



Universidad Nacional
"Pedro Ruiz Gallo"



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA QUÍMICA**

**"INFLUENCIA DEL ÁCIDO SULFÚRICO SOBRE LA
EXTRACCIÓN DE COBRE DURANTE LA LIXIVIACIÓN
DE UN MINERAL SULFURADO DE BAJA LEY EN
PRESENCIA DE ARSÉNICO"**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO QUÍMICO**

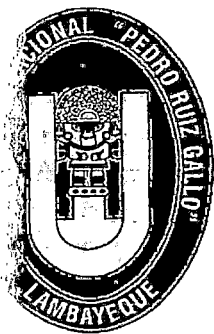
PRESENTADO POR:

Bach. ELERA TORRES JAHANG KARLO

Bach. ROMERO CASTILLO CINTHIA VANESSA DEL PILAR

LAMBAYEQUE- PERÚ

2015



UNIVERSIDAD NACIONAL
"PEDRO RUIZ GALLO"
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

**"INFLUENCIA DEL ÁCIDO SULFÚRICO SOBRE LA EXTRACCIÓN DE
COBRE DURANTE LA LIXIVIACIÓN DE UN MINERAL SULFURADO DE
BAJA LEY EN PRESENCIA DE ARSÉNICO"**

TESIS

Para

Optar el Título Profesional de:

INGENIERO QUÍMICO

Por

Bach: Elera Torres Jahang Karlo

Bach: Romero Castillo Cinthia Vanessa del Pilar

LAMBAYEQUE – PERU

2015

**“INFLUENCIA DEL ÁCIDO SULFÚRICO SOBRE LA EXTRACCIÓN
DE COBRE DURANTE LA LIXIVIACIÓN DE UN MINERAL
SULFURADO DE BAJA LEY EN PRESENCIA DE ARSÉNICO”**

TESIS

Para

Optar el Título Profesional de:

INGENIERO QUÍMICO

Por

Bach: Elera Torres Jahang Karlo

Bach: Romero Castillo Cinthia Vanessa del Pilar

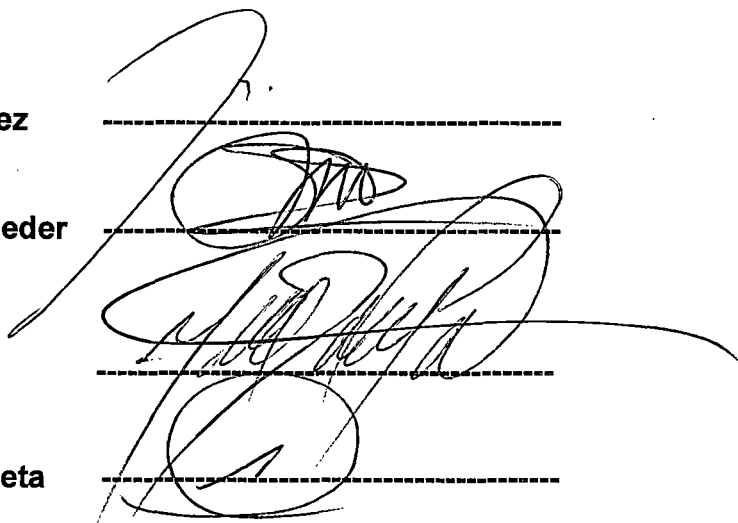
**Sustentada y aprobada ante el
Siguiendo jurado**

**Ing. M.Sc. Jaime Lucho Cieza Sánchez
Presidente**

**Ing. M.Sc. Sebastián Huangal Scheineder
Secretario**

**Ing. Manuel Antonio Díaz Paredes
Vocal**

**Ing. M.Sc. Iván Pedro Coronado Zuloeta
Asesor**

The image shows four horizontal dashed lines, each corresponding to a member of the jury. Over these lines, there are handwritten signatures in black ink. The signatures are stylized and cursive. The first signature is at the top, followed by the second, third, and fourth signatures below it, each aligned with its respective name in the adjacent column.

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis primeramente a Dios por haberme dado las fuerzas, motivación y dedicación para haberla realizado.

La dedico también a mis padres por su gran apoyo y por su amor incondicional.

CINTHIA

Dedico esta tesis a Dios por darme la voluntad, esfuerzo y motivación para haberla iniciado y culminado con éxito.

También dedico esta tesis a mis padres por confiar en mí y alentarme siempre.

JAHANG

AGRADECIMIENTO

Agradecemos inmensamente a Dios porque sin Él no se realiza nada, ya que Él nos brindó el conocimiento y el esfuerzo para desarrollarlo

También a nuestros padres por su apoyo y amor ya que sin ellos no tendríamos la motivación de superación

RESUMEN

El presente trabajo de investigación "Influencia del ácido sulfúrico sobre la extracción de cobre durante la lixiviación de un mineral sulfurado de baja ley en presencia de arsénico", se realizó con el propósito de demostrar la factibilidad del uso de soluciones residuales de refinería en el proceso de lixiviación ácido-bacterial de minerales de cobre de baja ley, sin afectar su extracción cuprífera debido a los contenidos importantes de arsénico como impureza, y así reaprovechar favorablemente el ácido sulfúrico también contenido en dichas soluciones.

La lixiviación ácida es el proceso más utilizado para la recuperación de cobre desde minerales oxidados. La rentabilidad de esta operación va a estar determinada por el consumo de ácido sulfúrico y el grado de extracción de cobre. Se sabe que un aumento en la concentración de ácido en las soluciones lixivante impulsa una mayor recuperación de cobre, pero también se produce un elevado consumo de ácido por especies reactivas de la ganga, lo que repercute negativamente en la economía del proceso. De estudios anteriores se sabe que con una adecuada selección del nivel de concentración de ácido es posible optimizar el consumo de ácido en el proceso.

Para simular la lixiviación de los minerales de cobre en un botadero, se muestreó 2000 kg de mineral sulfurado de baja ley para someterlo a procesos de lixiviación a nivel de laboratorio (pruebas en columna de 2m).

En la ejecución de las pruebas en columna se planteó 2 escenarios de riego, el primero mediante la adición de ácido débil (con arsénico) y el segundo con adición de ácido preparado (sin arsénico) para poder realizar la contrastación. Además, cuatro (4) de estas columnas operaron con una acidez de 6 g/L y otras cuatro (4) con una acidez de 10 g/L, evaluando también el efecto del incremento de acidez en la solución.

Los porcentajes de extracción de cobre obtenidos en el caso de las columnas que operaron con 6 g/L, fueron de 7.80% (regando con solución sin arsénico) versus 7.67% (regando con solución con arsénico). Mientras que las recuperaciones obtenidas en el escenario con 10 g/L de acidez fueron de 8.29% versus 8.18% al regar las columnas con solución sin arsénico y con arsénico, respectivamente.

De acuerdo a estos resultados, se puede concluir que no se ha tenido un efecto negativo por la presencia de arsénico (en una concentración máxima de 0.25 g/L) en la extracción de cobre a lo largo de todo el ciclo de lixiviación.

Se concluye también, que al aumentar la concentración de ácido sulfúrico de 6 g/L a 10 g/L, el porcentaje de extracción de cobre aumenta (6.4 % más en promedio).

De igual forma de acuerdo al análisis estadístico, la interacción de ambas variables independientes no evidencia un efecto negativo en la extracción de cobre.

Adicionalmente, se ejecutaron pruebas de viabilidad bacteriana. Se concluyó que no hubo una diferencia significativa en las velocidades de oxidación con reposición del efluente respecto de las repuestas con ácido-agua.

ABSTRACT

The present research " Influence of sulfuric acid on copper extraction during leaching of low grade sulphide ore in the presence of arsenic "was held for the purpose of demonstrating the feasibility of using waste solutions refinery in process of acid-bacterial leaching of copper ores low grade, without affecting its copper extraction due to significant levels of arsenic as an impurity, and so favorably reuse sulfuric acid also contained in such solutions.

Acid leaching is the most widely used process for recovering copper from oxide ores. The profitability of this operation will be determined by the consumption of sulfuric acid and the degree of extraction of copper. It is known that an increase in acid concentration in the leaching solution drives greater recovery of copper, but a high consumption of acid is also produced by reactive species of the bargain, which adversely affects the economics of the process. From previous studies it is known that with proper selection of the level of acid concentration is possible to optimize the consumption of acid in the process.

To simulate the leaching of copper ores on a dump site was sampled 2000 kg of low grade sulphide ore for submission to leaching in the laboratory (column tests 2m).

In carrying out the tests in column 2 irrigation scenarios raised, the first by adding weak acid (arsenic) and the second addition of acid prepared (arsenic) to perform calibration. In addition, four (4) of these columns operated with an acidity of 6 g/L and four others (4) with an acidity of 10 g/L, also evaluating the effect of the increase of acidity in the solution.

The copper removal rates obtained in the case of columns operated with 6 g/L, were 7.80% (watering with arsenic solution) versus 7.67% (watering with arsenic solution). While the recoveries obtained on stage with 10 g/L acid were 8.29% versus 8.18% to water the columns solution without arsenic and arsenic,

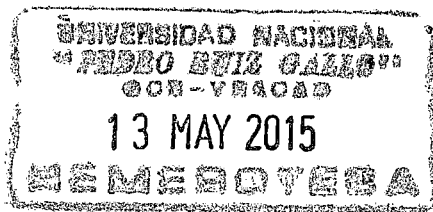
respectively.

According to these results, we can conclude that has not had a negative effect on the presence of arsenic (in a maximum concentration of 0.25 g/L) in the extraction of copper throughout the leach cycle.

It was also concluded that with increasing sulfuric acid concentration of 6 g/L to 10 g/L, the copper extraction rate increases (6.4% more on average).

Likewise according to the statistical analysis, the interaction of both independent variables does not show a negative effect on the extraction of copper.

Additionally, bacterial viability tests were run. It was concluded that no significant difference in the replenishment rates of oxidation effluent with respect to acid-water replenished.



ÍNDICE GENERAL

Página

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÍNDICE GENERAL.....	v
NOMENCLATURA.....	xiii
GLOSARIO.....	ix
CONTENIDO DE TABLAS.....	xii
CONTENIDO DE FIGURAS.....	xiv
CONTENIDO DE DIAGRAMAS.....	xv
INTRODUCCION.....	1

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1. 1.	UBICACIÓN.....	2
1. 2.	CLIMA Y METEOROLOGÍA.....	3
1. 3.	GEOLOGÍA.....	3
1. 4.	OPERACIONES MINERAS PERUANAS.....	5
1. 5.	METALURGIA DEL COBRE.....	7
1. 5.1.	POR VÍA METALÚRGICA.....	7
1. 5.2.	POR VÍA HIDROMETALÚRGICA.....	9
1. 5.2.1.	BIOHIDROMETALURGIA A TRAVÉS DE LA BIOLIXIVIACIÓN.....	11

CAPÍTULO II
PROCESO LIXIVIACIÓN

2.1.	ANTECEDENTES SOBRE LA LIXIVIACIÓN.....	12
2.2.	PROCESO DE LIXIVIACIÓN.....	18
2.3.	LIXIVIACIÓN EN BOTADEROS.....	18
2.4.	LIXIVIACIÓN DE COBRE.....	19
2.5.	DIAGRAMA POURBAIX DE ESPECIES DE COBRE.....	21
2.6.	MINERALES DE COBRE Y SUS PRINCIPALES REACCIONES.....	23
2.7.	CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN.....	26
2.8.	CICLOS DE LIXIVIACIÓN.....	27
2.9.	ACTIVIDAD BACTERIAL.....	28
2.10.	ELECTROQUÍMICA EN LA LIXIVIACIÓN ÁCIDAD-BACTERIAL.....	35

CAPÍTULO III
MATERIAL Y MÉTODOS

3.1.	MATERIAL.....	36
3.1.1.	MATERIAL DE ESTUDIO.....	36
3.1.1.1.	POBLACIÓN.....	36
3.1.1.2.	MUESTRA.....	36
3.1.2.	SOLUCIÓN DE RIEGO.....	38
3.1.3.	EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y MATERIALES.....	39
3.2.	MÉTODOS.....	41
3.2.1.	DISEÑO.....	41
3.2.3.	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	43
3.2.3.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	44

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. RESULTADOS PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE COBRE48

4.2. RESULTADOS DE PRUEBAS DE VIABILIDAD BACTERIANA.....51

4.3. DISCUSIONES.....51

CONCLUSIONES.....44

RECOMENDACIONES.....55

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....56

APÉNDICE.....58

ANEXOS.....97

NOMENCLATURA

pH: Potencial de hidrógeno

ppm: Partes por millón

g/L: Gramos/litro (Unidad de concentración)

Eh: Potencial reducción-oxidación (redox)

mV: Milivoltios (unidad de medida del potencial redox)

ΔG : Energía libre de Gibbs

NH₄: Amoníaco

PO₄³⁻: Ión fostato

H⁺: Iones hidrógeno

As³⁺: Arsenito

As⁵⁺: Arseniato

CuT: Cobre total

CuSAC: Cobre soluble en ácido (óxidos de cobre)

CuSCN: Cobre soluble en cianuro (sulfuras secundarios de cobre)

CuIns: Cobre insoluble (sulfuras primarios de cobre)

IS: Índice de solubilidad

IBC: Intermediate bulk container (contenedor/recipiente de uso intermedio para materiales)

ICP: Plasma de acoplamiento inductivo

D: Diferencia máxima entre dos niveles

σ : Desviación estándar

SS_T: Suma de cuadrados del total de tratamientos

SS_A: Suma de cuadrados del efecto A

SS_B: Suma de cuadrados del efecto B

SS_{AB}: Suma de cuadrados de la interacción AB

SS_E: Suma de cuadrados del error

MS_{TR}: Media de los cuadrados de los tratamientos

MS_E: Media de los cuadrados del error

GLOSARIO

Aglomeración: Proceso previo a la lixiviación utilizado para adherir las partículas finas de mineral a las gruesas. Es decir, prepara el material mineralizado para la lixiviación, garantizando un buen coeficiente de permeabilidad de la solución.

Alícuota: Muestra representativa de un todo líquido.

Análisis químico ICP: Es una técnica de análisis inorgánico que es capaz de determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica en un rango dinámico lineal de 8 órdenes de magnitud (ng/L-mg/L). Consiste en un equipo dotado de un monocromador posterior a la muestra y una serie de detectores dedicados a cada elemento en diferentes posiciones del plano focal.

Catálisis: Es el proceso por el cual se aumenta la velocidad de una reacción química, debido a la participación de una sustancia llamada catalizador. Un concepto importante es que el catalizador no se modifica durante la reacción química, lo que lo diferencia de un reactivo.

Cuarteo: Es la operación de dividir el mineral en partes iguales y en varias fracciones para llegar obtener la porción representativa del total de la muestra inicial, pudiendo realizarse esta operación en forma manual o en partidores mecánicos.

Chancado: Es la operación que reduce el tamaño de las rocas minerales, desde diámetros mayores hasta granulometrías menores a 1 pulg (en general), con equipos de chancado. Existen chancadoras de quijadas y cónicas.

Clasificación: Es la separación de mineral triturado en diversos tamaños de acuerdo a las necesidades requeridas. Se realiza con equipos de zarandas vibratorias, tamices, etc. Usualmente se emplea los tamices en el siguiente orden: mallas (1", ¾", ½", 3/8", ¼", y mallas +10 y -10).

Curado: Es la etapa en la cual se le da un primer contacto de reacción sólido-líquido a un mineral a lixiviar, con una alta concentración de ácido. Su objetivo es acondicionar al mineral para así poder generar mayores espacios vacíos en el

mineral por donde pueda penetrar la solución lixivante al empezar el ciclo de riego, y por ende se obtenga una mejor recuperación.

Dump leaching o lixiviación en botaderos: Técnica que consiste en lixiviar desmostes o sobrecarga de minas de tajo abierto, los que debido a sus bajas leyes no pueden ser tratados por métodos convencionales.

Espectrofotómetro de absorción atómica: Equipo utilizado para analizar muestras acuosas de bajas concentraciones. Utiliza como mecanismo de lectura a la absorción atómica.

Extracción por solventes: Proceso de intercambio iónico, en el que se transfiere iones entre dos fases líquidas, una acuosa y orgánica.

Homogenizado: Consiste en mezclar el mineral en todo su volumen con el objetivo de que los gruesos y finos estén distribuidos por igual en todo el conjunto de muestra.

Medio 9K: Es un medio que tiene sales nutritivas en traza y no contiene cobre pero sí hierro (aproximadamente 9 g/L, de ahí su nombre). Se usa para realizar pruebas de viabilidad bacteriana.

Planta LESDE: Planta de Lixiviación, Extracción por solventes y Deposición electrolítica.

pH: Expresa la acidez o alcalinidad relativa de soluciones acuosas en una escala de 0 a 14. El pH expresa la concentración del ion hidrógeno (H^+).

PLS: (Pregnat Leaching Solution), solución acuosa impregnada de cobre que se obtiene del proceso de lixiviación conteniendo cobre, fierro, ácido e impurezas.

Pulverizado: Es la operación que reduce el tamaño de rocas minerales chancadas hasta un tamaño de partícula ubicado entre las mallas # (100 a 200), dependiendo de la intensidad, tiempo y tipo de pulverizador. Existen dos tipos de equipos para pulverizar a nivel de laboratorio, pulverizador de discos y anillos.

Refino o raff: Fase acuosa residual del proceso de extracción de cobre. Solución acuosa con bajos contenidos de iones de Cu^{2+} (respecto al PLS), obtenida en procesos de extracción por solventes. Es utilizada como solución de riego para lixiviar.

Rifle: También conocido como partidor Jones, sirve para dividir de forma

homogénea muestras minerales. Es el ensamble de un número de chutes idénticos adyacentes con ángulo de 45° y alternadamente opuestos. Los chutes dirigen el mineral a dos recipientes ubicados bajo ellos, dividiendo en partes iguales la muestra mineral agregada.

Ripio: Mineral con bajo contenido metálico que ha cumplido ciclos de lixiviación.

Roleo: Método para homogenizar muestras minerales. El roleo se realiza sujetando por los extremos una manta, que descansa en el suelo o alguna superficie, haciendo rodar el material de una esquina a la otra. La operación se repite durante varios minutos. **Solución acuosa:** Es una mezcla líquida de agua con algún compuesto químico ácido o básico disuelto en ella que contiene diversos elementos o compuestos químicos. **Solución agua madre:** Solución que se origina en la lixiviación de los lodos anódicos. **Solución SAT:** Solución originada en la planta electrolítica de plata.

Sulfuro de cobre de baja ley (SBL): Mineral con presencia de sulfuros secundarios y principalmente sulfuros primarios de cobre y hierro.

Torpedo: Herramienta diseñada para cargar y trasladar muestras de mineral, tiene una base interior o tapa movable que se abre cuando se descarga el mineral a la columna. Tiene una cantidad de carga en peso para 15 Kg, pudiendo variar de acuerdo a su tamaño.

