

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



“RECUPERACIÓN DE ORO Y PLATA USANDO EL PRE-TRATAMIENTO DE
LOS RELAVES MEDIANTE BIOOXIDACIÓN BACTERIANA CON EL USO DEL
THIOBACILLUS FERROOXIDANS EN UN BIORREACTOR AIRLIFT EN FUNCIÓN
DEL TIEMPO Y PORCENTAJE DE SÓLIDOS”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

AUTORES:

Br. RODRÍGUEZ ALVARADO, DILER JORGE

Br. GUANILO JIMÉNEZ, MILENA

ASESOR:

Ms. Ing. MONCADA ALBITRES LUIS ORLANDO

TRUJILLO PERÚ

2006

Ing. RENE RAMIREZ RUIZ

PRESIDENTE DE JURADO

Ms. LUIS MONCADA ALBITRES

ASESOR

Ms. GUILLERMO EVANGELISTA BENITES

MIEMBRO DE JURADO

DEDICATORIA

*A mis queridos padres por brindarme
su apoyo incondicional para ver realizado
mi sueño, el ser una profesional de éxito.*

*A mis queridos hermanos quienes
con sus sabios consejos ayudaron
a cristalizar mis sueños.*

*A mi esposo y a mi querida hija Astrid
por ser la razón y el motivo más grande
para seguir superándome día a día.*

Milena

A Dios por guiarme por el camino

del bien y del saber, y por todas

las bendiciones recibidas.

Con gratitud y cariño a mis queridos padres por

el infinito apoyo, sacrificio y sabias enseñanzas

que me brindaron en todo momento.

A mis hermanos por estar

siempre a mi lado en todo momento y

a todos los que con su ayuda y consejos

hicieron realidad este trabajo.

Diler

AGRADECIMIENTO

Expresamos en primer lugar nuestro sincero agradecimiento a la Dirección y plana docente de Química y de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Trujillo, por su dedicación, esfuerzo y consejos para nuestra mejor formación profesional. En forma especial nuestro agradecimiento al Mg. Ing. Luis Moncada Albitres, asesor de nuestra tesis, por su apoyo, consejos y orientación en la realización y culminación de la misma.

Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento a nuestros co-asesores y demás personas que de una u otra forma contribuyeron a la cristalización de esta tesis.

Los autores.

RESÚMEN

En el presente trabajo de tesis “Recuperación de oro y plata usando el pre-tratamiento de los relaves mediante biooxidación bacteriana con el uso del *thiobacillus ferrooxidans* en un biorreactor Airlift en función del tiempo y porcentaje de sólidos”; hemos considerado la reactivación de la bacteria en medio 9k a partir de un liofilizado, la cual hemos utilizado para el pre-tratamiento del relave con una concentración mínima de 1×10^7 bacterias/ml.

Dicho pre-tratamiento lo hemos realizado en biorreactores “airlift” a diferentes porcentajes de sólidos y a diferentes tiempos, controlando diariamente el pH con la finalidad de evitar que la bacteria se muera.

De lo cual hemos concluido que el factor más importante para el desarrollo de la bacteria es el pH (1,5 – 2,5), lo cual hay que controlar diariamente 2 veces al día.

También hemos llegado a la conclusión que para obtener un recuperación óptima hay que acondicionar el relave (bajar el nivel de cianuro y otros iones mediante lavado con agua), debido a que también interfiere en el crecimiento de la bacteria.

Los datos obtenidos de recuperación del oro y plata fueron analizados estadísticamente con el análisis de la varianza para su respectiva discusión.

Se concluyó que el porcentaje de sólidos es el parámetro que mas influye en la recuperación del oro y la plata.

ABSTRACT

Presently thesis work "Recovery of gold and silver using the pre-treatment of relaves by means of bacterial biooxidation with the use of the thiobacillus ferrooxidans in a biorreactor Airlift in function of the time and percentage of solids"; we have considered the reactivation of the bacteria in a means 9k starting from a Lyophilized, which we have used for the pre-treatment of relave with a minimum concentration of 1×10^7 bacterias/ml.

This pre-treatment we has carried out in biorreactors "airlift" to different percentages of solids and different times, controlling pH daily with the purpose of avoiding that the bacteria dies.

Of that which we have concluded that the most important factor for the development of the bacteria is the pH (1,5 – 2,5), which is necessary to control daily 2 times a day.

We have also reached the conclusion that is necessary to condition the relave to obtain a good recovery (lower the cyanide level and others ions by means of laundry with water), because it also interferes in the growth of the bacteria.

The data obtained of recovery of gold and silver were analyzed statistically with the analysis of the variance for their respective discussion.

We concluded that the percentage of solids is the most influential parameter in the recovery of gold and silver by means of bacterial biooxidation

INDICE GENERAL

Dedicatoria.....	i
Agradecimiento.....	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Índice general.....	vi
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xii

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad Problemática.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Marco Teórico	
1.3.1. Oxidación Biológica o Lixiviación bacteriana.....	5
1.3.2. Aspectos Microbiológicos	
A. Bacterias.....	6
B. Transferencia de energía en sistemas biológicos.....	10
C. Adaptación de bacterias.....	10
D. Crecimiento Bacteriano.....	11
1.3.3. Mecanismo de la Biolixiviación	
A. Mecanismo Indirecto.....	12
B. Mecanismo Directo.....	13
1.3.4. Factores que tienen influencia en la actividad bacterial	
A. Efecto del medio ambiente.....	14
B. Efecto de la temperatura.....	15
C. Efecto del pH.....	15
D. Efecto de los nutrientes.....	15
E. Efecto del tamaño de partícula del mineral.....	16
F. Efecto del oxígeno y CO ₂	17
G. Efecto de la densidad de pulpa.....	18
H. Tolerancia a la acumulación de iones.....	18
1.3.5. Lixiviación del oro con cianuro o cianuración.....	19
A. Química del cianuro en medio acuoso.....	21

B. Termodinámica de la cianuración.....	23
C. Mecanismo electroquímico.....	24
D. Cinética de la reacción.....	25
E. Interferencia de impurezas de los minerales.....	26
➤ Aditivos aceleradores de la cianuración.....	26
➤ Inhibidores por consumo de oxígeno.....	27
➤ Inhibidores por consumo de cianuro.....	27
➤ Inhibidores por reacción con la cal.....	28
➤ Pasivación superficial de la interfase de reacción.....	28
1.4. Formulación del problema.....	29
1.5. Hipótesis.....	29
1.6. Objetivos.....	29
1.7. Importancia del problema.....	30

CAPÍTULO II: MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Material

2.1.1. Material de estudio.....	31
2.1.1.1. Características del Mineral	
A. Físicas.....	31
B. Químicas.....	31
2.1.2. Equipos, instrumentos, materiales y reactivos	
A. Equipos e instrumentos.....	32
B. Materiales.....	32
C. Reactivos.....	33

2.2. MÉTODOS

2.2.1. Diseño experimental.....	33
2.2.2. Procedimiento experimental	
➤ Construcción de los biorreactores Airlift.....	35
➤ Preparación del medio de cultivo 9K (Nutrientes) y la fuente energética.....	35
➤ Reactivación de la bacteria.....	35
➤ Recuento de la población de bacterias.....	36
➤ Preparación del mineral (relave).....	36
➤ Acondicionamiento del mineral.....	36

➤ Proceso de biooxidación.....	36
➤ Lavado.....	37
➤ Cianuración.....	37
➤ Lavado y secado.....	37
➤ Análisis de oro y plata por ensayos al fuego.....	37
➤ Procesamiento de datos.....	38
CAPÍTULO III: RESULTADOS.....	41
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	46
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1. Conclusiones.....	47
5.2. Recomendaciones.....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
ANEXOS	
➤ ANEXO I. CÁLCULOS EN EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	53
1. DATOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA LA EXTRACCIÓN DEL ORO.....	54
2. DATOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA LA EXTRACCIÓN DE PLATA.....	57
➤ ANEXO II. RECUENTO DE BACTERIAS EN LA CÁMARA DE NEUBAUER.....	60
➤ ANEXO III. CÁLCULOS PARA EL RECUENTO DE BACTERIAS EN LA CÁMARA DE NEUBAUER.....	61
➤ ANEXO IV. CÁLCULOS PARA HALLAR LAS VARIABLES DEL PROCESO	
• CALCULOS PARA UN 15% DE SÓLIDOS.....	62
• CALCULOS PARA UN 20% DE SÓLIDOS.....	64

• CALCULOS PARA UN 25% DE SÓLIDOS.....	65
➤ ANEXO V. PRUEBAS DE BIOOXIDACIÓN	67
➤ ANEXO VII. ANÁLISIS DE ORO Y PLATA POR VÍA SECA.....	68
➤ ANEXO VII ANÁLISIS QUÍMICO DE CIANURO LIBRE.....	71
➤ ANEXO VIII DETERMINACIÓN DE COBRE. FIERRO Y ZINC EN MINERALES POR ABSORCIÓN ATÓMICA.....	73
➤ ANEXO IX RESULTADOS DE CIANURACIÓN.....	76
➤ ANEXO X: TABLA DE VALORES DE $F_{0.05}$ “Tables of percentage points of inverted beta (F) distrubucion”.....	77
APÉNDICE DE FIGURAS.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Componentes para el medio de cultivo de las bacterias T. Ferrooxidans	16
Tabla 1.2 Concentraciones máximas que inhiben la actividad bacteriana mesófila	19
Tabla 2.1 Análisis químico del mineral de cabeza	31
Tabla 2.2 Factores y niveles para el diseño experimental	34
Tabla 2.3 Matriz de contrastación del diseño factorial	34
Tabla 3.1 Resultados del porcentaje de extracción de Au	41
Tabla 3.2 Resultados del análisis de varianza para la extracción de oro	43
Tabla 3.3 Resultados del porcentaje de extracción de Ag	43
Tabla 3.4 Resultados del análisis de varianza para la extracción de plata	45
Tabla I Varianza en el análisis estadístico	53
Tabla II Resultados de la recuperación de Au a un tiempo de 15 días malla (-200)	54
Tabla III Resultados de la recuperación de Au a un tiempo de 25 días malla (-200)	54
Tabla IV Resultados de la recuperación de Au a un tiempo de 30 días malla (-200)	55
Tabla V Datos del porcentaje de extracción de oro para el análisis de varianza	55
Tabla VI Resultados de la recuperación de Ag a un tiempo de 15 días malla (-200)	57
Tabla VII Resultados de la recuperación de Ag a un tiempo de 25 días malla (-200)	57
Tabla VIII Resultados de la recuperación de Ag a un tiempo de 30 días malla (-200)	57
Tabla IX datos del porcentaje de extracción de plata para el análisis de la varianza	57
Tabla X Resumen de datos	66
Tabla XI Codificación de pruebas	67

Tabla XII Pesos de los componentes del flux para 20 g de muestra de mineral.....	69
Tabla XIII Datos de valores de consumo titulante y determinación del factor.....	71
Tabla XIV Consumo de cianuro de sodio.....	76

Biblioteca de Ingeniería Química

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Bacteria y sus principales componentes.....	7
Figura 1.2 Representación esquemática de la oxidación, catalizada por bacteria, de un cristal de piritita (FeS_2) en condiciones aeróbicas.....	9
Figura 1.3 Representación esquemática de la oxidación catalizada por la bacteria, de un cristal de piritita en condiciones mixtas: aerobia y anaeróbica.....	9
Figura 1.4 Utilización de energía por microorganismos.....	10
Figura 1.5 Curvas de adaptación de bacterias.....	11
Figura 1.6 Fases de crecimiento bacteriano.....	11
Figura 1.7 Áreas de actividad de bacterias <i>Thiobacillus Ferrooxidans</i>	14
Figura 1.8 Diagrama Eh-pH para el oro y el auro-cianuro, mostrando además los rangos de presión para los distintos otros procesos industriales de extracción de oro.....	20
Figura 1.9 Disociación entre el HCN y el CN^- libre (26°C), mostrando la conveniencia de operar sobre pH 10.....	21
Figura 1.10 Diagrama Eh - pH para el sistema CN^- - H_2O a 25°C , considerando una concentración total de cianuro de 10^{-3} molar.....	22
Figura 1.11 Diagrama Eh - pH para el sistema Au- H_2O - CN a 25°C , considerando una concentración total de cianuro de 10^{-3} molar.....	23
Figura 1.12 Diagrama esquemático del proceso de disolución del oro mostrado como una corrosión electroquímica.....	24
Figura 2.1 Diagrama de bloques para la extracción de Au y Ag de un mineral mediante Lixiviación Bacteriana o biooxidación.....	39
Figura 2.2 Diagrama de Flujo del Proceso de Biooxidación Bacteriana de un mineral.....	40
Figura 3.1 Influencia del %de sólidos y el tiempo en la extracción de Au.....	42
Figura 3.2 Influencia del tiempo y el % de sólidos en la extracción de Au.....	42
Figura 3.3 Influencia del %de sólidos y el tiempo en la extracción de Ag.....	44
Figura 3.4 Influencia del tiempo y el % de sólidos en la extracción de Ag.....	44
Figura I Vista y selección de celdas usadas para un recuento de células a nivel de microscopio.....	79
Figura II Biorreactores: Proceso Principal (a) y Proceso de Reactivación (b).....	79

Figura III. Imagen Real de los biorreactores, materiales y reactivos usados para la Reactivación de la bacteria.....	80
Figura IV. Alimentación y recuento (viabilidad) diario de la bacteria	80
Figura V. Vistas interiores de lo biorreactores donde ocurren las reactivaciones ..	80
Figura VI. Cuarteo y chancado de la muestra.....	81
Figura VII. Copelación y fundición.....	81
Figura VIII. Vista superior de los biorreactores Airlift en donde se biooxida el mineral ..	82
Figura IX. Vista superior de algunos Biorreactores Airlift en el proceso.....	82
Figura X. Control del pH y vista frontal de los biorreactores Airlift.....	83
Figura XI. Biorreactores al final del proceso.....	83

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Realidad Problemática

La minería peruana está orientada principalmente al mercado externo y es el sector económico que más contribuye en la balanza comercial, con alrededor de 45% de las exportaciones totales. La producción minera se destina principalmente a mercados externos, por lo que la minería se convierte en un importante generador de divisas. Asimismo, la explotación minera se realiza muchas veces en zonas alejadas en donde no se realizan otras actividades productivas, convirtiéndose así en un importante impulso económico. No obstante, el impulso económico de la minería resulta insuficiente para generar un desarrollo sostenido sin la participación del Estado y la promoción de otras actividades productivas.

El presente proyecto se basa en las observaciones hechas al uso del método de cianuración directa para minerales de baja ley y relaves, en el cual se obtiene una baja recuperación de oro y plata siendo además el consumo de cianuro elevado, haciendo que la explotación de dicho mineral no sea rentable. Es por ello que proponemos un proyecto basado en el uso del pre-tratamiento bacteriano del mineral de baja ley debido a las siguientes ventajas:

- Requiere poca inversión de capital (las bacterias pueden ser aisladas a partir de las aguas ácidas de minas).

- Bajos costos de operación en comparación con los procesos convencionales.
- Relativa ausencia de polución o contaminación ambiental durante el proceso.
- Son utilizados para el tratamiento de minerales de baja ley. [9] y [10]

En el sector minero metalúrgico, la biotecnología ha sido utilizada como una herramienta en la disolución y recuperación de los valores metálicos contenidos en las menas.

El enorme potencial que representa el empleo de bacterias en los procesos mineros nos ha conllevado a proponer este método con la finalidad de que dichos minerales de baja ley y relaves sean explotados en un futuro no muy lejano.

1.2 Antecedentes

Un hito en la historia se comenzó a gestar en 1947 con el descubrimiento de un microorganismo presente en las aguas de drenaje de una mina de carbón española donde se oxidaba fierro y azufre. Esta era la *Thiobacillus Ferrooxidans*, bacteria que forma parte del proceso de obtención de Cobre. Una vez descubierta, se determinó que era la responsable de la oxidación de los minerales sulfurados que contenían el metal rojo, acelerando su lixiviación desde minerales de baja ley, los que tradicionalmente eran sometidos a procesos más largos, costosos y contaminantes. Las bacterias libera fuerzas químicas y biológicas que se esfuerzan en un plan común que explota la biotecnología degradar los sulfuros a formas solubles, a velocidades de medio a un millón de veces más rápidas que si estuvieran expuestas al aire y al agua en ausencia de bacterias. [13]

La afirmación que en 1979 brindara el Dr. Richard Manchee al respecto “Una planta de extracción de minerales del futuro podría tener el aspecto de una actual de tratamiento de agua: libre de la suciedad y de los montones de escorias asociadas a las operaciones mineras, mientras que bajo el suelo millones de microbios realizarían las tareas que en nuestros días se caracterizan por el rugido de las máquinas, del ruido de los picos y el traslado del mineral. La “Lixiviación Bacteriana”, conocida también como Biolixiviación o Biooxidación puede ser definida como un proceso natural que resulta de la acción de un grupo de bacterias principalmente del género *Thiobacillus* con la habilidad de oxidar minerales

sulfurados, permitiendo la liberación de los valores metálicos contenidos en ellos. En términos globales, se puede señalar que la Biolixiviación es una tecnología que emplea bacterias específicas para lixiviar, o extraer un metal de valor. [13]

Misari da a conocer un trabajo que es parte de un programa de investigación de la B.C Research para el desarrollo de procesos biológicos prácticos, donde se tomó una muestra de concentrado de pirita con una granulometría de 80% -m325, fue biolixiviado en Batch a una densidad de pulpa de 20% de sólidos en tanques con baffles y agitados a 35 °C con adición de aire enriquecido con CO₂ (1%), todas las pruebas fueron ajustadas a un pH 2 con ácido sulfúrico. Los resultados arrojaron lo siguiente: Una cianuración directa del concentrado sin una previa biolixiviación dio una recuperación de 24% de oro, la biooxidación de la pirita por biolixiviación mejoró esta recuperación de oro, así con 84% de oxidación ha sido aumentado a 81% la extracción de oro [7]

MLPSA en 1993 en TECSUP, operó continuamente las 24 horas del día. Después de 20 meses de operación la recuperación de Au fue mayor de 90% a una concentración de 15% de sólidos y un tiempo de retención de 6 días [11].

