ácidos, pero a pH menores que 1,4 puede haber problemas de inhibición, por otro lado también la acumulación de ión férrico puede reducir drásticamente el pH, de igual manera inhibiendo la actividad de los microorganismos, además de formar una capa superficial pasivante sobre el concentrado, originando un gran problema en el sistema. La Jarosita se forma también cuando el sistema aumenta a un pH mayor de 2,5, ya que facilita la formación de hidróxidos de hierro, precipitando fácilmente.

Cuando el pH se dispara hacia valores ácidos, es el resultado del balance entre un consumo simultáneo de protones en la biooxidación del hierro ferroso y la liberación de protones relacionada con la precipitación de hierro férrico (Meruane y Vargas, 2003). De las diversas pruebas ejecutadas como cianuración directa, cianuración directa con aireación, cianuración con pre tratamiento y aireación o cianuración con pre-tratamiento y aireación, esta última prueba fue, la de mejor resultado obtenido entre el 90,4 - 90,6 % de recuperación.

Además, se ha logrado bajar el consumo de cianuro tal como se puede apreciar en la Tabla 18. La aireación resulta ser un parámetro importante, si bien el oxígeno no es un nutriente limitante en los microorganismos biolixiviantes, si lo es el dióxido de carbono, es de considerar que los microorganismos que participan en el proceso en su mayoría son microorganismos quimiolitotrofos, este puede ser la causa por qué con los microorganismos lixiviantes se observó una mayor biooxidación. El proceso donde los microorganismos no son aireados se puede decir que se encuentran limitados su fuente de carbono, y por lo tanto conlleva a una baja población bacteriana y una baja actividad biolixivante.

Es interesante observar las fotografías de TEM, en ella se puede observar las corrosiones típicas que dejan los microorganismos después del ataque al concentrado, estas corrosiones de las fotografías se ajustan. Se conoce que los micro-organismos biolixivantes se al tener contacto con el concentrado estos tienen una primera atracción físico-química, y luego los microorganismos inician la producción de sustancias poliméricas extracelulares que le otorgaría la función de formar biofilm sobre el concentrado o mineral. Este biofilm formará un sistema de biolixiviación, donde las bacterias atrapadas oxidarán el hierro y el ion férrico se acumulará en el biofilm, este ion férrico a la vez atacará al concentrado dejando la huella que se observa en la fotografía al final de la experimentación (Figura 35).

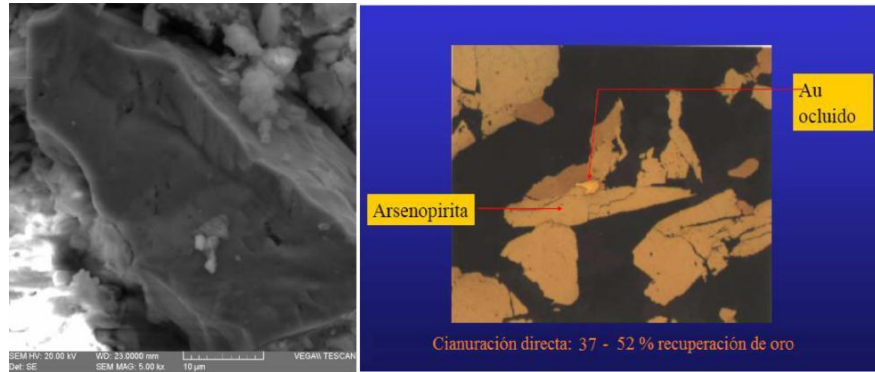


Figura 34. Concentrado de arsenopirita antes del proceso de biooxidación
Fuente: Elaboración Propia.

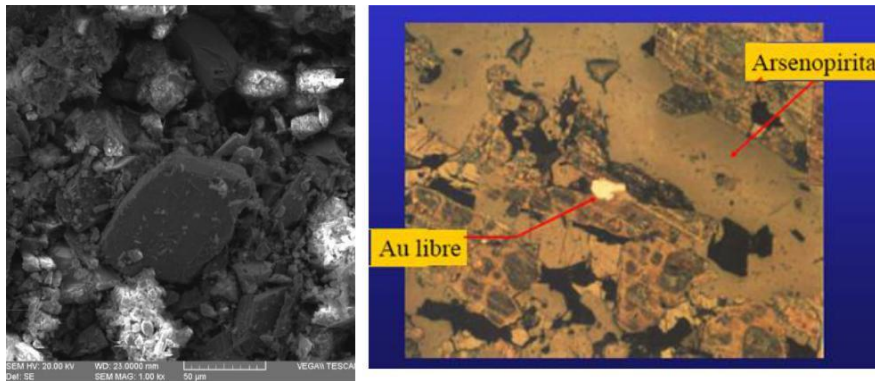


Figura 35. Concentrado de arsenopirita Después del proceso de biooxidación
Fuente: Elaboración Propia.

En los ambientes naturales asociados a la minería, es posible encontrar una variedad de microorganismos como bacterias y arqueas, pero en su mayoría bacterias, cuya población se encuentra fuertemente influenciada por la temperatura a la que están expuestas así como por los nutrientes presentes. La temperatura en los sistemas industriales no supera los 45 °C y en esta situación es posible encontrar bacterias de las especies *Acidithiobacillus ferroxidans* (A.f), *Acidithiobacillus thiooxidans* (A.t) y *Leptobacillus ferroxidans* (L.f) que son las más prevalentes. Respecto a los nutrientes en un medio con ión ferroso es común encontrar *Acidithiobacillus ferroxidans*, y en su ausencia predomina *Acidithiobacillus thiooxidans* y *Leptobacillus ferroxidans*, en si la presencia de determinadas especies de bacterias dependerá del mineral o concentrado biolixiviado, por lo que las condiciones óptimas de operación podrían no ser exactamente las mismas para todos los concentrados, es importante conocer su composición mineralógica (Vasquez, L. M., 1997). En este trabajo se consideró la temperatura ambiente, la cual que fluctuaba entre 25 y 30 °C.

Las cinéticas con el consorcio muestra un incremento progresivo de ion férrico, más el ion ferroso no se detectó en el análisis, este puede haberse debido a que fue consumido rápidamente o que mientras extraía la bacterias del mineral el hierro, este se era biooxidado instantáneamente.

6.2. CIANURACIÓN DIRECTA SIN TRATAMIENTO

La cianuración directa, aplicada a este concentrado presenta una máxima recuperación del 51,57 %, debido a que el oro se encuentra encapsulado dentro de la matriz de la arsenopirita. Así mismo el consumo de cianuro está por encima del 5,8 kg NaCN/t, por ser un concentrado refractario.

6.3. CIANURACIÓN DE LA ARSENOPIRITA AURIFERA BIOOXIDADO CON EL CONSORCIO *A. FERROOXIDAN* Y *A. THIOOXIDANS* (8 %DE CONCENTRADO)

Se trató de considerar la mejor prueba experimental ocurrida en el proceso de biooxidación y cianuración tal como se observa en la figura 33, donde la recuperación de oro logra el 90,4 %, considerando el 8 % de sólidos y el consorcio de bacterias. Esta vez se logró una recuperación del 90,6 %, mejorando la recuperación debido a que el oro estaba expuesto al proceso de cianuración. Así mismo el consumo de cianuro bajo de 6,3 a 3,0 kg NaCN/t, prácticamente se elimina gran parte de la refractariedad del concentrado.

CONCLUSIONES

1. Los ensayos de biooxidación de las bacterias *A. ferrooxidans* y el consorcio, aplicado a concentrados de arsenopirita aurífera variando el porcentaje de sólidos de 8 y 12 %, favorece el 8 % donde se logra una mayor biooxidación y crecimiento bacteriano, este se debe a que los microorganismos presentan menor estrés de las bacterias al 12 %.
2. La cianuración directa sin tratamiento de la arsenopirita aurífera presenta una máxima recuperación del 51,57 % a las 72 horas del proceso, debido a que un porcentaje de oro, aún se encuentra encapsulado dentro de la matriz de la arsenopirita. Al realizar el pre tratamiento de biooxidación se logra beneficiar la recuperación del oro.
3. El consumo de reactivos en los ensayos de lixiviación sin tratamiento incrementa el consumo de cianuro hasta 6,3 kg NaCN/t de concentrado y el consumo de cal es de 3,2 kg/t que para estos concentrados es el apropiado. Con respecto a los

ensayos de lixiviación con pre tratamiento el consumo de cianuro esta entre 2,66 - 2,79 kg NaCN/t de mineral y el consumo de cal fueron elevados entre 7 - 7,2 kg/t, debido a la acidificación del concentrado en la etapa de biooxidación.