CONTENIDO DE TABLAS

	<i>Página</i>
Tabla N° 01. Mineralogía presente en botaderos Sur (Toquepala).....	44
Tabla N° 02. Reacciones de la calcopirita.....	53
Tabla N° 03. Reacciones de la pirita.....	53
Tabla N° 04. Potencial de reposo de minerales sulfurados.....	55
Tabla N° 05. Distribución granulométrica y composición química del mineral en prueba.....	57
Tabla N° 06. Análisis ICP del ácido débil utilizado para la preparación de la solución de riego.....	59
Tabla N° 07. Niveles y valores de los factores, arsénico y ácido sulfúrico...62	
Tabla N° 08. Matriz de riego inicial y de reposición diaria de las soluciones de riego de cada columna de lixiviación.....	65
Tabla N° 09. Humedad de aglomerado y curado ácido del mineral.....	66
Tabla N° 10. Valores promedios experimentales de los porcentajes de extracción de cobre en función de las concentraciones de arsénico y ácido sulfúrico.....	68
Tabla N° 11. Valores ponderados de las leyes metálicas en la solución de riego de cada columna.....	70
Tabla N° 12. Valores ponderados de las leyes metálicas en los PLS de cada columna.	70
Tabla N° 1.A. Disposición general para el diseño de ambas variables respuesta.....	78
Tabla N° 2.A. Resultados experimentales de la prueba de extracción de cobre.....	79
Tabla N° 2.B. Datos experimentales mostrados de acuerdo al cálculo de suma de cuadrados del diseño factorial de dos factores.....	79
Tabla N° 2.C. Información para análisis de varianza.....	82

Tabla N° 3.A. Datos de las soluciones de percolación.....83

Tabla N° 3.B. Datos de la mezcla inicial de la prueba 1A y 1B.....84

Tabla N° 3.C. Datos de la mezcla inicial de la prueba 2A y 2B.....85

Tabla N° 3.D. Datos de la mezcla inicial de la prueba 3A y 3B.....86

Tabla N° 3.E. Datos de la mezcla inicial de la prueba 4A y 4B.....87

**Tabla N° 9.A. Pesos de reactivos para la preparación de soluciones
titulantes.....105**

Tabla N° 10.A. Proporción de los nutrientes.....109

CONTENIDO DE FIGURAS

Página

Figura N° 01. Ubicación de la mina Southern Copper Perú Corporation en Toquepala.....	22
Figura N° 02. Campamento Minero de Toquepala.....	24
Figura N° 03. Proceso pirometalúrgica.....	28
Figura N° 04. Proceso Hidrometalúrgica.....	30
Figura N° 05. Esquema del tratamiento de efluentes ácidos de Mexicana de Cobre.....	33
Figura N° 06. Diagrama de Pourbaix de especies de arsénico en solución acuosa a 25 °C y 1 atm.....	36
Figura N° 07. Mecanismos involucrados en la oxidación del arsenito en presencia de pirita y microorganismos.....	37
Figura N° 08. Planta extracción por solventes y deposición electrolítica en Toquepala y Cuajone en una operación de Lixiviación de cobre.....	40
Figura N° 09. Diagrama de Pourbaix de especies de cobre en solución acuosa a 25 °C y 1 atm.....	42
Figura N° 10. Mecanismo directo de lixiviación bacterial.....	51
Figura N° 11. Mecanismo indirecto de lixiviación bacterial.....	52
Figura N° 12. Muestreo de mineral en faja transportadora.....	57
Figura N° 13. Diagrama del procedimiento experimental.....	64
Figura N° 6.A. Solución valorada de dicromato de potasio.....	93
Figura N° 6.B. Solución sulfofosfórica y difenilamina de sodio.....	94
Figura N° 6.C. Valoración de dicromato de potasio.....	96
Figura N° 8.A. Solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y anaranjado de metilo.....	101
Figura N° 10.A. Baño maría.....	110

CONTENIDO DE GRÁFICAS

Página

Gráfico N° 01. Curva de extracción de Cobre en función de la concentración de ácido sulfúrico.....	69
Gráfico N° 02. Curva de extracción de cobre en función de la concentración de arsénico.....	69
Gráfico N° 3.A. Velocidad de oxidación para las percolaciones en las cuatro primeras columnas.....	84
Gráfico N° 3.B. Resultados de las pruebas 1A y 1B.....	85
Gráfico N° 3.C. Resultados de las pruebas 2A y 2B.....	86
Gráfico N° 3.D. Resultados de las pruebas 3A y 3B.....	87
Gráfico N° 3.E. Resultados de las pruebas 4A y 4B.....	88

INTRODUCCIÓN

Como parte de las operaciones de una planta de Fundición de cobre se genera diariamente un efluente en la planta de ácido conocido como ácido débil. Esta solución presenta altos contenidos de arsénico entre otras impurezas que luego son tratados en la planta de neutralización. La oportunidad de mejora radica en los contenidos de ácido que también presenta dicha solución, lo cual podría reaprovecharse como agente lixivante de minerales de cobre.

La propuesta consiste en derivar los efluentes de las plantas de ácido de fundición a las operaciones de lixiviación. La finalidad es llevar soluciones con impurezas (especialmente arsénico) a los botaderos de lixiviación y conservarlos en el circuito operativo con lo que se podría paralizar las plantas de efluentes (neutralización) en fundición.

Sin embargo, al utilizar estas soluciones en el proceso de lixiviación bacterial de minerales de cobre, es importante conocer el comportamiento de las bacterias con las impurezas que vendrían en el efluente (principalmente el arsénico) que podrían inhibir su acción oxidante y por lo tanto disminuir la recuperación de cobre. Otro punto importante es la acumulación de las impurezas que se tendrían a largo plazo en las soluciones acuosas (operación en circuito cerrado), lo cual podría afectar las operaciones siguientes de extracción por solventes y electrodeposición.

Asimismo, la reutilización de dichas soluciones reduciría los costos por consumo de ácido sulfúrico. Por lo tanto, es comprensible el interés de reaprovechar dichas soluciones en Lixiviación, reduciendo así costos operativos de proceso y por consumo de reactivos.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1. 1. UBICACIÓN

Se desarrolla en Tacna, departamento ubicado en el extremo sur del país, el 27 de setiembre del 2011. El Municipio provincial y organizaciones sociales se oponen al uso y extracción de aguas superficiales y subterráneas por parte de la Compañía Southern Copper Perú Corporation en provecho de sus centros mineros Toquepala (Tacna) y Cuajone (Moquegua), y que afectarían los ríos Callazas, Tacalaya y Salado.

Desde que la Compañía Southern Perú anunció la ejecución de su nuevo proyecto "Ampliación de la concentradora de Toquepala y recrecimiento del embalse de relaves de Quebrada Honda" varios sectores de la población se opusieron al mismo. Argumentan que Southern ha sobreexplotado, durante más de 50 años, el recurso hídrico de Tacna, a través de pozos ubicados en la provincia andina de Candarave, donde cuenta con una licencia de uso de agua de 1.950 litros de agua por segundo (1.440 son de aguas subterráneas y 510 de aguas superficiales).

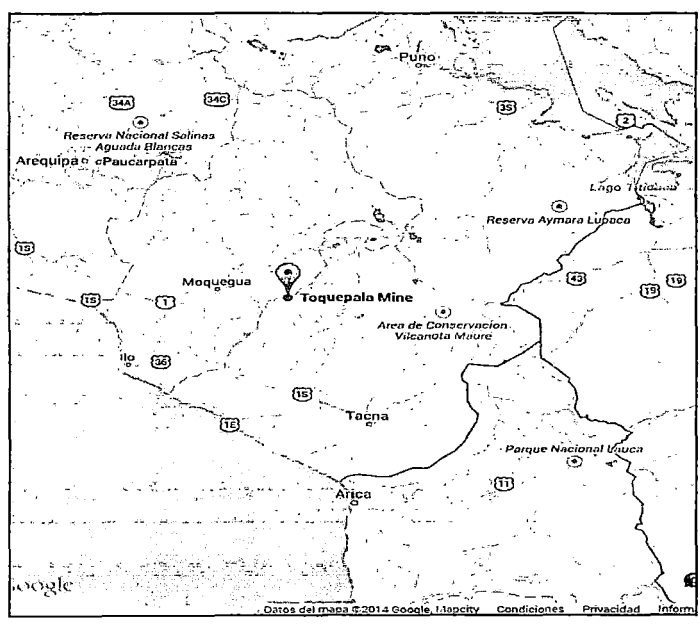
De igual forma, la mayoría de las autoridades de la región fronteriza, encabezados por el presidente regional Tito Chocano, concuerdan en que Southern debería instalar una planta desalinizadora de agua de mar a fin que ya no se siga explotando los pozos que tiene en la provincia de Candarave. Además, exigen que Southern responda por los daños ambientales producidos por la empresa, entre ellos la desertificación de Candarave. Las poblaciones

directamente afectadas por estos daños ambientales son especialmente los pobladores del distrito de Ilabaya, de la provincia tacneña de Jorge Basadre, y de Candarave.

En este contexto se instala la mesa de diálogo entre los actores locales y el Ejecutivo para tratar la problemática minera y sus impactos en los recursos hídricos. Funcionarios de los ministerios de Energía y Minas (MEM) y Agricultura, la Autoridad Nacional del Agua, autoridades tacneñas y representantes de la sociedad civil se reúnen en el auditorio de la Zona Franca de Tacna (Zofratacna) donde se instala la mesa de trabajo multisectorial convocada por el Ministerio de Energía y Minas. Son tres los temas que están en agenda son: balance hídrico, pasivos ambientales e inclusión social.

En las primeras reuniones convocada por el gobierno regional las autoridades locales y las organizaciones sociales, acuerdan oponerse a cualquier empresa minera que pretenda usar el agua destinada para consumo humano y agrícola. A la fecha este conflicto sigue latente.

Figura N° 01. Ubicación de la mina Southern Copper Perú Corporation en Toquepala



Fuente: Datos del mapa @2014 Google, Mapcity

1. 2. CLIMA Y METEOROLOGÍA

De acuerdo a los registros meteorológicos, la precipitación promedio anual total es de 81.6 mm característico de una zona semiárida. El máximo total anual registrado para ese periodo fue de 214,6 mm y el mínimo de 8,0 mm en el año 1954 y 1956 respectivamente.

La evaporación promedio del total anual promedio registrada para el período 2006-2010, es de 1 476.06 mm. Este valor es un indicador de la aridez del sector, ya que la evaporación es mayor que la precipitación durante la mayor parte del año. En general la evaporación promedio supera ampliamente a la precipitación anual, incluso durante la estación lluviosa.

Las temperaturas mínimas extremas varían entre -0.6 y -9.5°C. Las temperaturas más altas corresponden a los meses de verano mayormente. La humedad relativa de Toquepala indica un clima sumamente seco y semiárido. La humedad relativa es mayor durante los meses de verano (de diciembre a marzo). El promedio de velocidad de los vientos que soplan en esta estación se encuentra en torno a los 1,8 m/s, es decir se trata de brisas ligeras según la escala de Beaufort.

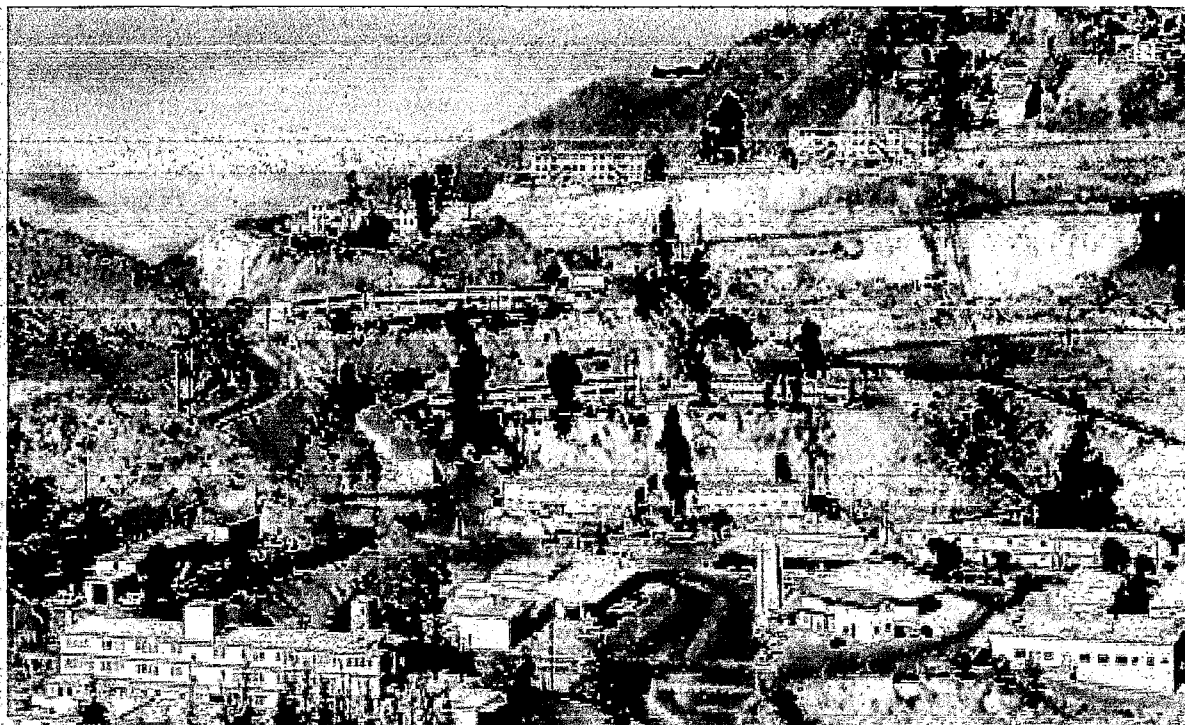
1. 3. GEOLOGÍA

El yacimiento de pórfidos de cobre de Toquepala se ubica en la pendiente oeste de la Cordillera Occidental, en la parte sur de la cordillera de los Andes del Perú. El yacimiento es parte de un distrito mineral que contiene otros dos yacimientos conocidos: Cuajone y Quellaveco.

El yacimiento de Toquepala está en la región sur del Perú, ubicado en la pendiente occidental de la cordillera de los Andes, aproximadamente a unos 120 kilómetros de la frontera con Chile. Esta región se extiende hacia Chile y aloja muchos de los yacimientos conocidos de cobre más importantes del mundo. El

yacimiento está en un territorio con actividades intrusivas y eruptivas de rocas riolíticas y andesíticas que tienen 70 millones de años de antigüedad (Cretáceo-Terciario) y que crearon una serie de lava volcánica. La lava está compuesta de riolitas, andesitas y aglomerados volcánicos con un buzamiento oeste y una altitud de 1,500 metros. Estas series son conocidas como el Grupo Toquepala. Posteriormente, se produjo diferentes actividades intrusivas, las cuales quebraron y fundieron las rocas del Grupo Toquepala. Estas actividades intrusivas produjeron dioritas, granodioritas, y diques de dacita porfídica. Toquepala tiene una mineralogía simple, y allí la ley del cobre tiene una distribución regular. Hay presencia de minerales con valor económico en forma de sulfuros diseminados por todo el yacimiento como venillas que ocupan los espacios vacíos o como pequeños agregados. Hay minerales como la calcopirita (CuFeS_2), la calcosina (Cu_2S) y la molibdenita (MoS_2). También hay una zona de enriquecimiento secundario, con espesores de 0 a 150 metros.

Figura N° 02. Campamento Minero de Toquepala



Fuente: Departamento de Geología Southern Copper Perú Corporation

1. 4. OPERACIONES MINERAS PERUANAS

Las operaciones mineras peruanas de la Compañía Southern Perú están sujetas a las leyes y normas ambientales peruanas. El gobierno peruano, a través del Ministerio del Medio Ambiente, realiza auditorías anuales de las operaciones mineras y metalúrgicas peruanas de la Compañía. Mediante estas auditorías ambientales, se revisan temas relacionados con compromisos ambientales, el cumplimiento de requisitos legales, emisiones atmosféricas y control de efluentes. La Compañía considera que cumple cabalmente con las leyes y reglamentos ambientales vigentes en el Perú.

La ley peruana estipula que las compañías del sector minero hagan provisiones por cierre y remediación futura. El MINEM ha aprobado los planes de cierre de la Compañía de conformidad con lo requerido por esta ley. Como parte de los planes de cierre, la Compañía está dando garantías con el fin de asegurar que habrá suficientes fondos para la obligación para el retiro de activos. Para mayor información sobre este tema, remítase a la Nota 10 "Obligación para el retiro de activos".00

- ❖ **Ampliación de la concentradora de Toquepala:** Hasta el 31 de diciembre de 2011, hemos gastado \$199 millones en la ampliación de Toquepala, principalmente en equipos mineros, los cuales se están usando en el desbroce inicial del proyecto. Se ha definido el alcance del proyecto como un aumento en la capacidad de molienda a 120,000 toneladas por día, que debería aumentar la producción anual en 100,000 toneladas de cobre y 3,100 toneladas de molibdeno. El EIA del proyecto fue presentado al MINEM en julio de 2011. Como parte del proceso de aprobación para el EIA, se realizó una audiencia pública en Toquepala en septiembre de 2011, pero debido a protestas en el exterior del campamento, el gobierno peruano invalidó la audiencia. Estamos esperando instrucciones del gobierno peruano para seguir adelante con el proceso de aprobación del EIA. Asumiendo que recibamos la

aprobación del EIA a tiempo, la conclusión del proyecto está programada para el primer trimestre de 2014.

- ❖ **Ampliación de la concentradora de Cuajone:** Hasta 31 de diciembre de 2011 hemos gastado \$ 80.2 millones en el proyecto de ampliación de Cuajone. Como primera etapa del plan de ampliación, el proyecto incluye una metodología de ley de corte variable que nos permitirá aumentar la producción de cobre y molibdeno. Cuando esté concluido, el proyecto aumentará la producción de cobre en 22.0 toneladas por año. La conclusión del proyecto para esta etapa está programada para el tercer trimestre de 2012.
- ❖ **Disposición de relaves en Quebrada Honda:** Este proyecto aumenta la altura de la represa existente en Quebrada Honda para contener los futuros relaves de las molindas de Toquepala y Cuajone y extenderá la vida esperada de esta planta de relaves en 25 años. Se ha concluido la primera etapa de este proyecto de disposición de relaves. Se terminó la construcción del sistema de drenaje para la represa lateral que comenzó en junio de 2010. El proyecto tiene un costo total presupuestado de \$66.0 millones, habiéndose gastado \$47.7 millones hasta el 31 de diciembre de 2011.
- ❖ **Tantahuatay:** La mina Tantahuatay está ubicada en Cajamarca, en el norte del Perú. La producción comenzó en agosto de 2011, y la mina produjo 46,200 onzas de oro y 260,100 onzas de plata en 2011. Se espera que Tantahuatay tenga una producción promedio anual de 90,000 onzas de oro y 425,000 onzas de plata durante cinco años. Tenemos una participación del 44.2% en este proyecto.
- ❖ **Proyecto Tía María:** Hemos iniciado un proceso de licitación para elaborar un nuevo EIA para el proyecto. Confiamos en que esta iniciativa tendrá un efecto positivo en las partes interesadas y que nos permitirá obtener la aprobación para el desarrollo este proyecto de cobre de

120,000 toneladas de producción anual. En consecuencia, hemos reprogramado el inicio del proyecto para inicios de 2015. Además, algunos de los equipos que ya habían sido adquiridos están siendo asignados a nuestras operaciones en Buenavista, Toquepala y Cuajone.