Acevedo F., en 1994, evaluó el efecto del porcentaje de sólidos y la aireación en la biooxidación de un concentrado refractario de Au y Ag, usando un cultivo de bacterias *Thiobacillus Ferrooxidans*, los resultados obtenidos permitieron establecer las condiciones mas apropiadas para la biooxidación del concentrado refractario de Au y Ag, siendo estos 18 % de sólidos y 1,0 VVM de velocidad de aireación. [1]

Loayza, c; 1999; p. 2, cuando se realizan procesos para la extracción de oro a partir de minerales arsenopiritosos, dichos minerales reportan extracciones de 30 - 40% de oro cuando se trata con cianuro a una molienda típica - m200, y en algunos casos las recuperaciones son muy bajas como en el caso de la CÍA. Minera Lisandro Proaño cuyos concentrados reportan extracciones alrededor del 10% cuando se les aplica cianuración directa; cuando se aplica la biolixiviación a estos minerales este proceso mas eficiente porque la contaminación es mínima, reduce el costo de capital en 20% del costo operativo en 10% y mientras que la recuperación de oro se incrementa de 2- 13% [11]

López F, y Alvarado E (2000 p. 61) en la tesis de investigación: "Influencia de la bioxidación, condición del mineral y granulometría en la extracción de oro y plata del mineral aurífero refractario de la CIA. Minera Sayapullo S. A tratado por cianuración y thioureación"; incluye que aplicando el proceso de pretratamiento de bioxidación de cianuración al mineral de cabeza molido de 81% - 200 malla se obtuvieron las mas altas extracciones de oro y plata (65% y 73,22% respectivamente); y en el procesamiento de este mineral las variables con mayor significancia fueron la bioxidación y el proceso de lixiviación en extracción de oro y plata [11]

Mazuelos A. y Falencia L, en 2000, lograron obtener una producción máxima de 11,1 g/l -h del Fe^{3+} a partir del Fe^{2+} . El Fe^{3+} es utilizado como agente lixivante para los sulfuros metálicos no ferrosos, usando una mezcla de bacteria; *Thiobacillus Ferrooxidans* y *Leptosprillum Ferrooxidans*. [12]

Natarajan K., en 2001, encontró que, con un 15 % de sólidos, aire enriquecido con 1 % de CO_2 y una temperatura de 28° C; se mejora los porcentajes de extracción de Au y Ag de un concentrado refractario, de 45% a 85% y de 62% a 97% respectivamente. Las variables mencionadas desempeñan un papel importante en la determinación de la oxidación del Fe^{2+} catalizado por las bacterias *Thiobacillus Ferrooxidans*. [15]

Loayza, c. P.6 - 8 en el estudio de investigación realizado por la compañía Minera Lisandro Proaño, sobre extracción de oro a partir de minerales arsenopiritosos aplicando pre-tratamientos de biolixiviación, tostación y lixiviación a presión oxidante seguido de cianuración obtuvieron los siguientes resultados de extracción: 92% de oro y 62% de plata al aplicar lixiviación bacteriana, 60% de oro al aplicar tostación y 95% de oro y 60% de plata al aplicar lixiviación a presión constante, con el que se concluye de estos resultados que la lixiviación bacteriana es un proceso viable para la extracción de oro a partir de minerales arsenopiritosos, comparados con los otros dos procesos mencionados que son costosos y contaminan el medio ambiente [11].

En la presente tesis, los relaves mineros serán tratados por el proceso de lixiviación bacteriana para la recuperación del Oro y la Plata. Dicho proceso consiste en la

utilización de una bacteria del genero *thiobacillus ferrooxidans* para la lixiviación de los metales contenidos en dichos relaves, para lo cual se tendrá que cultivar la bacteria para luego adicionarla al relave y ver los resultados que estas bacterias producen.

1.3 Marco Teórico

1.3.1 Oxidación biológica o lixiviación bacteriana

El empleo de sistemas biológicos en los procesos industriales, conocido como biotecnología, ha sido usado desde tiempos inmemoriales en la producción de vino, cerveza, en la fabricación de antibióticos, en la industria alimentaria, entre otras aplicaciones. En el sector minero metalúrgico, la biotecnología ha sido utilizada como una herramienta en la disolución y recuperación de los valores metálicos contenidos en las menas. Mayormente, los procesos microbianos han sido empleados en la lixiviación de cobre y uranio, en el mejoramiento de la extracción de metales preciosos contenidos en sulfuros refractarios y en el tratamiento de aguas residuales [2]

Muchos de los depósitos de oro y plata están a menudo asociados con minerales sulfurados, tales como la pirita y arsenopirita. Estos minerales presentan resistencia a la recuperación de los metales preciosos. La facilidad con la cual el oro puede ser extraído, está relacionado con el tamaño de grano y su manera de distribución dentro del mineral, en la mayoría de los casos un porcentaje significativo de oro puede ocurrir en forma submicroscópica o en solución sólida con pirita. El oro que se encuentra como partículas submicroscópicas en los granos de pirita y arsenopirita, según pruebas basados sobre técnicas microscópicas, indicaron que algo de 50% del oro estuvo incluido en la pirita y 20% en la arsenopirita con un 30% de oro libre. Con el advenimiento de las técnicas sofisticadas, usando el microscopio electrónico de barrido, ahora hay evidencia que la mayor parte del oro esta debajo de un rango de 0,2 micrones de tamaño. El encapsulamiento de las partículas de metal precioso en esta manera, hace su extracción muy dificultosa, debido a que estos metales son inaccesibles a las soluciones lixiviantes, tales minerales son conocidos como minerales refractarios. Para lograr una recuperación satisfactoria de los metales preciosos es necesario primero romper los cristales de sulfuro para liberarlos, antes de

aplicar un tratamiento convencional. Por ejemplo la tostación ha sido usada como una etapa de pre-oxidación antes de la cianuración. Sin embargo, las regulaciones del control de la polución y la fusión de la plata, los cuales forman escorias, hacen a la tostación no atractiva. Una molienda de partícula a tamaño fino ayuda a la liberación de los metales preciosos, pero todavía da una recuperación insatisfactoria y conduce al consumo alto de reactivos en el proceso de extracción a causa del incremento del área de superficie. Como el tamaño de la partícula de los metales preciosos en el interior de la matriz sulfurosa puede estar en el rango desde unos cuantos micrones a submicrones, la molienda llega a ser costosa y una ruta no atractiva.

Una alternativa para tales minerales refractarios es la lixiviación bacteriana o biolixiviación seguida por cianuración. La biolixiviación disuelve a la matriz del sulfuro, así expone los metales preciosos encapsulados a la solución de lixiviación [7]

Lixiviación bacteriana, también conocida como Biolixiviación, puede ser definida como un proceso natural de disolución que resulta de la acción de un grupo de bacterias, principalmente del género *Thiobacillus Ferrooxidans*, con habilidad de oxidar minerales sulfurados, permitiendo la liberación de los valores metálicos contenidos en ellos. Por lo tanto la biolixiviación es una tecnología que se emplea bacterias específicas para lixiviar o extraer un metal como uranio, cobre, cinc, níquel y cobalto presentes en las menas. De otro lado, el termino biolixiviación es utilizado para describir un proceso que emplea bacterias para degradar un sulfuro, usualmente pirita (FeS_2) y arsenopirita (FeAsS_2), en el que el oro ó la plata, o ambos se encuentran encapsulados. [6], [7] y [13]

1.3.2 Aspectos microbiológicos:

A. Bacterias:

Thiobacillus ferrooxidans:

Los microorganismos que son responsables de la disolución de los metales a partir de minerales son, principalmente, organismos quimiosintéticos y

autotróficos pertenecientes al género *Thiobacillus*, aunque no es la única. De las especies de *Thiobacillus* que se conocen la que más atención ha recibido es *Thiobacillus ferrooxidans*, cuya presencia fue demostrada por Colmer y Hinkle, a comienzos de los años 50, en el drenaje unas minas de carbón, que reportaban altos contenidos de ácido y fierro.

T. ferrooxidans presenta forma bacilar, gram negativas, de 0,5 a 1,7 μ , algunas cepas tienen flagelos, es quimioautotrófico, capaz de oxidar compuestos inorgánicos como iones ferroso (Fe(II)) y azufre, los que le sirven de fuente primaria de energía. El carbono necesario para su arquitectura celular lo obtiene por fijación de CO₂, de manera similar a las plantas verdes (Ciclo de Calvin-Benson). Es aerobio (requiere de O₂ como aceptor final de electrones), acidófilo (desarrolla en rangos de pH que varían entre 1,5 y 3,0), y a temperaturas que oscilan entre 25-35°C. Es considerada como el mayor contribuyente en la producción de aguas ácidas que drenan de depósitos de metales sulfurados, gracias a la capacidad que tienen de oxidar minerales de disulfuro de fierro, generando soluciones ácidas de sulfato férrico.



THIOBACILLUS FERROOXIDANTS

Figura 1.1 Bacteria y sus principales componentes

Las bacterias son organismos unicelulares, como se muestran en la figura 1.1, ellas están constituidas por elementos subcelulares de morfología y estructura bien definida. Entre estos elementos o partes de los microorganismos se distinguen: pared celular, la membrana citoplasmática y algunas estructuras membranosas que cumplen funciones respiratorias. Las bacterias en general se clasifican según su modo de nutrirse en:

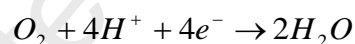
- Autotróficas, capaces de sintetizar todos sus nutrientes como proteínas, Lípidos y carbohidratos, a partir del CO₂.
- Heterotróficas, estas requieren carbohidratos como la glucosa para formar sus propios nutrientes

- Mixotróficas, estas tienen la habilidad de formar sus propios nutrientes a partir de dióxido de carbono y carbohidratos.

Las bacterias también se clasifican según el modo de respirar, en:

- Aeróbicas, requieren de oxígeno para su respiración.
- Anaeróbicas, se desarrollan en medios exentos de oxígeno.
- Facultativas, estas son capaces de poder desarrollarse tanto en medios aeróbicos y anaeróbicos.

Las bacterias que intervienen en los procesos de lixiviación son generalmente autotróficas y aeróbicas. Las bacterias que son capaces de catalizar reacciones de oxidación en sustancias inorgánicas, como son los minerales, son generalmente clasificadas como quimio-lito-autotróficas o bien quimiosintéticas. Es decir, tienen la facultad de obtener la energía necesaria para desarrollar su metabolismo energético a partir de la oxidación de compuestos inorgánicos, es decir a partir de intercambio de electrones, fundamentalmente a partir de la oxidación de sulfuros metálicos, de la oxidación del ión ferroso o bien de la oxidación del azufre elemental. La reacción de oxidación del ión ferroso, de los sulfuros metálicos o de los compuestos de azufre es catalizada por la bacteria, mientras que el oxidante (o receptor terminal de los electrones) es normalmente el oxígeno molecular que por efectos penetra en el interior de la membrana citoplasmática. En este caso estaremos hablando de una oxidación en condiciones aeróbicas. El oxígeno es reducido a agua según la reacción:



Un esquema de oxidación de un cristal de la piritita, catalizada por bacterias, se muestra en la figura 1.2

Por otra parte, también se puede dar una oxidación siempre catalizadas por las bacterias, en condiciones anaeróbicas, es decir, sin oxígeno; o bien unas condiciones mixtas: aeróbicas y anaeróbicas. En estos casos el oxidante (o receptor de electrones), además del oxígeno puede ser el ión férrico. Se

observa en la figura 1.3, esta otra situación siempre asumiendo el caso de la oxidación de un cristal de pirita, catalizada por bacterias [3]

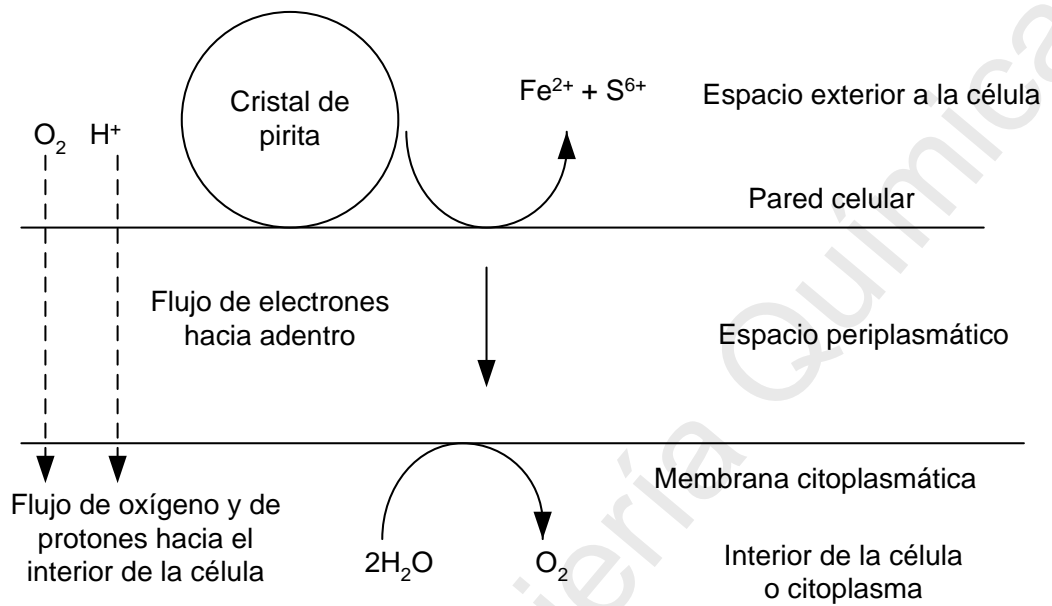


Figura 1.2 Representación esquemática de la oxidación, catalizada por bacteria, de un cristal de pirita (FeS_2) en condiciones aeróbicas

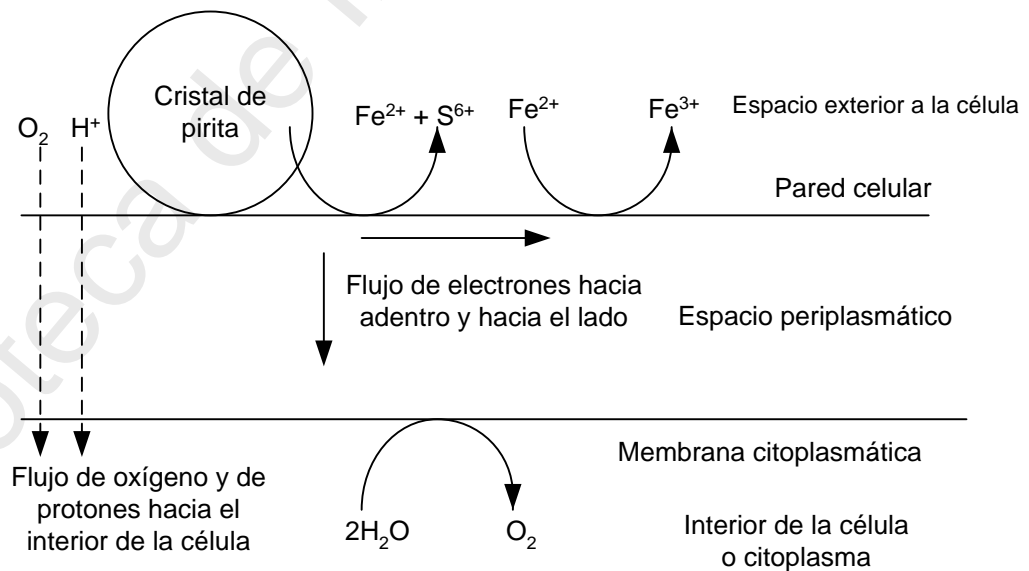


Figura 1.3 Representación esquemática de la oxidación catalizada por la bacteria, de un cristal de pirita en condiciones mixtas: aerobia y anaeróbica

B. Transferencia de energía en sistemas biológicos

Un problema de vida es la transferencia de energía desde una fuente al organismo y la utilización de parte de esa energía para su crecimiento multiplicación y otros procesos biológicos. Compuestos fosforosos están generalmente reconocidos que juegan un rol universal en los fenómenos de transferencia de energía.

La energía metabólica de la oxidación del sustrato se transfiere al ATP (Adenosine Triphosphate). El ATP cargado entonces transporta la energía bioquímica a todas partes de la célula donde la energía puede ser requerida para la síntesis y mantenimiento. La energía del ATP es utilizado en la célula para trabajo de transporte, trabajo mecánico y biosíntesis, y en este proceso el ATP es hidrolizado a ADP (Adenosine Diphosphate) mas fosfato inorgánico. [4]

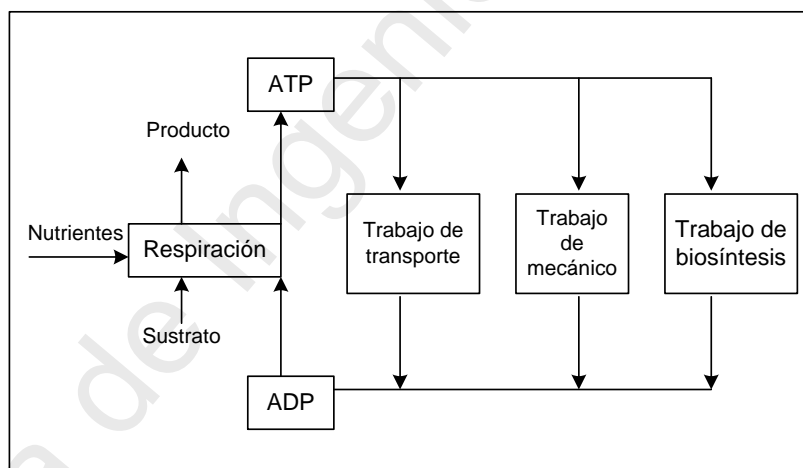


Figura 1.4 Utilización de energía por microorganismos

C. Adaptación de bacterias

La actividad bacteriana se mejora efectuando repetidos cultivos sobre el mismo sustrato. Este seguimiento está ilustrado en la figura 1.5 Mediante una adaptación se logra:

- Una disminución del tiempo muerto (tiempo improductivo)
- Aumento del grado de extracción del metal
- Incremento de la velocidad de extracción

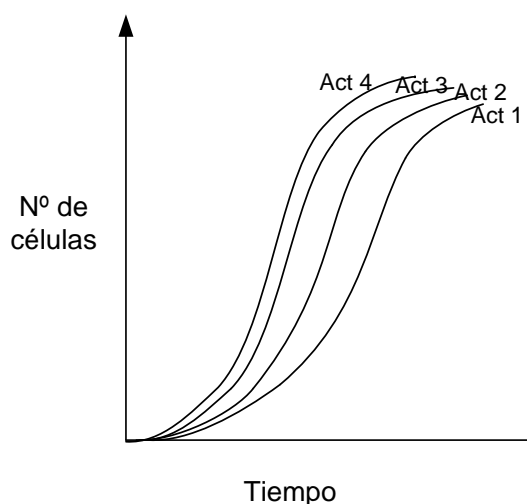


Figura 1.5 Curvas de adaptación de bacterias

D. Crecimiento bacteriano

El ciclo de vida de una colonia de bacterias inoculadas en un medio de cultivo (9K) puede representarse mediante el esquema de la figura 1.6

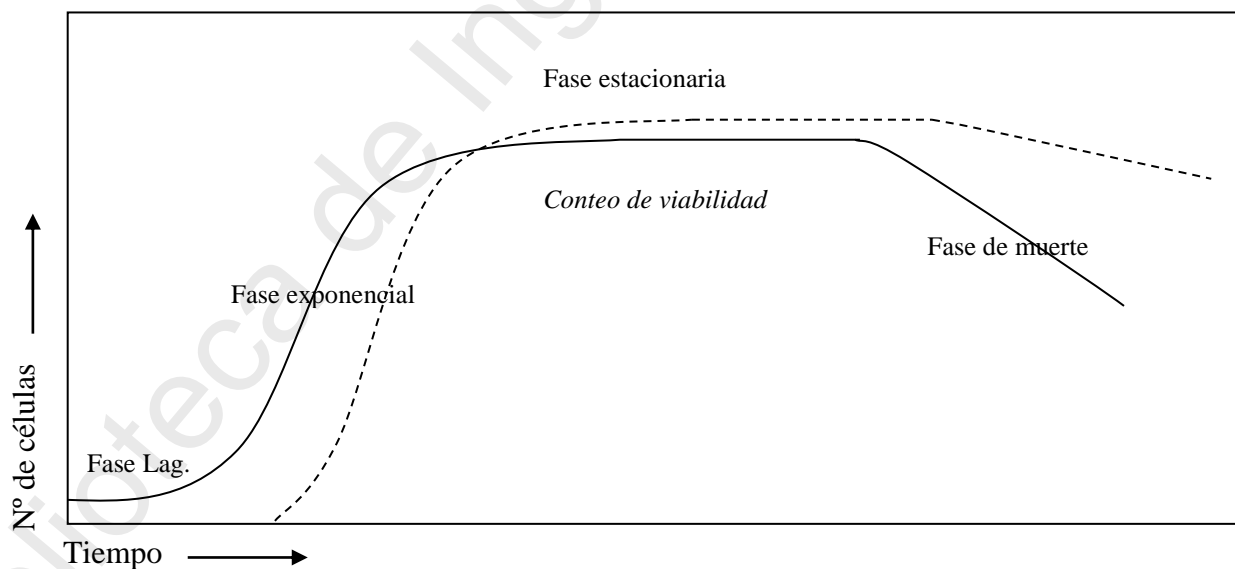


Figura 1.6 Fases de crecimiento bacteriano

En este esquema se muestra en primer lugar un periodo inicial de crecimiento lento o "etapa de acostumbramiento" al nuevo medio, que se caracteriza por muy poca actividad bacteriana mientras la bacteria se acostumbra y desarrolla los niveles.