4. Las experiencias de biooxidación realizadas con el concentrado de arsenopirita aurífera muestran que los cultivos mixtos o consorcios logran una mayor extracción de oro asociados a la arsenopirita. Esto seguramente implica la destrucción parcial o total de la matriz sulfurada que rodea al oro y que permite una mayor recuperación del mismo cuando se expuso al proceso de cianuración llegando a obtener recuperaciones entre el 90,4 - 90,6 % de oro a las 24 horas, con consumos menores de cianuro respecto al proceso directo de cianuración.

5. Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación son los adecuados frente a un tratamiento actual de cianuración directa aplicado actualmente en la Empresa Minera EMILSOL S. A. LA PAZ - BOLIVIA, que no supera el 50 % de recuperación de oro. Además este proceso de biooxidación se adecua a las exigencias medio ambientales que rigen en todo el mundo.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar los contenidos de arsénico disuelto en el proceso de cianuración ya que puede afectar en la etapa siguiente como es la adsorción del oro en carbón activado o bien en el proceso de precipitación (Merrill Crowe).
2. Se recomienda utilizar oxidantes en el proceso de preareación durante el proceso de cianuración como el peróxido de hidrogeno, el peróxido de calcio y el hidróxido de amonio.
3. Hacer pruebas a nivel piloto para el ajuste de las variables del proceso y el diseño de equipos, y deben ser en zona donde va estar la planta industrial.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo F. 2000. The use of reactor in biominig process. Electric Journal of Biotechnology. 3 184-190. Disponible en internet:<http://ejbiotechnology.uvc.cl/content/vol13/issue3/full/4/>.
- Acevedo F., Gentina J. C. 2005. Biolixiviación de minerales de cobre. En: Fernando Acevedo y Juan Carlos Gentina (Editores). Fundamentos y Perspectivas de las Tecnologías Biomineras. p 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 Microbiology Biotechnology 20 865–869.
- Adamson, R. J. 1972. Gold Metallurgy in South Africa. Johannesburg: Chamber of Mines of South Africa.
- Adapted *Thiobacillus ferrooxidans*. Hydrometallurgy 61, 151–156.
- Applications of microbial processes by the minerals industries. Applicaations Microbial Biotechnology. 63, 249–257.

- 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.
- Bacterial leaching of low-grade ZnS concentrate using indigenous mesophilic and thermophilic strains. *Hydrometallurgy*. Vol 85. Pp 59–65.
- Ballester, A. 2005. Mecanismo de la biolixiviación. *Fundamentos y perspectivas de las tecnologías mineras*. Valparaíso, Chile: Ediciones Universitarias de Valparaíso, p. 9-24.
- Ballester; J. Sancho; L. F. Verdeja , *metalurgia extractiva: fundamentos* (vol. I) 2000, pp 360-371, 381-387
- 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.
- Benavente Oscar, *Hidrometalurgia I*, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, 2004, pp 41 - 58.
- Benavente Oscar. “Proceso Lixiviación” Antofagasta, 2004. Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
- Bosecker, K. (2001). Microbial leaching in environmental clean-up programmes. *Hydrometallurgy*. 59, 245-248.

- Bosecker, K. (2001). Microbial leaching in environmental clean-up programmes. *Hydrometallurgy*. 59, 245-248.
- Bozdemir, T., Durusoy, T., Erincin, E., Yürüm, Y. 1996. Biodesulfurization of Turkish lignites. *Fuel*. 75 (13): 1596-1600.
- Collinet, M.N., Morin, D., 1990. Characterization of arsenopyrite oxidizing *Thiobacillus*. Tolerance to arsenite, arsenate, ferrous and ferric iron. *Antonie van Leewenhoek*. Vol 57. Pp 237-244.
- Corkhill C.L., Vaughan D.J. 2009. Arsenopyrite oxidation - A review. *Applied Geochemistry*. doi:10.1016/j.apgeochem.2009.09.008.
- Crundwell, F., 1996. The formation of biofilms of iron-oxidising bacteria on pyrite. *Minerals Engineering*. 9, 91081–1089.
- Crundwell, F., 1996. The formation of biofilms of iron-oxidising bacteria on pyrite. *Minerals Engineering*. 9, 91081–1089.
- Daoud J, Karamanev D (2005) Formation of jarosite during Fe²⁺ oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Min Eng* 19:960–967
- Daoud J, Karamanev D (2005) Formation of jarosite during Fe²⁺ oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Min Eng* 19:960–967
- Das T, Ayyappan S, Chaudhury G.R. 1999. Factors affecting bioleaching kinetics of sulfide ores using acidophilic micro-organisms. *BioMetals*, 12. 1-10.

- Das T, Ayyappan S, Chaudhury G.R. 1999. Factors affecting bioleaching kinetics of sulfide ores using acidophilic micro-organisms. *BioMetals*, 12. 1-10.
- Das, A., Modak, J.M., Natarajan, K.A., 1999. Surface chemical studies of *Thiobacillus ferrooxidans* with reference to copper tolerance. *Antonie van Leeuwenhoek Vol 73*. Pp 215–222.
- E. M. Domic Mihovilovic, *Hidrometalurgia*, 2001 pp 200 - 211
- F., Missari Chuquipoma, "Metalurgia del Oro" , Primera Edición, Editorial San Marcos, Lima-Perú 2010. Pp 25 - 29.
- Fathi Habashi, Curso Internacional "Avances De La Metalurgia Del Oro" Lima, 03 De Diciembre del 2010.
- Fathi Habashi, *Métallurgie extractive*, Québec, Enr., 1993 - Technology & Engineering - pp. 689.
- Fathi Habashi, *Metalurgia Extractiva del Oro, A Textbook of Hydrometallurgy*, 2nd edition, Laval University, Quebec City, Canada February 1999.
- Gomez, C., Blazquez, M.L., Ballester, A., 1999. Bioleaching of a Spanish complex sulphide ore bulk concentrate. *Minerals Engineering*. Vol 12. Pp 93–106.

- 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.
- Guevara A.; De la Torre E. Tratamientos de minerales refractarios de oro, 2006, Ecuador, pp 2-4.
- 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.
- I. Nagy, P. Mrkusic, H.W. MacCulloch. (1993). Tratamiento químico de menas refractarias de oro.p. 4.1 - 4.8.
- Instituto de Ingenieros de minas del Perú, Revista Minería, N° 424 año LX Enero 2013/www.iimp.org.pe. pp50-56.
- J., Gallardo, "Metalurgia del oro y la Plata", Segunda edición. Editorial San Marcos. 1990 Lima – Perú.
- Kelly, D. P. & Wood, A. P. (2000). Genus Thiobacillus Beijerinck. In Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, 2nd edition, vol. 2. Edited by N. R. Krieg, J. T. Staley & D. J. Brenner. Michigan: Bergey's Manual Trust (in press).

- 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.
- 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.
- Li, H.M., Ke, J.J., 2003a,b. Influence of Ni²⁺ and Mg²⁺ on the growth and activity of Cu²⁺
- 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.*
- 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*
- McIntosh, J. M., Groat, L. A. Biological-mineralogical interactions. *Mineralogical association of Canada, Short course series. Ottawa. 1997.*

- Mendoza W. E., Metalurgia Del Oro y Plata Publicado, 2010, pp.1
- Meruane G. (2002). Oxidación bacteriana de sulfato ferroso con *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Mención Química. Universidad de Chile. Chile, 102 pp.
- 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.
- Miller, J. D.; John K; Tien; John F., Solution concentration and purification. In: (Editors), *Metallurgical Treatises*. AIME, 1981. New York, N. Y., pp 95 – 116.
- Mixing in stirred tank reactors. *Hydrometallurgy* 71 385–396.
- Mrkusic., *Metallurgy of refractory gold ores*, 1989. pp. 237-267.
Mular, A.L., y R.B. Bhappu, editors. 1980. *Mineral Processing Plant Design*. 2nd edition. Nueva York: SNE_AIME.
- Murphy, R., Strongin, D.R., 2009. Surface reactivity of pyrite and related sulfides. *Surface Science Reports*. Vol 64. Pp 1-45.
- Newrick G.; Woodhouse G.; Dods D., Carbón in pulp versus carbón in leach. 1983, pp 48-51.