1. 5. METALURGIA DEL COBRE

La metalurgia del cobre está en función de si el mineral está en forma de sulfuros, en cuyo caso se utiliza la vía pirometalúrgica en la que se producen ánodos y cátodos, o en forma de óxidos, en cuyo caso se utiliza la vía hidrometalúrgica a través de la cual se producen directamente cátodos. Últimamente también existe una nueva vertiente de la hidrometalurgia llamada biohidrometalurgia donde se utilizan bacterias capaces de oxidar los minerales de cobre.

http://www.aim.es/publicaciones/bol2/13_Metalurgia_Cobre.pdf

1. 5.1. POR VÍA PIROMETALÚRGICA

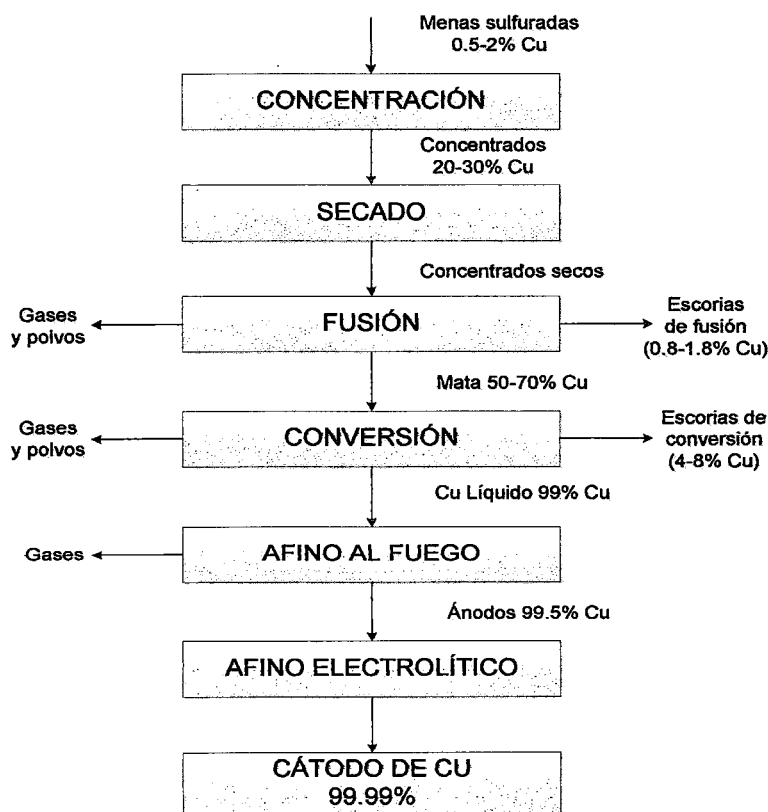
Siguiendo el proceso acorde a la figura 2.5 el mineral de sulfuro de cobre en la mina tiene un contenido entre el 0,5 y 2 % de cobre, por lo que hay que concentrarlo en la mina, mediante flotación, para su posterior fundición, obteniéndose un concentrado de cobre que contiene entre 20 y 30 % de cobre, los otros dos componentes principales son el azufre y el hierro, además de otros metales entre los cuales se encuentran el oro y la plata como positivos y el plomo, arsénico y mercurio como impurezas.

El concentrado de cobre se lleva a la Fundición en el Horno de Fusión, allí se recupera el cobre, eliminando el azufre y el hierro mediante oxidación en estado fundido a una temperatura entre 1200 y 1300 ° C.

En el horno el azufre se convierte en gas SO_2 , mientras que el cobre y el hierro, conjuntamente con sílice procedente de la arena que se introduce en el horno, permanecen en estado líquido. El cobre líquido se deposita en la parte inferior y se extrae del horno formando parte de un producto que se denomina mata de cobre, con un contenido de entre 50-70% de cobre.

La mata de cobre pasa a la sección de convertidores, para incrementar la riqueza en cobre del producto, donde se le somete a una gran oxidación adicional en un proceso discontinuo "batch", consiguiendo un producto intermedio denominado blister con un contenido en cobre del 99%, gases con SO_2 que se unen a los gases anteriores del horno y escorias con un contenido del 6% de cobre.

Figura N° 03. Proceso Pirometalúrgico



Fuente: Morales Soto, Alejandro (2006). [14]

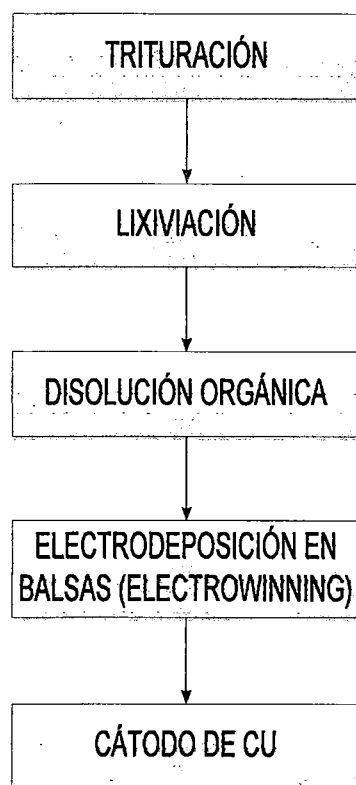
El blister pasa al horno de afinado donde incrementa su contenido en cobre hasta el 99,5% y posteriormente a la rueda de moldeo de ánodos, donde se da a los ánodos la forma geométrica, semejante a una camiseta de mangas cortas extendidas "T-shirt", necesaria para su utilización en la refinería. Los gases de SO₂ producidos en el horno y convertidores se recogen, se oxidan y se convierten en ácido sulfúrico en una planta de doble absorción, mientras que las escorias, después de tratarlas en un horno eléctrico para recuperar todo el cobre que contienen, se enfrían y granulan para su posterior utilización como material estéril.

Los ánodos pasan a la Refinería, que es la fase final del proceso de producción de los cátodos con un contenido del 99,9% de cobre. El proceso utilizado es el electro refinado de los ánodos, que consiste en disponer en celdas (balsas) los ánodos que actúan como electrodo positivo, separados por una placa inerte que actúa como electrodo negativo, sumergidos en una disolución de sulfato de cobre denominada electrolito y utilizar una corriente eléctrica de bajo voltaje, que al ser selectiva para el cobre disuelve los ánodos en el electrolito y los iones de cobre resultante se depositan sobre la placa inerte obteniendo los cátodos. [1]

1. 5.2. POR VÍA HIDROMETALÚRGICA

En este proceso (Ver figura N° 04) se parte del mineral de cobre procedente de la mina o residuos mineros, sin concentrar y se tritura a tamaños inferiores a 10 mm siendo posteriormente transportado a los montones o tanques donde será tratado posteriormente. La instalación suele estar anexa a la mina con objeto de ahorrar costes y optimizar servicios.

Figura N° 04. Proceso Hidrometalúrgico



Fuente: Arlandis Rubio, José (1999). [1]

A continuación se lixivian (disuelven) los minerales de cobre, óxidos o sulfuros secundarios, mediante el riego con una disolución acuosa de ácido sulfúrico, obteniéndose una solución de sulfato de cobre con bajo contenido de cobre. La disolución de bajo contenido de cobre con otros metales e impurezas se trata con un reactivo extractante orgánico, en un circuito cerrado y a contracorriente, que extrae el cobre y permite obtener un electrolito con alto contenido de cobre y limpio de todos los elementos indeseables.

La disolución con un alto contenido de cobre y limpia de impurezas pasa a las celdas (balsas) de electrólisis, donde la energía eléctrica hace que los iones del cobre presentes en la solución se depositen en los cátodos, de ahí su nombre de electrodeposición, a diferencia del electro refinado, que se realiza al pasar de ánodos de cobre a cátodos. [1]

1. 5.2.1. BIOHIDROMETALURGIA A TRAVÉS DE LA BIOLIXIVIACIÓN

La biolixiviación es un proceso en el cual se emplean microorganismos para recuperar metales como cobre desde los minerales que los contienen. Es un proceso natural de disolución de sulfuros resultante de la acción de un grupo de bacterias que oxidan minerales sulfurados. Las bacterias catalizan la oxidación de elementos como el hierro ferroso o el azufre reducido, actuando de esta forma absorben la energía que utilizan para el mantenimiento y proliferación de sus células.

Los microorganismos más frecuentemente usados son bacterias quimioautotróficas y mesófilas entre las que se destacan *Acidithiobacillus ferrooxidante* y *Acidithiobacillus thiooxidante*. También se encuentran asociadas a este proceso, células de *Leptospirillum ferrooxidante*. El uso de estas especies de bacterias en aplicaciones industriales de esta metodología, está asociado directamente a su carácter de acidófilos y a los escasos requerimientos de nutrientes e infraestructura necesarios (debido a que no requieren fuentes orgánicas de energía ni mantenimiento de temperaturas elevadas) lo que permite que el proceso sea económicamente factible para la recuperación de diferentes metales a partir de minerales. [17]

CAPÍTULO II

PROCESO LIXIVIACIÓN

2.1. ANTECEDENTES SOBRE LA LIXIVIACIÓN

La Lixiviación es la disolución selectiva de los constituyentes de un mineral en una solución, mediante un proceso de reacción y de transporte de materia.^[3] En términos generales, consiste en la remoción de una o varias sustancias solubles, mediante la acción de un agente lixivante que disuelve la sustancia o metal de interés, permitiendo su recuperación desde el mineral.

La Lixiviación constituye la operación principal de la ruta hidrometalúrgica para el tratamiento de minerales de cobre y es aplicable sólo en ciertos casos, que en general, dependen del tipo de mineral, la ley de cobre, la disponibilidad de agua, terreno, etc.

Existen diversos procesos de lixiviación, y la elección de uno de ellos va a depender principalmente de la ley del mineral, la mineralogía, la granulometría, el tipo de contacto entre la solución lixivante y el mineral a tratar, etc., y en general, se clasifican en: lixiviación de lecho fijo o por percolación, lixiviación agitada o en reactores y lixiviación bacteriana. ^[5]

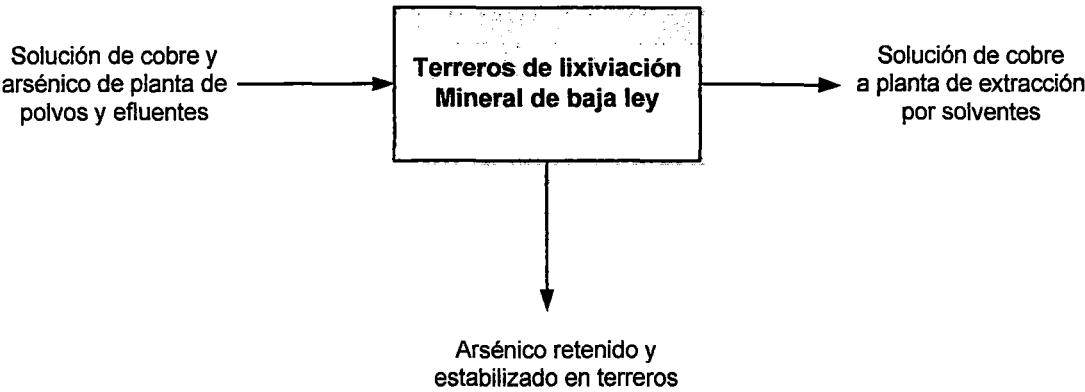
En la primera, el agente lixivante entra en contacto con el lecho rocoso y a medida que desciende gradualmente por él, va disolviendo el o los metales de interés. La solución rica se recoge por el fondo para luego dirigirse a una etapa de extracción. Dentro de este tipo se encuentran: lixiviación en pilas, lixiviación en bateas, lixiviación in-situ y lixiviación en botaderos. Por otro lado, la lixiviación en reactores se realiza en tanques agitados, bajo condiciones de temperatura y presión controladas, y es aplicable cuando ley de cabeza del mineral a tratar es

alta, ya que se requiere de material finamente molido o de un concentrado del mineral inicial. Finalmente, la lixiviación bacteriana viene a ser un proceso complementario y alternativo a la lixiviación en pilas y en botaderos para el tratamiento de minerales de cobre sulfurados, los cuales antes la presencia de determinados microorganismos incrementan su velocidad de disolución.

Estudios previos han demostrado que contenidos de arsénico en soluciones de riego no afectan la lixiviación ácido-bacterial de minerales de cobre debido a procesos químicos de retención natural en el mineral y de adaptación bacterial principalmente.

López, Javier (2009), menciona que el proceso de estabilización de arsénico consiste principalmente en que a través de la irrigación con efluente de la planta de ácido de los botaderos de lixiviación de minerales de baja ley, el arsénico se retiene y se mantiene de manera estable en el mineral.

Figura N° 05. Esquema del tratamiento de los efluentes ácidos Mexicana de Cobre



Fuente: López Javier (2009). [10]

Menciona que esto se debe a mecanismos de oxidación biótica y abiótica que logran generar compuestos de arsénico pentavalente (escorodita), los cuales reaccionan con el medio estabilizándose en el terrero (botadero) de tal manera que en las percolaciones el contenido de arsénico no excede los 10 ppm (0.010 g/L). Ver Figura 4.

El artículo menciona también que no existe impacto negativo del arsénico en la lixiviación ácida de sus botaderos, reflejados en sus resultados de extracción comparativos.

También se llevaron trabajos para determinar el impacto del arsénico en la lixiviación bacteriana en los botaderos. Los resultados indican que los microorganismos resultaron tolerantes al arsenito (As^{3+}) en concentraciones de hasta 800 ppm (0.800 g/L), además que actúan favorablemente para la estabilización del arsénico. Por lo tanto, se concluyó que los contenidos de arsénico no afectan la actividad bacteriana en sus botaderos.

En los estudios de estabilización de arsénico, se utilizaron soluciones ácidas que contenían hasta 12 g/L de As, llegando a una misma conclusión de estabilización del arsénico en el botadero del mineral de baja ley.

Dentro del mecanismo de estabilización se tiene que el arsénico se encuentra en forma de arsenito (As^{3+}) y con la presencia de férrico (Fe^{3+}) en solución y de óxidos de manganeso (Mn^{3+} y Mn^{5+}) en el mineral de baja ley, se oxida a arseniato (As^{5+}) donde tiende a precipitarse y ser adsorbido en las superficies de los óxidos de manganeso, precipitando luego en los botaderos como una estructura estable.

Asimismo, en muestras acuosas del circuito de lixiviación y extracción por solventes no se identificó la presencia de arsénico en las concentraciones proporcionales como era enviado a los botaderos.

Actualmente, los botaderos se vienen regando con el ácido débil de la Planta de Ácido de Mexicana de Cobre a un ratio de (500-800) $\text{m}^3/\text{día}$ con (4-7)

g/L As y (30-60) g/L H⁺ por más de 12 años, obteniéndose percolaciones en concentraciones de (10-15) ppm As.

El As³⁺ domina en la superficie de los botaderos, sin embargo en las muestras tomadas a mayor profundidad domina el As⁵⁺ (hasta 100 % en una de las muestras). Este último resultado es crucial ya que el As⁵⁺ forma iones negativos, que en el ambiente se retienen por procesos de desorción. En un medio ácido la retención es aún más probable ya que todas las arcillas presentan carga positiva. Además en muestras profundas de los botaderos, la fracción residual del arsénico que no libera a este elemento ni con agua, ni con bicarbonato, ni con ácido clorhídrico (HCl) es muy alta; lo que indica la formación de una fase sólida muy estable.

En otra investigación, Mateo Magda (2005), evaluó la precipitación del arsénico, en presencia de iones férricos y piritita (catalizador), como scorodita, su forma cristalizada que es muy estable e insoluble. [17]

Según la investigación, la estrategia para hacer frente al problema de arsénico disuelto en soluciones de biolixiviación y biooxidación sería, primero la oxidación del As³⁺ a As⁵⁺ y después la precipitación del arseniato férrico preferiblemente como scorodita.

La especiación del arsénico disuelto se puede representar en un diagrama de Pourbaix Eh-pH. En la Figura 06, se muestra la predominancia de los iones arsenito y arseniato, disueltos en función del potencial y pH. Termodinámicamente a pH bajo, el arsenito presente como H₃AsO₃ debería ser fácilmente oxidado por los iones férricos (Fe³⁺) a arseniato, y luego en presencia de iones Fe³⁺ y (SO₄)²⁻ se formaría el arseniato férrico que al contacto con el aire se cristalizaría y formaría la scorodita, según se muestra en las reacciones siguientes:

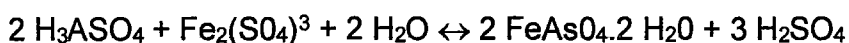
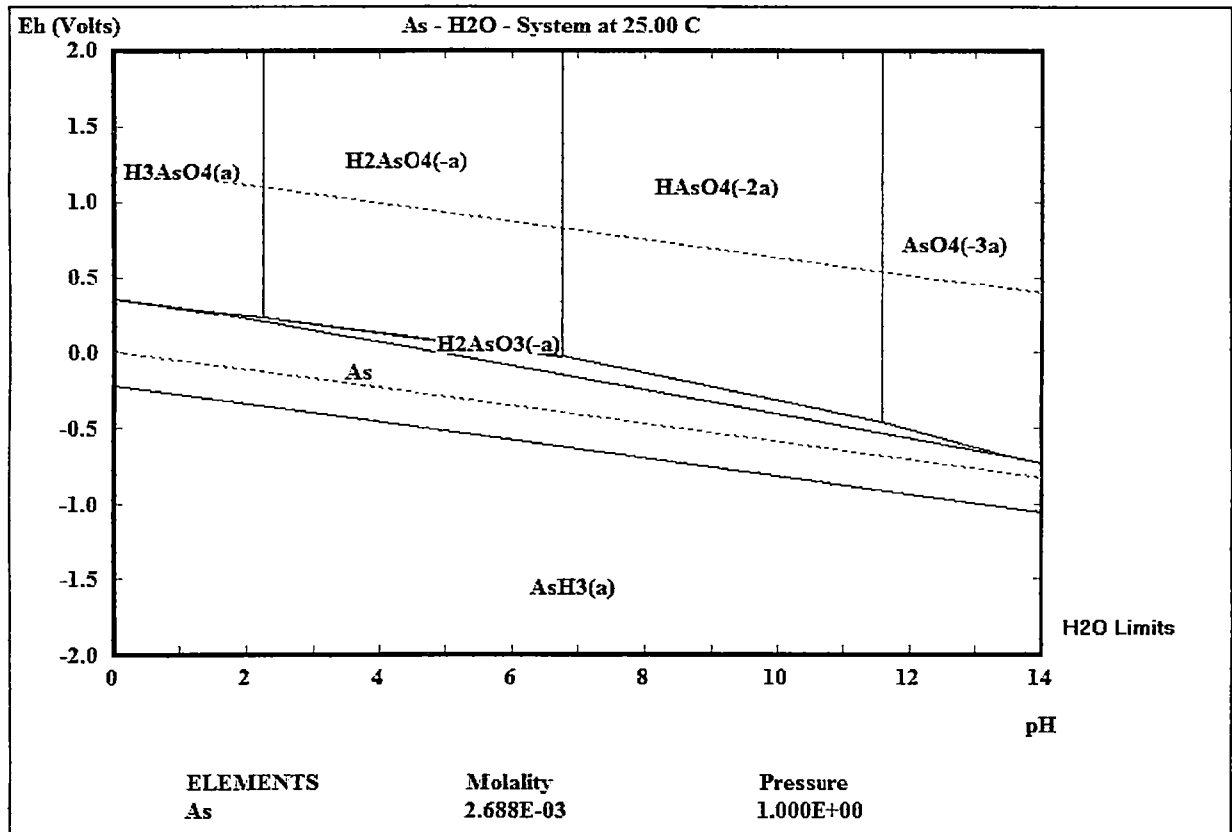
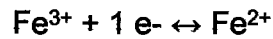
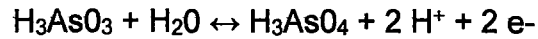
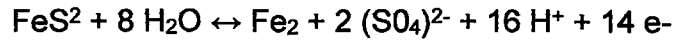


Figura N° 06. Diagrama de Pourbaix de especies de Arsénico en solución acuosa a 25 °C y 1 atm



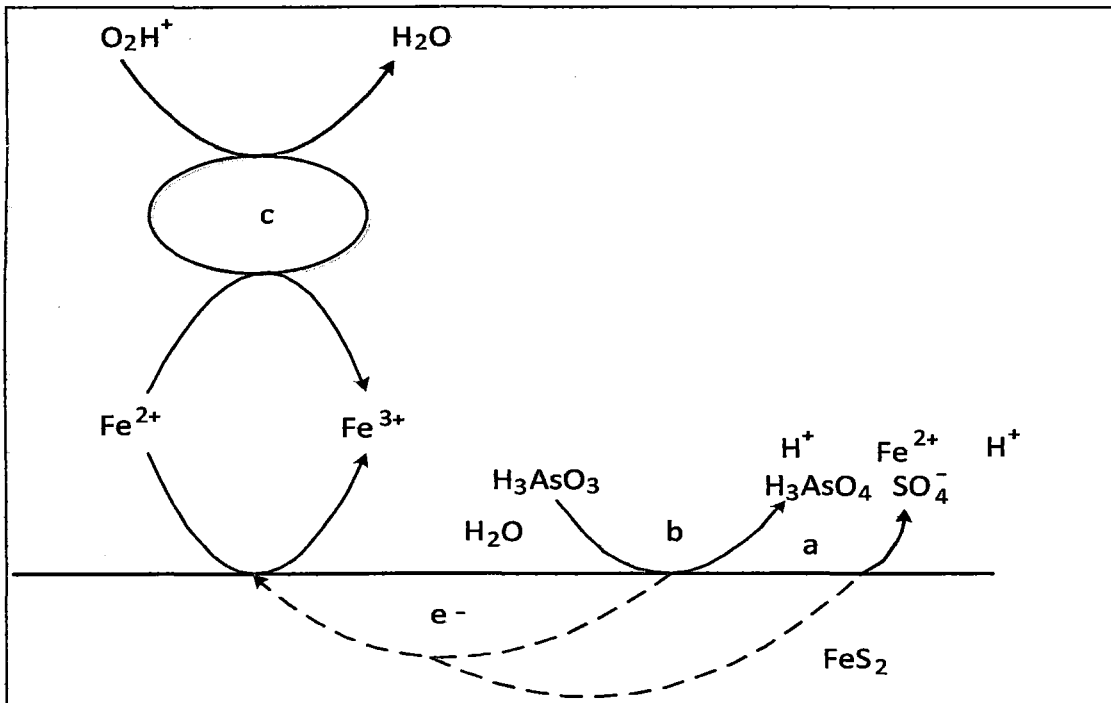
Fuente: Pourbaix M. (1974) "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions" Pergamon Press, New York. USA.