La segunda fase es la "etapa de crecimiento exponencial". En la que la bacteria se multiplica exponencial mente por división binaria. Esta fase de la vida de una colonia de bacterias se distingue de las demás y se le denomina "periodo de duplicación" y que corresponde al tiempo que demora en duplicarse la población bacteriana, bajo ciertas condiciones estandarizadas.

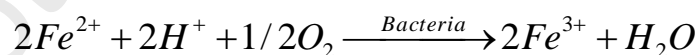
La tercera fase corresponde a la limitación de la velocidad de solubilización o de crecimiento de la población, debido al agotamiento de uno o más de los nutrientes esenciales o que los subproductos de su propia actividad envenenan su ambiente provocando su inhibición, esta etapa se denomina "etapa estacionaria". La población bacteriana en esta etapa consiste en su totalidad de células completamente variables pero su crecimiento está limitado. En cambio al entrar a la cuarta fase, comienza a disminuir la población de bacterias y se entra de lleno a un decaimiento motivo por el cual esta etapa se conoce como "fase de muerte". Esto indica que el punto adecuado de efectuar la transferencia de cultivo a otro esta precisamente en la fase de crecimiento exponencial. [3]

1.3.3 Mecanismos de la biolixiviación:

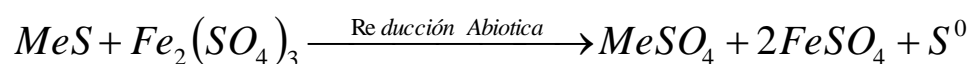
Los mecanismos de reacción generalmente utilizados en el proceso biogénico de minerales sulfurados son de dos tipos:

A. Mecanismo indirecto: Requiere de la presencia de hierro disuelto en las soluciones:

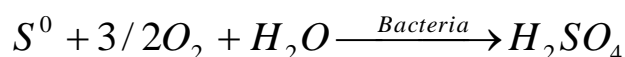
Reacción aeróbica 1:



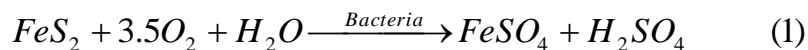
Reacción anaeróbica:



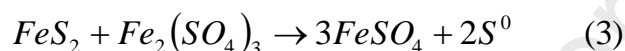
Reacción aeróbica 2:



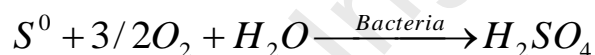
Para la pirita:



El sulfato férrico es un oxidante fuerte capaz de disolver una amplia variedad de minerales sulfurados. La lixiviación con $Fe_2(SO_4)_3$ recibe el nombre de lixiviación indirecta porque se realiza en ausencia de oxígeno o de bacterias y, es responsable de la disolución de varios minerales sulfurados, como la pirita:

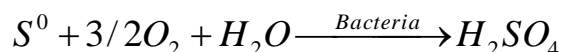
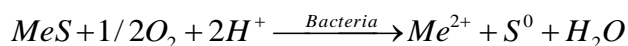


El mecanismo, lixiviación indirecta depende de la regeneración biológica del sulfato férrico (reacción 2). El azufre (S^0) generado en la reacción 3 puede ser transformado en ácido sulfúrico por T. Ferrooxidans según:

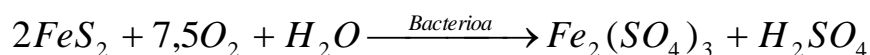


En el mecanismo de contacto indirecto el ion férrico (Fe^{3+}) oxida al sulfuro metálico, produciéndose ion ferroso (Fe^{2+}) y el azufre elemental (S^0), que a su vez son reoxidados por las bacterias regenerando el ion férrico y produciendo así ácido sulfúrico. [1]

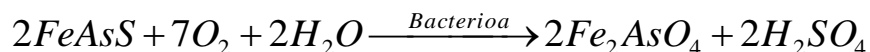
B. Mecanismo directo: Implica la adhesión de la bacteria directamente sobre los cristales del sólido, actuando ella como puente para el traspaso de electrones, es decir, las bacterias T. Ferrooxidans también pueden lixiviar sulfuros metálicos directamente si la participación del sulfato férrico producido biológicamente. [3] El proceso se describe en la siguiente reacción:



Para la Pirita:



Para la arsenopirita:



Dado que el hierro siempre esta presente en ambiente de lixiviación natural, es posible que tanto la lixiviación indirecta como la directa ocurran de manera simultánea. [12]

1.3.4 Factores que tienen influencia en la actividad bacterial

La actividad metabólica de los microorganismos incluidos en la lixiviación de sulfuros esta afectada considerablemente por factores ambientales, entre las que podemos mencionar: Eh, pH, temperatura, presión, concentración de nutrientes, tamaño de partícula o área de superficie del sustrato entre otros.

A. Efecto del medio ambiente

Los limites de actividad bacterial en el ambiente natural se han estudiado en términos de pH y el potencial de oxidación - reducción. La escala Eh se extiende desde +850 a -190 mV, mientras que los rangos de pH son de 1,0 a 9,2. En el diagrama de Pourbaix (figura 1.7) se muestran áreas de actividad para bacterias *Thiobacillus Ferrooxidans*.

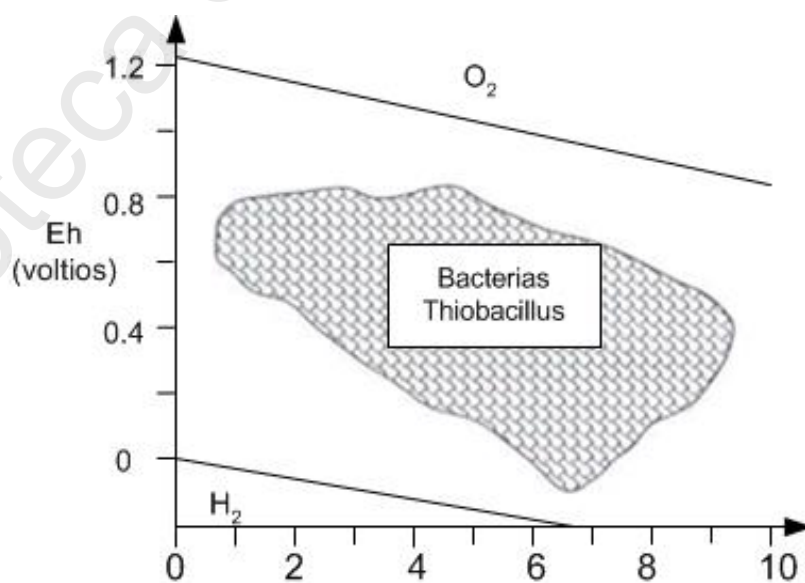


Figura 1.7 Áreas de actividad de bacterias *Thiobacillus Ferrooxidans*

B. Efecto de la temperatura

La temperatura óptima para el *T. Ferrooxidans* está en el rango de 25 a 45°C. La oxidación biológica de sulfuros metálicos por el *T. Ferrooxidans* cesa alrededor de 50°C y mayor temperatura solamente una oxidación química ocurre. Una temperatura mínima no ha sido establecida para el crecimiento de *T. Ferrooxidans* pero generalmente se acepta que la actividad bacterial aún puede darse a 10°C

La existencia de la vida para el *T. Ferrooxidans* es también dependiente de las radiaciones naturales que existen en el medio ambiente. Los *T. Ferrooxidans* son sensitivas a la radiación y los mejores resultados para su crecimiento se obtienen bajo la oscuridad.

C. Efecto del pH

La oxidación biológica del ión ferroso y de sulfuros incluye movimientos de iones hidrógeno así como de electrones, el pH tiene un efecto definido. La influencia de pH sobre la actividad de las bacterias *T. Ferrooxidans* a sido estudiado por investigadores en el rango de 1 a 5. Pero han reportado valores óptimos de pH en el rango de 2,3 y 2,5 para la chalcopirita, sulfuro de zinc, covelita y hierro ferroso.

La apariencia simple del proceso bacterial, tropieza en la práctica con propiedades de los minerales y medio ambiente variables en un amplio rango constituyendo por lo tanto cada yacimiento un problema particular que requiere ser estudiado separadamente.

- **Efecto de los nutrientes**

Los nutrientes que requieren el *T. Ferrooxidans* son los mismos que utiliza un autótrofo quimiosintético. El medio de cultivo que se usan más frecuentemente es el 9k y su composición se muestra en la tabla 1.1

El *T. Ferrooxidans* sintetiza sus materiales celulares a partir de fuentes inorgánicas que son: dióxido de carbono (como fuente de carbón para el

crecimiento de la célula), sulfato de amonio y fosfato ácido de potasio (como fuente de nitrógeno y fosfato), cloruro de potasio (como factores de crecimiento)

La fuente de energía utilizada por el T. Ferrooxidans son los iones ferrosos (Fe^{2+}) y azufre inorgánico. Esta energía como efecto de la oxidación del ión ferroso a ión férrico, es utilizada para su metabolismo. Esta oxidación se muestra en el cambio de color de la solución nutriente y comprueba de este modo el límite de la concentración para la dilución de un cultivo.

Tabla 1.1 Componentes para el medio de cultivo de las bacterias T. Ferrooxidans

Componentes	Cantidades (g/L)
Medio Basal	(*)
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	3,00
K_2HPO_4	0,50
$\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,50
KCl	0,10
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0,01
Fuente de energía	(**)
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	50,0

(*) Medio de cultivo 9k (Silverman, Lundgren), para 700 ml de solución (Nutrientes)

(**) Fuente de energía utilizada para los cultivos, para 300 ml de solución Ferrosa (ión ferroso Fe^{2+})

D. Efecto del tamaño de partícula del mineral.

En suspensiones acuosas de partículas sólidas, los iones a ser oxidados son suministrados por la superficie de mineral. La concentración de estos iones está controlada por muchos fenómenos; es decir, por el producto de solubilidad, las reacciones de hidrólisis, la presencia de electrolitos inertes, la tensión superficial, el tamaño de partícula o área de superficie y el potencial de rédox.

Uno de los mayores requerimientos para la oxidación de sulfuros por la bacteria es la disponibilidad del sustrato. La condición ideal existe, cuando el sustrato es soluble tal como el sulfato ferroso (sustrato). Para sustratos insolubles, se requiere una exposición adecuada de los minerales sulfurados. En el caso del sustrato insoluble, como el mineral sulfurado, el factor que realmente interesa e interviene directamente en la cinética del proceso no es su concentración expresada como peso por unidad de volumen de suspensión. Al ser el compuesto insoluble, toda la materia que queda en el interior de la partícula no tiene intervención en el proceso y sólo aquella porción en contacto directo con el líquido tiene intervención, entonces la interfase sólido-líquido, se ve involucrada en la lixiviación. Por lo tanto, el factor concentración se ve reemplazado en este caso por el área de la interfase sólido-líquido, expresada convenientemente como área superficial por unidad de volumen.

Por lo tanto, un aumento en esta área, producido por un mayor grado de molienda, deberá tener un efecto favorable en la velocidad de solubilización. Los estudios realizados tanto minerales como con sistemas modelo confirman esta predicción.

Usando diferentes fracciones de tamaño en una muestra de pirita, los mejores resultados fueron obtenidos con la fracción de partículas de tamaño más pequeño. Usando concentrados de calcopirita, se determinó que el cobre se extrae más rápidamente de partículas finas que en partículas más grandes.

En la práctica, el tamaño óptimo de partícula tiene que ser determinado para cada clase de mineral a ser lixiviado. [4]

E. Efecto del oxígeno y CO₂

La disponibilidad del oxígeno es un factor que controla la extracción de metales por bacterias. No se conoce otro oxidante que pueda ser utilizado por los microorganismos en ambientes de lixiviación. El dióxido de carbono es utilizado como fuente para la fabricación de su arquitectura celular.

Estudiando el efecto del dióxido de carbono sobre la actividad bacterial, se observó que la velocidad de oxidación de la pirita por el T. Ferrooxidans gradualmente disminuyó cuando se eliminó el CO₂ del aire usado para la aireación. Aumentando el contenido de CO₂ del aire se estimuló el crecimiento del T. Ferrooxidans usando hierro ferroso como sustrato. [1]

F. Efecto de la densidad de pulpa

- A bajas densidades de pulpa, la velocidad de extracción es directamente proporcional a la densidad de pulpa, pero a mayores densidades de pulpa la velocidad llega a ser independiente de esta variable. A todavía mayores valores de densidad de pulpa la velocidad de extracción disminuye.
- A concentraciones bajas de mineral la velocidad de extracción esta limitada por la cantidad de mineral disponible; es decir, la velocidad de crecimiento de la bacteria esta limitada por la disponibilidad de fuente de energía
- A densidad de pulpas mayores hay un exceso de fuente de energía y la velocidad de crecimiento bacterial, y por lo tanto, la velocidad de extracción del mineral se ve limitada por otros factores [4].

G. Tolerancia a la acumulación de iones

Estos microorganismos en general presentan una alta tolerancia a diversos iones metálicos. En la tabla 1.2 se entregan los valores máximos de concentración de diversos iones, superado los cuales se inhiben fuertemente o simplemente se detiene la actividad bacteriana.

También se ha reportado que existe una inhibición de la actividad bacterial con el aumento de iones férricos en la solución. El exceso de iones férrico suprime la oxidación del ión ferroso. Se determinó que el óptimo crecimiento se logra con una concentración de iones ferroso entre 1,5 y 3,0 g/L. [3]

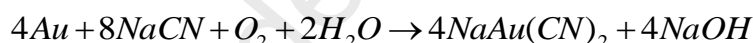
Tabla 1.2 Concentraciones máximas que inhiben la actividad bacteriana mesófila

Catión	Conc. Máxima (g/L)	Catión metálico	Conc. Máxima (g/L)	Aniones	Conc. Máxima
Fe ³⁺	160	Co ²⁺	30	SO ₄ ²⁻	80-100 (g/L)
Zn ²⁺	119	As ³⁺	17	Cl ⁻	2-6 (g/L)
Ni ²⁺	72	UO ₂ ²⁺	0.5	NO ₃ ⁻	2-6 (g/L)
Cu ²⁺	55	Al ³⁺	10	CN ⁻	2,5x10 ⁻⁵ M
Mn ²⁺	33	Mo ²⁺	2.9	F ⁻	2,5x10 ⁻⁵ M
Cr ²⁺	0,8	Ag ⁺	<0,05	-	-
Hg ²⁺	0,1	Se ²⁺	-	-	-

- El potencial de óxido-reducción (Eh) debe estar en un máximo de 800 – 850 mV
- El pH no debe disminuir a menos de 1,0

1.3.5 Lixiviación del oro con cianuro o cianuración ^[5] y ^[14]

Las reacciones que tienen lugar durante la disolución de oro en las soluciones de cianuro, bajo condiciones normales, han sido estudiadas por varios científicos. La mayoría de los científicos en la materia concuerdan que la ecuación global de la disolución es la siguiente:



Conocida como la ecuación de Eisner (1846), quien estableció la necesidad de la presencia de oxígeno para que el cianuro disuelva al oro

En un sistema relativamente simple de este tipo, el oro se disuelve con facilidad y las únicas condiciones que requieren son: que el oro esté libre y limpio, que la solución de cianuro no contenga impurezas que puedan inhibir la reacción que se mantenga un adecuado abastecimiento de oxígeno a la solución durante todo el proceso de la reacción. [17]

La recuperación de oro disuelto con cianuro normalmente se puede realizar a través de la precipitación con zinc, previas desaireación de las soluciones, proceso conocido como Merrill Crowe. La termodinámica de ambos procesos, el

de la lixiviación con cianuro y el de la precipitación con zinc, se puede entender mejor observando el sector de operación de cada uno de ellos, como se muestra en el diagrama Eh-pH para el oro y el cianuro (figura 1.8)

En el mismo diagrama de la figura 1.8 también se pueden apreciar los rangos de condiciones de estabilidad para otras ocurrencias de otras formas de disoluciones de oro: con agua regia, con tiourea y biolixiviación para sulfuros encapsulados. Según el diagrama Eh-pH (figura 1.8), se afirma que:

- Todo el proceso de cianuración en la práctica se realiza entre pH 10 y 11,5.
- Para la cianuración se requieren condiciones de operación oxidantes.
- Para la precipitación con zinc las condiciones de operación conservando el pH alcalino, deben ser totalmente reductoras.

Así mismo en relación a la disolución con agua regia y con tiourea se requieren condiciones muy oxidantes y en ambiente ácido inferior a pH 1,5 y 2. Estas condiciones son también las que se utilizan para el tratamiento de oxidación de los minerales definidos como sulfuros refractarios que tienen el oro encapsulado.

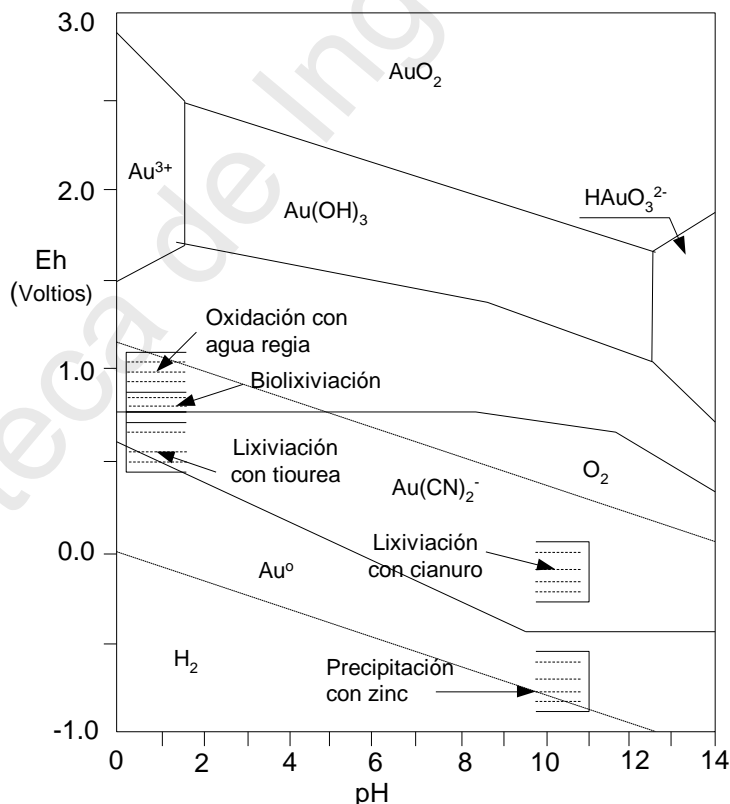


Figura 1.8 Diagrama Eh-pH para el oro y el auro-cianuro, mostrando además los rangos de presión para los distintos otros procesos industriales de extracción de oro

Para la lixiviación, el cianuro se utiliza en alguna de sus formas más solubles, es decir, como cianuro de potasio (KCN), cianuro de sodio (NaCN) o cianuro de calcio $\text{Ca}(\text{CN})_2$. Sin embargo, industrialmente se prefiere usar NaCN por su mayor contenido de CN^- activo por unidad de peso (53% comparado con 40% en el caso del KCN). EL $\text{Ca}(\text{CN})_2$ no es utilizado, a pesar de presentar 56,5% de ion CN^- activo, debido a que se comercializa con mayor contenido de impurezas que en los otros casos.