- Olson, G., Brierley, J., Brierley, C., 2003. Bioleaching review part B: Progress in bioleaching:
- 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.
- 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.
- 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.




- Rohwerder, T., Sand W., 2003. The sulfane sulfur of persulfides is the actual substrate of the sulfur-oxidizing enzymes from *Acidithiobacillus* and *Acidiphilium* spp. *Microbiology*. Vol 149. 1699– 1709.
- 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.
- Rossi G. 2001. The design of bioreactors. *Hidrometallurgy*. Vol. 59. 217-231.
- Rossi, G. (2001). The design of bioreactors. *Hydrometallurgy*, vol. 59, no. 2-3, p. 217-231.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- Terkel Rosenqvist, *Principles of Extractive Metallurgy* 2004.
- Thompson S., *Gold dissolution and activation in cyanide solution: kinetics and mechanism*, 2000, pp 57.
- Valencia, P., Acevedo, F. 2008. Are bioleaching rates determined by the available particle surface area concentration?. *World J Microbiol Biotechnol*. 25 101–106.
- Valencia, P., Acevedo, F. 2008. Are bioleaching rates determined by the available particle surface area concentration?. *World J Microbiol Biotechnol*. 25 101–106.

72.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.

ANEXOS:

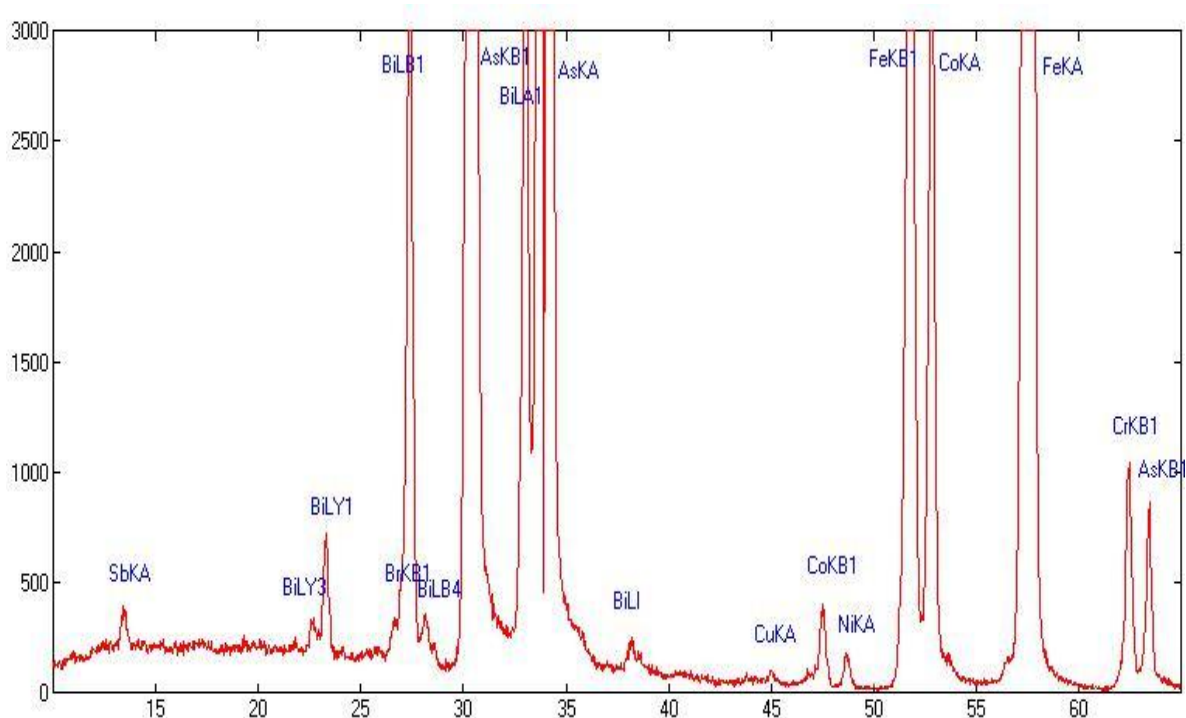
ANEXO 1. Descripción de muestra en superficie mina Capillani

CODIGO	UBICACIÓN	DESCRIPCIÓN	Tiene	MUESTRA	LEY PPM	FOTO
A-09	542256.712E 8246562.441N	una extensión de unos 1.5 m, conformado por una veta de cuarzo lechoso brechado, un espesor de esta veta de unos 0,70 m, con fragmentos de líticos grandes. Esta estructura tiene un rumbo de 356° N, presenta un inclinación prácticamente vertical.		Se tomó 1,50 m de extensión, realizando un corte a la estructura mineralizada	Au: <0,01 Ag: <0,2 As: 31 Co: 3	
A-26	542158.000E 8245916.000N	Tiene una extensión de unos 15 m, conformado por brechas con óxidos, esta muestra se encuentra fuera de la concesión pero representaba una estructura interesante para su muestreo, cable indicar que se aprecia en el área un muestreo de tipo canaleta de 1.00 m de extensión. Esta estructura no muestra ningún tipo de dirección.		Se tomó 1,00 m de extensión, realizando un corte a la estructura mineralizada, con los siguientes porcentajes, zona de oxido 80% y 20% roca.	Au: 0,03 Ag: <0,2 As: 29 Co: 3	
A-11 A-27	542180.848E 8246159.110N	Tiene una extensión de unos 20 m, conformado por una veta de cuarzo lechoso brechado, rodeada de una roca oscura cristalina posiblemente debido al cuarzo, los espesor de las vetas son variables, con adelgazamiento y engrosamientos hasta un máximo de 10 cm. Esta estructura tiene un rumbo de 350 N, su inclinación es prácticamente vertical.		Muestreo A-11 Se tomó 1,00 m de extensión, con un corte a la estructura mineralizada, cuarzo masivo 30%, 40% roca con venillas de cuarzo y 30% roca. Muestreo A-27 Se realizo un segundo muestreo específicamente de la arsenopirita, con 90 % arsenopirita y 10% cuarzo.	A-11 Au: 0,04 Ag: <0,2 As: 44 Co: 3 A-27 Au: >100 Ag: 37 As: >10000 Co: >10000	

ANEXO 2. Análisis por difracción y fluorescencia de Rayos X.

MUESTRA "N1 - 6"

FLUORESCENCIA DE RAYOS X



ELEMENTOS IDENTIFICADOS.-

a) MAYORITARIOS (> 2%)

Fe, As, Bi, Co.

b) MINORITARIOS (2% ~ 02%)

No detectados.

c) TRAZAS (< 0,2%)

Ni, Sb, Cu.

NOTA.- El elemento Cr. Corresponde al Tubo de Rayos X. No es posible determinar su presencia en la muestra analizada. No se han realizado determinación por Elementos Ligeros (Al, Si, Mg, P, K, y Na), así como Ti y Ca.



ALS Bolivia Ltda.
Avenida Circunvelación y
Final Campo Jordán s/n.
Oruro URURO
Phone: +591 (2) 527 8235 Fax: +591 (2) 527 8234
www.alsglobal.com

To: MINERA GRAN CHACO
CALLE 11 Nº 17 ACHUMANI
LA PAZ

Page: 1
Finalized Date: 22-JUN-2011
This copy reported on
23-JUN-2011
Account: MGCH

CERTIFICATE OB11103715	
Project:	
P.O. No.:	
This report is for 39 Rock samples submitted to our lab in Oruro, URURO, Bolivia on 6-JUN-2011.	
The following have access to data associated with this certificate:	
DARDO BARRIENTOS	

SAMPLE PREPARATION	
ALS CODE	DESCRIPTION
WEI-21	Received Sample Weight
BAG-01	Bulk Master for Storage
LOG-22	Sample log in - Rcd w/o BarCode
CRU-31	Fine crushing - 70% < 2mm
SPL-21	Split sample - riffle splitter
PUL-31	Pulverize split to 85% < 75 um

ANALYTICAL PROCEDURES		
ALS CODE	DESCRIPTION	INSTRUMENT
Au-AA25	Ore Grade Au 30g FA AA finish	AAS
ME-ICP41	35 Element Aqua Regia ICP-AES	ICP-AES

To: MINERA GRAN CHACO
ATTN: DARDO BARRIENTOS
CALLE 11 Nº 17 ACHUMANI
LA PAZ

This is the Final Report and supersedes any preliminary report with this certificate number. Results apply to samples as submitted. All pages of this report have been checked and approved for release.