Sin embargo, según el artículo en la mayoría de casos la cinética de la reacción es muy lenta y no se observa casi ninguna oxidación de arsenito, pero, en presencia de minerales de pirita en los botaderos, las reacciones descritas arriba, sucederían y tendrían una cinética de reacción rápida. El mecanismo aún no está completamente aclarado, pero se afirma que la pirita se comportaría como la zona anódica (disolución) y la zona catódica sería producida en la superficie de la pirita por la oxidación bacteriana, teniendo así un sistema electroquímico.



Este mecanismo (Ver Figura 07), puede ser explicado como una reacción electroquímica en la superficie de la pirita. La función de los microorganismos sería mantener altos potenciales redox en la solución de riego y altas concentraciones de Fe^{3+} mediante la re-oxidación del Fe^{2+} . Las bacterias también pueden estar implicadas en las reacciones anódicas y catódicas descritas arriba, participando en el transporte de electrones en la superficie sólida.

Figura N° 07. Mecanismos involucrados en la oxidación del arsenito en presencia de pirita y microorganismos



Fuente: Pourbaix M. (1974) "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions" Pergamon Press, New York. USA.

2.2. PROCESO DE LIXIVIACIÓN

La lixiviación es la disolución total o parcial de un mineral con el fin de recuperar uno o varios elementos de valor económico por medio de reactivos (agentes lixiviantes) que los disuelven o transforman en sales solubles. [14]

2.3. LIXIVIACIÓN EN BOTADEROS

Esta técnica consiste en lixiviar desmontes o sobrecarga de minas con operaciones a tajo abierto, lo que debido a sus bajas leyes no pueden ser tratados por los métodos convencionales (flotación). Este material, generalmente del tamaño "run of mine" (es decir, tal como sale de la mina), es depositado sobre superficies poco permeables y las soluciones percolan a través del lecho por gravedad. Normalmente son de grandes dimensiones, requiere de poca inversión y es económica su operación, pero la recuperación es baja y necesita tiempos excesivos para la extracción del metal. [6]

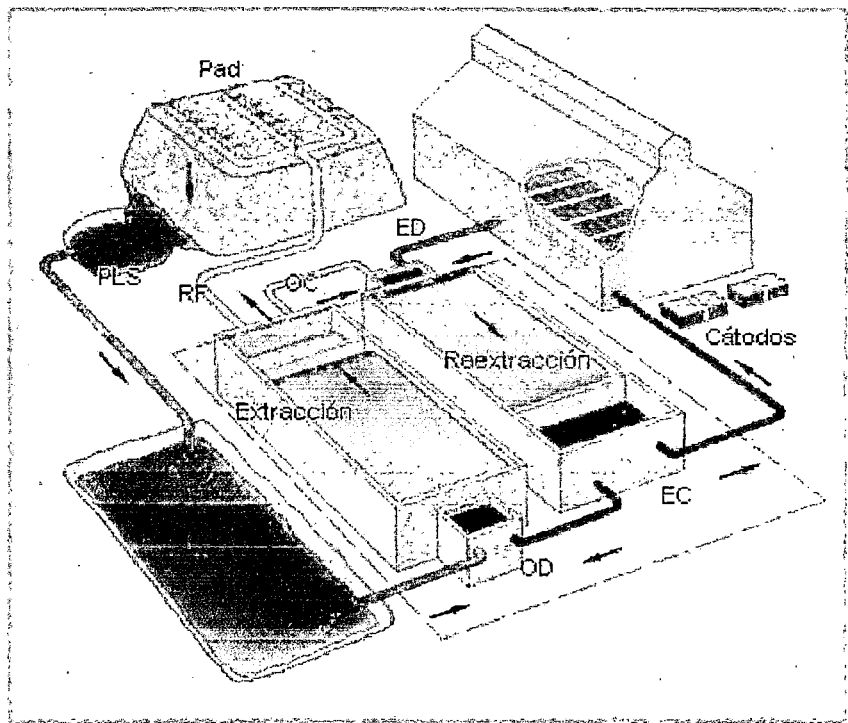
Normalmente la lixiviación en botaderos es una operación de bajo rendimiento. Entre las diferentes razones para ello se puede mencionar:

- ❖ Baja penetración de aire al interior del lecho.
- ❖ Gran tamaño de algunas rocas.
- ❖ Compactación de la superficie por empleo de maquinaria pesada.
- ❖ Baja permeabilidad del lecho por formación de precipitados (yeso, hidróxido, férrico, jarosita, etc).
- ❖ Excesiva canalización favorecida por la heterogeneidad de tamaños del material en el botadero.

2.4. LIXIVIACIÓN DE COBRE

En el caso de la lixiviación de cobre, los principales minerales de cobre por su abundancia son la Calcopirita (CuFeS_2), la Calcosita (Cu_2S), ambos de lixiviación lenta y como óxidos se tiene la Malaquita ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$) y Crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{OH}$). Otro de los sulfuros importantes involucrados en el proceso es la Pirita (FeS_2). Se utiliza como agente lixivante al ácido sulfúrico (H_2SO_4). Cuando se procesa mineral de baja ley, la lixiviación se realiza en pilas de lixiviación o en botaderos, que consiste en la acumulación de mineral de bajo grado de cobre (0.10 %Cu a 0.30 %Cu) para luego ser regados por goteo o aspersión con una solución residual del proceso de extracción por solventes llamada refino o raff, a la cual se agrega agua y ácido con el fin de compensar las pérdidas por fugas, evaporaciones y mantener el pH en valores que oscilen entre 1.5 y 3.0 para prevenir la destrucción de bacterias, minimizar la hidrólisis y la precipitación del hierro (jarositas). Producto de este riego se forma el PLS (solución impregnada de cobre) que es colectado en un conjunto de pozas para luego ser llevada mediante un sistema de bombeo hacia la poza de alimentación de la planta de extracción por solventes (SX). Una forma de describir como un todo los procesos de lixiviación SX-EW es visualizar los tres ciclos interconectados (Ver Figura 08), donde el cobre es transferido desde un ciclo a otro sucesivamente.

Figura 08: Planta extracción por solventes y deposición electrolítica en Toquepala y Cuajone en una operación de Lixiviación de cobre.



Fuente: Planta de Extracción mina Southern Copper Perú Corporation (Toquepala)

Las dimensiones de los botaderos Sur y Noroeste de Toquepala oscilan entre 50 m y 250 m y están ubicadas en un radio de 10 km del tajo. Que de acuerdo a la topografía permiten almacenar de unos cuantos miles a millones de toneladas. Es necesario indicar que las alturas originales varían con el tiempo debido a:

- ❖ Transporte de finos a los espacios vacíos debido a la compactación.
- ❖ Aumento de peso del botadero debido al % de saturación de solución acuosa.
- ❖ Disolución y desintegración de los minerales del botadero.

La distribución granulométrica del mineral nos indica aproximadamente un 55% menor a 8" (run of mine) y se tiene tamaños máximos hasta 39", condiciones que influyen en la lixiviación de botaderos. [17]

La lixiviación de un botadero es compleja debido a que se tiene interacción de muchas variables: composición mineralógica, distribución de tamaños, segregación, compactación, % saturación, etc. Por ello es importante establecer ciclos de riego y reposo que permitan provocar ingreso de aire, la oxidación, acción bacterial y sobresaturación.

2.5. DIAGRAMA POURBAIX DE ESPECIES DE COBRE

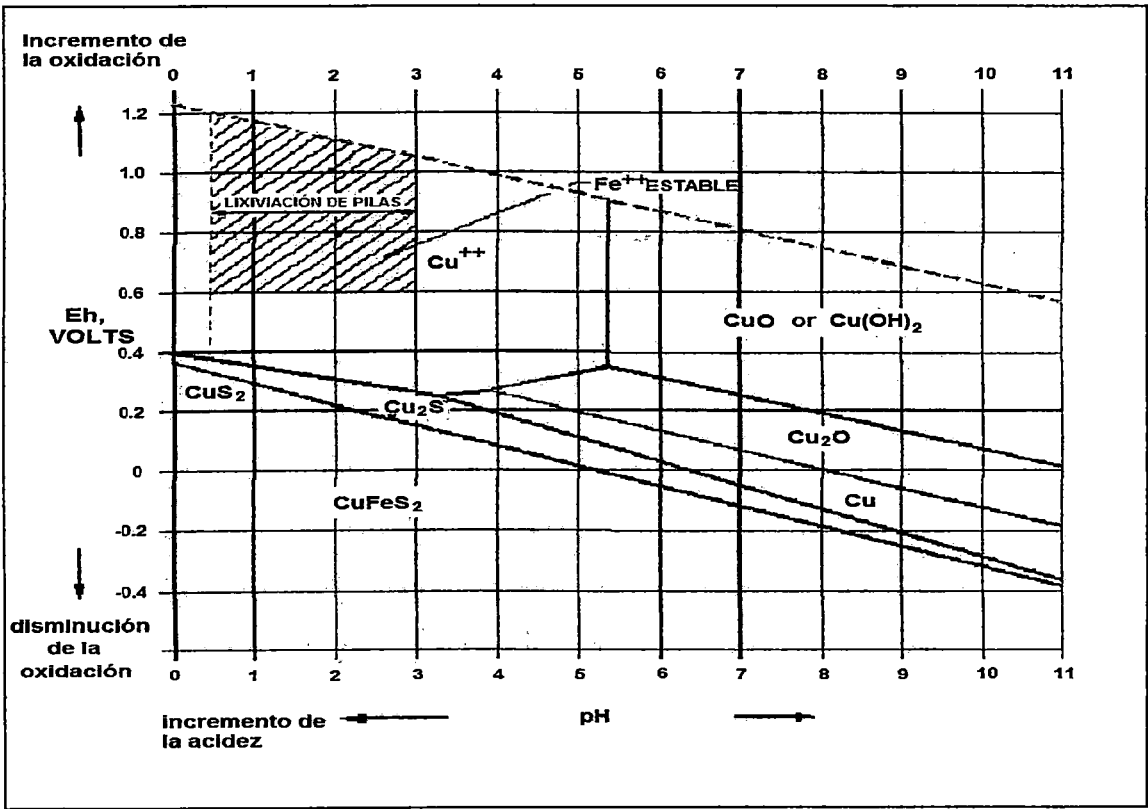
Al momento de lixiviar los minerales con un agente oxidante (Ejemplo: ácido sulfúrico diluido) provoca una serie de reacciones químicas y electroquímicas con los diferentes elementos (especies químicas) contenidos en el mineral. Es en tal momento donde la Termodinámica nos ayuda a saber que reacciones no ocurrirán y que reacciones tienen alta probabilidad de que ocurran.

Como complemento es necesario conocer e interpretar los diagramas de Marea! Pourbaix, que son gráficas de tratamientos termodinámicos de un sistema (por ejemplo nos interesa el sistema agua-cobre-azufre) en éstos se observa campos de estabilidad de iones, elementos y compuestos en función de dos variables: pH y potencial de oxidación-reducción.

Dentro de las principales zonas marcadas en el diagrama de Pourbaix (Ver Figura 09), los diferentes estados químicos del cobre son mostrados como estables. Esto simplemente significa que la forma dada del cobre puede existir en las condiciones de pH y Eh mostrados en los ejes del diagrama. Por ejemplo, en un pH de 8.0 el cobre puede existir ya sea como CuO o Cu(OH)_2 para cualquier Eh entre 0.20 voltios y 0.75 voltios. En un Eh de -0.20 voltios el CuFeS_2 puede existir entre valores de pH de 0 y aproximadamente 8.25. El Eh es una medida (en voltios) de la fuerza de oxidación de una reacción particular. [17]

Para obtener el cobre en un estado en donde se disuelva en la solución de lixiviación, es necesario formar Cu^{2+} . Del diagrama, el CuO y el Cu(OH)_2 se convierten en Cu^{2+} si el pH es disminuido por debajo de 5.4 (encima de un Eh de 0.4). En efecto, esto es exactamente lo que ocurre cuando la adición de solución de lixiviación disminuye en pH. Cuanto menor sea el valor de pH de 5.4, el CuO y el Cu(OH)_2 llegan a ser menos estables y mayor es el porcentaje de CuO y Cu(OH)_2 que se convierte a Cu^{2+} . El porcentaje de conversión es el porcentaje de cobre recuperado. El CuCO_3 sigue el mismo proceso general, no mostrado en este diagrama.

Figura N° 09. Diagrama de Pourbaix de especies de cobre en solución acuosa a 25 °C y 1 atm



Fuente: Pourbaix M. (1974) "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions" Pergamon Press, New York. USA.

2.6. MINERALES DE COBRE Y SUS PRINCIPALES REACCIONES

Los minerales de cobre se pueden encontrar en la naturaleza como óxidos de cobre o como sulfuros de cobre, siendo esta mineralogía importantísima en la respuesta metalúrgica del sistema. ^[9] Entre las especies oxidadas mayormente encontradas tenemos:

- ❖ Malaquita : $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$
- ❖ Cuprita : Cu_2O
- ❖ Tenorita : CuO
- ❖ Brocantita : $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$
- ❖ Crisocola : $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Entre las especies sulfuradas que se encuentran comúnmente tenemos:

- ❖ Calcopirita: CuFeS_2
- ❖ Bornita : Cu_5FeS_4
- ❖ Calcosita : Cu_2S
- ❖ Covelita : CuS

En el caso de de la oxidación la calcopirita y calcosita puede ser considerada como incompleta si sólo se logra formar como producto de reacción el azufre elemental y será completa si se obtienen sulfatos (máximo grado de oxidación). Cuando se alcanza el máximo grado de oxidación del azufre del mineral sulfurado (pirita, calcopirita, bornita, calcosita, etc.), entonces hay producción de ácido y evitamos la formación de azufre elemental en la matriz de mineral. ^[17]

Los principales minerales de cobre en los botaderos de Toquepala son calcopirita (CuFeS_2) y calcosita (Cu_2S). Ver Tabla 01.

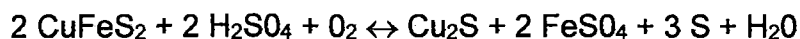
Tabla N° 01. Mineralogía presente en botaderos sur (Toquepala)

Botaderos	Óxidos	Calcopirita	Calcosita
2	0.0 %	79.6 %	20.4 %
3	0.0 %	86.6 %	13.3 %
4	0.0 %	83.3 %	16.4 %
3250	0.0 %	84.9 %	15.1 %
Til	26.2 %	65.7 %	8.1 %

Fuente: Elaboración propia

Calcopirita (CuFeS_2), la calcopirita se lixivia lentamente. Las reacciones de lixiviación de este mineral son complejas, pero pueden ser simplificadas en varios pasos:

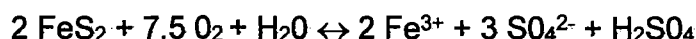
La lixiviación del hierro desde la calcopirita con ácido sulfúrico forma sulfato de hierro, azufre elemental y minerales sulfurados de cobre secundario como calcosita (Cu_2S) o covelita (CuS). Estas reacciones se dan en diferentes pasos, pero la reacción global para producir calcosita puede ser resumida de la siguiente manera:



El sulfato de hierro y el azufre son productos sólidos que pueden inhibir la reacción global de la lixiviación de cobre ya que pueden no permitir una buena difusión del agente lixivante, por ello es importante dar las condiciones químicas necesarias, especialmente el pH.

Un pH menor a 3.0 y reposos periódicos ayudan a controlar la formación de películas sólidas complejas. Adicionalmente, es conveniente usar una solución fuerte de ácido sulfúrico periódicamente a través de los botaderos para ayudar a disolver esta película.

El hierro tiene dos especies iónicas: ion férrico (Fe^{3+}) uno de los más poderosos agentes oxidantes conocidos y el ión ferroso (Fe^{2+}). Los botaderos de Toquepala tienen un contenido significativo de pirita (FeS_2), la cual reacciona en presencia de aire, agua y bacterias para formar iones férricos de la siguiente manera:



Además de ion férrico, esta reacción también genera ácido sulfúrico (H_2SO_4) reduciendo así el requerimiento de ácido total.

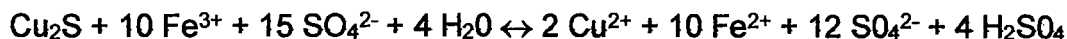
Pero hay que tener presente que la transformación del ión ferroso a férrico y la formación de agua son reacciones muy lentas y es necesario de un catalizador como por ejemplo los microorganismos que hacen que estas reacciones lentas se aceleren en un millón de veces. Entonces es importante asegurar bacterias que oxiden el azufre que es una limitante física en la lixiviación de minerales sulfurados.

Las bacterias actúan como "catalizador" para aumentar la velocidad mencionada, viven naturalmente en los botaderos y son miembros de la familia de los *Thiobacillus*, probablemente *Thiobacillus thiooxidans* y *Thiobacillus ferrooxidans*. Estas bacterias se reproducen bajo las siguientes condiciones:

- ❖ pH entre 2.0 y 2.5
- ❖ Temperatura entre (25-40) °C y aún en clima relativamente frío. Estas temperaturas pueden ser alcanzadas dentro del botadero como resultado del calor producido por algunas de las reacciones exotérmicas de lixiviación.
- ❖ Suministro adecuado de oxígeno.

Calcosita (Cu_2S), la calcosita es otro mineral presente en los botaderos. La calcosita y la covelita (CuS) son formados por la lixiviación parcial de la calcopirita. El cobre de estos minerales puede ser disuelto por la solución de

lixiviación por reacción con iones férricos. La reacción de la calcosita es muy similar a la de la covelita.



Adicionalmente a la producción de iones cúprico (Cu^{2+}) la reacción también reduce el ión férrico (Fe^{3+}) a ión ferroso (Fe^{2+}). Este último no lixivia al cobre, pero es reoxidado por acción de las bacterias. De esta manera el hierro es usado para pasar de férrico a ferroso y luego a regresar a la forma férrica.

Los minerales de cobre ocupan una porción relativamente pequeña del volumen total de roca. La mayor cantidad de estos compuestos están constituidos por silicatos complejos, los cuales son llamados ganga. Es de mucha importancia considerar las especies químicas consideradas como ganga en la lixiviación del cobre, debido a que son consumidores de ácido y pasan a ser parte de las impurezas (Fe, Mn, Zn, Ca, Al, y otros) que debe evitarse en la composición de los cátodos de cobre.