A. Química del cianuro en medio acuoso

El cianuro de hidrogeno (HCN), es un ácido débil en soluciones acuosas. En la figura 1.9 se muestra el equilibrio de disociación del HCN en función de pH. A un pH cercano a 9,3, a la mitad del cianuro total se encuentra como HCN, mientras el resto se presenta como cianuro libre (CN^-). A pH 10,2 más del 90% del cianuro total se encuentra como CN^- y a pH 8.4 el 90% esta como HCN. Esto es importante ya que el HCN tiene una presión de vapor relativamente alta (100 kPa a 26°C), lo que hace que volatilice con facilidad en la superficie de las soluciones, en condiciones normales del ambiente, causando pérdidas importantes de cianuro en solución, con los consiguientes riesgos ambientales. Todo esto obliga a controlar cuidadosamente el pH operacional sobre pH 10.

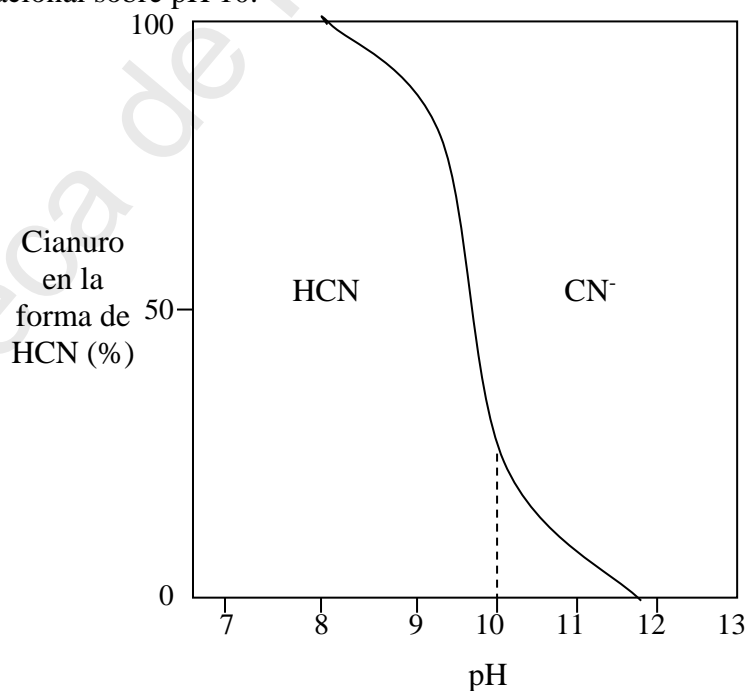
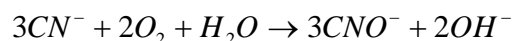
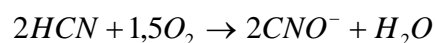


Figura 1.9 Disociación entre el HCN y el CN^- libre (26°C), mostrando la conveniencia de operar sobre pH 10

El HCN y el cianuro libre (CN^-), en presencia de oxígeno y bajo condiciones oxidantes, se oxidan a cianato (CNO^-) de acuerdo a las siguientes reacciones:



Estas reacciones son indeseables durante el proceso de lixiviación, ya que reducen el cianuro libre disponible y las especies de cianato no disuelven oro. Según la figura 1.10 estas reacciones de oxidación debieran ser termodinámicamente espontáneas. Sin embargo en la práctica esto no ocurre y se requieren oxidantes muy fuertes, tales como: ozono (O_3), agua oxigenada (H_2O_2) o ácido hipocloroso (HClO) para lograr que la reacción para la destrucción del cianuro se produzca a una velocidad significativa. En condiciones simplemente aireadas, estas reacciones son extremadamente lentas. [3]

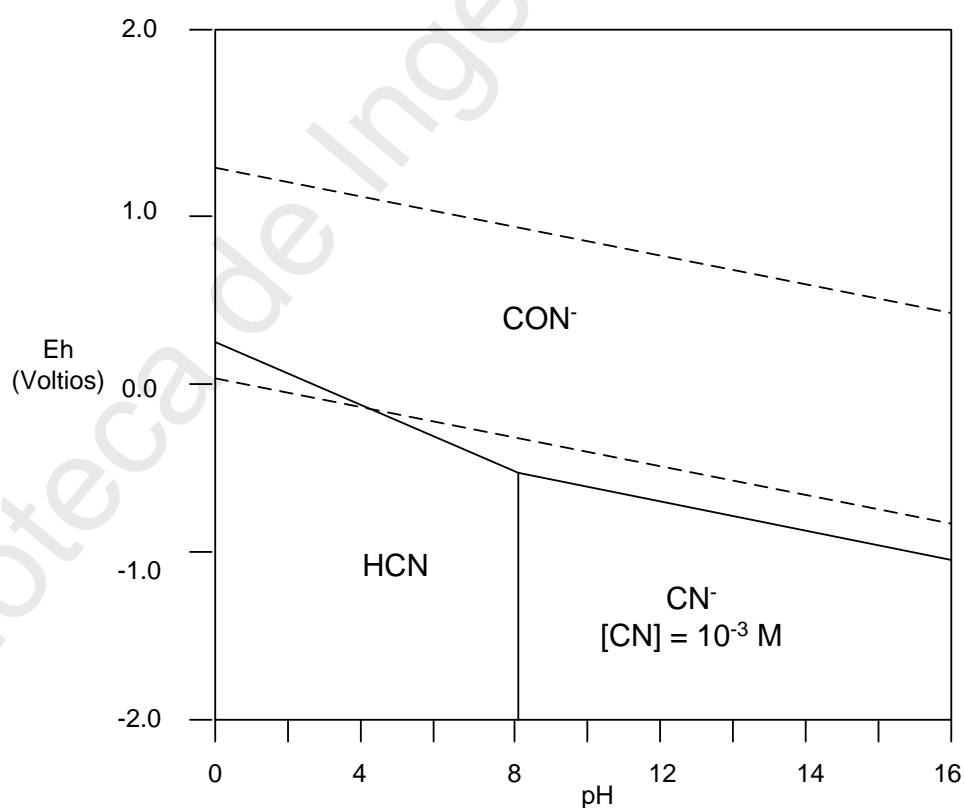


Figura 1.10 Diagrama Eh - pH para el sistema $\text{CN}^- - \text{H}_2\text{O}$ a 25°C , considerando una concentración total de cianuro de 10^{-3} molar

B. Termodinámica de la cianuración

Para comprobar los mecanismos fisicoquímicos de la lixiviación del oro, es necesario recurrir a las propiedades termodinámicas y a los estables y metaestables representado en el diagrama de Pourbaix (figura 1.11), que relaciona el potencial de óxido-reducción (Eh) del metal con el pH del medio. Estos diagramas de compuestos como $\text{Au}(\text{OH})_2$, AuO_2 , HAuO_3^{2-} y Au^{3+} requieren elevados potenciales redox (superiores al de la descomposición del oxígeno) para formarse. La lixiviación del oro metálico, es por lo tanto, muy difícil a causa de la gran estabilidad del oro. [14]

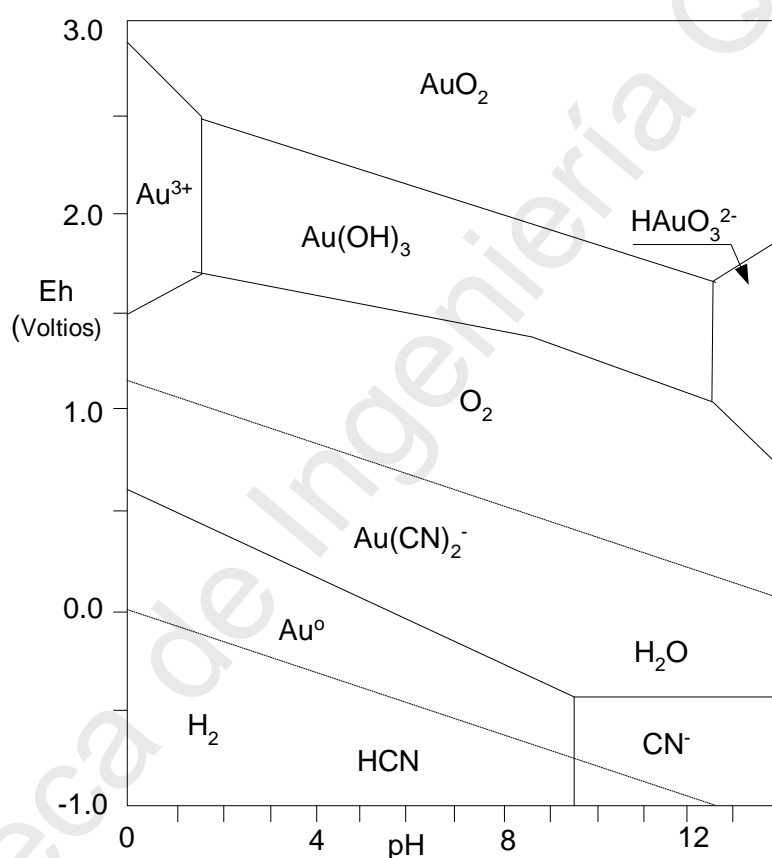


Figura 1.11 Diagrama Eh - pH para el sistema Au- H₂O-CN a 25°C, considerando una concentración total de cianuro de 10⁻³ molar

En el diagrama Au-H₂O-CN (figura 1.11), no obstante la reacción $\text{Au}(\text{CN})_2^- + e^-$ se lleva a cabo dentro de los límites de estabilidad del agua. El campo de estabilidad del complejo aurocianuro está limitado por una recta que inicialmente, muestra una pendiente pronunciada (efecto de la hidrólisis del cianuro a pH menor a 9) tomándose luego casi horizontal debido a la acción oxidante del oxígeno en medio básico, hecho a su vez permite que se haga

efectiva la reacción de lixiviación por formación de aurocianuro. En el mismo gráfico se pueden observar que los compuestos $\text{Au}(\text{OH})_3$, HAuO_3^{2-} y Au^{3+} son reducidos por la acción del cianuro.

C. Mecanismo electroquímico.

En la cianuración, la disolución de oro está regida por los principios electroquímicos de corrosión, es decir, es un proceso de corrosión electroquímica. Así el área del oro se puede dividir en zona anódica y catódica, es decir sobre una parte de la superficie del oro (zona catódica), el oxígeno captaría electrones procedentes de la otra parte de la superficie. En la figura 1.12 se muestra la explicación esquemática de este fenómeno.δ

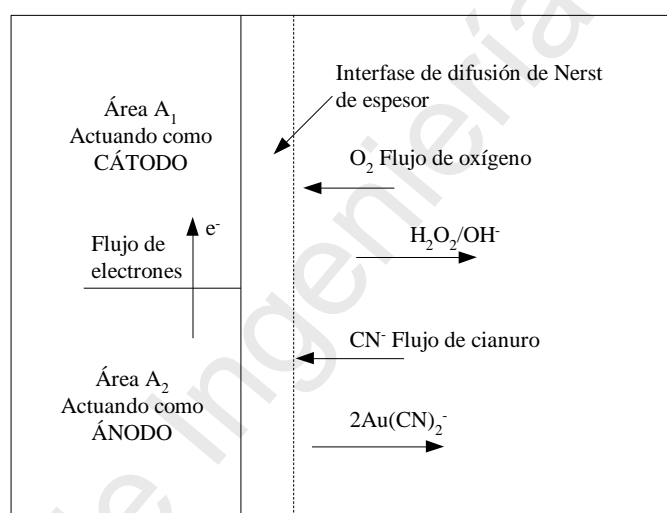
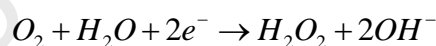


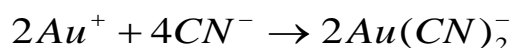
Figura 1.12 Diagrama esquemático del proceso de disolución del oro mostrado como una corrosión electroquímica

Las Reacciones que ocurren son:

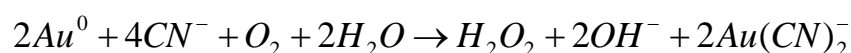
Cátodo:



Anodo:



Reacción General:



D. Cinética de la reacción

La cianuración está gobernada por las leyes de Fick, y matemáticamente la velocidad de disolución está dada por la siguiente expresión

$$V = \frac{2AD_{O_2}D_{CN^-}[CN^-][O_2]}{\delta(D_{CN^-}[CN^-] + 4D_{O_2}[O_2])} \quad (4)$$

Donde:

D_{O_2} y D_{CN^-} : Son los coeficientes de difusión (cm^2/s)

$[O_2]$ y $[CN^-]$: Concentraciones de oxígeno y cianuro en la solución (mol/ml)

δ : Ancho de la capa límite de Nerst (cm)

A: Área donde ocurren las reacciones anódicas y catódicas

De la ecuación (4) se puede considerar dos posibilidades:

Cuando las concentraciones de cianuro son bajas, el primer término del denominador es despreciable respecto al segundo, y la velocidad de disolución depende solo de la concentración de cianuro, la ecuación resultante será:

$$V = \frac{AD_{CN^-}[CN^-]}{2\delta} \quad (5)$$

Cuando las concentraciones de cianuro de cianuro son altas, en este caso el segundo término del denominador de la ecuación (4) es despreciable respecto al primero, y la velocidad de disolución depende solo de la concentración del oxígeno, la ecuación resultante será:

$$V = \frac{2AD_{O_2}[O_2]}{\delta} \quad (6)$$

Cuando el proceso desde control por difusión de cianuro a control por difusión de oxígeno ambos reactantes deben estar emigrando a la superficie del metal a sus máximas velocidades. Así podemos igualar las ecuaciones

(5) y (6) justo para este punto cambio del control difusional, desde el cianuro al oxígeno, momento en el que se cumple:

$$D_{CN^-} [CN^-] = 4D_{O_2} [O_2], \text{ es decir}$$

$$\frac{D_{CN^-} [CN^-]}{D_{O_2} [O_2]} = 4 \quad (7)$$

Se ha demostrado experimentalmente $\frac{D_{O_2}}{D_{CN^-}} = 1,5$ (promedio establecido a partir de diferentes pruebas experimentales). Entonces reemplazando estos valores en la ecuación (7), 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.

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

E. Interferencia de impurezas de los minerales^[16]

En la extracción de oro desde sistemas minerales, la velocidad de disolución es principalmente afectada por la complejidad del mineral. El oro que se encuentra en forma limpia, como partículas metálicas finas y liberadas, en general es fácilmente cianurable. La presencia de otras sustancias en los minerales, puede alterar este comportamiento, acelerando e inhibiendo la disolución del metal.

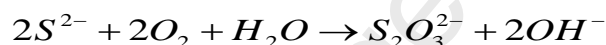
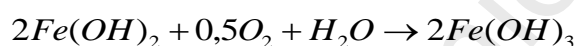
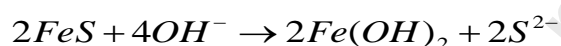
➤ Aditivos aceleradores de la cianuración

Existen algunas sustancias que en pequeñas concentraciones, influyen favorablemente en la disolución de minerales de oro y plata por cianuración al depolarizar la superficie del metal. Estos iones son: el plomo, el mercurio, el bismuto y el talio. Cuando no están presentes en forma soluble naturalmente en los minerales, se suelen agregar externamente: En estos casos se usa una sal soluble, como por ejemplo, el acetato o nitrato de plomo, que se dosifica en mínimas cantidades. Se

crea que en este caso cambian algunas características físicas de la superficie del oro, pasando a comportarse como una pseudo-aleación Au-Pb, con lo que disminuirá el espesor de la capa límite.

➤ **Inhibidores por consumo de oxígeno**

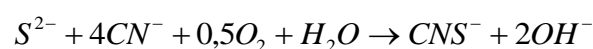
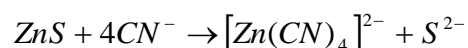
Por otro lado, existen un gran número de sustancias que remueven el oxígeno disuelto desde las soluciones cianuradas retardando y algunas veces deteniendo completamente la acción del cianuro. Por ejemplo la pirrotita actúa consumiendo oxígeno, doblemente vía la oxidación del hierro y vía la oxidación del ión sulfuro (S^{2-}) formando tiosulfatos, ambos sin utilidad en la lixiviación.



➤ **Inhibidores por consumo de cianuro**

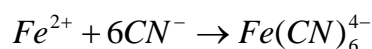
Otras sustancias consumen cianuro y además forman compuestos que dificultan la disolución de oro, sin beneficios para el proceso y de esta forma inhiben la disolución de oro. Ejemplos de estos son:

- Los minerales sulfurados de cobre, zinc, arsénico y antimonio. El ión metálico reacciona formando un cianuro del metal. Además el ión sulfuro también consume cianuro formando tiocianatos que no tienen acción lixivante alguna:

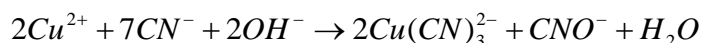


- El hierro disuelto, es la forma de iones o complejos, los cuales se comportan como inhibidores desde débiles hasta muy fuertes ya que

con el cianuro forman otros complejos y sales, comportándose como consumidor de cianuro en soluciones alcalinas. Esto ocurre, por ejemplo, con el ión ferroso:



- Los iones cúpricos que en soluciones cianuradas alcalinas pueden comportarse de acuerdo a la siguiente reacción:



Donde el complejo de cianuro de cobre representa un importante mayor consumo de cianuro

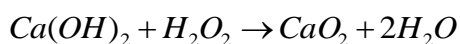
➤ **Inhibidores por reacción con la cal**

Los minerales de arsénico y antimonio disminuyen la disolución de oro a medida que aumenta la alcalinidad ya que consumen cal hidratada, $Ca(OH)_2$, oxígeno y cianuro, formando compuestos indeseados como arseniatos y antimoniatos de calcio

➤ **Pasivación superficial de la interfase de reacción**

Existe elementos que pasivan al oro o que podrían formar compuestos insolubles sobre la superficie del oro, estos compuestos son:

- El ion Sulfuro (S^{2+}), cuyo efecto depresivo, retardando la disolución de oro. Algunas veces la disolución puede ser detenida completamente, debido a la formación de una película aurosulfurada insoluble sobre la superficie de las partículas de oro
- El peróxido de calcio (CaO_2) produce un efecto de pasivación superficial semejante. Este peróxido se produce como una reacción secundaria al usar hidróxido de calcio (cal hidratada o apagada), para controlar el pH, según la siguiente reacción [3]



1.4 Formulación del problema

¿En que medida se puede recuperar el oro y la plata usando el pre-tratamiento de los relaves mediante biooxidación bacteriana en función del tiempo y porcentaje de sólidos?

1.5 Hipótesis

En la recuperación de oro y plata realizada mediante procesos convencionales, se observa que el tiempo y porcentaje de sólidos son de gran influencia; así, siendo el pre-tratamiento de biooxidación bacteriana un proceso más económico y rentable, se realizaran las pruebas en función del tiempo y porcentaje de sólidos con la finalidad de obtener la mayor recuperación de oro y plata.

Según estudios realizados, usando el pre-tratamiento de biooxidación bacteriana se produce un rendimiento del 70-90%. Dicho proceso consiste en el uso de un microorganismo mesófilo del género *thiobacillus* que tiene la habilidad de oxidar los minerales sulfurados, permitiendo la liberación de los metales valiosos contenidos en ellos, haciendo de esta manera más fácil la recuperación.