Signature:


Rene Mamani, Laboratory Manager, Peru

ALS Bolivia Ltd.
Avenida Circunvalación y
Final Campo Jordán s/n.
Oruro OROURO
Phone: +591 (2) 527 8235
www.alsglobal.com

To: MINERA GRAN CHACO
CALLE 11 N° 17 ACHUMANI
LA PAZ

Page: 2 - A
Total # Pages: 2 (A - C)
Finalized Date: 22-JUN-2011
Account: MCCH



CERTIFICATE OF ANALYSIS OB11103715

Method Analyte Units LOR	ME-ICP41 Au-AAS Au ppm	ME-ICP41 Ag ppm	ME-ICP41 Al %	ME-ICP41 As ppm	ME-ICP41 Ba ppm	ME-ICP41 Bi ppm	ME-ICP41 Ca %	ME-ICP41 Cd ppm	ME-ICP41 Co ppm	ME-ICP41 Cr ppm	ME-ICP41 Cu ppm	ME-ICP41 Fe %
A-01	2.75	<0.01	0.2	1.54	20	0.8	2	0.05	11	56	13	3.33
A-02	2.10	0.01	<0.2	1.09	28	30	0.01	<0.5	1	87	18	3.08
A-10	2.87	<0.01	<0.2	1.15	44	30	0.02	<0.5	3	58	23	2.21
A-11	4.01	0.04	<0.2	0.18	23	10	0.06	<0.5	<1	113	6	0.75
A-12	4.37	15.30	2.9	0.03	>10000	10	0.32	<0.5	2930	107	12	4.18
A-13	2.48	<0.01	<0.2	1.15	71	30	0.02	<0.5	5	78	8	2.21
A-14	3.15	0.01	<0.2	1.59	40	30	0.02	<0.5	4	38	17	3.21
A-15	2.53	0.01	<0.2	1.37	42	10	0.02	<0.5	5	70	8	2.54
A-16	2.96	<0.01	<0.2	0.52	38	30	0.02	<0.5	3	114	5	1.86
A-17	3.00	0.01	<0.2	1.19	37	30	0.02	<0.5	7	65	5	2.35
A-22	0.78	<0.01	<0.2	1.82	244	30	0.02	<0.5	23	41	98	13.30
A-25	4.06	0.01	<0.2	3.61	47	30	0.01	<0.5	3	70	14	5.21
A-26	1.83	0.03	<0.2	1.83	29	190	<0.01	<0.5	3	74	9	1.48
A-27	0.35	>100	37.0	0.10	>10000	<10	<0.01	<0.5	>10000	36	37	23.8
N1-1	3.30	11.70	>100	0.10	>10000	140	0.10	41.3	1480	55	540	3.69
N1-2	2.62	15.80	>100	1.07	>10000	60	0.30	7.1	498	57	287	6.03
N1-3	3.27	2.42	69.4	0.71	>10000	70	0.05	2.3	417	60	144	7.80
N1-4	3.38	0.36	41.8	0.85	1235	90	0.05	1.3	57	56	30	2.41
N1-5	2.55	3.97	91.2	0.53	>10000	60	0.37	10.7	2380	49	114	5.94
N1-6	2.20	2.50	58.2	0.81	>10000	40	0.12	4.8	1940	96	35	4.12
N1-7	1.61	0.91	>100	0.24	4440	40	0.87	7.9	78	53	170	4.97
N1-8	3.16	1.78	43.5	0.18	>10000	80	1.84	4.0	1580	85	45	4.25
N1-9	1.58	0.02	0.5	2.34	184	10	0.04	<0.5	85	51	622	17.8
N1-10	2.79	4.72	98.2	0.11	>10000	160	0.01	8.3	2040	80	47	3.81
N2-1	3.88	2.95	17.4	0.10	>10000	60	1.57	144.0	961	35	455	23.9
N2-2	2.55	5.46	21.3	0.15	>10000	80	0.20	5.8	2090	24	1740	9.75
N2-3	2.77	8.82	14.7	0.16	9520	110	3.09	3.5	506	93	37	2.69
N2-5	2.47	2.52	65.4	0.09	>10000	80	3.59	4.2	419	58	33	1.95
N2-6	2.56	29.3	>100	0.07	>10000	100	1.84	7.2	1340	58	586	4.17
N2-7	2.95	1.12	5.3	0.16	4440	60	0.04	4.2	136	99	68	3.75
N3-1	3.07	23.8	18.5	0.67	>10000	60	1.75	<0.5	6340	62	8	10.70
N3-2	2.81	8.07	55.7	2.72	>10000	<10	0.76	<0.5	4320	116	73	14.80
N3-3	3.69	15.10	4.9	2.55	>10000	<10	1.82	<0.5	9460	75	5	18.8
N3-4	3.20	26.5	9.2	4.59	>10000	<10	5.14	<0.5	2910	88	11	14.30
N3-5	3.02	0.28	2.0	0.99	632	50	0.85	<0.5	20	63	4	2.28
N3-6	3.27	0.31	0.2	479	80	<10	2.29	<0.5	21	80	6	1.26
N3-7	2.27	1.36	0.9	3.68	1955	20	1.44	0.7	24	62	18	20.3
NCH-1	2.40	1.04	2.3	5.01	1365	20	6.00	1.3	43	31	182	10.00
NCH-2	1.43	0.48	0.5	0.20	828	<10	0.14	<0.5	71	85	5	0.61

ANEXO 3. Adaptación de *Bacterias* en medio OK

Acidithiobacillus ferrooxidans DSM 1477

Acidithiobacillus ferrooxidans DSM 1477



SCREENING MEDIO O K (04/04/12)



SCREENING MEDIO O K (09/04/12)



SCREENING MEDIO O K (10/04/12)



SCREENING MEDIO O K (11/04/12)



SCREENING MEDIO O K (12/04/12)



SCREENING MEDIO O K (16/04/12)





SCREENING MEDIO O K (17/04/12)



SCREENING MEDIO O K (18/04/12)



ANEXO 4. Análisis químico del concentrado de arsenopirita y las pruebas de ensayo