2.7. CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN

Al conocer la velocidad en que ocurren las reacciones se está en condiciones de diseñar el tamaño de equipos de una planta para una capacidad de tratamiento considerando la extracción de cobre que puede lograrse en un tiempo; además se logra planificar a corto, mediano y largo plazo la producción. Esto está relacionado a la parte económica del proyecto y es considerada como la observación macro de la cinética de la lixiviación. Por otra parte es importante conocer los mecanismos de reacción (interacción mineral sulfurado/oxidado y ácido sulfúrico) y determinar la etapa controlante para optimizar y controlar el proceso; esta observación es considerada como observación micro de la cinética de la lixiviación. [17]

La cinética química tiene como objetivo encontrar la relación entre la

reacción química y el tiempo en que ocurre. Generalmente la termodinámica no explica porque las reacciones son lentas a pesar que el valor termodinámico ($\Delta G < 0$) nos indica que es una reacción posible. Como ejemplo tenemos la calcopirita, que es termodinámicamente posible; pero en la práctica sólo se alcanza a lixiviar el 5% de cobre en aprox. 100 días, en cambio la calcosita y covelina que tiene valores similares se obtiene una extracción de 50% y 80% respectivamente.

Las principales etapas de reacción (lixiviación) se pueden resumir en 4 etapas, esto de acuerdo a varios modelos presentados en la bibliografía hidrometalúrgica:

Transporte de masa del reactante (refino) a través de la interfase sólido-líquido.

- ❖ Transporte de masa de los reactantes a través de la capa porosa.
- ❖ Reacción química o electroquímica en la superficie de la mena incluyendo adsorción y desorción.
- ❖ Transporte de masa de productos (PLS) a través de la capa porosa e interfase hacia el seno de líquido o refino.

En resumen los sistemas hidrometalúrgicos se caracterizan por involucrar reacciones en sistemas heterogéneos y la etapa controlante puede ser la reacción química o la transferencia de masa de los reactivos (refino) y productos (PLS).

2.8. CICLOS DE LIXIVIACIÓN

El ciclo básico de lixiviación de Toquepala es relativamente complejo ya que las reacciones de lixiviación son más lentas, y por ende necesitan tiempos de reposo más largos para fomentar la oxidación de sulfuros por las bacterias. ^[17]

Asimismo, para que ocurra la disolución del cobre contenido en el mineral es necesario que en el primer riego se alcance un porcentaje de saturación de mineral (humedad) que permita una buena difusión de ácido a la matriz de mineral (por capilaridad) para alcanzar el pH óptimo e inicien las reacciones químicas y electroquímicas. Es recomendable superar el 6% de humedad y pH menor a 3.

Luego del acondicionamiento se menciona el primer ciclo de lixiviación que corresponde al primer reposo y primer riego (primera lixiviación), luego se tiene el segundo reposo y segundo riego (segunda lixiviación) y así sucesivamente. Los ciclos de reposo y riego son controlados teniendo en cuenta su costo y beneficio.

2.9. ACTIVIDAD BACTERIAL

La lixiviación bacteriana está provocada por la catálisis que ciertos microorganismos ejercen durante la disolución de determinadas menas minerales. Efectivamente, el microorganismo utiliza el mineral como combustible tomando electrones para sus propósitos de pervivencia. En este tipo de procesos no son necesarias altas energías de activación; una prueba de ellos es que las reacciones transcurren a baja presión y baja temperatura. [6]

Por lo tanto, se entiende por biolixiviación, también denominada lixiviación bacteriana, como el ataque y solubilización de un mineral mediante la acción directa o indirecta de distintos microorganismos. Este proceso natural resulta principalmente de la acción de un grupo de bacterias llamado *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Dentro de los minerales de importancia que pueden ser tratados por vía biológica tenemos: calcopirita (CuFeS_2), covelita (CuS), calcosita (Cu_2S), arsenopirita, sulfuras auro-argentíferos, sulfuras de zinc, etc.

El proceso eje es una reacción redox en un medio ácido y en un sistema heterogéneo (sólido-líquido). Las bacterias intervienen en el éxito del proceso

redox, haciendo posible que los potenciales electroquímicos sean los adecuados tanto para la reacción anódica como para la reacción catódica. Finalmente, fenómenos de interface y velocidad de cambio de reactantes y productos deciden la cinética del proceso.

El cultivo bacteriano más usado en biolixiviación corresponde a un cultivo mixto de bacterias. Las variaciones en las características físicas y químicas del mineral, condiciones climáticas, pH, y en la disponibilidad de O_2 , CO_2 , agua y nutrientes apropiados afectarán la naturaleza y distribución cualitativa y cuantitativa de las poblaciones de microorganismos que se desarrollan. Este medio altamente interactivo está cambiando continuamente, llevando a una sucesión de poblaciones microbianas.

En general, las complejas asociaciones microbianas que se desarrollan en la lixiviación de minerales sulfurados están dominadas por bacterias acidófilas con capacidades para oxidar fierro y azufre. Estos organismos a menudo presentan tolerancia a altos niveles de acidez y altas concentraciones de metales disueltos.

En resumen ^[17], el proceso de disolución de los sulfuros puede interpretarse como algo realizado por:

- ❖ La acción oxidante de las bacterias quimiolitó autótrofa actuando directamente sobre los elementos componentes de los sulfuros minerales.
- ❖ La acción química de un agente oxidante tal como el ión férrico que puede encontrarse en el sistema de reacción sea por haber adicionado el reactivo o por haberse producido éste dentro del sistema.

Para que ocurra la producción de iones férricos por lixiviación del sulfato de hierro, pirita y otros minerales de hierro, es necesario el efecto catalizador de las bacterias para aumentar la velocidad de reacción del ión Fe^{2+} a Fe^{3+} . Este

último reacciona con los sulfuros de cobre convirtiéndolos a Cu^{2+} , soluble en ácido sulfúrico.

En la medida de que se tenga mayor cantidad de bacterias, el efecto de la descripción anterior va a ser favorecida y una forma de control es el conteo de bacterias presentes y su arrastre en determinados sectores del proceso de lixiviación.

Como ya se mencionó, los procesos de biolixiviación permiten recuperar elementos valiosos de los minerales sulfurados y en algunos casos minerales oxidados insolubles. La forma como estos microorganismos lixivian el mineral es aún tema de discusión; pero se puede formular la más fundamentada al momento; esta se refiere a dos mecanismos, uno directo y otro indirecto.

En el mecanismo directo, el sulfuro es directamente oxidado a sulfato por acción de los microorganismos adheridos a la superficie del mineral. Ahora, sólo la bacteria que ataca (adherida) tiene acceso al sustrato y todo el oxígeno y CO_2 que consume ocurre en la superficie del mineral (Ver Figura 09). Dónde: M, es un metal bivalente. Ejemplo: Reacción de la pirita.

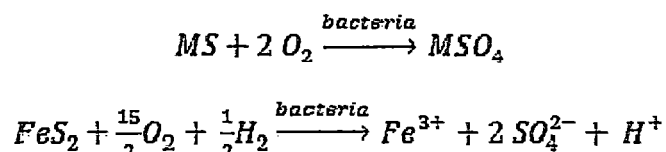
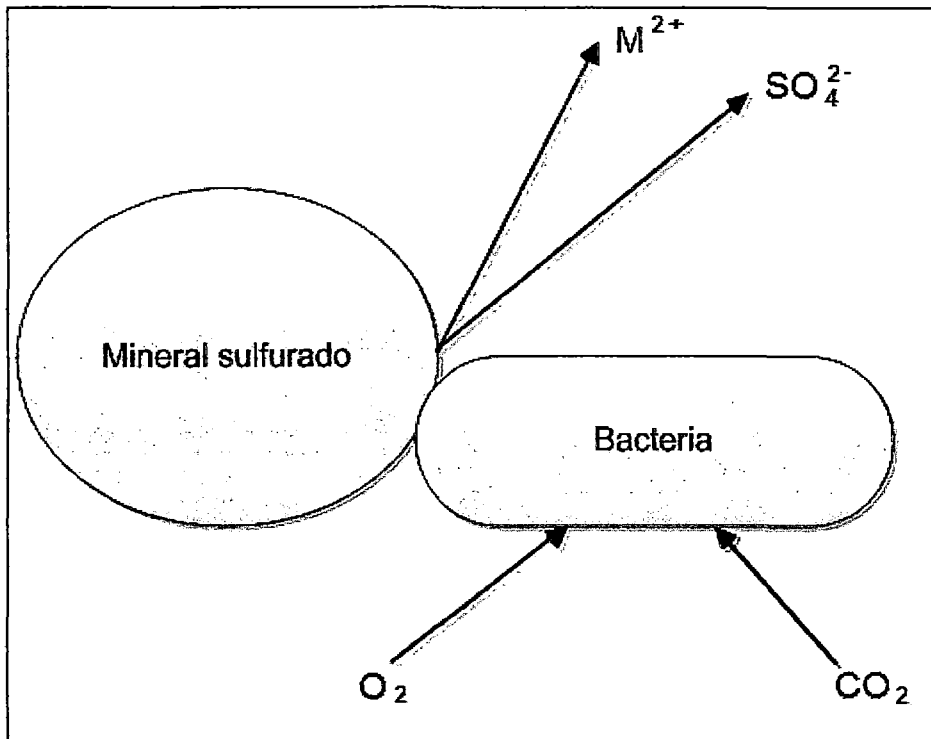
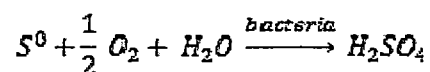
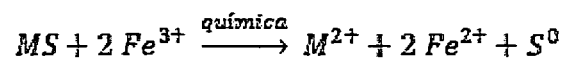


Figura N° 10. Mecanismo directo de lixiviación bacterial

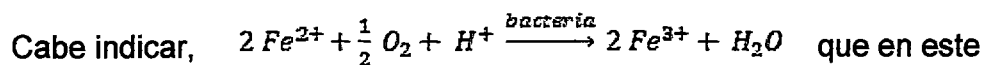


Fuente: Elaboración propia

En el mecanismo indirecto, la bacteria actúa directamente sobre el Fe^{2+} quitándole un electrón y originando un excelente agente oxidante, Fe^{3+} , el que se reduce al reaccionar con el sulfuro metálico, éste le cede un electrón regenerándose el Fe^{2+} original.

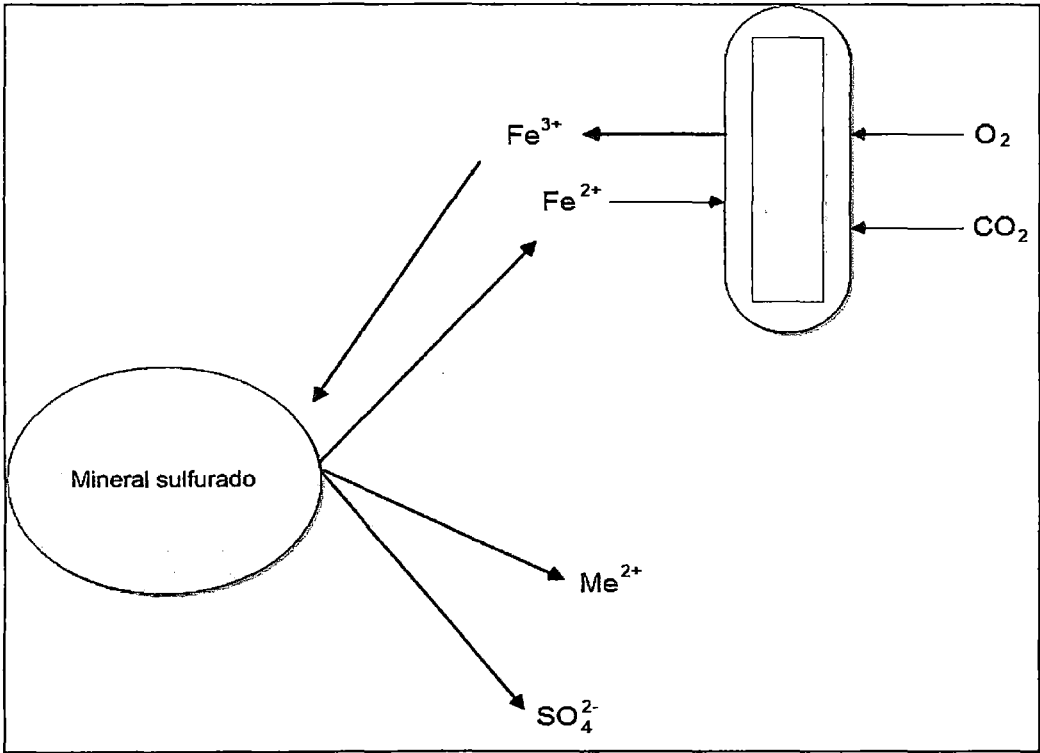


Luego el azufre elemental y el ión ferroso generados son oxidados por los microorganismos, así:



último mecanismo se tiene un ciclo de oxidación y reducción del hierro; por tanto es necesaria la presencia de hierro en solución. Además la reoxidación química del ión ferroso es muy lenta a los bajos pH y temperaturas de operación y solo esto mejoraría si se trata en sistemas calientes (Ver Figura 11).

Figura N° 11. Mecanismo indirecto de lixiviación bacterial



Fuente: Elaboración propia

En el mecanismo indirecto todas las bacterias (que están en solución) tienen acceso al sustrato, y consumen el oxígeno y CO₂ que hay solución. En las (Tabla N° 02 y 03), se muestra los mecanismos de las reacciones de la calcopirita y pirita.

Tabla N° 02. Reacciones de la calcopirita

Mecanismo	Estequiometría	Ecuación
Directo	$CuFeS_2 + 4.25 O_2 + H^+ \rightarrow Cu^{2+} + 2 SO_4^{2-} + Fe^{3+} + \frac{1}{2} H_2O$	Bio
Incompleta	$CuFeS_2 + 4 Fe^{3+} \rightarrow Cu^{2+} + 2 S^0 + 5 Fe^{2+}$	Químico
Indirecta	$5 Fe^{2+} + \frac{5}{4} O_2 + 5 H^+ \rightarrow 5 Fe^{3+} + \frac{5}{2} H_2O$ $2 S^0 + 3 O_2 + 2H_2O \rightarrow 2 H_2SO_4$	Bio Bio
Completa	$CuFeS_2 + 16 Fe^{3+} + 8 H_2O \rightarrow Cu^{2+} + 2 SO_4^{2-} + 17 Fe^{2+} + 16 H^+$	Químico
Indirecta	$17 Fe^{2+} + \frac{17}{4} O_2 + 17 H^+ \rightarrow 17 Fe^{3+} + \frac{17}{2} H_2O$	Bio

Fuente: Laboratorio Químico Southern Copper Perú Corporation Toquepala)

Tabla N° 03. Reacciones de la pirita

Mecanismo	Estequiometría	Ecuación
Directo	$FeS_2 + \frac{15}{4} O_2 + \frac{1}{2} H_2O \rightarrow 2 SO_4^{2-} + Fe^{3+} + H^+$	Bio
Incompleta	$FeS_2 + 2 Fe^{3+} \rightarrow 2 S^0 + 3 Fe^{2+}$	Químico
Indirecta	$5 Fe^{2+} + \frac{3}{4} O_2 + 3 H^+ \rightarrow 3 Fe^{3+} + \frac{3}{2} H_2O$ $2 S^0 + 3 O_2 + 2H_2O \rightarrow 2 H_2SO_4$	Bio Bio
Completa	$CuFeS_2 + 16 Fe^{3+} + 8 H_2O \rightarrow Cu^{2+} + 2 SO_4^{2-} + 17 Fe^{2+} + 16 H^+$	Químico
Indirecta	$15 Fe^{2+} + \frac{15}{4} O_2 + 15 H^+ \rightarrow 15 Fe^{3+} + \frac{15}{2} H_2O$	Bio

Fuente: Laboratorio Químico Southern Copper Perú Corporation Toquepala)

Podemos resumir que los requisitos más importantes para que exista una buena actividad bacteriana son:

- ❖ Presencia de cepas activas, sean éstas nativas o inoculadas.
- ❖ Que la roca sea permeable y/o que existan sulfuros sobre su superficie.
- ❖ Que el sulfuro metálico posea propiedades electroquímicas, además un adecuado producto de solubilidad.
- ❖ Que la humedad de la roca sea entre un (5-12) % dependiendo del tamaño del grano.
- ❖ Que el lecho del mineral sea aireada, permitiendo la penetración del aire quien llevará consigo el oxígeno y el CO_2 necesarios para la actividad bacteriana.
- ❖ Que la disolución de la roca cuente con los nutrientes necesarios para la bacteria: Magnesio, sodio, potasio, fosfato, amoníaco, entre otros. Las bacterias son quimio sintéticas, es decir se desarrollan en base a sales inorgánicas.
- ❖ Que la solución se encuentre a un $\text{pH}=2$. Es recomendable también mantener de (0.40-0.80) g/L de Fe y un potencial por encima de los 500 mV. Temperatura de (28-35) °C.
- ❖ Evitar altas concentraciones de Cl^- (no mayor de 30 g/L), SO_4^{2-} (no mayor de 200 g/L).
- ❖ Evitar cationes pesados con Ag, Pb, Hg, que afectan la actividad bacteriana. En muchos de los casos, el exceso de iones hacen la solución densa haciendo que reactivos y productos migren lentamente en otros casos alteran las mejores condiciones para el desarrollo de la actividad bacteriana (escasez de nutrientes, de oxígeno, formación de precipitados no deseables, etc.),

2.10. ELECTROQUÍMICA EN LA LIXIVIACIÓN ÁCIDA-BACTERIAL

Cuando dos minerales sulfurados de diferente potencial de reposo están en contacto íntimo en solución acuosa, el mineral de más alto potencial de reposo actúa como cátodo y se protege galvánicamente, el mineral con más bajo potencial de reposo (Ver Tabla 04) actúa como ánodo. [6]

El potencial de reposo depende del tipo de solución y concentración de solución. Si comparamos la interacción calcopirita y pirita se deduce que la calcopirita se comporta como ánodo (se disuelve) y la pirita se pasiva porque actúa como cátodo y es donde se reduce el oxígeno.

❖ Calcopirita (Ánodo):



❖ Pirita (Cátodo):



Tabla N° 04. Potencial de reposo de minerales sulfurados
(Solución 1M H₂SO₄)

Mineral	Potencial de reposo SHE, volt
Pirita	0.63
Calcopirita	0.52
Calcosita	0.44
Covelita	0.42
Galena	0.28

Fuente: Laboratorio Químico Southern
Copper Perú Corporation (Toquepala)

CAPÍTULO III

MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. MATERIAL

3.1.1. MATERIAL DE ESTUDIO

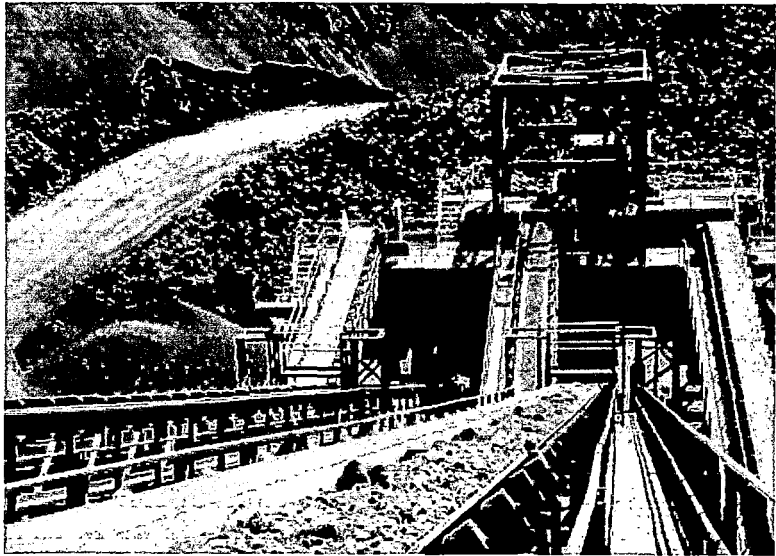
3.1.1.1. POBLACIÓN

El material utilizado en la presente investigación es un mineral sulfurado con alta presencia de sulfuras primarios y secundarios de cobre proveniente del tajo de Toquepala de la compañía minera Southern Copper Perú Corporation.