1.6 Objetivos

➤ General:

Recuperar la mayor cantidad posible de oro y plata existentes en los relaves mediante el pre-tratamiento de biooxidación bacteriana en función del tiempo y porcentaje de sólidos.

➤ Especificos:

- Fomentar el uso de la lixiviación bacteriana para el pre- tratamiento de relaves y/o minerales de baja ley en la recuperación de oro y plata.
- Proponer un proceso más económico y rentable a las diversas empresas mineras dedicadas a la explotación de oro y plata.

1.7 Importancia del problema

Se justifica el presente proyecto porque será una respuesta a problemas económicos, ya que según estudios realizados en otros países y actualmente en el Perú para minerales de baja ley utilizando biooxidación bacteriana han tenido un rendimiento del 70%-90% de recuperación de los metales, como los relaves que provienen de las plantas metalúrgicas que tienen baja ley, por lo tanto el proceso de biooxidación bacteriana también será aplicable al tratamiento de los relaves.

CAPITULO II

MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 MATERIAL

2.1.1 Material de estudio.

El material de estudio que se usó en el presente trabajo de investigación es una muestra de un relave sulfurado proveniente del Laboratorio de Metalurgia de la Universidad Nacional de Trujillo

2.1.1.1 Características del Mineral

- A. Físicas.** El mineral es un sulfuro, que se encuentra principalmente constituido por pirita y arsenopirita, con un color plomo negrusco característico de los minerales sulfurados.
- B. Químicas.** El análisis químico del mineral se realizó por vía seca y espectrofotometría. En la tabla 2.1 se muestran los resultados del análisis químico.

Tabla 2.1 Análisis químico del mineral de cabeza

Elemento	Contenido
Au	5,00 g/TM
Ag	210,00 g/TM
Cu	67,01 g/TM
Fe	17,40 %
S	7,89 %

Fuente: Laboratorios de Ingeniería Química

2.1.2 Equipos, instrumentos, materiales y reactivos

A. Equipos e instrumentos

- Chancadora primaria de quijada
- Molino de bolas a nivel laboratorio
- Horno eléctrico
- Plancha de calentamiento con su campana extractora de gases
- Balanza (cap. máx. 200 g)
- Balanza analítica (0,000 mg)
- Espectrofotómetro
- Compresor de aire automático
- 6 biorreactores airlift de vidrio (cap. 2,5 L)
- 2 biorreactores tipo tanque agitado (cap 1,5 L)
- 2 bombas de aire para acuario
- Microscopio de contraste de fases
- Cámara de Neubauer
- Soporte universal para 6 biorreactores
- Autoclave

B. Materiales

- Balón de 1000 ml
- Matraces erlenmeyer de 500 ml
- Pipetas de 2, 5 y 10 ml
- Probetas de 100 y 500 ml
- Lunas de reloj
- Crisoles de 30g
- Copelas de magnesita
- Bagueta
- Asa microbiológica de siembra
- Lunas portaobjetos y cubreobjetos
- Cinta pH y pH-metro digital
- Mangueras de peceras

- Llaves para acuario
- Piedras difusoras

C. Reactivos

• Agua destilada	:	H ₂ O
• Ácido sulfúrico	:	H ₂ SO ₄
• Sulfato de amonio	:	(NH ₄) ₂ SO ₄
• Cloruro de potasio	:	KCl
• Fosfato ácido de potasio	:	K ₂ HPO ₄
• Sulfato de magnesio heptahidratado	:	MgSO ₄ .7H ₂ O
• Nitrato de calcio	:	Ca(NO ₃) ₂
• Sulfato ferroso heptahidratado	:	FeSO ₄ . 7H ₂ O
• Carbonato de sodio	:	Na ₂ CO ₄
• Litargirio	:	PbO
• Bórax	:	Na ₂ B ₄ O ₇
• Sílice	:	SiO ₂
• Harina	:	C
• Cianuro de sodio	:	NaCN
• Nitrato de plata	:	AgNO ₃
• Plomo metálico	:	Pb
• Ácido nítrico	:	HNO ₃

D. Liofilizado de la bacteria Thiobacillus Ferrooxidans

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Diseño experimental

El diseño experimental que se usó para el análisis de los resultados de las pruebas experimentales, es el modelo tipo bifactorial.

Los factores y niveles así como el diseño factorial, se muestran en las tablas 2.2 y 2.3 respectivamente.

A. Variables independientes

- Tiempo de biooxidación (con niveles de 15, 25 y 30 días)
- % de sólidos (con niveles de 15, 20 y 25 %)

B. Variables dependiente

- Porcentaje de extracción de oro.
- Porcentaje de extracción de plata.

C. Número total de pruebas

- El número de pruebas experimentales se determino de la siguiente manera

$$\text{N}^\circ \text{ de Pruebas} = \text{Niveles}^{\text{Factores}} * \text{Repeticiones}$$

$$\text{Factores} = 2$$

$$\text{Niveles} = 3$$

$$\text{Repeticiones} = 3$$

$$\text{N}^\circ \text{ de pruebas} = 3^2 \times 3 = 27 \text{ pruebas experimentales}$$

Tabla 2.2 Factores y niveles para el diseño experimental

FACTORES	B			
	NIVELES	B1	B2	B3
A	A1	A1.B1	A1.B2	A1.B3
	A2	A2.B1	A2.B2	A2.B3
	A3	A3.B1	A3.B2	A3.B3

Tabla 2.3 Matriz de contrastación del diseño factorial

Factores	Niveles
A: Porcentaje de sólidos	A1 = 15% A2 = 20% A3 = 25%
B: Tiempo de Biooxidación	B1 = 15 días B2 = 25 días B3 = 30 días

2.2.2 Procedimiento experimental

➤ **Construcción de los biorreactores Airlift**

Se procedió a la construcción de los biorreactores a partir de botellas de vidrio de 2 y de 1 litro, dándoles la forma que se muestra en la figura II.a del apéndice II, y utilizamos focos fluorescentes en desuso con recortes de botellas pequeñas para el asa interna, todo ello unido con silicona, los cuales fueron usados para el proceso de biooxidación; para el proceso de reactivación se usó 2 biorreactores de 1.5 litros que tienen la forma de la figura II.b del apéndice II, los cuales fueron llevados a esterilizar en luz ultravioleta.

➤ **Preparación del medio de cultivo 9K (Nutrientes) y la fuente energética**

Se preparó 1400 ml del medio de cultivo 9K de acuerdo a la tabla 1.1, y con las cantidades de sales especificadas en ella, las cuales se disolvieron en agua destilada.

También se disolvió los 100g de sulfato ferroso en agua destilada (fuente energética) y se llevó a 600 ml, agregándolo luego a los 1400 ml del medio de cultivo 9K, haciendo un total de 2000 ml para la reactivación de la bacteria, y llevándolo a un pH de 2,5.

➤ **Reactivación de la bacteria**

Se tomaron 50 ml de 9K y con una asa de siembra se cogió un poco de bacteria liofilizada, y se le empezó a airear con bomba de acuario, se dejó por una semana y luego se trasvasó a unos biorreactores de 1,5 L. cada uno, a los cuales se les repartió equitativamente la solución antes preparada conteniendo el 9K mas la fuente energética, aireándolo con bombas de acuario y dejándolo por unas semanas, hasta alcanzar la concentración adecuada para la biooxidación.

El color característico amarillo caramelo (que aparece entre los 10 a 15 días), con un precipitado color rojizo, es lo que indica que la población bacterial está creciendo y que el sulfato ferroso se está convirtiendo en sulfato férrico;

entonces se debe agregar sulfato ferroso nuevamente a razón de 1 a 2 g diarios para reponer los consumidos por la bacteria.

➤ **Recuento de la población de bacterias**

Luego de varias semanas de hacer la reactivación de la bacteria, se procedió a hacer el recuento en la cámara de Neubauer, llevándolo a cabo en un microscopio de intercambio de fases, luego de un tiempo, de acuerdo al procedimiento del anexo II y III, la concentración obtenida fue de $1,05 \times 10^8$ bacterias/ml, haciendo diluciones posteriores para obtener la concentración de trabajo de $1,0 \times 10^7$, obteniendo de esta manera nuestro inóculo para la biooxidación.

➤ **Preparación del mineral (relave)**

Se tomó una muestra de relave de un mineral sulfurado, que había sido tratado por lixiviación con cianuro en el laboratorio de metalurgia, el mineral fue cuarteado y se tomó una muestra de aproximadamente 10 kg, se procedió a lavar el mineral con agua a fin de eliminar algunas impurezas como residuos de cianuro o sales que pudieran interferir en el proceso; se hicieron los análisis respectivos al mineral a fin de obtener los resultados mostrados en la tabla 2.1.

➤ **Acondicionamiento del mineral**

Se pesaron las diferentes muestras a fin de obtener los parámetros establecidos en la tabla X, y se hicieron las pruebas repartiéndolo en los biorreactores, por triplicado; se agregó el volumen de agua y medio de cultivo 9K establecidas en la tabla antes mencionada, y se dio un tiempo de acondicionamiento de 1 hora aproximadamente a fin de regular el pH en 2, para así agregar posteriormente las bacterias presentes en el inóculo.

➤ **Proceso de biooxidación**

Luego que el mineral estuvo acondicionado se agregó el inóculo en las cantidades especificadas en la tabla X, midiendo nuevamente el pH para

asegurar el éxito del proceso; con un control diario de éste parámetro, regulándolo con ácido sulfúrico.

Aquí se puso a pruebas las variables de operación estipuladas para este proceso, en los diferentes niveles de tiempo y porcentaje de sólidos (anexo V); llevándolo a cabo en biorreactores airlift; tres porcentajes de sólidos diferentes con su triplicado y en tres tiempos diferentes, con una aireación de entre 4 a 5 VVM y con una granulometría del mineral de 80% -malla 200.

➤ **Lavado**

Luego de transcurrido los diferentes tiempos de biooxidación, se dejó un tiempo de 5 horas para que se formara las dos fases líquido y sólido, siendo luego separadas. El sólido que es el mineral biooxidado se lavó 4 veces con agua de caño a fin de eliminar el azufre y otros iones presentes, luego se dejó secar el mineral para pasar luego a la cianuración respectiva.

➤ **Cianuración**

Una vez lavado y secado el mineral, se cianuro en botella por un tiempo de 70 horas, con las condiciones de operación y control que se especifican en el anexo IX, para la cianuración de oro y plata.

➤ **Lavado y secado**

Luego que el mineral ha sido cianurado, se separó el líquido del sólido por precipitación y se tomó la parte sólida, para ser llevados a analizar posteriormente.

➤ **Análisis de oro y plata por ensayos al fuego**

Las muestras sólidas finales de la cianuración, debidamente rotuladas, se llevaron a analizar por oro y plata por el método de ensayos al fuego (anexo VII): para obtener, por diferencia entre la ley inicial y la ley final, el porcentaje de oro y plata recuperada.

➤ **Procesamiento de datos**

Los resultados obtenidos experimentalmente de porcentaje de recuperación de oro y plata que se muestran en las tablas 3.1 y 3.3; fueron analizados estadísticamente, mediante el análisis de varianza y la prueba “F”, para lo cual consideramos un nivel de error de 0,05, que corresponde a un nivel de confianza de 95% el cual nos proporciona una buena seguridad en el análisis (cálculos detallados en el anexo I); los resultados se muestran en las tablas 3.2 y 3.4

Figura 2.1 Diagrama de bloques para la extracción de Au y Ag de un mineral mediante Lixiviación Bacteriana o biooxidación

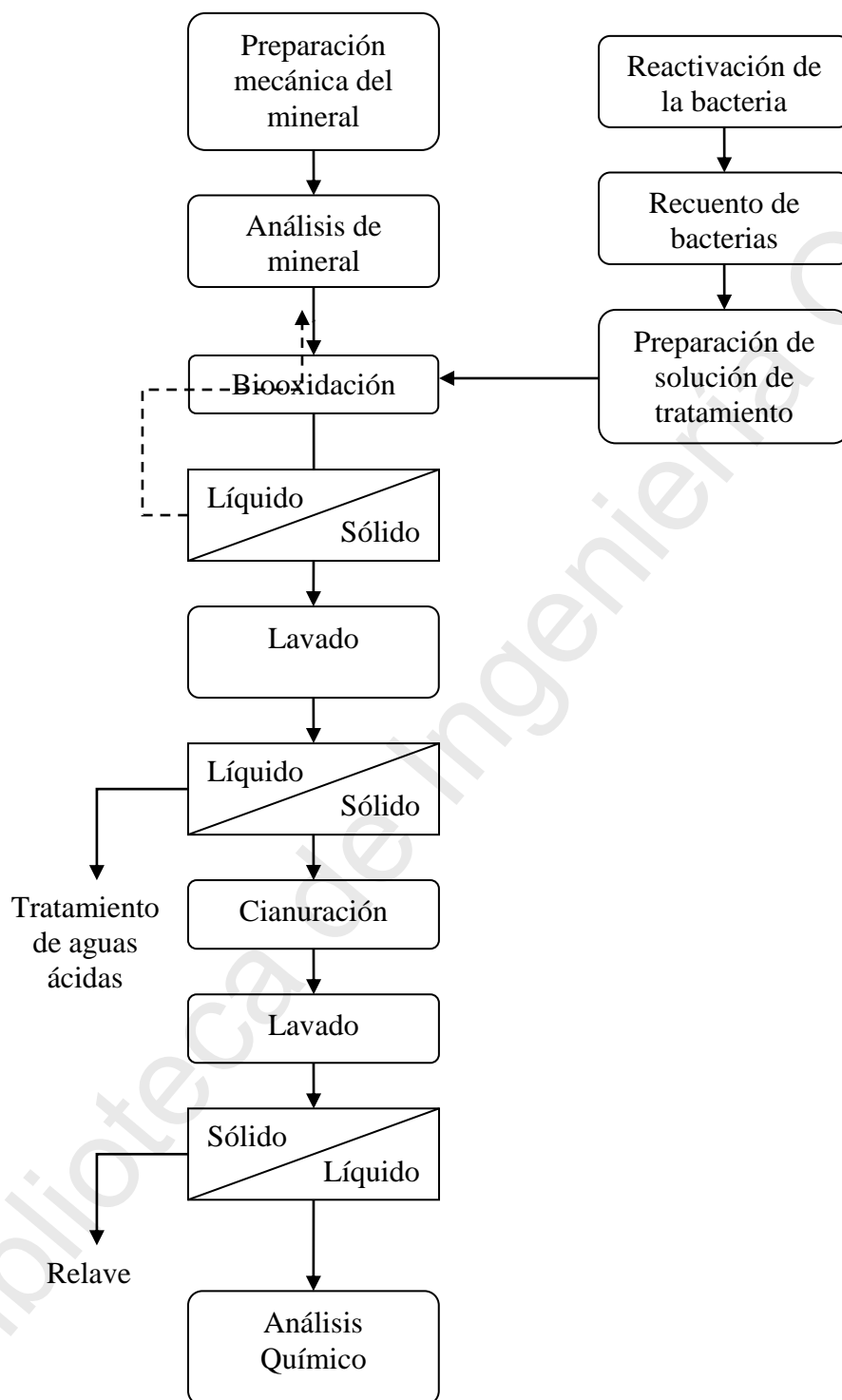
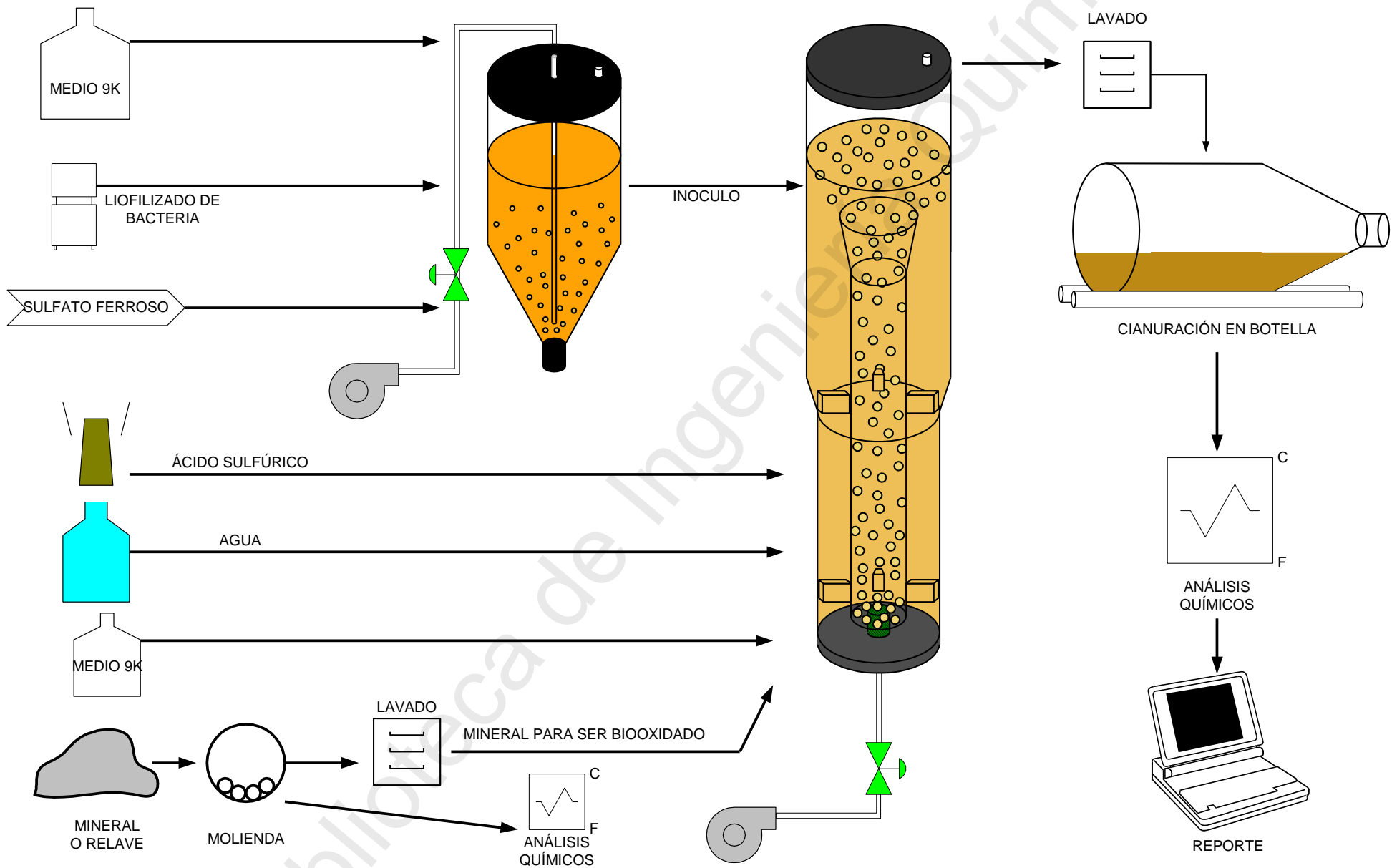


Figura 2.2 Diagrama de Flujo del Proceso de Biooxidación Bacteriana de un mineral



CAPÍTULO III

RESULTADOS

Tabla 3.1 Resultados del porcentaje de extracción de Au

FACTORES		Tiempo (días)					
		15		25		30	
Porcentaje de sólidos	15%	52,40	52,60 %	66,40	67,40 %	76,40	77,40 %
		51,80		67,20		80,20	
		53,60		68,40		78,40	
	20%	48,20	46,70 %	51,60	51,80 %	56,60	56,10 %
		47,80		50,20		54,40	
		45,20		52,00		55,60	
	25%	42,2	41,20 %	47,20	46,80 %	48,20	47,90 %
		41,8		45,60		46,20	
		40,2		46,40		47,60	