 Membro del grupo SGS (Société Générale de Surveillance)	SGS BOLIVIA S.A. LABORATORIO PARA ENSAYOS MINERALÓGICOS SGS MINLAB - El Alto Z. 12 de octubre, calle 10, N°115 carretera a Oruro Telf.: (591-2) 2825852 / 2821139 (int. 231), Fax: (591-2) 2821139 (int. 214) La Paz-Bolivia																																										
	Pág. 1 de 1																																										
INFORME DE ENSAYO																																											
ORDEN N° 00421-12	FECHA EMISIÓN : 2012-02-13																																										
CLIENTE :	EMSUDOESA																																										
MATERIAL :	ARSENO PIRITA																																										
NUESTRA REFERENCIA :	COMERCIAL																																										
ENSAYOS SOLICITADOS :	Au, Ag, As, Bi, Cd, Co, Fe, In, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn, Cu, Al, SiO₂, Pt, Cr.																																										
FECHA DE ENSAYOS :	2012-02-03 y 2012-02-13																																										
DIRECCION CLIENTE :	Av. Montenegro, N° 909, San Miguel, La Paz																																										
FECHA RECEPCIÓN LABORATORIO :	2012-02-03																																										
Su referencia:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Au g/t</th> <th>Ag g/t</th> <th>As %</th> <th>Bi %</th> <th>Cd %</th> <th>Co %</th> <th>Fe %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>81,5</td> <td>154</td> <td>33,8</td> <td>1,84</td> <td>0,01</td> <td>1,40</td> <td>27,9</td> </tr> <tr> <th>In %</th> <th>Ni %</th> <th>Pb %</th> <th>Sb %</th> <th>Sn %</th> <th>Zn %</th> <th>Cu %</th> </tr> <tr> <td><0,01</td> <td>1,72</td> <td>1,21</td> <td>0,22</td> <td>0,05</td> <td>2,88</td> <td>0,07</td> </tr> <tr> <th>Al %</th> <th>SiO₂ %</th> <th>Pt g/t</th> <th>Cr %</th> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>0,21</td> <td>5,15</td> <td><0,01</td> <td>0,005</td> <td colspan="3"></td> </tr> </tbody> </table>	Au g/t	Ag g/t	As %	Bi %	Cd %	Co %	Fe %	81,5	154	33,8	1,84	0,01	1,40	27,9	In %	Ni %	Pb %	Sb %	Sn %	Zn %	Cu %	<0,01	1,72	1,21	0,22	0,05	2,88	0,07	Al %	SiO ₂ %	Pt g/t	Cr %				0,21	5,15	<0,01	0,005			
Au g/t	Ag g/t	As %	Bi %	Cd %	Co %	Fe %																																					
81,5	154	33,8	1,84	0,01	1,40	27,9																																					
In %	Ni %	Pb %	Sb %	Sn %	Zn %	Cu %																																					
<0,01	1,72	1,21	0,22	0,05	2,88	0,07																																					
Al %	SiO ₂ %	Pt g/t	Cr %																																								
0,21	5,15	<0,01	0,005																																								
Método Utilizado :	Au, Pt: P3-MINE-35/Ensayo al Fuego; Ag, As, Bi, Cd, Co, Fe, In, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn, Cu, AlCr: Absorción Atómica (AAS); SiO ₂ : Gravimetría.																																										
Observaciones :	Ninguna																																										
 P. SGS Bolivia S.A. Luis M. Mena Lozano SUPERVISOR LAB. MINERALES																																											
ADVERTENCIA: Los resultados de la(s) muestra(s) registrados en este informe (los "resultados") se ha(n) elaborado por instrucciones provistas por el cliente o por un tercero que actúe por instrucción del cliente. Los resultados no constituyen garantía de la representatividad de la muestra del (o los) bienes y estrictamente están relacionadas con la(s) muestra(s). SGS Bolivia S. A. no asume ninguna responsabilidad en relación con el origen o la fuente de la que la muestra(s) es/ó se dice que fueron extraídos.																																											
<small> Este Informe de Ensayo es emitido por la compañía en conformidad con sus Condiciones Generales para Servicio que puede encontrarse en la página http://www.sgs.com/ensayos_condiciones.htm. Son especialmente importantes las disposiciones sobre limitaciones de responsabilidad, pago de remuneración y jurisdicción dictada en dichas Condiciones Generales de Servicio. Se informa a cualquier persona que tenga en su poder este documento, que el contenido del mismo, refleja los hallazgos de la compañía solo al momento de su liberación y dentro de los límites de las instrucciones del cliente si hubiera alguna. La compañía es únicamente responsable ante su cliente y este documento no emite a las partes de una transacción de espec. sobre sus derechos y obligaciones en virtud de los documentos de la transacción. Cualquier modificación no autorizada, fraude o falsificación del contenido o de la apariencia de este documento es ilegal y los culpables serán procesados con el máximo rigor de la ley. Los resultados de los ensayos presentados, se refieren exclusivamente a las muestras enviadas e entregadas por el interesado. La muestra o muestra(s) se conservará por un tiempo no mayor a 90 días. Las responsabilidades de la SGS se limitan únicamente a la ejecución de estas labores dentro de normas técnicas adecuadas. </small>																																											
Este documento no podrá ser reproducido total ni parcialmente sin autorización escrita de SGS Bolivia S.A.																																											
LAB-FOR-026 Edición: 08 Fecha: 2011-09-13																																											



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú / Apartado 2102

Telf: (054) 443294 Fax: (054) 444582

www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

INFORME DE ENSAYO LAS-13-01132

Fecha de emisión: 12/03/2013


Señores: Kenny Cesar Laura Carita
Dirección: Asoc. De Vivienda los Granados Mza A Lote 7 Centro Poblac
Atención: Sr. Sola
Recepción: 11/03/2013
Realización: 11/03/2013

Pág.: 2/2

Método de ensayo aplicado

- *909 Método de ensayo para Cobre por Volumetría en solución Ácida
- 903 Método de ensayo para Cobre por Absorción Atómica en solución Ácida
- 901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina
- *915 Método de ensayo para Acido Libre por volumetría

Muestra #	Nombre de muestra	Descrip. de muestra	909 Cu g/L	903 Cu g/L	901 Au mg/L	915 H+ g/L
SS13000266	Muestra C 2	Solución de ácido sulfúrico	-----	-----	-----	-----
SS13000267	Muestra C 3	Solución de ácido sulfúrico	-----	-----	-----	-----
SS13000268	Muestra C 4	Solución de ácido sulfúrico	-----	-----	-----	-----
SS13000269	Muestra C 5	Solución de ácido sulfúrico	-----	-----	-----	-----
SS13000270	Muestra C 6	Solución de ácido sulfúrico	-----	-----	-----	-----
SS13000271	Muestra C 7	Solución de ácido sulfúrico	-----	-----	-----	-----
SS13000272	Muestra G 1	Solución de cianuro	-----	-----	7.3	-----
SS13000273	Muestra G 2	Solución de cianuro	-----	-----	7.5	-----
SS13000274	Muestra G 3	Solución de cianuro	-----	-----	7.5	-----
SS13000275	Muestra G 4	Solución de cianuro	-----	-----	6.6	-----
SS13000277	Muestra G 5	Solución de cianuro	-----	-----	5.7	-----
SS13000278	Muestra G 6	Solución de cianuro	-----	-----	7.3	-----
SS13000279	Muestra X	Solución de ácido sulfúrico	-----	-----	-----	-----
SS13000280	Muestra H	Solución de cianuro	-----	-----	-----	-----
SS13000281	Muestra D	Solución de cianuro	-----	-----	-----	-----

El resultado: "< Valor numérico", significa, que se encuentra debajo del límite de cuantificación indicado. 
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado de conformidad de cantidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada.
 Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
 Omar A. Juárez Sola
 Oficina de Certificación
 M. Sc. Ingeniero Químico C.P. 1141



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú / Apartado 2102

Telf: (054) 443294 Fax: (054) 444582

www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

INFORME DE ENSAYO LAS-13-01152

Señores: Kenny Cesar Laura Carita
Dirección: Asoc. De Vivienda los Granados Mza A Lote 7 Centro Poblado Legi
Atención: Kenny Cesar Laura Carita
Recepción: 11/03/2013
Realización: 11/03/2013

Fecha de emisión: 13/03/2013

Pág.: 1/1

Método de ensayo aplicado

502 Método de Ensayo para Cobre por Absorción Atómica - 2011 (METODO DE ENSAYO ACREDITADO)
*552 Método de Ensayo a fuego para Oro por Gravimetría