3.1.1.2. MUESTRA

Para el muestreo se seleccionaron 20 puntos en un tramo de 2 km (2000 kg del SBL) de la faja transportadora que alimenta al botadero mineral Quebalix. Aproximadamente 100000 t/día son alimentados por esta faja a dicho botadero (Ver Figura 12). Su composición química por mallas es mostrada en la Tabla 05.

Figura N° 12. Muestreo del mineral en faja transportadora



Fuente: Mina Southern Copper Perú Corporation (Toquepala)

Tabla N° 05. Distribución granulométrica y composición química del mineral en prueba

Malla	Dist.	CuT	CuSAc	CuSCN	CuIns	IS	FeT	FeSAc	As
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
+1	4.12	0.135	0.006	0.013	0.116	14.07	1.271	0.261	0.002
+¾"	23.18	0.136	0.008	0.017	0.111	18.38	0.911	0.221	0.007
+½"	33.77	0.143	0.006	0.016	0.121	15.38	1.007	0.202	0.009
+3/8"	10.71	0.162	0.005	0.017	0.140	13.58	0.994	0.188	0.013
+¼"	7.99	0.171	0.008	0.016	0.147	14.04	1.166	0.227	0.016
+10	10.42	0.185	0.009	0.019	0.157	15.14	1.321	0.268	0.013
-10	9.81	0.335	0.021	0.039	0.275	17.91	2.585	0.462	0.016
Total	100.0	0.169	0.008	0.019	0.141	15.95	1.194	0.242	0.010

Fuente: Laboratorio Químico Southern Copper Perú Corporation (Toquepala)

Los resultados indican que la ley de cobre total aumenta lenta pero constantemente entre las fracciones +1" y +m10, y luego hay un incremento notable en la -m10. El porcentaje de cobre soluble en ácido es extremadamente bajo y casi constante en todas las fracciones, con un claro incremento en la -m10. El porcentaje de cobre soluble en cianuro varía irregularmente en función del tamaño de grano aunque con una tendencia general a aumentar hacia las fracciones más finas.

3. 1.2. SOLUCIÓN DE RIEGO

Para manejar las mismas condiciones de operación de la planta LESDE, se tuvo mezclas de refino fresco-ácido débil y refino fresco-ácido preparado, siendo un punto clave las mezclas iniciales de solución (refino y ácido débil) donde los porcentajes utilizados fueron los mínimos para evitar disolución de elementos y tener acidez de riego aceptable (Ver Tabla 08). Se utilizó los PLS de cada día para la preparación y reposición, manteniendo las variables de acidez y volumen de riego diario.

El refino diario fue muestreado de la Poza Raff (Sur-puntual), la acidez y densidad promedio de esta solución fue de 6 g/L y 1.13 kg/L respectivamente. Presentaba un potencial redox por encima de 500 mV y constante que indicaba la alta actividad bacterial y presencia de Fe^{3+} , además contenía As en una concentración promedio de 0.010 gpl. El efluente (ácido débil) fue traído desde las plantas de ácido de Refinería en lio y almacenado en IBC's. En la reposición diaria de solución de riego se consideró 1% (volumen/volumen) de efluente.

En la tabla inferior (Tabla 06) se presenta el análisis químico ICP por 21 elementos del ácido débil utilizado en las pruebas y que es proveniente de las dos plantas de ácido (PAS1 y PAS2). La mayoría de elementos se encuentra en concentraciones muy bajas a excepción del arsénico que reporta valores entre

(4.2-6.4) g/L As en el efluente, asimismo la acidez se determinó entre (80-90) g/L H⁺.

Tabla N° 06. Análisis ICP del ácido débil utilizado para la preparación de solución de riego

Materiales disueltos		PAS 1	PAS 2	Materiales disueltos		PAS 1	PAS 2
Aluminio	mg/L	13.0	3.2	Magnesio	mg/L	5.46	3.21
Arsénico	mg/L	4152	6435	Manganeso	mg/L	0.404	0.128
Boro	mg/L	3.6	5.6	Molibdeno	mg/L	<0.5	0.62
Bario	mg/L	0.174	0.142	Sodio	mg/L	66.9	111
Calcio	mg/L	355	5.5	Niquel	mg/L	<0.25	<0.25
Cadmio	mg/L	13.7	40.3	Plomo	mg/L	3.8	4.5
Cobalto	mg/L	<0.25	<0.25	Antimonio	mg/L	<0.75	<0.75
Cromo	mg/L	0.44	<0.25	Selenio	mg/L	<1.3	<1.3
Cobre	mg/L	3.58	5.10	Sílice	mg/L	129	364
Fierro	mg/L	56.3	8.57	Zinc	mg/L	12.8	37.7
Potasio	mg/L	23.3	3.91				

Fuente: Laboratorio Químico Southern Copper Perú Corporation (Toquepala)

3. 1.3. EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y MATERIALES

- ❖ Soluciones valoradas de dicromato de potasio.
- ❖ Solución valorada de hidróxido de sodio fuerte.
- ❖ Solución valorada de carbonato de sodio 0,1 N.
- ❖ Frasco con solución preparada de difenilamina de sodio.

- ❖ Frasco con pellets de hidróxido de sodio (NaOH).
- ❖ Frasco con carbonato de sodio (Na₂CO₃).
- ❖ Frasco con dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇).
- ❖ Anaranjado de metilo.
- ❖ Botella con solución sulfofosfórica preparada.
- ❖ Mallas metálicas ASTM E-II (1 pulg, ¾ pulg, ½ pulg, 3/8 pulg, ¼ pulg, +m10 y -m10)
- ❖ Baldes (ARGENOX)
- ❖ Frascos (WHEATON, 500 ml.)
- ❖ Papel toalla (YICHEN)
- ❖ Gotero (SANDOZ)
- ❖ Bombilla de succión (INLAD S.A.C)
- ❖ Gradilla metálica (KRAMER, 50 tubos)
- ❖ Pinza para carga y descarga de crisoles (CRTS, 150mm)
- ❖ Soporte universal (HALDENWANGER)
- ❖ Pizetas (INLAD S.A.C, 250ML Y 1L)
- ❖ Bureta (INLAD S.A.C, 50ml)
- ❖ Fiola (INLAD S.A.C)
- ❖ Matraz erlenmeyer (INLAD S.A.C, 250ml)
- ❖ Vaso de precipitación de 500 ml (PIREX)

- ❖ Pipetas de 10 ml (INLAD S.A.C)
- ❖ Probeta graduada de 1L (INLAD S.A.C)
- ❖ Agitador Magnético (NUOVA II STIPRER 10 VELOCIDADES)
- ❖ Bagueta (INLAD S.A.C)
- ❖ Cucharita (INLAD S.A.C)
- ❖ Tanques para alimentación (SX KINETICS, Capacidad 10 L/min, T°= 20 a 60°C)
- ❖ Chancadora de quijadas (EIMM, Capacidad M3PH/pulg)
- ❖ Ro-Tap® (RX-29 and RO-TAP® RX-30 MODELS, de 8" a 200mm)
- ❖ Espectrofotómetro de absorción atómico (PERKIN ELMER™ PRECISELY, Flujo mínimo 28 L/min, P= 500 KPa)
- ❖ Mallas para granulometría (NEWARK, NEW JERSEY 07104, -m10 y +m10)
- ❖ pHmetro Thermo ORION (Model 420)
- ❖ Balanza analítica (EXCELL BH- 300 CAPACIDAD MÁXIMA 300g)
- ❖ Equipo de oxigenación (HANNA INSTRUMENTS)
- ❖ Casaca aluminizada (EASYVIEW PARKA T-L)
- ❖ Guantes vinílicos desechables (MARIGOLD, Talla m 7.5")
- ❖ Guantes de nitrilo verdes (JACKSON SAFETY* G80, Talla 9)
- ❖ Lentes de seguridad (KEVLAR)
- ❖ Zapatos de seguridad (KEVLAR, de 5 a 13, 14, 15 en mediano (D), ancho (E) y extra ancho (EEE o X)).

3.2. MÉTODOS

3. 2.1. DISEÑO

Se utilizó un diseño experimental factorial (dos variables de dos niveles cada uno), en el que se varió la concentración de arsénico y la concentración de ácido sulfúrico, y se determinó su influencia sobre el porcentaje de extracción de cobre.

Para evaluar estadísticamente los resultados obtenidos se aplicó el análisis de varianza para analizar si el efecto de las variable en estudio es significativo en los diferentes escenarios seleccionados, para tal efecto se considerará un error $\alpha = 0.05$ que corresponde a un nivel de confianza del 95 %.

La concentración de arsénico es una variable independiente del tipo cuantitativa en g/L que se mide en forma indirecta por absorción atómica.

La concentración de ácido sulfúrico es otra variable independiente del tipo cuantitativa en g/L que se mide en forma indirecta por titulación.

El porcentaje de extracción de cobre es una variable dependiente del tipo cuantitativa en % (peso/peso) que se mide en forma indirecta por relación de la cantidad final e inicial del cobre contenido en el mineral. Los niveles de las variables independientes se muestran en la Tabla 07.

Tabla N° 07. Niveles y valores de los factores, arsénico y ácido sulfúrico

Factor	Niveles	
	1	2
Concentración de arsénico, g/L	0.00	0.25
Concentración de ácido sulfúrico, g/L	6.00	10.00

**Fuente: Laboratorio Químico Southern Copper Perú
Corparation (Toquepala)**

Dada la capacidad disponible y la experiencia en el Laboratorio Químico Southern Copper Perú Corporation (Toquepala), en este tipo de pruebas de lixiviación, optamos por muestrear 20 puntos a lo largo de 2 km de faja transportadora para poder obtener un grupo de 04 columnas con 01 repetición para cada una.

La matriz bifactorial general para la disposición de datos de ambas variables dependientes, se presenta en el Apéndice A.

3. 2.2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

El espectrofotómetro de absorción atómica que se utilizó para medir la concentración de arsénico en solución es de la marca Perkín Elmer 3300.

El método aplicado para medir la concentración de ácido sulfúrico en solución fue el de titulación potenciométrica (Mountain States), este método es utilizado cuando la solución acuosa contiene concentraciones de Fe mayores a 5 g/L. Para esto se utilizó una bureta digital, un pHmetro Thermo ORION (Model 420) y un agitador magnético.

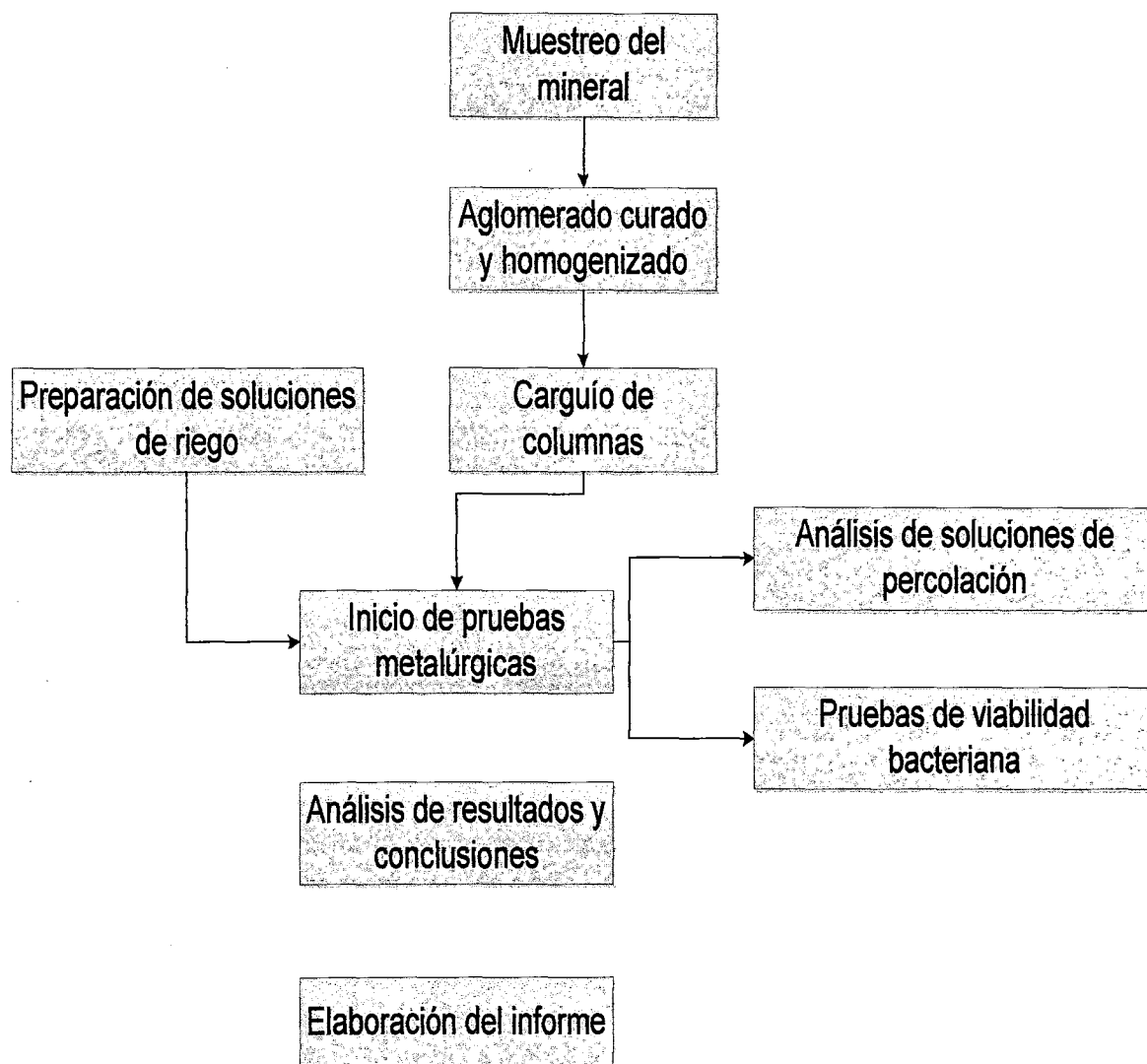
El método consiste en neutralizar con una solución de carbonato de sodio a una alícuota de la muestra hasta viraje naranja (indicador: anaranjado de metilo). Previamente se adiciona solución de yoduro de potasio y tiosulfato de sodio para enmascarar al hierro y cobre presentes (Ver Apéndice H).

Adicionalmente, en el apéndice F se muestra el método para medir la concentración de ácido sulfúrico en soluciones que contienen una concentración de Fe menores a 5 g/L.

El método aplicado para deducir la extracción de cobre es mediante un balance másico del metal en solución.

3. 2.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Figura N° 13. Diagrama del procedimiento experimental



Fuente: Elaboración propia

a) Elaboración de la matriz de pruebas en columna (Se muestra en la Tabla 08)

Tabla 08. Matriz de riego inicial y de reposición diaria de las soluciones de riego de cada columna de lixiviación

Pruebas	Tipo Circuito	Solución Riego Inicial			Reposición de Solución			
		Refino %	Ac. Débil %	Ac. Prep %	Ac. Débil %	Agua %	Ácido %	Refino %
1	Cerrado	100	-	-	X	X	X	X
2	Cerrado	100	-	-	X	X	X	X
3	Cerrado	100	-	-	-	X	X	X
4	Cerrado	100	-	-	-	X	X	X
5	Cerrado	95	5	-	X	X	X	X
6	Cerrado	95	5	-	X	X	X	X
7	Cerrado	95	-	5	-	X	X	X
8	Cerrado	95	-	5	-	X	X	X

Fuente: Laboratorio Químico Southern Copper Perú Corporation (Toquepala)

b) Se muestreó y se trasladó las 2 toneladas de mineral al área de pruebas (Planta Piloto de LESDE), donde fue homogenizado y clasificado para determinar las condiciones iniciales de distribución granulométrica. Las mallas utilizadas fueron: 1 pulg, ¾ pulg, ½ pulg, 3/8 pulg, ¼ pulg, +m10 y –m10. Tomando como referencia principal el tamaño de mineral utilizado en las columnas igual a p80 ¾ " se realizó el chancado y clasificación del mineral, obteniendo la distribución de tamaños mostrada en la Tabla 05, el material mayor a 1 pulg fue chancado previo al tamizaje (se tuvo rocas entre 30 cm y 50 cm).

c) Durante la preparación del mineral de cabeza se obtuvo 01 muestra general, representativa de todas las columnas y por mallas para su análisis

químico en el Laboratorio Químico de Toquepala cuyos resultados fueron utilizados en las evaluaciones metalúrgicas (Ver Tabla 05).

d) Se habilitó 08 columnas de HDPE con un promedio de altura de 2.0 m y 18.7 cm de diámetro. Así también se acondicionó el sistema de riego para cada columna, es decir: las mangueras de alimentación de solución, el lecho filtrante de la base de cada columna, las conexiones eléctricas para las bombas peristálticas, baldes codificados y completamente hermetizados, etc.

e) Aglomerado y curado, seguido del homogenizado previo al carguío de columnas. El peso del mineral para las columnas fue de 88 kg y la malla de menor abertura es la m10, que tiene un 9.81 % en peso para cada columna (ver Tabla 05), éstos son los finos que fueron adheridos a las partículas mayores formando glómeros mediante esta etapa de preparación.

La carga preparada (de acuerdo a la distribución granulométrica) para cada columna fue aglomerada y curada con solución de ácido sulfúrico (Ver Apéndice E). Bajo este esquema se presentan en la tabla 09, los pesos de ácido ingresado por columna en donde se calcula la humedad y curado inicial.

Tabla N° 09. Humedad de aglomerado y curado ácido del mineral

Columna	Peso Solución (Kg)	Volumen Solución (L)	Humedad Aglom. (%)	Curado Mineral (Kg/t)
C1A	2.73	2.71	3.01	0.47
C2A	2.62	2.60	2.89	0.45
C3A	2.73	2.71	3.01	0.47
C4A	2.92	2.80	3.11	0.48
C5A	2.64	2.62	2.91	0.45
C6A	2.66	2.64	2.94	0.46
C7A	2.64	2.62	2.91	0.45
C8A	2.60	2.58	2.87	0.45

Fuente: Laboratorio Químico Southern Copper Perú Corporation (Toquepala)

En los cálculos de la Tabla 09, se consideró la densidad y pureza del ácido sulfúrico en 1.84 kg/L y 97.5 % respectivamente, la solución ácida fue preparada a 15.2 g/L H. (Ver Apéndice E). Nótese que el porcentaje de humedad final en el carguío fue en promedio de 2.96 % y el curado ácido real obtenido en promedio es de 0.46 kg/t.

- f) Preparación de las soluciones de riego iniciales (Ver Tabla 08).
- g) Se realizó el carguío de las columnas con la ayuda de un torpedo hechizo para mejor caída/distribución de gruesos, intermedios y finos dentro la columna mineral. Una vez cargadas las columnas, se dejaron por un período de reposo de 07 días en promedio (ciclos on-off), tiempo en que el ácido ingresado empieza a lixiviar el mineral formando sulfatos de cobre listos a ser extraídos durante el riego. La reposición se realizó diariamente considerando obtener una acidez de riego de 6 g/L (primeras 04 columnas) y 10 g/L (04 columnas restantes). Se trabajó con una tasa de riego igual a 10 L/h/m².
- h) Se tomaron muestras de las percolaciones de todas las columnas y se enviaron a Laboratorio para su respectiva caracterización química (Cu, Fe, As, etc.).
- i) Luego de casi 04 meses de lixiviación se completaron 08 ciclos de riego-reposo, se procedió con la etapa de drenaje de todas las columnas. Las columnas drenaron por un espacio de 7 días antes de los trabajos de preparación mecánica.
- j) Adicionalmente, se realizaron pruebas de viabilidad bacteriana utilizando inóculos de las percolaciones luego de 04 meses de lixiviación (Ver Apéndice C).
- k) Los ripios de cada columna fueron descargados y preparados (pesados, secados, tamizados, chancados, pulverizados, homogenizados y cuarteados) para obtener muestras sólidas representativas a fin de realizar el análisis químico. La compactación promedio fue de 8.65 % en las 08 columnas operadas y la humedad final promedio de 4.35%.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUCIONES

4.1. RESULTADOS PROMEDIO DEL PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE COBRE

Después de los 08 ciclos de riego-reposo de lixiviación se obtuvo los resultados promedio mostrados en la Tabla 10.