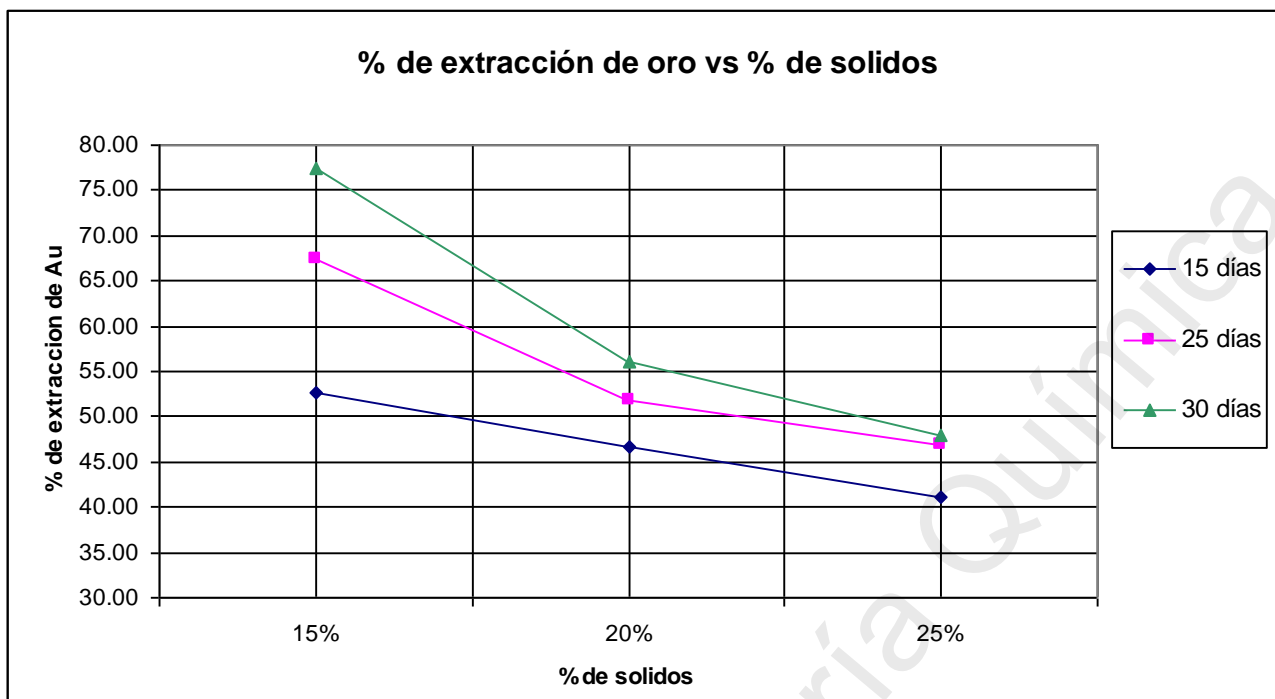


Figura 3.1 Influencia del % de sólidos y el tiempo en la extracción de Au

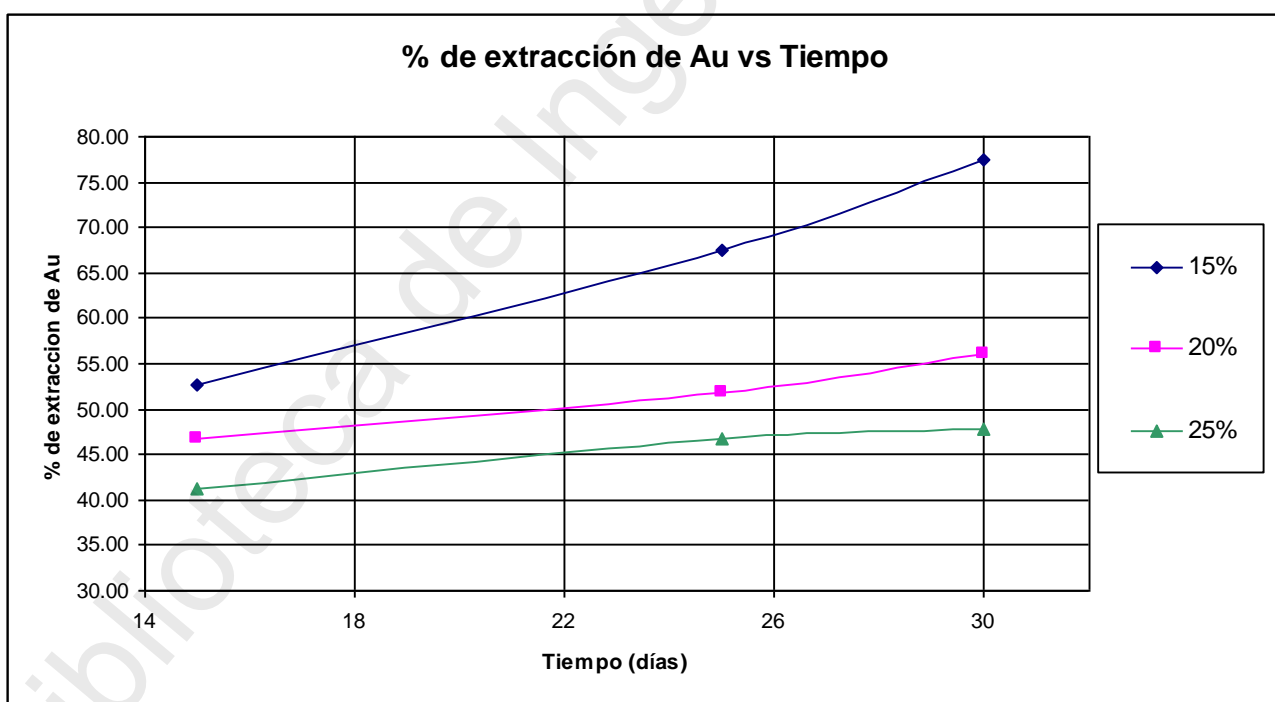


Figura3.2 Influencia del tiempo y el % de sólidos en la extracción de Au

Tabla 3.2 Resultados del análisis de varianza para la extracción de oro

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F _o	F _i
% sólidos (Factor A)	2102,71	2	1051,35	725,63	3,55
Tiempo (Factor B)	815,31	2	407,65	281,36	3,55
Iteración	353,57	4	88,39	61,01	2,93
Error	26,08	18	1,45		
Total	3297,67	26			

Tabla 3.3 Resultados del porcentaje de extracción de Ag

FACTORES		Tiempo de Biooxidación (días)					
		15		25		30	
Porcentaje de sólidos	15%	41,18	39,27 %	47,61	49,93 %	55,70	55,47 %
		33,32		49,29		54,57	
		43,32		52,91		56,13	
	20%	37,59	35,42 %	41,16	39,88 %	43,11	43,53 %
		33,56		38,58		45,73	
		35,11		39,89		41,73	
	25%	31,44	34,12 %	36,30	36,50 %	38,88	39,64 %
		34,26		39,51		40,18	
		36,65		33,67		39,86	

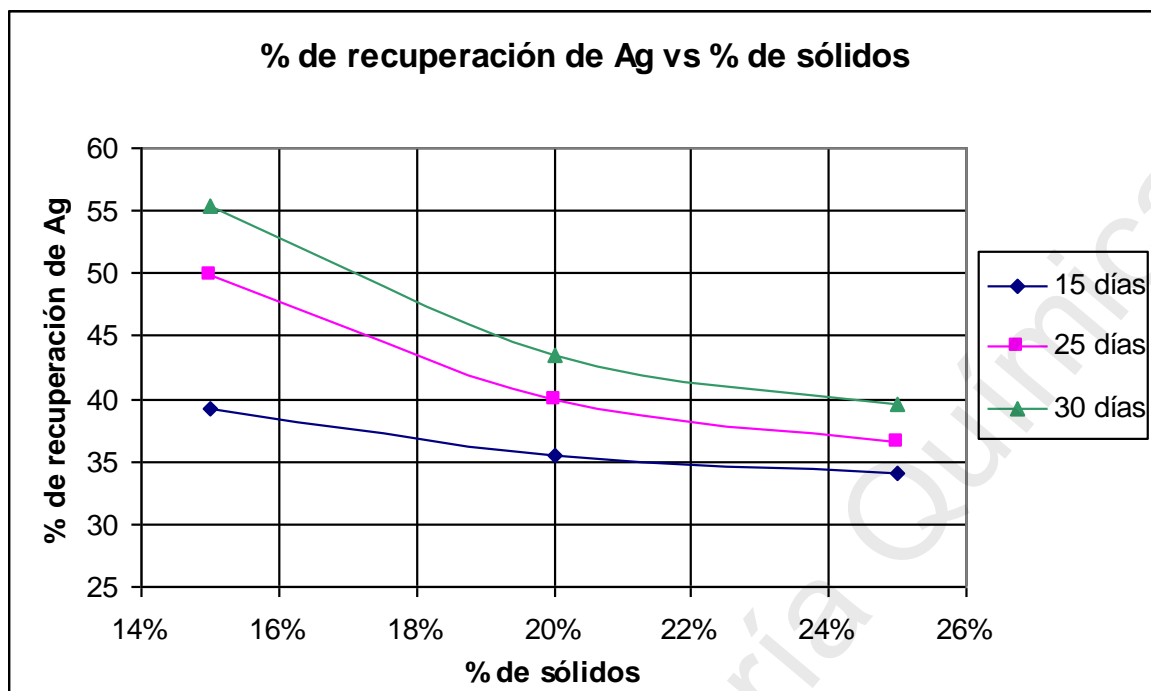


Figura 3.3 Influencia del % de sólidos y el tiempo en la extracción de Ag

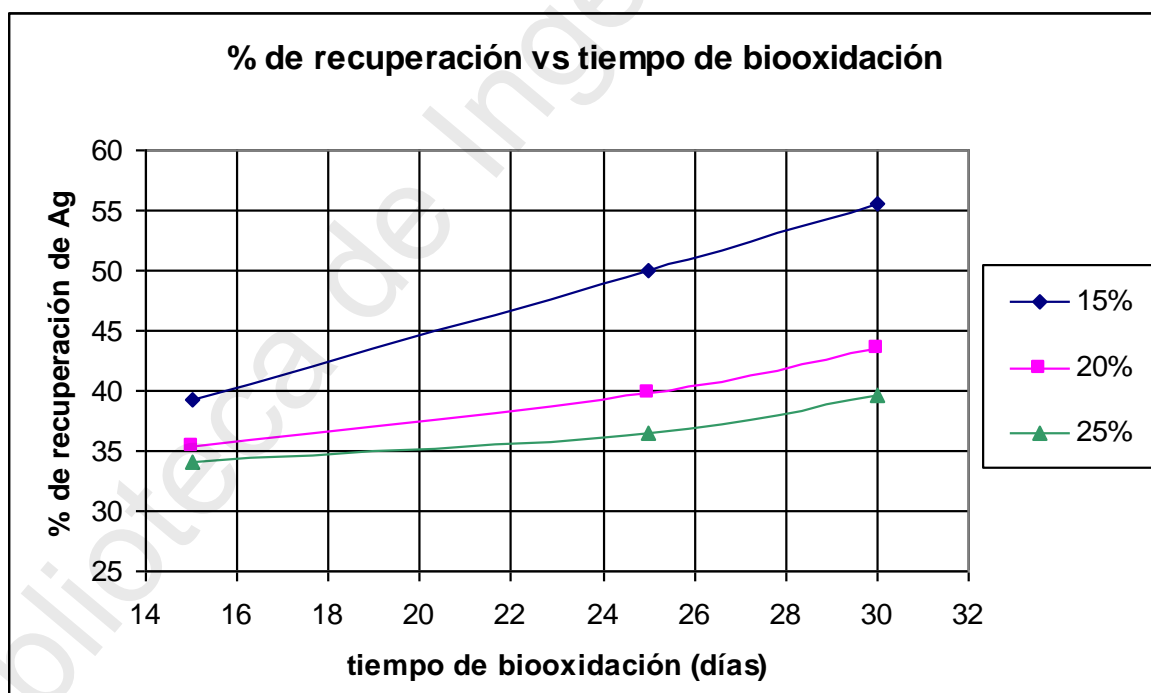


Figura3.4 Influencia del tiempo y el % de sólidos en la extracción de Ag

Tabla 3.4 Resultados del análisis de varianza para la extracción de plata

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	F _o	F _i
% sólidos (Factor A)	642,65	2	321,33	47,04	3,55
Tiempo (Factor B)	449,29	2	224,65	32,88	3,55
Iteración	102,10	4	25,53	3,74	2,93
Error	122,97	18	6,83		
Total	1317,02	26			

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

1. En la figura 3.1 y 3.3 se observa que para el 15% de sólidos en las pruebas, la variación del porcentaje de extracción de oro y plata respectivamente aumenta a medida que pasa el tiempo, siendo mayor que para el 20 y 25 %, observándose que para estos últimos la variación del porcentaje de extracción de oro y plata es mínima.
2. En la figura 3.2 y 3.4 se observa que en 30 días de biooxidación, la variación del porcentaje de extracción de oro y plata respectivamente aumenta a medida que disminuye el % de sólidos, siendo menor para los días 15 y 25, observándose que para estos últimos la variación del porcentaje de extracción de oro y plata también es mínima.
3. En la tabla 3.2 se tiene el análisis de varianza para la extracción de oro y se observa que los dos factores evaluados en el proceso influyen significativamente, siendo el porcentaje de sólidos el que más influye en comparación con el tiempo; además se puede decir que la iteración de ambos factores también son influyentes.
4. En la tabla 3.4 se tiene el análisis de varianza para la extracción de plata y se observa también que los dos factores evaluados en el proceso influyen pero menos que para el caso de la extracción de oro, observándose que la influencia de los dos factores es casi similar; además se puede decir que la iteración de ambos factores también son influyentes.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se determinó que el porcentaje de sólidos que permite una mayor extracción de oro y plata de un mineral es de 15 %; con un 77,40% de extracción de oro, estando este resultados dentro del rango encontrado por anteriores investigaciones que varía de 70 a 90% de extracción de oro; y 55,47% de extracción de plata, estando este resultado con un valor cercano a los resultados de investigaciones anteriores, no se alcanzan valores muy altos debido a que para lixiviar mejor la plata se necesita cianurar a una concentración de cianuro mas alta, no se lo hizo debido a que bajaría la lixiviación de oro.
- Se determinó que el tiempo adecuado para obtener una mayor extracción de oro y plata de un mineral es de 30 días, estando este dentro del rango recomendado por la bibliografía (15 a 30 días).
- Se concluye que para la extracción de oro la variable que tiene mayor importancia según los resultados y análisis de varianza es el porcentaje de sólidos presentes en el proceso de biooxidación.
- Se concluye que para la extracción de plata según los resultados y análisis de varianza la influencia del porcentaje de sólidos y del tiempo es casi similar.

5.2 Recomendaciones

Para las posteriores investigaciones se recomienda

- Un buen acondicionamiento del relave antes del proceso (lavado para eliminar cianuro u otras impurezas solubles presentes en el relave).
- Tener en cuenta la influencia de la temperatura sobre la reactivación de la bacteria y la biooxidación.
- Evaluar la concentración de la bacteria para el proceso de biooxidación a mayores concentraciones.
- Evaluar el flujo de aire en el biorreactor “airlif”.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acevedo F. et al, 1994. "Biooxidación de concentrados refractarios de oro en tanques agitados". Escuela de Ing. Bioquímica, Universidad Católica de Valparaíso. Editorial Addison-Wesley Iberoamericana. Valparaíso-Chile.
- [2] Acevedo F., 1988. "The use of reactors biomining processes". Electronic journal of biotechnology ISSN. Editorial Addison-Wesley Iberoamericana. Universidad Católica de Valparaíso - Chile.
- [3] Carranza F., El Proceso BRISA, 1983. "Estrategias de aplicación en función de la mineralogía del material a tratar". Editorial Prentice Hall. España.
- [4] Domíe E., 2001. "Hidrometalurgia fundamentos, procesos y aplicaciones". Editorial Addison-Wesley Iberoamericana. Santiago - Chile.
- [5] De la Torre E. y Guevara A. 2005 "Recuperación de oro a partir de minerales refractarios polisulfurados" Escuela politécnica nacional. Editoriaal Mc Graw Hill. Quito – Ecuador
- [6] Guerrero J., 1988. "Biotecnología en la disolución y recuperación de metales". I CONGRESO PERUANO DE BIOTECNOLOGÍA Y BIOINGENIERÍA. Editorial Prentice Hall. Trujillo - Perú.
- [7] Guerrero J., 1998. "Lixiviación bacteriana de concentrados de Zn". SEGUNDO CONGRESO NACIONAL DE MINERÍA. Trujillo-Perú.
- [8] Irwin R Miller/ Jhon E. Freud/ Richard Johnson. "Probabilidad y estadística para ingenieros"; Cuarta edición. Editorial Prentice Hall. México
- [9] LIMACHE J., 2003 "recuperación de oro a partir de minerales auríferos refractarios mediante lixiviación bacteriana indirecta con *thiobacillus ferrooxidans* utilizando un biorreactor airlift de lecho concéntrico" IX CONGRESO PERUANO DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA QUÍMICA. Chiclayo - Perú

[10] LOAYZA C. 1999. "Recuperación de Oro Mediante Biolixiviación", V SIMPOSIUM NACIONAL DE MINERÍA AURÍFERA. Lima-Perú.

[11] López F. y Alvarado E., 2000. "Influencia de la biooxidación, condición del mineral y granulometría en la extracción de oro y plata del mineral aurífero refractario de la Cia. Minera Sayapullo S.A, tratado por cianuración y thioureación". Tesis para optar título de Ingeniero Metalurgista. Trujillo - Perú.

[12] Mazuelos A. y Falencia L., 2001. "Ferric iron production in packed bed bioreactors: influence of pH, temperature, particle size, bacterial support material and type of air distributor". Editorial Prentice Hall. Universidad de Sevilla - España.

[13] Misan F., 1987. "Tecnología de la lixiviación bacteriana de mineral". 1era . Edición. Editorial Prentice Hall. Lima - Perú.

[14] Misari F., 1993. "Metalúrgica el oro". Primera edición. CEPECT. Editorial Prentice Hall. Lima- Perú.

[15] Natarajan A., 2001. "Bioreactor engineering for treating refractory gold - bearing concentrates. An Indian experience". Amsterdam – Inglaterra.