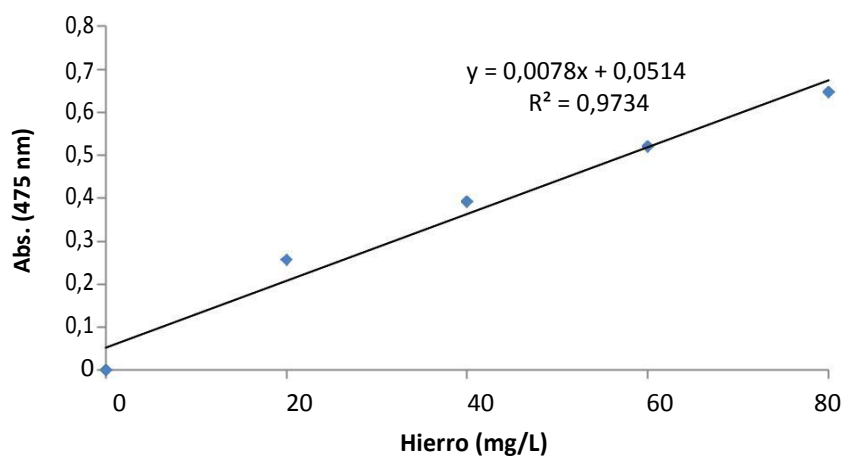
Muestra #	Nombre de muestra	Descrip. de muestra	Procedencia de la muestra	601 Cu %	502 Cu %	552 Au g/t	552 Au oz/t
MN13003949	Muestra I	Mineral Gran.	No proporcionado por el cliente	-----	-----	-----	-----
MN13003950	Muestra K 1	Mineral Gran.	No proporcionado por el cliente	-----	-----	-----	-----
MN13003952	Muestra K 2	Mineral Gran.	No proporcionado por el cliente	-----	-----	-----	-----
MN13003953	Muestra K 3	Mineral Gran.	No proporcionado por el cliente	-----	-----	-----	-----
MN13003954	Muestra J1	Mineral Gran.	No proporcionado por el cliente	-----	-----	13.91	0.406
MN13003955	Muestra J2	Mineral Gran.	No proporcionado por el cliente	-----	-----	20.49	0.598
MN13003956	Muestra J3	Mineral Gran.	No proporcionado por el cliente	-----	-----	14.93	0.436
MN13003957	Muestra J4	Mineral Gran.	No proporcionado por el cliente	-----	-----	13.01	0.379
MN13003958	Muestra J5	Mineral Gran.	No proporcionado por el cliente	-----	-----	14.71	0.429
MN13003959	Muestra J6	Mineral Gran.	No proporcionado por el cliente	-----	-----	16.92	0.493

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Pérez Soto
Gerente de Operaciones

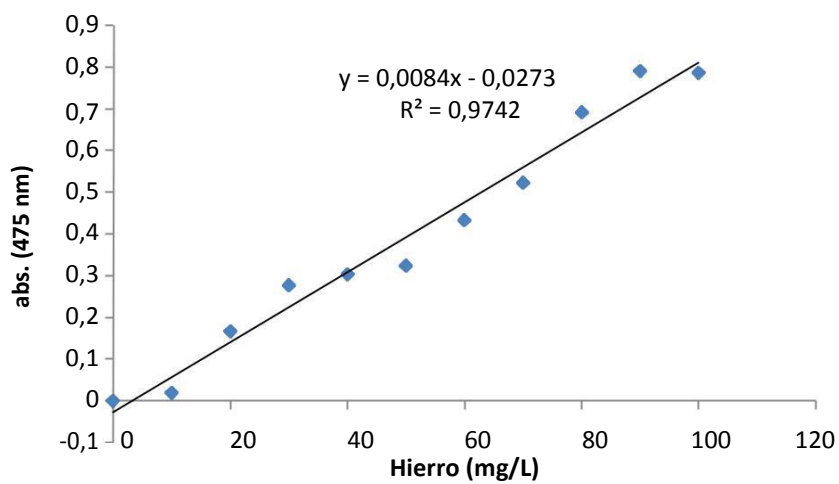
El resultado: "< Valor numérico", significa, que se encuentra debajo del límite de cuantificación indicado.
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada.
Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

ANEXO 5. Curvas de calibración.

Hierro Total



Hierro Férrico



ANEXO 6. Cinética de biooxidación del concentrado de arsenopirita.

Cinéticas de biooxidación por *A. ferrooxidans* a 8 y 12% de arsenopirita

Ac idithiobacillus ferrooxidans

Concentrado 8 %	TIEMPO	Hierro Total				Hierro Férrico				Hierro Ferroso			
	(Horas)	Fet(1)	Fet(2)	Fet(prom)	Desv	Fe+3 (1)	Fe+3 (2)	Fe+3(prom)	Desv	Fe+2 (1)	Fe+2 (2)	Fe+2 (prom)	Desv
0	1287,00	1744,44	1488,89	180,66	288,89	177,78	233,34	78,57	1200,01	1566,62	1383,32	259,23	
48	8625,00	1888,89	1633,34	361,93	1187,78	782,22	1222,22	286,77	190	1106,67	648,34	648,18	
96	1344,44	1344,44	1344,44	0	1177,78	1288,89	1187,78	78,56	166,66	55,55	111,11	78,56	
144	1566,67	1566,67	1566,67	0	1500	1500	1500	0	66,67	66,67	66,67	0	
192	1622,22	1988,89	1566,67	259,27	1233,33	1477,78	1355,56	172,85	388,89	511,11	450	86,42	
240	1700	1644,44	1672,22	39,28	1288	1288	1288	0	412	356,44	384,22	39,28	

Recuento bacteriano								pH
Ln(1)	Ln(2)	Ln(prom)	Cel(1)	Cel(2)	Cel(prom)	Desv		
16,12	16,12	16,12	10019062	10000000,00	10019061,6	0	1,5	
16,48	16,18	16,33	14360616	11000000,00	12499610,8	2631858,47	1,69	
17,78	17,8	17,79	52693360	54000000,00	53225597,7	752698,53	1,65	
17,8	18,21	18,05	53757836	81000000,00	67380549,7	19265426,44	1,71	
18,15	18,81	18,48	76286001	150000000,00	111941785	50424893,67	1,72	
18,42	18,6	18,51	99931949	120000000,00	109786106	13935883,48	1,68	

Concentrado 12 %	TIEMPO	Hierro Total				Hierro Férrico				Hierro Ferroso			
	(Horas)	Fet(1)	Fet(2)	Fet(prom)	Desv	Fet(1)	Fet(2)	Fet(prom)	Desv	Fet(1)	Fet(2)	Fet(prom)	Desv
0	1488,89	1744,44	1616,67	180,7	288,89	177,78	233,34	78,56	1200	1566,66	1383,33	259,26	
48	1300	1544	1422	172,53	870	1055,56	962,78	131,21	430	488,44	459,22	41,32	
96	888,89	1266,67	1266,67	267,13	1066,67	1166,67	1116,62	70,71	177,78	100	138,89	54,99	
144	1544,44	1188,89	1366,67	251,41	1311,11	1266,67	1288,89	31,42	70	77,78	73,89	5,50	
192	1044,44	1122,22	1083,33	54,99	1411,11	944,44	944,44	329,98	0	0	0	0	
240	1944,44	1222,22	1583,33	510,68	1544	1544	1544	0	0	0	0	0	

Recuento bacteriano								pH
Ln(1)	Ln(2)	Ln(prom)	Cel(1)	Cel(2)	Cel(prom)	Desv		
16,12	16,12	16,12	10019062	10000000,00	10019061,6	0	1,5	
16,36	16,36	16,36	12736724	13000000,00	12704961,3	44918,73	1,65	
17,9	17,7	17,7	59411597	49000000,00	54026849,2	7615183,25	1,67	
18	17,8	17,8	65659969	54000000,00	59708902,6	8416079,07	1,67	
18,15	18,26	18,26	76286001	85000000,00	80508835,4	5971990,3	1,65	
18,29	18,28	18,28	87749788	87000000,00	174626450	617392,59	1,63	

Cinéticas de bio-oxidación por el consorcio de *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans* a 8 y 12% de arsenopirita

Consortio de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*

Concentrado 8 %	TIEMPO (Horas)	Hierro Total				Hierro Férrico				Hierro Ferroso			
		Fet(1)	Fet(2)	Fet(prom)	Desv	Fe+3 (1)	Fe+3 (2)	Fe+3(prom)	Desv	Fe+2 (1)	Fe+2 (2)	Fe+2 (prom)	Desv
	0	1287,00	1375,00	1331,00	62,54	1162,50	177,78	233,34	78,57	1200,01	1566,62	1383,32	259,23
	48	8625,00	6375,00	7500,00	1590,99	1450,00	782,22	1222,22	286,77	190	1106,67	648,34	648,18
	96	7250,00	6875,00	7062,50	265,16	1177,78	1288,89	1187,78	78,56	166,66	55,55	111,11	78,56
	144	7125,00	7125,00	7125,00	0	1500	1500	1500	0	66,67	66,67	66,67	0
	192	10625,00	10500,00	10562,50	88,38	1233,33	1477,78	1355,56	172,85	388,89	511,11	450	86,42
	240	8250,00	10500,00	9375,00	1590,99	1288	1288	1288	0	412	356,44	384,22	39,28
	264	3275,00	8175,00	5725,00	3464,82	1288	1288	1288	0	412	356,44	384,22	39,28