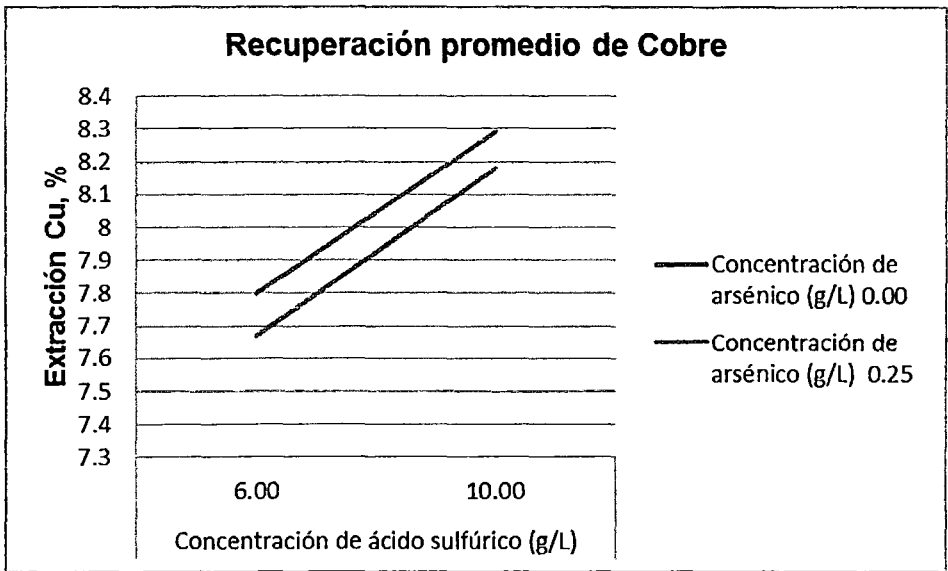
Tabla N° 10. Valores promedios experimentales de los porcentajes de extracción de cobre en función de las concentraciones de arsénico y ácido sulfúrico

Concentración de arsénico (g/L)	Concentración de ácido sulfúrico (g/L)	
	6.00	10.00
0.00	7.80	8.29
0.25	7.67	8.18

Fuente: Elaboración propia

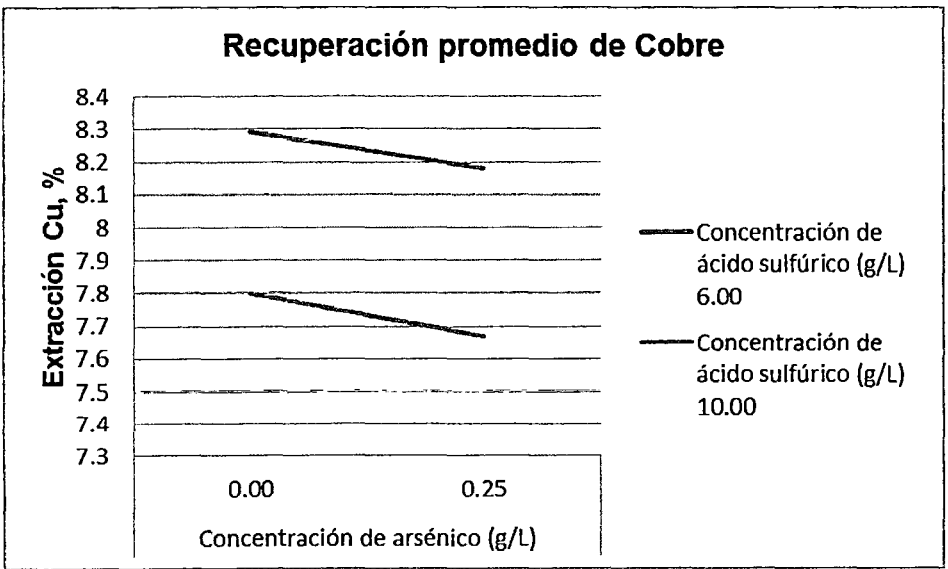
De acuerdo a la Tabla 10, se construye el gráfico siguiente (Gráfico 01), en donde se presentan los valores del porcentaje de extracción de cobre promedio, probados con valores de concentración de arsénico de 0 y 0.25 g/L y, 6 y 10 g/L de ácido sulfúrico.

Gráfico N° 01. Curva de extracción de Cobre en función de la concentración de ácido sulfúrico



Fuente: Tabla N° 10

Gráfico N° 02. Curva de extracción de cobre en función de la concentración de arsénico



Fuente: Tabla N° 10

También se muestra los resultados promedios de leyes metálicas en la solución de riego y PLS de cada columna.

Tabla N° 11. Valores ponderados de las leyes metálicas en la solución de riego de cada columna

Columna	pH	Eh	CuT	FeT	Mn	As	H ⁺
	-	mV	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L
1	1.49	462.36	0.424	13.33	2.22	0.206	6.66
2	1.50	461.87	0.434	13.28	2.24	0.210	6.69
3	1.47	471.50	0.432	13.37	2.23	-	6.71
4	1.48	473.53	0.434	13.37	2.22	0.002	6.59
5	1.23	435.73	0.414	13.84	2.21	0.261	10.49
6	1.24	436.08	0.404	13.82	2.23	0.247	10.34
7	1.22	449.65	0.396	13.69	2.20	-	10.07
8	1.22	446.92	0.401	13.67	2.19	0.002	10.16

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 12. Valores ponderados de las leyes metálicas en los PLS de cada columna

Columna	pH	Eh	CuT	FeT	Mn	As	H ⁺
	-	mV	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L
1	1.59	470.92	0.475	14.10	2.32	0.210	5.63
2	1.58	470.14	0.485	14.18	2.33	0.212	5.74
3	1.58	481.26	0.486	14.13	2.32	-	5.73
4	1.58	484.04	0.486	14.12	2.30	0.002	5.52
5	1.26	437.88	0.469	14.72	2.31	0.260	9.67
6	1.28	438.75	0.457	14.68	2.32	0.248	9.49
7	1.28	456.59	0.450	14.55	2.29	-	8.79
8	1.28	453.15	0.454	14.54	2.28	0.002	8.87

Fuente: Elaboración propia

4.2. RESULTADOS DE PRUEBAS DE VIABILIDAD BACTERIANA

Esta actividad bacteriana se evaluó mediante la medición de la oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} . En la Gráfica 03, se muestra los resultados obtenidos para las percolaciones obtenidas de las 04 primeras columnas después de 4 meses de lixiviación (Ver Apéndice 03).

4.3. DISCUSIONES

En el caso del primer escenario planteado a 6 g/L H^+ , para las columnas con riego de efluente (1 y 2), se tiene un promedio de 0.211 g/L As acumulado en el PLS por las adiciones del elemento en la preparación diaria de soluciones. Las soluciones de Planta LESDE reportan normalmente valores de 0.010 g/L As en promedio, este incremento permitió estudiar el efecto de esta impureza. De acuerdo a los resultados obtenidos en la extracción de cobre, no se muestra variación importante por efecto del ácido débil comparado con las pruebas en blanco (adición agua-ácido), que permita decir que el As afecte el porcentaje de extracción de cobre.

Además, se obtuvo un incremento acumulado de ley de cobre en PLS entre (0.47-0.49) g/L Cu debido a que a estas soluciones no se les ha extraído el Cu por extracción por solventes. Asimismo se reportó altos valores de hierro hasta 14.13 g/L en el PLS, el cual es mayor al reportado en las operaciones de lixiviación que trabajan en 10 g/L en promedio.

Adicionalmente, se aprecia que los valores de consumo de ácido tampoco tienen una variación importante entre las columnas (Apéndice L). Así para las columnas con riego de efluente (1 y 2) se tiene un valor promedio de 5.59 kg/t H^+ , mientras que para las columnas sin riego de efluente (3 y 4), un valor promedio de 5.55 kg/t H^+ .

Para el caso del segundo escenario en donde las columnas operaron a una acidez promedio de 10 g/L H^+ se obtuvieron resultados similares al escenario anterior en donde el porcentaje de extracción de cobre reportó valores similares no mostrando un efecto negativo del ácido débil.

En estas pruebas, las soluciones de riego de las columnas 5 y 6 acumularon en promedio 0.254 g/L As.

En cuanto a los valores de potencial redox en PLS, se tiene un promedio de 471 mV para las columnas regadas con efluente (1 y 2) y un valor de 483 mV para las columnas regadas sin efluente (3 y 4). Se evidencia una mayor actividad en las columnas sin efluente sin embargo no es significativo en los resultados de extracción de cobre, y seguramente se debe al tiempo de adaptación de las bacterias al medio con arsénico. Similar comportamiento en las columnas regadas con 10 g/L H^+ (Ver Tabla 12).

Así también si se observa las curvas de potencial redox en todo el ciclo de lixiviación (ver Apéndice L), se tiene que las percolaciones presentan valores crecientes a lo largo del ciclo, indicativo también de una creciente mayor actividad en la población bacteriana. También se observa valores más bajos de los potenciales redox en las columnas regadas a 10 g/L H^+ , esto debido a la mayor acidez y por ende pH más bajo que pudo desacelerar la adaptación bacteriana.

Finalmente se puede afirmar que de acuerdo a nuestros antecedentes, se confirma que el arsénico en una concentración máxima de 0.25 g/L no afecta significativamente el porcentaje de extracción de cobre. Se tiene diferencias mínimas de 1.7 % respecto de regar sin ácido débil a 6 g/L H^+ y de 1.3 % de regar sin ácido débil a 10 g/L H^+ (Ver Gráfico 01).

Sin embargo lo que sí tiene una influencia en el incremento del porcentaje de extracción de cobre, es la concentración de ácido sulfúrico presente en la solución de riego. Para las columnas regadas sin ácido débil se tiene un

incremento de 6.3 % en la extracción de cobre, mientras que la regada con efluente da un 6.6 % (Ver Gráfico 02).

La velocidad de oxidación promedio para las percolaciones de las columnas 1 y 2 fue de 52 mg $\text{Fe}^{2+}/\text{L/h}$ y de 54 mg $\text{Fe}^{2+}/\text{L/h}$ para las columnas 3 y 4 (riego sin efluente). Esta mínima diferencia entre las columnas regadas con y sin efluente demostraría que las bacterias llegan a adaptarse al medio con contenidos de arsénico, además estos valores están dentro del margen histórico operativo, en donde pruebas similares con soluciones de planta, reportan velocidades de oxidación entre (35-55) mg $\text{Fe}^{2+}/\text{L/h}$, que indica una actividad bacteriana aceptable.

Según las condiciones de operación, este estudio nos permitió demostrar que es viable la reutilización de dichas soluciones, sin afectar la extracción de cobre; y así contribuir a la reducción de costos operativos por paralización del tratamiento de efluentes y consumo de ácido.

En una probable adición diaria en operación, el ácido débil representa el 0.28 % del inventario de soluciones de ingreso a la poza de refino (solución de riego de los botaderos de lixiviación), que sería el punto de descarga del efluente. En las pruebas en columna, las soluciones de riego contenían como máximo 1.00 % de ácido débil.

CONCLUSIONES

- ❖ De acuerdo a los resultados obtenidos mediante pruebas de lixiviación en columna, se concluye que no hay influencia significativa en el porcentaje de extracción de cobre por la presencia de arsénico hasta 0.25 g/L.
- ❖ La concentración de ácido sulfúrico influye significativamente según el análisis de varianza. El porcentaje de extracción de cobre aumenta en 6.4 % en promedio al incrementar de 6 g/L a 10 g/L la concentración de ácido sulfúrico.
- ❖ De la interacción de ambas variables independientes se concluye según el análisis de varianza que no influye significativamente en el porcentaje de extracción de cobre. El mejor valor fue de 8.29% de extracción de cobre para 10 g/L de H^+ y 0 g/L de As, y 8.18% de extracción de cobre para 10 g/L de H^+ y 0.25 g/L de As.
- ❖ De las pruebas de viabilidad bacteriana podemos concluir que no hubo una diferencia significativa en las velocidades de oxidación de las pruebas con reposición del efluente respecto de las repuestas con ácido preparado.

RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda realizar pruebas metalúrgicas con un rango de concentraciones de arsénico más amplio para poder determinar cuál es la máxima concentración que el proceso podría soportar para no alterar la extracción de cobre.
- ❖ Realizar pruebas en módulos o gaviones de mineral (mayor escala) que permitan hacer un estudio mineralógico-microscópico de la estabilización/estado del arsénico en el ripio mineral.
- ❖ Analizar el impacto de la acumulación de impurezas (As) a largo plazo en la calidad de los cátodos de cobre en la etapa de electrodeposición electrolítica.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] ARLANDIS RUBIO, José (1999). "La Metalurgia del Cobre". Asociación de Ingenieros Industriales de Madrid.
- [2] BALLESTER, Antonio (2000). "Metalurgia extractiva-Procesos de obtención". Volumen II. Editorial Síntesis S.A. España.
- [3] BUTTS A. Copper: The science and technology of the metal, its alloys and compounds, 1970. Pág 300-311.
- [4] CHAUDHUY, G. R.; R. P. Das, (1987). Bacterial Leaching-Complex Sulphides of Copper, Lead and Zinc. Int. J. of Mineral Processing, 21: 57-64.
- [5] COL, Martín & al (RAHCO), " Manejo de Materiales en Proyectos de Lixiviación ", Minería Chilena N°191, pp 109-123, Mayo 1997.
- [6] DOMIC, M. (2001). "Hidrometalurgia: Fundamentos, procesos y aplicaciones". Editorial And ros, Santiago de Chile.
- [7] GARCÍA, M. (2008). "Evaluación de efectos por presencia de arsénico en microorganismos de terreros del Consorcio Minero La Caridad, Nacozari, Sonora". Instituto de Metalurgia UASLP, San Luis Potosí.
- [8] GUIACHETTI TORRES, Diego Ariel (2011). Tesis: "Consumo de Ácido Sulfúrico y Cinética de Lixiviación de un Mineral Oxidado de Cobre". Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología. Santiago, Chile.
- [9] INTERCADE (2013). "Hidrometalurgia aplicada a minerales de cobre y polimetálicos".

- [10] LÓPEZ, J. (2009). "Planta de Tratamiento de Polvos y Efluentes de Mexicana de Cobre S.A. de C.V". Artículo presentado en la XXVIII Convención Minera Internacional, AIMMGM AC, Veracruz.
- [11] MANUAL LIXIVIACIÓN TOQUEPALA (2009). Southern Perú Copper Corporation. Tacna- Perú.
- [12] MATEO, M. et al (2005). "Oxidación del As (III) en soluciones de Biolixiviación a 30 °C y 70 °C". Artículo presentado en el Hydrocopper.
- [13] MINERA ANDINA Y SOCIEDAD, (2011). Southern Copper Peru Corporation. Vol. 7 Número 32, Tacna, Perú.
- [14] MORALES SOTO, Alejandro (2006). "Caracterización de polvos de fundición de cobre y establecimiento de rutas de procesado". Tesis Doctoral Universidad de Barcelona, 2006.
- [15] REGHEZZA, Andrés, (1987). "Aspectos Tecnológicos de la Lixiviación ", Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- [16] ROBINS, R. et al (2001). "Removal of Arsenic from Drinking Water by Precipitation, Adsorption or Cementation".
- [17] RODRÍGUEZ MORENO, Verónica A. (2006). "Recuperación de Cobre a partir de concentrados de flotación por el proceso de Biolixiviación". Centro de Tecnología Mineral. Río de Janeiro, Brasil.
- [18] SARMENTERO REQUEIRA, Juan Carlos (2010). Trabajo final del master en Ingeniería de Recursos Naturales: "Impacto de la logística inversa en el mercado del cobre en España". Barcelona- Manresa, España.
- [19] SOTO BARINOTTO, Jesús Ricardo & SOLÍS SOLÍS, Alexis (2012). Tesis: "Caracterización y optimización de parámetros de Sx/ew para la obtención de cobre electrolítico a nivel laboratorio". Lima, Perú.

APÉNDICE

APÉNDICE 1

Matriz bifactorial para disposición de variables dependientes

La disposición general para el diseño bifactorial para ambas variables dependientes estudiadas es como se muestra en la Tabla 1.A.

Tabla 1.A. Disposición general para el diseño de ambas variables respuesta

Factor A	Factor B	
	1	2
1	Y_{111}	Y_{121}
	Y_{112}	Y_{122}
	Y_{113}	Y_{123}
2	Y_{211}	Y_{221}
	Y_{212}	Y_{222}
	Y_{213}	Y_{223}

Fuente: Elaboración propia

APÉNDICE 2

Resultados experimentales y análisis de varianza de la extracción de cobre

Tabla 2.A. Resultados experimentales de la prueba de extracción de cobre

A \ B		Concentración H ₂ SO ₄			
		6.00		10.00	
		Extracción (%)	Promedio	Extracción (%)	Promedio
Concentración As	0.00	7.83	7.80	8.26	8.29
		7.73		8.32	
	0.25	7.46	7.67	8.18	8.18
		7.87		8.17	

Fuente: Tabla N° 10

Tabla N° 2.B. Datos experimentales mostrados de acuerdo al cálculo de suma de cuadrados del diseño factorial de dos factores

Factor A Concentración de Arsénico (g/L)	Factor B – Concentración de Ácido Sulfúrico (g/L)		y_i	\bar{y}_I
	6.00	10.00		
0.00	7.86	8.26	32.17	8.04
	7.73	8.32		
	15.59	16.58		
0.25	7.46	8.18	31.68	7.92
	7.87	8.17		
	15.33	16.35		
y_j	30.92	32.93	$y =$	63.85
\bar{y}_j	7.73	8.23	$\bar{y} =$	7.98

Fuente: Tabla N° 10

1. Hipótesis

$H_0: \tau_1 = \tau_2 = 0$ Para tratamiento de renglón

$\beta_1 = \beta_2 = 0$ Para tratamiento de columna

$(\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = (\tau\beta)_{21} = (\tau\beta)_{22} = 0$ Para interacción

$H_1:$ No todos los τ_i ; β_j ; $(\tau\beta)_{ij}$ son iguales a cero, o al menos un τ_i ; β_j ; $(\tau\beta)_{ij}$ son diferentes de cero.

2. Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

3. Criterio:

Si se tiene $a=2$, $b=2$, $r=2$; entonces $N=abr=8$; luego:

❖ Para el efecto principal del Factor A (concentración de arsénico), se rechaza la hipótesis nula si:

$F_0 > F_{\alpha; (a-1); ab(r-1)}$ y $F_{0.05; (2-1); 4 \times (2-1)} = F_{0.05; 1; 4} = 7.71$

❖ Para el efecto principal del Factor B (concentración de ácido), se rechaza la hipótesis nula si:

$F_0 > F_{\alpha; (b-1); ab(r-1)}$ y $F_{0.05; (2-1); 4 \times (2-1)} = F_{0.05; 1; 4} = 7.71$

❖ Para el efecto principal del Factor AB (concentración de arsénico y concentración de ácido), se rechaza la hipótesis nula si:

$F_0 > F_{\alpha; (a-1)(b-1); ab(r-1)}$ y $F_{0.05; (2-1)(2-1); 4 \times (2-1)} = F_{0.05; 1; 4} = 7.71$

4. Cálculos:

$$SST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r y_{ijk}^2 - \frac{y^2}{N}$$

$$= 7.862 + 7.732 + 8.262 + 8.322 + 7.462 + 7.872 + 8.182 + 8.172$$

$$(63.852/8)$$

$$= 0.6294875$$

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

$$= \frac{32.17^2 + 31.68^2}{2 \times 2} - \frac{63.85^2}{8}$$

$$= 0.0300125$$

$$SS_A = \sum_{j=1}^b \frac{y_j^2}{br} - \frac{y^2}{N}$$

$$= \frac{30.92^2 + 32.93^2}{2 \times 2} - \frac{63.85^2}{8}$$

$$= 0.5050125$$

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

$$= \frac{15.59^2 + 16.58^2 + 15.33^2 + 16.35^2}{2 \times 2} - \frac{63.85^2}{8} - 0.030 - 0.505$$

$$= 0.0001125$$

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

$$= 0.09435$$

5. Decisión

Tabla N° 2.C. Información para análisis de varianza

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media de los Cuadrados	F ₀	F _{α;y₁;y₂}
Concentración de Arsénico	(a-1)=2-1=1	0.0300	0.030	2.227	7.71
Concentración de Ácido Sulfúrico	(b-1)=2-1=1	0.5050	0.505	37.468	7.71
Interacción	(a-1)(b-2)=1	0.0001	0.000	0.008	7.71
Error	(ab)(r-1)=4	0.094	0.013		
Total	abr-1=7	0.629			

Fuente: Elaboración propia

Para los efectos principales, en el caso de la concentración de arsénico, el valor de F₀ es menor que el valor de F crítico entonces se acepta la hipótesis nula, es decir no existe diferencia significativa para la recuperación de cobre utilizando solución de riego sin concentración de arsénico o con una concentración de 0.25 g/L.