[16] Rubio J. 1991. "Metalurgia del oro". Editorial Vicente Rico. México. pp: 138

[17] VARGAS J. 1990. Metalurgia del oro y la plata. 2da. Edición. Editorial Iberoamerica. La Paz-Bolivia

[18] Rivero J. y otros, 2003. "Determinación de oro, plata, cobre, fierro y zinc en minerales por absorción atómica", Trujillo – Perú. Seminario de Absorción atómica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<http://www.biohidrica.cl> Publicada en junio del 2000. Revisado el 1 de julio de 2003

<http://depa.pquim.unam.mx/~relva/mailto> Publicada el 12 de octubre 1998. Revisado el 21 de junio de 2003

<http://www.monografias.com/cgi-bin/search.cgi?substring=0&bool=and&query=lixiviacion>

Publicada en abril del 2001. Revisado 01 de julio del 2003

ANEXOS

ANEXO I. CÁLCULOS EN EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO [8]

Tabla I. Varianza en el análisis estadístico

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	F _o
A	(a-1)	SS _A	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_{oA} = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	(b-1)	SS _B	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_{oB} = \frac{MS_B}{MS_E}$
Iteración (AB)	(a-1)(b-1)	SS _{AB}	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_{oAB} = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Error	ab(r-1)	SS _E	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(r-1)}$	
Total	abr-1	SS _T		

A. Suma total de cuadrados

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{abr}$$

B. Suma de cuadrados para el efecto principal del porcentaje de sólidos (A)

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{br} - \frac{y^2}{abr}$$

C. Suma de cuadrados para el efecto principal del tiempo de biooxidación (B)

$$SS_B = \sum_{j=1}^B \frac{y_j^2}{ar} - \frac{y^2}{abr}$$

D. Suma de cuadrados para la iteración entre porcentaje de sólidos y tiempo (AB)

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij}^2}{r} - \frac{y^2}{abr} - SS_A - SS_B$$

E. Suma de cuadrados para el error

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

F. Puntos porcentuales de la distribución F

$$F_{\alpha, v_1, v_2} \text{ (Ver tabla del anexo X)}$$

Donde:

v_1 = grados de libertad correspondiente

$v_2 = ab(r-1)$

$\alpha = 0,05$

G. Criterios de decisión

1. Si $F_{OA} > F_{\alpha, v_1, v_2}$: Entonces, se rechaza H_0 para el factor A (se concluye que existe efecto del factor A)
2. Si $F_{OB} > F_{\alpha, v_1, v_2}$: Entonces, se rechaza H_0 para el factor B (se concluye que existe efecto del factor B)
3. Si $F_{OAB} > F_{\alpha, v_1, v_2}$: Entonces, se rechaza H_0 para el factor AB (se concluye que existe interacción entre los factores AB)

1. DATOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA LA EXTRACCIÓN DEL ORO

Tabla II Resultados de la recuperación de Au a un tiempo de 15 días malla (-200)

Nº Pruebas	P(%) 15%			P(%) 20%			P(%) 25%		
	Ley _i	Ley _f	(% Ext)	Ley _i	Ley _f	(% Ext)	Ley _i	Ley _f	(% Ext)
1	5,00	2,38	52,40	5,00	2,59	48,20	5,00	2,89	42,20
2	5,00	2,41	51,80	5,00	2,61	47,80	5,00	2,91	41,80
3	5,00	2,32	53,60	5,00	2,74	45,20	5,00	2,99	40,20

Tabla III Resultados de la recuperación de Au a un tiempo de 25 días malla (-200)

Nº Pruebas	P(%) 15%			P(%) 20%			P(%) 25%		
	Ley _i	Ley _f	(% Ext)	Ley _i	Ley _f	(% Ext)	Ley _i	Ley _f	(% Ext)
1	5,00	1,68	66,40	5,00	2,42	51,60	5,00	2,64	47,20
2	5,00	1,64	67,20	5,00	2,49	50,20	5,00	2,72	45,60
3	5,00	1,58	68,40	5,00	2,40	52,00	5,00	2,68	46,40

Tabla IV Resultados de la recuperación de Au a un tiempo de 30 días malla (-200)

Nº Pruebas	P(%) 15%			P(%) 20%			P(%) 25%		
	Ley _i	Ley _f	(% Ext)	Ley _i	Ley _f	(% Ext)	Ley _i	Ley _f	(% Ext)
1	5,00	1,18	76,40	5,00	2,17	56,60	5,00	2,59	48,20
2	5,00	0,99	80,20	5,00	2,28	54,40	5,00	2,69	46,20
3	5,00	1,08	78,40	5,00	2,22	55,60	5,00	2,62	47,60

Tabla V Datos del porcentaje de extracción de oro para el análisis de varianza

FACTORES		Tiempo (días)						y _i
		15		25		30		
Porcentaje de sólidos	15%	52,40	157,80	66,40	202,00	76,40	235,00	594,80
		51,80		67,20		80,20		
		53,60		68,40		78,40		
	20%	48,20	141,20	51,60	153,80	56,60	166,60	
		47,80		50,20		54,40		
		45,20		52,00		55,60		
	25%	42,20	124,20	47,20	139,20	48,20	142,00	
		41,80		45,60		46,20		
		40,20		46,40		47,60		
y_j			423,20		495,00		543,60	1461,80

A. Suma total de cuadrados

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{abr}$$

$$= (52,40)^2 + (51,80)^2 + \dots + (46,20)^2 + (47,60)^2 - \frac{(1461,80)^2}{3 \times 3 \times 3}$$

$$= 3297,67$$

B. Suma de cuadrados para el efecto principal del porcentaje de sólidos (A)

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{br} - \frac{y^2}{abr}$$

$$= \frac{(594,80)^2 + (461,60)^2 + (405,40)^2}{3 \times 3} - \frac{(1461,80)^2}{3 \times 3 \times 3}$$

$$= 2102,71$$

C. Suma de cuadrados para el efecto principal del tiempo de biooxidación (B)

$$SS_B = \sum_{j=1}^B \frac{y_j^2}{ar} - \frac{y^2}{abr}$$

$$= \frac{(423,20)^2 + (495,00)^2 + (543,60)^2}{3 \times 3} - \frac{(1461,80)^2}{3 \times 3 \times 3}$$

$$= 815,31$$

D. Suma de cuadrados para la iteración entre porcentaje de sólidos y tiempo (AB)

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij}^2}{r} - \frac{y^2}{abr} - SS_A - SS_B$$

$$= \frac{(157,80)^2 + (141,20)^2 + \dots + (166,60)^2 + (142,00)^2}{3} - \frac{(1461,80)^2}{3 \times 3 \times 3} - 2102,71 - 815,31$$

$$= 353,57$$

E. Suma de cuadrados para el error

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

$$= 3297,67 - 2102,71 - 815,31 - 353,57$$

$$= 26,08$$

F. Puntos porcentuales de la distribución F

$$F_{\alpha, v_1, v_2} \quad (\text{Ver anexo X})$$

Siendo:

Para el factor A y B

$$v_1 = 2$$

$$v_2 = 3 \times 3 (3-1) = 18$$

$$\alpha = 0,05$$

Para la iteración

$$v_1 = 4$$

$$v_2 = 3 \times 3 (3-1) = 18$$

$$\alpha = 0,05$$

2. DATOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA LA EXTRACCIÓN DE PLATA

Tabla VI Resultados de la recuperación de Ag a un tiempo de 15 días malla (-200)

Nº Pruebas	P(%) 15%			P(%) 20%			P(%) 25%		
	Ley _i	Ley _r	(%Ext)	Ley _i	Ley _r	(%Ext)	Ley _i	Ley _r	(%Ext)
1	210,00	123,53	41,18	210,00	131,06	37,59	210,00	143,98	31,44
2	210,00	140,02	33,32	210,00	139,53	33,56	210,00	138,06	34,26
3	210,00	119,02	43,32	210,00	136,26	35,11	210,00	133,03	36,65

Tabla VII Resultados de la recuperación de Ag a un tiempo de 25 días malla (-200)

Nº Pruebas	P(%) 15%			P(%) 20%			P(%) 25%		
	Ley _i	Ley _r	(%Ext)	Ley _i	Ley _r	(%Ext)	Ley _i	Ley _r	(%Ext)
1	210,00	110,02	47,61	210,00	123,56	41,16	210,00	133,76	36,30
2	210,00	106,50	49,29	210,00	128,98	38,58	210,00	127,02	39,51
3	210,00	98,89	52,91	210,00	126,23	39,89	210,00	139,30	33,67

Tabla VIII Resultados de la recuperación de Ag a un tiempo de 30 días malla (-200)

Nº Pruebas	P(%) 15%			P(%) 20%			P(%) 25%		
	Ley _i	Ley _r	(%Ext)	Ley _i	Ley _r	(%Ext)	Ley _i	Ley _r	(%Ext)
1	210,00	93,02	55,70	210,00	119,46	43,11	210,00	128,36	38,88
2	210,00	95,41	54,57	210,00	113,96	45,73	210,00	125,63	40,18
3	210,00	92,12	56,13	210,00	122,36	41,73	210,00	126,30	39,86

Tabla IX datos del porcentaje de extracción de plata para el análisis de la varianza

FACTORES		Tiempo (días)						y _i	
		15		25		30			
Porcentaje de sólidos	15%	41,18	117,82	47,61	149,80	55,70	166,40	434,03	
		33,32		49,29		54,57			
		43,32		52,91		56,13			
	20%	37,59	106,26	41,16	119,63	43,11	130,58		356,48
		33,56		38,58		45,73			
		35,11		39,89		41,73			
	25%	31,44	102,35	36,30	109,49	38,88	118,91		330,74
		34,26		39,51		40,18			
		36,65		33,67		39,86			
y_j			326,43		378,92		415,90	1121,25	

A. Suma total de cuadrados

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{abr}$$

$$= (41,18)^2 + (33,32)^2 + \dots + (40,18)^2 + (39,86)^2 - \frac{(1121,25)^2}{3 \times 3 \times 3} = 3297,67$$

B. Suma de cuadrados para el efecto principal del porcentaje de sólidos (A)

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{br} - \frac{y^2}{abr}$$

$$= \frac{(594,80)^2 + (461,60)^2 + (405,40)^2}{3 \times 3} - \frac{(1461,80)^2}{3 \times 3 \times 3}$$

$$= 2102,71$$

C. Suma de cuadrados para el efecto principal del tiempo de biooxidación (B)

$$SS_B = \sum_{j=1}^B \frac{y_j^2}{ar} - \frac{y^2}{abr}$$

$$= \frac{(423,20)^2 + (495,00)^2 + (543,60)^2}{3 \times 3} - \frac{(1461,80)^2}{3 \times 3 \times 3}$$

$$= 815,31$$

D. Suma de cuadrados para la interacción entre porcentaje de sólidos y tiempo (AB)

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij}^2}{r} - \frac{y^2}{abr} - SS_A - SS_B$$

$$= \frac{(157,80)^2 + (141,20)^2 + \dots + (166,60)^2 + (142,00)^2}{3} - \frac{(1461,80)^2}{3 \times 3 \times 3} - 2102,71 - 815,31$$

$$= 353,57$$

E. Suma de cuadrados para el error

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

$$= 3297,67 - 2102,71 - 815,31 - 353,57$$

$$= 26,08$$

F. Puntos porcentuales de la distribución F

$$F_{\alpha, v_1, v_2} \quad (\text{Ver anexo X})$$

Siendo:

Para el factor A y B

$$v_1 = 2$$

$$v_2 = 3 \times 3 (3-1) = 18$$

$$\alpha = 0,05$$

Para la iteración

$$v_1 = 4$$

$$v_2 = 3 \times 3 (3-1) = 18$$

$$\alpha = 0,05$$

ANEXO II. RECUENTO DE BACTERIAS EN LA CÁMARA DE NEUBAUER

- La Cámara de Neubauer tiene 25 celdas distribuidas en un cuadrado de 5 x 5 celdas, de 0,2 mm de lado en cada celda; y entre la laminilla cubreobjetos y la cámara queda un espacio de 0,1 mm de altura; obteniendo un volumen de celda de:

$$\text{Volumen de la celda en la cámara} = (0,2 \text{ mm})(0,2 \text{ mm})(0,1 \text{ mm})$$

$$\text{Volumen de celda} = 0,004 \text{ mm}^3$$

$$\text{Volumen de celda} = 0,004 \text{ mm}^3 \times \frac{1 \text{ cm}^3}{1000 \text{ mm}^3}$$

$$\boxed{\text{Volumen de celda} = 4 \times 10^{-6} \text{ cm}^3}$$

- Para hacer el recuento se procede a colocar una laminilla cubreobjetos sobre la cámara, y se inyecta con una pipeta una muestra del inóculo a analizar; entre la laminilla y la cámara, esperando a que se desplace por todo el interior de la cámara.
- Se lleva la muestra al microscopio de intercambio de fases y se empieza a contar las bacterias presentes en cada celda de las esquinas de la cámara y la del centro, dando un total de 5 celdas, luego le sacamos el promedio de bacterias por celda y obtenemos la concentración de bacterias por la fórmula siguiente

$$C_{bact} = \frac{N^{\circ} \text{ prom. de bacterias}}{\text{Volumen de celda}}$$

$$\boxed{C_{bact} = \frac{N^{\circ} \text{ prom de bacterias}}{4 \times 10^{-6} \text{ cm}^3}}$$

En la Figura del apéndice I se muestra la figura como se observa la cámara de Neubauer al microscopio y las celdas usadas en el recuento.

ANEXO III. CÁLCULOS PARA EL RECuento DE BACTERIAS EN LA CÁMARA DE NEUBAUER

$$\boxed{\text{Volumen de celda} = 4 \times 10^{-6} \text{ cm}^3}$$

$$\boxed{C_{bact} = \frac{N^{\circ} \text{ prom de bacterias}}{4 \times 10^{-6} \text{ cm}^3}} \dots\dots\dots(I)$$

N° promedio de bacterias en el recuento = 405

Reemplazando en ecuación (I) tenemos

$$C_{bact} = \frac{405 \text{ bacterias}}{4 \times 10^{-6} \text{ cm}^3}$$

$$\boxed{C_{bact} = 1,0 \times 10^8 \frac{\text{bacterias}}{\text{cm}^3}}$$

Biblioteca de Ingeniería Química

ANEXO IV. CÁLCULOS PARA HALLAR LAS VARIABLES DEL PROCESO

Datos generales

- Densidad del inóculo líquido (δ_{liq}): 1,05 g/ml
- Densidad del mineral (δ_{mine}) : 4,02 g/ml
- Volumen total de trabajo (V_T) : 2400 ml

Fórmulas globales

$$V_{liq} + V_{mineral} = V_T \dots\dots\dots(1)$$

Pero $V = W / \delta$

Reemplazando en (1) tenemos

$$\frac{W_{liq}}{\delta_{liq}} + \frac{W_{mineral}}{\delta_{mineral}} = 1400 \dots\dots\dots(2)$$

▪ CÁLCULOS PARA UN 15% DE SÓLIDOS

Relación sólido líquido

$$\frac{L}{S} = \frac{0,85}{0,15}, \text{ entonces tenemos: } L = \frac{17S}{3} \text{ ó } W_{liq} = \frac{17W_{mineral}}{3} \dots\dots\dots(3)$$

Reemplazando datos generales y ecuación (3) en (2) tenemos

$$\frac{17 W_{mineral}}{3 (1,05)} + \frac{W_{mineral}}{4,02} = 2400$$

$$W_{mineral} \left(\frac{17}{3,15} + \frac{1}{4,02} \right) = 2400$$

$$W_{mineral} = 425,1g$$

$$V_{\text{mineral}} = \frac{425,1g}{4,02g/ml} = 105,7ml$$

$$V_{\text{liq}} = V_T - V_{\text{mineral}} = 2400 \text{ ml} - 105,7 \text{ ml}$$

$$V_{\text{liq}} = 2294,3ml$$

El volumen de 9K es $\frac{1}{4}$ del volumen del líquido total, así tenemos

$$V_{9k} = \frac{V_{\text{liq}}}{4} \dots\dots(4)$$

$$V_{9k} = \frac{2294,3}{4}$$

$$V_{9k} = 573,6ml$$

Sabiendo que la concentración de bacterias de la fase líquida debe ser de aproximadamente igual a 1×10^7 bacterias/ml, y el recuento de bacterias del inóculo dio un resultado de.

$$\text{Concentración de bacterias} = 1 \times 10^8 \text{ bacterias/ml}$$

Luego tenemos

$$\text{Volumen de inóculo (V}_I\text{)} = V_{\text{liq}} * 10^7/10^8 \text{ ó } V_I = \frac{V_{\text{liq}}}{10} \dots\dots(5)$$

$$V_I = 2294,3 \text{ ml} / 10$$

$$V_I = 229,4ml$$

$$\text{Luego: } V_{AD} = V_{\text{liq}} - V_{9k} - V_I \dots\dots(6)$$

$$V_{AD} = 2294,3ml - 573,6ml - 229,4 \text{ ml}$$

$$V_{AD} = 1491,3ml$$

▪ **CALCULOS PARA UN 20% DE SÓLIDOS**

Relación sólido líquido

$$\frac{L}{S} = \frac{0,80}{0,20}, \text{ entonces tenemos: } L = 4S \text{ ó } \boxed{W_{liq} = 4S} \dots\dots\dots(7)$$

Reemplazando datos generales y ecuación (7) en (2) tenemos

$$4 \frac{W_{\text{mineral}}}{1,05} + \frac{W_{\text{mineral}}}{4,02} = 2400$$

$$W_{\text{mineral}} \left(\frac{4}{1,05} + \frac{1}{4,02} \right) = 2400$$

$$\boxed{W_{\text{mineral}} = 591,4g}$$

$$V_{\text{mineral}} = \frac{591,4g}{4,02g/ml} = 147,1ml$$

$$V_{liq} = V_T - V_{\text{mineral}} = 2400 \text{ ml} - 147,1 \text{ ml}$$

$$\boxed{V_{liq} = 2252,9ml}$$

De ecuación (4) tenemos

$$\boxed{V_{gk} = 563,2ml}$$

De ecuación (5) tenemos

$$V_I = 2252,9 \text{ ml} / 10$$

$$\boxed{V_I = 225,3ml}$$

Luego de ecuación (6)

$$V_{AD} = 2252,9ml - 563,2ml - 225,3 \text{ ml}$$

$$\boxed{V_{AD} = 1464,4ml}$$

▪ CALCULOS PARA UN 25% DE SÓLIDOS

Relación sólido líquido

$$\frac{L}{S} = \frac{0,75}{0,25}, \text{ entonces tenemos: } L = 3S \text{ ó } \boxed{W_{liq} = 3S} \dots\dots\dots(8)$$

Reemplazando datos generales y ecuación (8) en (2) tenemos

$$3 \frac{W_{\text{mineral}}}{(1,05)} + \frac{W_{\text{mineral}}}{4,02} = 2400$$

$$W_{\text{mineral}} \left(\frac{3}{1,05} + \frac{1}{4,02} \right) = 2400$$

$$\boxed{W_{\text{mineral}} = 772,7g}$$

$$V_{\text{mineral}} = \frac{772,7g}{4,02g/ml} = 192,2ml$$

$$V_{liq} = V_T - V_{\text{mineral}} = 2400 \text{ ml} - 192,2 \text{ ml}$$

$$\boxed{V_{liq} = 2207,8ml}$$

De ecuación (4) tenemos

$$V_{9k} = \frac{2207,8}{4}$$

$$\boxed{V_{9k} = 552ml}$$

De ecuación (5) tenemos

$$V_I = 2207,8 \text{ ml} / 10$$

$$\boxed{V_I = 220,8ml}$$

Luego de ecuación (6)

$$\text{Luego: } V_{AD} = V_{liq} - V_{9k} - V_I \dots\dots\dots(6)$$

$$V_{AD} = 2207,8\text{ml} - 552\text{ml} - 220,8 \text{ ml}$$

$$V_{AD} = 1435 \text{ ml}$$

Tabla X Resumen de datos

% de sólidos	W_{mineral} (g)	V_{liq}(ml)	V_{9k}(ml)	V_I(ml)	V_{AD}(ml)
15	425,1	2294,3	573,6	229,4	1491,3
20	591,4	2252,9	563,2	225,3	1464,4
25	772,7	2207,8	552,0	220,8	1435,0

ANEXO V. PRUEBAS DE BIOOXIDACIÓN

A. Condiciones

Volumen total del proceso = 2400 ml

[Bacteria] = 1×10^7 Bacterias / ml

Temperatura = 23 – 25° C.