Recuento bacteriano								pH
Ln(1)	Ln(2)	Ln(prom)	Cel(1)	Cel(2)	Cel(prom)	Desv		
16,15	16,15	16,14	10272695	10000000	10019061,6	0	1,52	
16,74	16,74	16,74	18606099	11000000	12499610,8	2631858,47	1,81	
17,30	17,30	17,30	32605776	54000000	53225597,7	752698,53	1,92	
17,70	17,70	17,69	48544915	81000000	67380549,7	19265426,44	1,93	
18,63	18,63	18,63	76286001	150000000	111941785	50424893,67	1,95	
19,14	19,14	19,14	99931949	120000000	109786106	13935883,48	2,12	

Concentrado 12 %	TIEMPO (Horas)	Hierro Total				Hierro Férrico				Hierro Ferroso			
		Fet(1)	Fet(2)	Fet(prom)	Desv	Fet(1)	Fet(2)	Fet(prom)	Desv	Fet(1)	Fet(2)	Fet(prom)	Desv
	0	1612,50	1487,00	1550,00	88,29	1525,00	1637,50	1581,25	79,55	87,50	150,00	118,75	44,19
	48	5875,00	8000,00	6937,50	1502,61	900,00	1725,00	1312,50	583,36	4975,00	6275,00	5625,00	919,23
	96	5875,00	9500,00	7687,50	2563,26	5750,00	5625,00	5687,50	88,38	125,00	3875,00	2000,00	2651,65
	144	8750,00	7625,00	8187,50	795,49	7125,00	6750,00	6937,50	265,16	70,00	875,00	472,50	569,22
	192	10125,00	8875,00	9500,00	883,88	8875,00	6625,00	7750,00	1590,99	0	0	0	0
	240	7500,00	7500,00	7500,00	0	5375,00	10625,00	80000,00	3712,31	0	0	0	0
	264	2612,50	2575,00	2593,75	26,51	2087,50	2450,00	2268,75	256,32	0	0	0	0

Recuento bacteriano							
Ln(1)	Ln(2)	Ln(prom)	Cel(1)	Cel(2)	Cel(prom)	Desv	pH
16,15	16,15	16,12	10019062	10000000,00	10019061,6	0	1,52
16,93	16,93	16,36	12736724	13000000,00	12704961,3	44918,73	1,78
17,32	17,32	17,7	59411597	49000000,00	54026849,2	7615183,25	2,01
17,66	17,66	17,8	65659969	51000000,00	59708902,6	8416079,07	2,05
19,11	19,11	19,11	76286001	83000000,00	80508835,4	5971990,3	2,09
19,36	19,36	19,36	87749788	89000000,00	174626450	617392,59	2,25

ANEXO 7. Métodos analíticos

ANALISIS DE ORO EN SOLUCIONES DE CIANURACION

1. Métodos de evaporación empleando cápsula de plomo

Se evapora el líquido y se analiza el oro en el residuo

Se evapora en un vaso 50 a 200 mL de solución de cianuración hasta reducir su volumen a 30 mL aproximadamente.

Se trasvasa la solución a una cápsula de plomo fabricada en el mismo laboratorio.

El contenido de la cápsula se evapora a sequedad cuidadosamente para que no se pierda nada.

Una vez completada la evaporación se funde la cápsula entera en un crisol de arcilla con los siguientes fundentes.

Reactivo	Peso
Litargirio	20 g.
Bicarbonato de sodio	15 g.
Almidón	0,5 g.
Sílice	10 g.
Cubierta de fundición	
Cloruro de sodio	9 g.
Bórax	10 g.

Para evitar que el botón de plomo auro-argentífero resulte demasiado grande se añade poca cantidad de almidón. Se sigue el proceso incuartando, copelando disolviendo la plata con HNO₃

diluido 1:5 primero y después dos veces con HNO₃ concentrado lavando, secando y pesando.

2. Método de Chiddy

A 365 mL de solución de cianuración se añade suficiente cantidad de cianuro de sodio para llevar la concentración de la solución a 0,50 % de NaCN.

Se agregan 45 mL de solución saturada de acetato de plomo Pb(C₂H₃O₂)₂ y 5,0 g. de polvo de zinc.

Se agita bien y se calienta por 20 o 30 minutos . No se hace hervir.

Seguidamente se añade 25 mL de ácido clorhídrico y se deja reposar sobre la estufa caliente hasta que el zinc se disuelva y forme una esponja.

La solución se decanta y se lava la esponja de agua y luego se seca.

La esponja seca se disuelve en una l mina de plomo para elevar el peso hasta unos 20 gramos y enseguida se copela.

Calculo del contenido de oro

Se expresa la ley de oro en gramos por litros de solución aplicando la siguiente proporción:

$$\frac{\text{Peso boton de oro x 1000 mL}}{\text{de solución tomados}}$$

3. Métodos de evaporación empleando litargirio

En un vaso de evaporación se pone 146 a 292 mL de solución de cianuración.

Se agrega 50 gramos de litargirio.

Se deja evaporar hasta la sequedad añadiendo alrededor de 10 gramos de litargirio durante la evaporación.

El queque seco se saca y se limpia el vaso con papel filtro humedecido con ácido clorhídrico diluido.

Se funde el queque con más papel filtro en un crisol agregando el flujo más conveniente.

Seguidamente se copela el botón resultante de la fundición en crisol.

4. Método del sulfato de cobre

Se toma 146 a 292 mL de solución de cianuración y se agrega 5 gotas de solución saturada de ferrocianuro de potasio y 15 mL de solución precipitante. Se agita bien.

En seguida se añade con todo cuidado 20 mL de ácido sulfúrico y se agita.

Se filtra, se lava y se seca el precipitado resultante.

Se mezcla el precipitado con los fundentes que se emplean en el ensaye corriente de oro. El papel filtro se coloca junto con el precipitado en el crisol.

Se copela el botón de oro obtenido.

Nota: La solución precipitante se prepara de la siguiente manera:

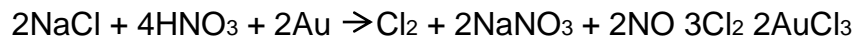
A una solución saturada de sulfato de cobre se agrega una solución saturada de soda cáustica hasta que se haya formado un precipitado pesado de color azulado. Se añade más soda cáustica hasta que el color cambie a azul oscuro, permitiendo el precipitado pesado anteriormente formado. Seguidamente, se le agrega una solución saturada de NaCN hasta que el precipitado se disuelve y la solución tome un color amarillo o café claro.

ANALISIS DE ORO PRECIPITADO DE CIANURACION

Los precipitados de cianuración contienen oro, plata cobre, zinc y otras impurezas metálicas. Se puede distinguir en el proceso las etapas siguientes:

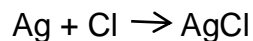
Lixiviación de los precipitados a objeto de eliminar el cloruro de sodio que contienen ya que al ser tratado con ácido nítrico se

forma agua regia que disuelve el oro de acuerdo a la siguiente ecuación:



Todas las impurezas metálicas como el cobre , zinc, plomo, plata, etc. se disuelven al estado de nitratos en el ácido nítrico diluido (1:3) añadiendo a los precipitados para la lixiviación y eliminación del cloruro de sodio.

Si contiene el precipitado pequeñas cantidades de cloruro de sodio y como generalmente contiene plata no es necesario la lixiviación en razón de que reacciona primero el cloro con el ion plata para formar cloruro de plata insoluble en ácido según la reacción que sigue:



Si acaso no se tiene certeza de la existencia de plata es suficiente añadir una pequeña cantidad de plata laminada de modo que se tenga un exceso de este elemento.

El residuo se calcina y se funde con el flujo siguiente.

Reactivo	Peso
Litargirio	85 g.
Bicarbonato de sodio	20 g.
Almidón	3 g.
Sílice	10 g.
Cubierta de fundición	
Cloruro de sodio	15 g.
Bórax	15 g.

Las pequeñas cantidades de impurezas que aun contiene el residuo se escorifican en la fundición con el flujo indicado anteriormente.

El botón obtenido en la fundición se copela en la mufla a una temperatura que varia entre los 800 °C y 1 100 °C . Esta última temperatura es el punto de fusión del oro.

El botón de oro grande obtenido en la copelación se somete al muestreo con un taladro obteniendo así virutas de las cuales se pesa una cantidad determinada, se encuarta con plata, se envuelve en plomo laminado y se copela.

El cálculo del oro en los precipitados es el siguiente:

P_1 = Peso precipitado tomado para fundir

P_2 = Peso de botón de Au + Ag obtenido

L = Ley de oro fino del botón de Au + Ag anterior

$$\text{Au en precipitado} = \frac{P_2 \times L \times 100}{P_1}$$

DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE CIANURO

Prueba N° 1 Cianuro Libre

Se toma 25 mL de muestra y se coloca en un pequeño frasco Erlenmeyer seco; no se añade agua. Se titula con una solución estándar que contiene 4,33 gramos de AgNO_3 por litro. Esta solución estándar se prepara poniendo 4,33 gramos de AgNO_3 a un frasco volumétrico de un litro y agregando agua destilada hasta la altura de un litro. El punto final de la titulación es cuando la brillantez original de la solución se ve apagada por una bruma azulada. Para determinar con mas precisión el punto final se suele colocar un fondo negro de papel.

Un mL de la solución estándar = 0,01 % NaCN

Por tanto:

mL gastados en la titulación $\times 0,2 = \text{Lbs NaCN / t solución}$

$$\frac{\text{Lbs NaCN/ton solución}}{2.205} \text{ Kg NaCN/ ton solución}$$

Prueba N° 2 Cianuro Total

Se toma 25 mL de muestra y se coloca en un vaso de 400 mL se añade 4 mL de solución alcalina de yoduro de potasio (KI) y se titula con solución estándar de nitrato de plata 4,33 gr litro de AgNO_3 hasta que aparezca una opalescencia amarilla en la solución al finalizar la titulación.

Un mL de la solución estándar = 0,01 % NaCN o sea

$$\text{cc} \times 0.2 \text{ Lbs NaCN/ton sol.} \frac{\text{Lbs NaCN/ton solución}}{2.205} \text{ Kg NaCN/ ton solución}$$

DETERMIANCION DEL CONSUMO DE ALCALI

A la solución titulada de la Prueba N° 1 (cianuro libre) se añade unas pocas gotas de indicador de fenoltaleina. Si la solución se vuelve de color salmón se usa la prueba N° 3 pero si la solución permanece incolora se procede de acuerdo a la prueba N° 4

Prueba N° 3 álcali

Se titula con una solución estándar de ácido oxálico hasta que desaparezca el color salmón. La solución estándar de ácido oxálico se prepara añadiendo 5,625 gramos de este ácido ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a un frasco de un litro de volumen y agregando agua destilada hasta alcanzar un litro.

Un cc de la solución estándar = 0,01 % CaO o sea

cc x 0,2 = Lbs CaO/ton. solución

$$\frac{\text{Lbs CaO/ton sol.}}{2.205} \quad \text{Kg CaO/ton sol..}$$

Prueba N° 4 álcali

Se titula con una solución estándar de NaOH hasta alcanzar un punto final de color rojo débil. La solución estándar de NaOH se prepara de la siguiente forma. Se coloca 70 mg de NaOH a un frasco volumétrico de un litro y se agrega agua estilada hasta la raya que se marca un litro.

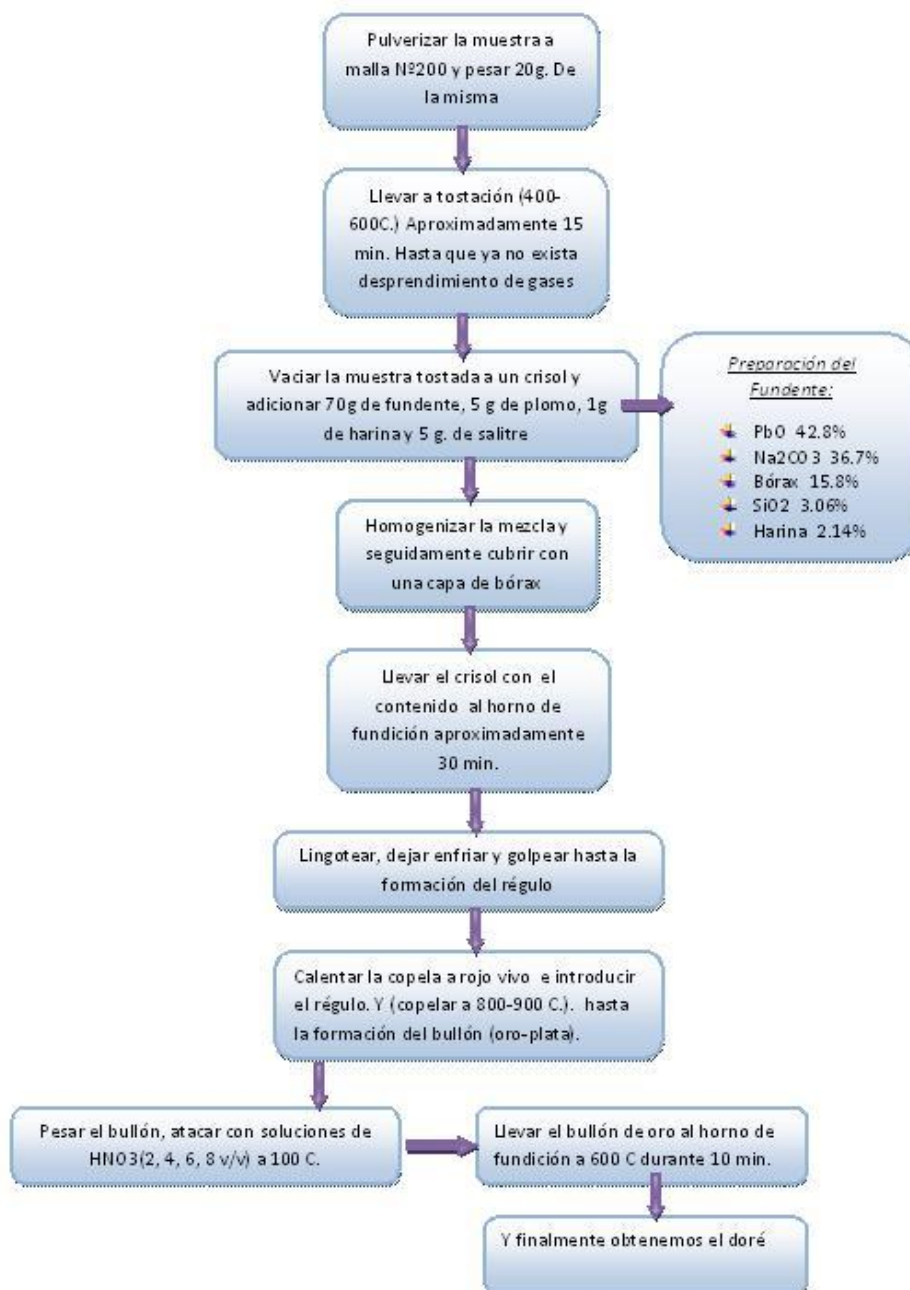
Un cc de la solución estándar = 0,01 % CaO

cc x 0,2 = Lbs CaO/ton solución

$$\frac{\text{Lbs CaO/ton sol.}}{2.205} \quad \text{Kg CaO/ton sol..}$$

NOTA: El indicador de fenoltaleina se prepara disolviendo 0,5 g de fenoltaleina en 500 mL de alcohol etílico y 500 mL de agua destilada hervida. Luego se neutraliza con 0.50 N de NaOH.

ANEXO 8. PROCESO DE FUNDICION EMSUDOESTE S. A. LA PAZ-BOLIVIA



RESULTADOS

Resultados del análisis químico de concentrado de planta EMINSOL S.A.

Nº DE MUESTRA	Producto	% humedad	% Au [g/TM]	% Ag [g/TM]
1	Concentrado 1	6 %	81,8232	210,4321
2	Concentrado 2	6 %	80,4567	190,4562
3	Concentrado 3	6 %	81,8237	207,2346
4	Concentrado 4	6 %	82,3212	209,6582
5	Concentrado 5	6 %	79,4512	201,6235
6	Concentrado 6	6 %	82,5698	203,4500