Flujo de Aire = 4 vvm

B. Codificación de las pruebas

% de sólidos(A)

a1 = 15%

a2 = 20%

a3 = 25%

Tiempo de biooxidación (B)

b1 = 15 días

b2 = 25 días

b3 = 30 días

Tabla XI Codificación de pruebas

% de sólidos	Tiempo (días)		
	15	25	30
15	1	10	19
	2	11	20
	3	12	21
20	4	13	22
	5	14	23
	6	15	24
25	7	16	25
	8	17	26
	9	18	27

ANEXO VII. ANÁLISIS DE ORO Y PLATA POR VÍA SECA

1. Pasos a seguir para el análisis de oro en un mineral, por vía seca.

- a. Pesarse la muestra (previamente preparada), con una precisión de 3 dígitos de gramo, en crisoles de 30 o 50 gramos de capacidad, según se requiera, conteniendo flux en la relación que se muestra en la tabla V, el peso de la muestra es variable (5 a 30 g).
- b. Agregar plata como nitrato o cloruro, para incuarterar, para muestras sulfuradas agregar nitrato de potasio, y para muestras oxidadas agregar harina, mezclar bien y cubrir con una ligera capa de bórax.
- c. Con la ayuda de una tenaza, colocar el crisol en el horno eléctrico, o de petróleo, que se encuentra precalentada entre 900° C a 1000° C por un tiempo promedio de 50 a 60 min.
- d. Luego retirar el crisol y vaciar el contenido en moldes cónicos, llamados lingoteras y dejar enfriar.
- e. Separar el régulo de la escoria, dando unos golpes, luego limpiar el régulo de la escoria adherida a éste, dándole golpes con un martillo, moldeándolo en forma cúbica.
- f. Colocar el régulo, en una copela, que ha sido precalentada y que se encuentra en el horno de copelación, y dejarla por un espacio de 55 a 60 minutos a una temperatura de 870° C a 900° C.
- g. Retirar la copela del horno conteniendo un botón llamado doré (oro-plata), laminar este botón, dándole golpes con un martillo o en una laminadora, para darle mejor área de ataque y colocarlo en un crisol de porcelana para luego llevarlo a la etapa de partición.
- h. En la etapa de partición, se agrega ácido nítrico (1:6) al crisol de porcelana, llevar a calentar en la plancha eléctrica lentamente, hasta finalizar el ataque, luego cambiar el ácido a más concentrado (1:1), para asegurar la dilución y así separación completa de la plata, teniendo cuidado de no atacar a temperaturas elevadas, para no diseminar el oro y perderlo al lavar, el ataque termina cuando ya no se desprenden burbujas del botón.
- i. Retirar el ácido y lavar el oro 3 veces con agua destilada caliente, con cuidado de no perder muestra.

- j. Poner el crisol conteniendo la muestra de oro en la plancha caliente, para su secado total y después llevar a calcinar en el horno a 700° C, durante unos minutos (1-5 minutos).
- k. Dejar enfriar los crisoles, y luego llevar a su pesado final, luego los resultados, son llevados al cálculo respectivo con la fórmula siguiente y reportada en g/TM (gramos por tonelada o ppm).

$$\text{Ley de oro(g/TM)} = \frac{\text{Peso del botón (g)} \times 10^6}{\text{Peso de Muestra (g)}}$$

Reactivos a usar

Flux de fundición

- Litargirio
- Carbonato de Sodio
- Bórax
- Sílice
- Nitrato de Potasio
- Harina
- Nitrato o Cloruro de Plata

Solución de Ataque

- Ácido Nítrico diluido
- Agua destilada

Tabla XII Pesos de los componentes del flux para 20 g de muestra de mineral.

Componente	Para mineral oxidado	Para mineral sulfurado
Peso de muestra	20 g	20 g
Bórax	10 g	10 g
Carbonato de sodio	20 g	20 g
Litargirio	60 g	60 g
Harina	4 g	-
Sílice	2 g	2 g
Nitrato de potasio	-	4 g

2. Pasos a seguir para el análisis de plata en un mineral, por vía seca.

- a. Para el análisis por plata, se siguen los mismos pasos que para el análisis de oro, con la diferencia de que no se agrega plata en el pesado de muestras o pesado inicial; además se debe tener cuidado con la temperatura al momento de copelar, para evitar pérdidas por evaporación.
- b. Luego de pesado el doré, que sale de copelación, éste es encuartado y juntado para el ataque y separación del oro que se halla en el doré; la ley de plata se encuentra por la diferencia del doré con el peso del oro.

ANEXO VII ANÁLISIS QUÍMICO DE CIANURO LIBRE.**1. Preparación de la solución de nitrato de plata (AgNO_3)**

- Pesar 4,3342g de nitrato de plata en una balanza analítica
- Agregar el nitrato de plata a una fiola de 1000 ml disolviéndolo completamente y luego enrasar
- La solución cristalina se debe guardar en un frasco de color ámbar
- La equivalencia química de la solución será que $1 \text{ ml AgNO}_3 = 0,0025 \text{ g NaCN}$.

2. Procedimiento para la valoración de una solución de AgNO_3

- Pesar 0,5 g de NaCN q.p
- Pesar 0,5 g de NaOH
- Adicionar a un vaso de precipitación de 400 ml y aforar hasta 200 ml con agua destilada agitando para obtener una completa disolución.
- Para obtener el consumo o gasto práctico de AgNO_3 se titula 4 veces la solución preparada de NaCN, tomando como muestra 10 ml para cada una. El reporte de titulación y el factor se detalla en la tabla XIII

Tabla XIII Datos de valores de consumo titulante y determinación del factor

Nº de muestra	Volumen de	Volumen titulante	NaCN pte (g)	Volumen titulante	Factor
1	10	10	0,025	10	1
2	10	10	0,025	10	1
3	10	10	0,025	10	1
4	10	10	0,025	10	1

3. Procedimiento para el análisis de cianuro

- Tomar 10 ml de solución a analizar previamente filtrada y agregarlo a un matraz erlenmeyer de 250 ml
- Agregar 50 ml de agua destilada.
- Agregar 2 gotas de indicador fenolftaleina
- Titular con la solución valorada de AgNO_3 hasta la aparición de un color rosado indicando el punto final de la titulación.

- Lee el gasto de titulante con las siguientes fórmulas

$$NaCN_{pte(g)} = \frac{\text{ml gastados} \times \text{factor} \times 0,0025 \times V_{\text{solución}}}{V_{\text{muestra}}}$$

$$NaCN_{\text{consumido (g)}} = NaCN_{\text{inicial}} - NaCN_{\text{pte}}$$

$$NaCN_{pte(\%)} = \frac{NaCN_{pte(g)} \times 100}{V_{\text{solución}}}$$

Biblioteca de Ingeniería Química

ANEXO VIII DETERMINACIÓN DE COBRE, FIERRO Y ZINC EN MINERALES POR ABSORCIÓN ATÓMICA

1. FUNDAMENTO

Para determinar estos elementos el mineral tiene que ser sometido a una digestión ácida.

El método de absorción atómica puede reemplazar a los métodos volumétricos tradicionales, sin embargo para leyes altas de estos elementos es más recomendable el método volumétrico.

2. REACTIVOS, MATERIALES Y EQUIPOS

- Ácido Nítrico concentrado q. p. ó p.a.
- Ácido Clorhídrico q.p. ó p. a.
- Agua destilada
- Solución stock de 1000 ppm de plata
- Vasos de 400 ó 600 ml
- Lunas de reloj
- Fiola de 1000 ml clase A
- Fiolas de 100 ml clase A
- Fiolas de 50 ml clase A
- Pipetas de 10 ml clase A
- Pipeta de 5 ml clase A
- Pipetas de 3 ml clase A
- Pipeta de 1 ml clase A
- Balanza con una sensibilidad de 0,001 g
- Plancha de calentamiento con campana extractora
- Equipo de Absorción Atómica

3. PREPARACIÓN DE ESTÁNDARES DE COBRE, FIERRO Y ZINC PARA ABSORCIÓN ATÓMICA

A Partir de un estándar de 1000 ppm de Cu. Fe o Zn (Solución Stock)

Los estándares son preparados directamente de esta solución (1000 ppm).

Estándar de 100 ppm de Cu, Fe o Zn

Tomar 10 mL de solución stock (1000 ppm) y colocarlo en una fiola de 100 mL, enrasar con agua destilada y agitar.

Estándar de 5 ppm de Cu, Fe o Zn

Tomar 5 mL de solución de 100 ppm y colocarlo en una fiola de 100 mL, enrasar con "solución blanco" y agitar.

Estándar de 3 ppm de Cu, Fe o Zn

Tomar 3 ml de solución de 100 ppm y colocarlo en una fiola de 100 ml, enrasar con "solución blanco" y agitar.

Estándar de 1 ppm de Cu, Fe o Zn

Tomar 1 ml de solución de 100 ppm y colocarlo en una fiola de 100 mL, enrasar con "solución blanco" y agitar.

Solución Blanco para Cu, Fe o Zn: Solución acuosa al 10 % de HCl.

4. CONDICIONES GENERALES DE TRABAJO DEL EQUIPO DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Parámetros Instrumentales

Elemento : Cu
Longitud de onda : 324,8 nm
Slit : 0,70
Mechero : Aire - Acetileno
Tipo de llama : Oxidante, azul, limpia
Intensidad de corriente : 15 mA

Elemento : Fe
Longitud de onda : 248,3 nm
Slit : 0,20
Mechero : Aire - Acetileno
Tipo de Llama : Oxidante, azul, limpia
Intensidad de corriente : 30 mA

Elemento	: Zn
Longitud de onda	: 213,9 nm
Slit	: 0,70
Mechero	: Aire - Acetileno
Tipo de Llama	: Oxidante, azul, limpia
Intensidad de corriente	: 15 mA

5. PROCEDIMIENTO PARA ANÁLISIS DE COBRE, FIERRO Y ZINC EN UN MINERAL

- Pesar 0,100 g de muestra seca y pulverizada a malla -140, en un vaso pirex de 400 ml
- Adicionar 5 rnl de HCl concentrado q.p, tapar el vaso con una luna de reloj y en frío se agita durante 10 minutos.
- Posteriormente adicionar 5 ml de HNO₃ concentrado q.p. y agitar 10 minutos más.
- Luego colocar en la plancha caliente y digerar hasta estado pastoso, no dejar secar, retirar de la plancha. Si se desea oxidar un sulfuro agregar unos 3 g de Clorato de Potasio.
- Una vez frío retirar la luna de reloj enjuagándola con agua destilada y vertiendo este lavado en el vaso para evitar la pérdida de muestra.
- Adicionar al vaso aproximadamente 25 ml de agua destilada para digerar las sales. Además 10 mL de HCl concentrado, para dar el medio adecuado al 10 %.
- Colocar a la plancha para calentar hasta antes de hervir.
- Retirar el vaso de la plancha, dejar enfriar y transvasar a una fiola de 250 ml
- Aforar con agua destilada, tapar y agitar.
- Dejar reposar por unos minutos y leer en el equipo de A.A.

6. CALCULO PARA DETERMINAR LA LEY DE COBRE, FIERRO Y ZINC EN LA MUESTRA DE MINERAL

Para reportar la concentración de Cu, Fe o Zn (g/TM) en la muestra multiplicar el valor obtenido en el equipo de absorción atómica (ppm) por 500.

Ejemplo

Muestra tomada : 0,100 g

Lectura AA : 0,250 ppm

$$\boxed{\text{Ley de mineral (g/TM)} = 0,250 * 500 = 125}$$

ANEXO IX RESULTADOS DE CIANURACIÓN

a. Condiciones de operación

- Peso de muestra 100g
- Dilución 3
- Volumen de solución lixivante 300 ml
- [NaCN] 1000 ppm
- pH 10,5 – 12,5
- Tiempo 65 horas
- Consumo promedio de cal por prueba 2,9 g

Tabla XIV Consumo de cianuro de sodio

# de Prueba	Consumo de NaCN (g)	# de Prueba	Consumo de NaCN (g)	# de Prueba	Consumo de NaCN (g)
1	1,15	10	1,22	19	1,23
2	1,13	11	1,21	20	1,20
3	1,15	12	1,19	21	1,30
4	0,98	13	1,10	22	1,18
5	1,06	14	1,11	23	1,19
6	1,00	15	1,09	24	1,20
7	0,89	16	0,90	25	1,11
8	0,80	17	0,98	26	1,12
9	0,83	18	1,00	27	1,09

ANEXO X: TABLA DE VALORES DE $F_{0.05}$ “Tables of percentage points of inverted beta (F) distribution”

Extraído del libro Probabilidad y estadística para ingenieros de Irwin R. Miller [8]

Tabla 6(a) Valores de $F_{0.05}$

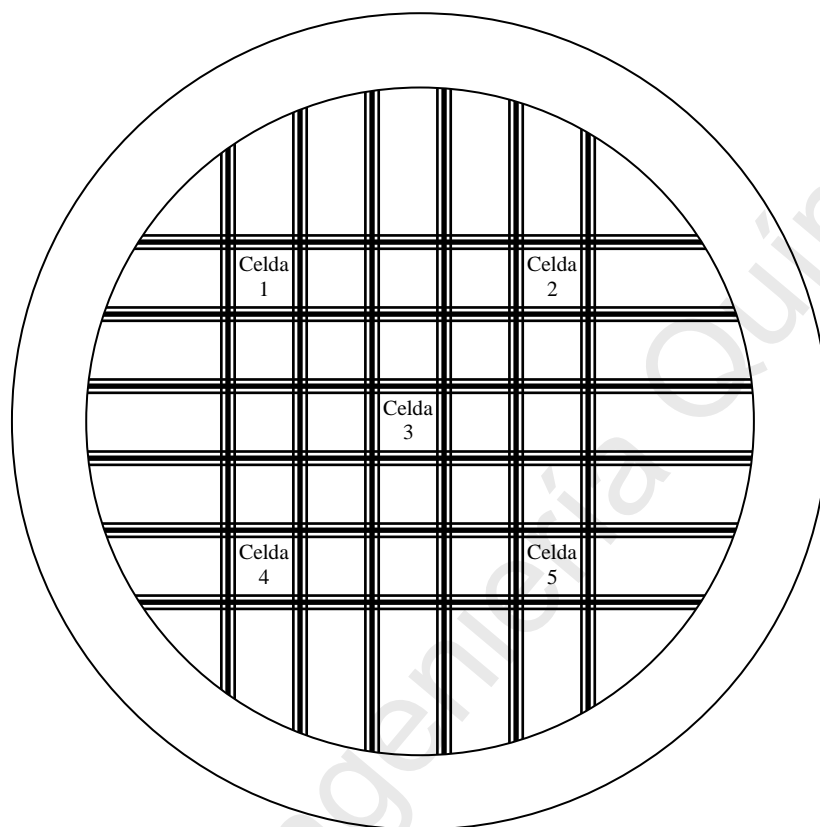
v_1 = Grados de libertad para el numerador

v_2 = Grados de libertad para el denominador	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	246	248	249	250	251	252	253	254
2	18.50	19.00	19.20	19.30	19.30	19.30	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50
3	10.10	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.38	2.38	2.30	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.43	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.93
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

APÉNDICE DE FIGURAS

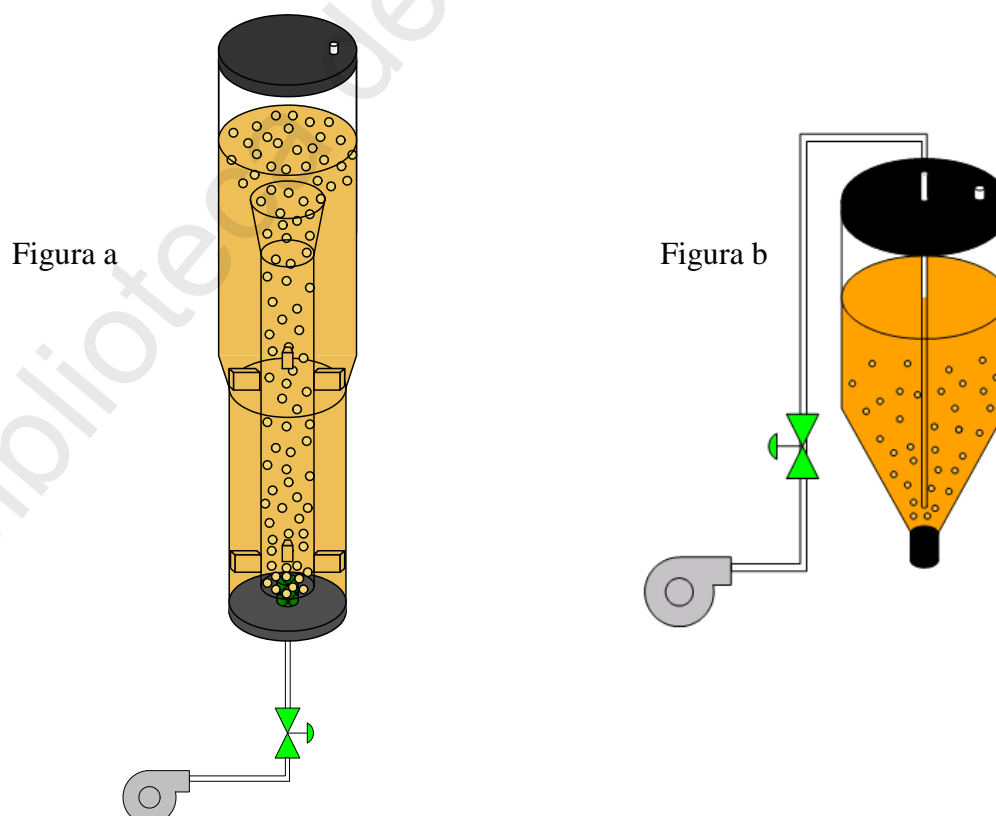
APÉNDICE I

Figura I Vista y selección de celdas usadas para un recuento de células a nivel de microscopio



APÉNDICE II

Figura II. Biorreactores: Proceso Principal (a) y Proceso de Reactivación (b)



APÉNDICE III

Figura III. Imagen Real de los biorreactores, materiales y reactivos usados para la Reactivación de la bacteria.



Figura IV. Alimentación y recuento (viabilidad) diario de la bacteria



Figura V. vistas interiores de los biorreactores donde ocurren las reactivaciones

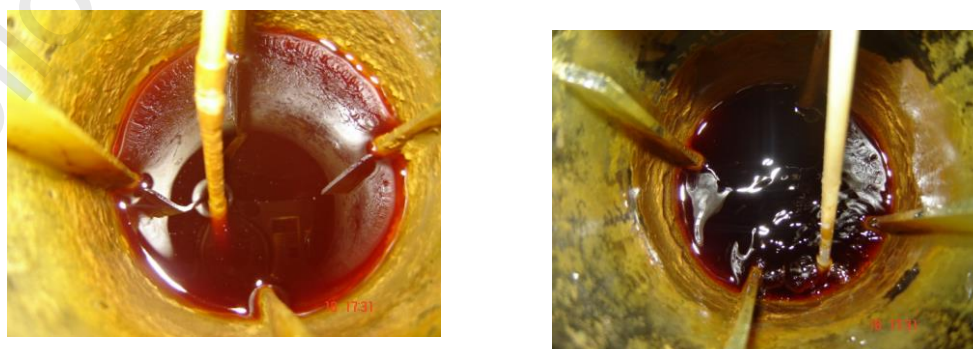


Figura VI. Cuarteo y chancado de la muestra



Figura VII. Copelación y fundición



Figura VIII. Vista superior de los biorreactores Airlift en donde se biooxida el mineral



Figura IX. Vista superior de algunos Biorreactores Airlift en el proceso



Figura X. Control del pH y vista frontal de los biorreactores Airlift



Figura XI. Biorreactores al final del proceso