En el caso de la concentración de ácido sulfúrico, el valor de F₀ es mayor que el valor de F crítico, la hipótesis nula debe ser rechazada, es decir sí existe diferencia significativa en el porcentaje de extracción de cobre al utilizar (6 y 10) g/L de ácido sulfúrico.

Para el efecto de interacción de la concentración del arsénico y la concentración de ácido sulfúrico, el valor F₀ es menor al valor tabular, entonces la hipótesis debe aceptarse.

APÉNDICE 3

Pruebas de viabilidad bacterial

En las pruebas de viabilidad, se planteó evaluar el efecto en la población bacteriana en soluciones de lixiviación (percolaciones) de las pruebas en columna, en donde se tiene contenidos importantes de As en lixiviación y una acidez de operación manejada en planta (6 g/L H⁺). Así, se utilizó inóculos de las percolaciones luego de 04 meses de lixiviación de las mismas columnas. Toda prueba A en cada etapa tuvo su repetición B.

1. Características del inóculo.

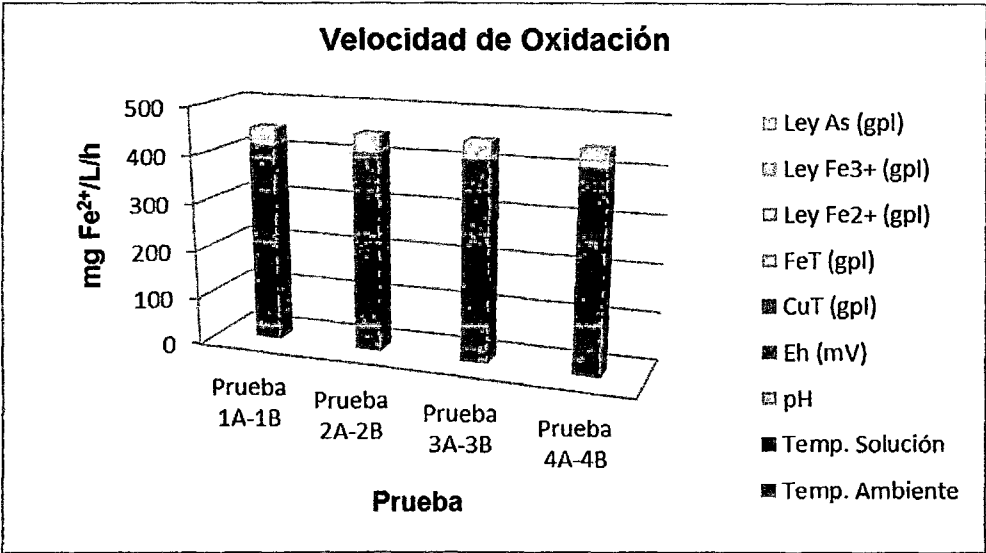
En las Tabla 3.A., se observa los datos iniciales de las soluciones de percolación usadas en la prueba de viabilidad.

Tabla N° 3.A. Datos de las soluciones de percolación

Datos Percolación	Prueba 1A-1B	Prueba 2A-2B	Prueba 3A-3B	Prueba 4A-4B
Temp. Ambiente	13	13	13	13
Temp. Solución	13	13	13	13
pH	1.76	1.81	1.81	1.83
Eh (mV)	389	388	388	387
CuT (gpl)	0.50	0.51	0.52	0.52
FeT (gpl)	17.03	16.70	17.06	16.92
Ley Fe ²⁺ (gpl)	0.67	0.69	0.71	0.80
Ley Fe ³⁺ (gpl)	16.36	16.01	16.35	16.12
Ley As (gpl)	0.256	0.256	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.A. Velocidad de oxidación para las percolaciones en las 4 primeras columnas



Fuente: Tabla N° 3.A.

2. Resultado de las pruebas

2.1. Columna 1 (reposición con ácido débil) - Pruebas 1A y 1B

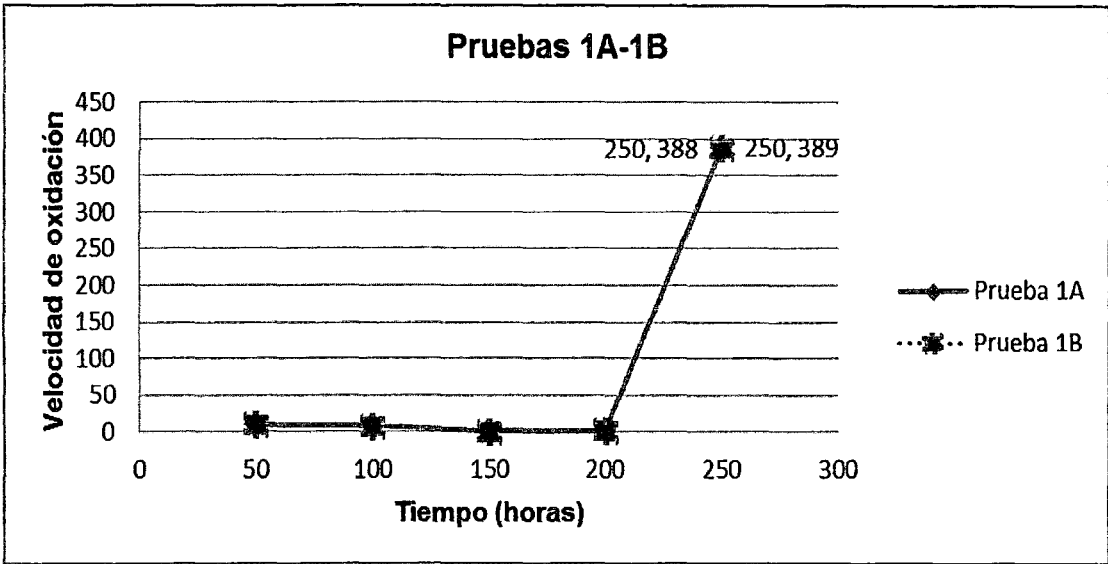
La acidez del inoculo utilizado fue 5.18 g/L y el As de 0.255 g/L. Estas pruebas muestran una aceptable velocidad de oxidación reportando 51 mg Fe²⁺/L/h en 250 horas de prueba.

Tabla N° 3.B. Datos de la mezcla inicial de la prueba 1A y 1B

Tiempo (horas)	Prueba 1A	Prueba 1B
50	9.64	9.63
100	8.32	8.31
150	1.32	1.33
200	1.76	1.77
250	389	388

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.B. Resultados de las Pruebas 1A y 1B



Fuente: Tabla N° 3.B.

2.2. Columna 2 (reposición con ácido débil) - Pruebas 2A y 2B

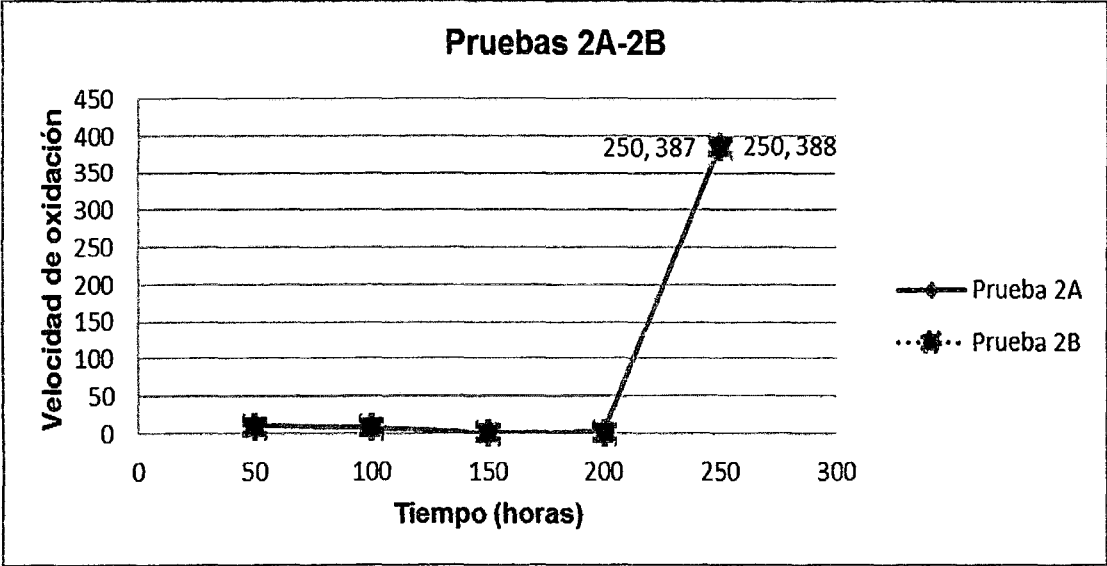
La acidez del inóculo utilizado fue 6 g/L y el As 0.256 g/L. Estas pruebas muestran una aceptable velocidad de oxidación reportando 50 mg Fe²⁺/L/h en 250 horas de prueba.

Tabla N° 3.C. Datos de la mezcla inicial de la prueba 2A Y 2B

Tiempo (horas)	Prueba 2A	Prueba 2B
50	9.61	9.61
100	8.31	8.29
150	1.31	1.32
200	1.81	1.81
250	388	387

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.C. Resultados de las Pruebas 2A y 2B



Fuente: Tabla N° 3.C.

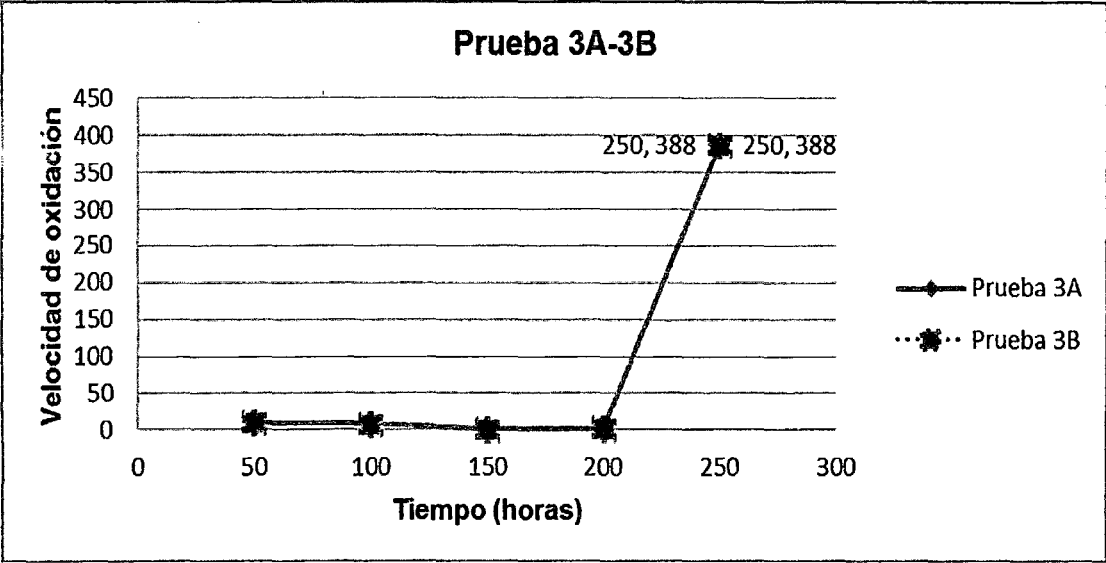
2.3. Columna 3 (reposición con agua-ácido) - Pruebas 3A y 3B

Tabla N° 3.D. Datos de la mezcla inicial de la prueba 3A Y 3B

Tiempo (horas)	Prueba 3A	Prueba 3B
50	9.64	9.64
100	8.30	8.34
150	1.33	1.29
200	1.81	1.82
250	388	388

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.D. Resultados de las Pruebas 3A y 3B



Fuente: Tabla N° 3.D.

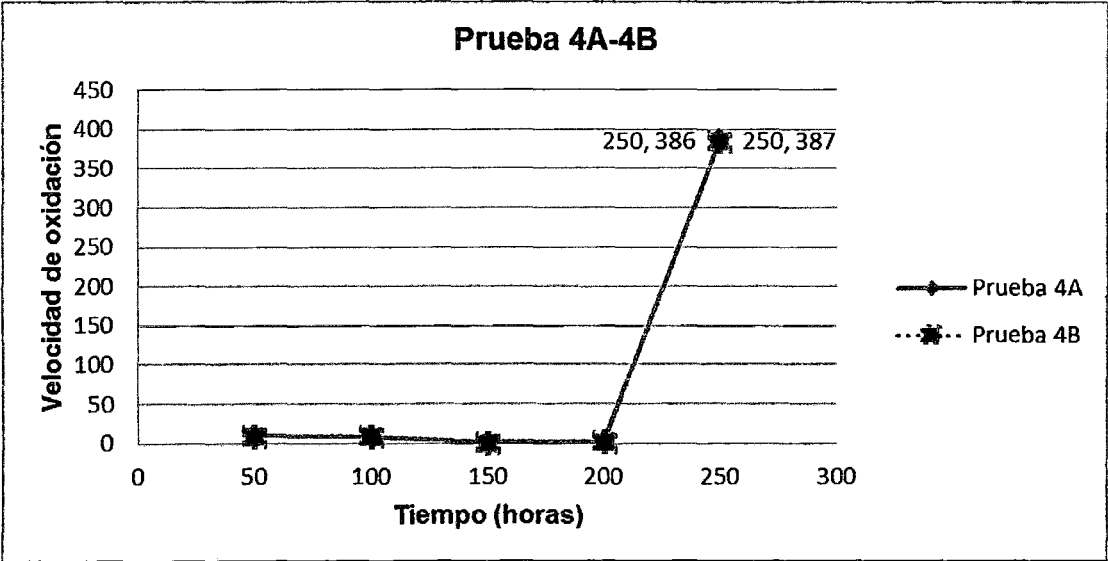
2.4. Columna 4 (reposición con agua-ácido) - Pruebas 4A y 4B

Tabla N° 3.E. Datos de la mezcla inicial de la prueba 4A Y 4B

Tiempo (horas)	Prueba 4A	Prueba 4B
50	9.63	9.63
100	8.24	8.40
150	1.39	1.23
200	1.83	1.84
250	387	386

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 3.E. Resultados de las Pruebas 4A y 4B



Fuente: Tabla N° 3.E.

APÉNDICE 4

Información operativa de Lixiviación y Fundición - Southern Copper Perú

Corporation

De acuerdo a la información preliminar proporcionada por las áreas de Fundición y LESDE, se tiene los siguientes datos operativos:

a) Fundición (Operación 2013): Los datos se refieren a la generación del ácido débil en las plantas de ácido.

- ❖ Volumen Diario: 380 m³/día
- ❖ Acidez promedio: 85 g/L
- ❖ Peso Ácido: 34.4 t/día
- ❖ Volumen Agua: 363 m³/día

b) Lixiviación (Operación 2013): Los datos se refieren al inventario y reposición de soluciones en el circuito.

- ❖ Inventario de Sol. Ingreso a Poza Raff: 137382 m³/día
- ❖ Adición de Agua a Refino: 10289 m³/día
- ❖ Adición de Ácido al flujo de riego: 330 t/día

Como se observa, si el proyecto fuera viable se tendría el envío de 380 m³/día de ácido débil (34.4 t/día de ácido y 363 m³/día de agua}. Comparando con las reposiciones que realiza lixiviación a su poza de refino (330 t/día de ácido y

10289 m³/día de agua), se tiene que la proporción que representa la adición de ácido débil es el 10% de ácido y 3.5% de agua.

Una de las características de la operación en Lixiviación es que los elementos disueltos no deseados recirculan en el circuito de acuoso y precipitan de acuerdo a las condiciones de los botaderos. Con la adición, del ácido débil se tendría un ingreso de impurezas adicional siendo el principal el arsénico (As) por lo que la evaluación de su impacto es importante a largo plazo.

Actualmente, soluciones de Refinería continúan su descarga en las soluciones de planta de LESDE, siendo utilizadas como solución de riego en los depósitos lixiviables de Toquepala. Se envían dos tipos de soluciones: Solución SAT (1549 m³ en el 2012) que se descarga a la Poza RAFF y Solución Agua Madre (2631 m³ en el 2012) que se descarga a la poza de alimentación a planta de ES. Dichas soluciones son recepcionadas hace aproximadamente 11 años y dado al circuito cerrado de operación se ha tenido un incremento total de As en 0.006 g/L. Para referencia, la solución SAT se origina en la planta electrolítica de plata mientras que la solución agua madre se origina en la lixiviación de los lodos anódicos.

APÉNDICE 5

Curado del mineral

a) Preparación de la solución del curado

$$[\text{Ácido}]_{\text{solución}} = 15.2 \text{ g/L}$$

$$V_{\text{solución}} = 10 \text{ L}$$

$$\rho_{\text{ácido (97.5\% pureza)}} = 1.794 \text{ g/ml}$$

$$\rightarrow 10 \text{ L solución} \times \frac{15.2 \text{ g ácido}}{1 \text{ L solución}} = 152 \text{ g ácido (100\% pureza)}$$

$$\rightarrow 152 \text{ g ácido} \times \frac{100\%}{97.5\%} = 155.89 \text{ g ácido} \Leftrightarrow 0.155 \text{ kg (97.5\% pureza)}$$

$$\rightarrow 152 \text{ g ácido} \times \frac{1 \text{ ml ácido}}{1.794 \text{ g H}^+} = 84.72 \text{ ml ácido (97.5\% pureza)}$$

$$= 10000 \text{ ml solución} - 84.72 \text{ ml ácido} = 9915.28 \text{ ml} \Leftrightarrow 9.915 \text{ kg agua}$$

De acuerdo a estos cálculos se taró un balde y se adicionó 9.915 kg agua y luego 0.155 kg de ácido sulfúrico al 97.5%.

b) Curado del mineral

$$W_{\text{mineral}} = 88 \text{ kg}$$

$$W_{\text{solución}} = 2.730 \text{ kg}$$

$$\rho_{\text{solución}} = 1.008 \text{ kg/L}$$

$$[\text{Ácido}]_{\text{solución}} = 15.2 \text{ g/L}$$

$$\rightarrow V_{\text{solución}} = \frac{2.730 \text{ kg solución}}{1.008 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \text{ solución}} = 2.708 \text{ L solución}$$

$$\rightarrow \% \text{ Humedad}_{\text{curado}} = \left(\frac{2.730 \text{ kg}}{88 \text{ kg} + 2.730 \text{ kg}} \right) \times 100 = 3.01\%$$

$$\rightarrow \text{Ratio}_{\text{curado}} = \left(\frac{2.708 \text{ L solución} \times \left(\frac{15.2 \text{ g ácido}}{\text{L solución}} \right)}{88 \text{ kg mineral}} \right) = 0.47 \text{ kg} \frac{\text{ácido}}{\text{t}} \text{ mineral}$$

APÉNDICE 6

Análisis químico del ión ferroso

1. Objetivo

- ❖ Determinar la concentración del ión ferroso en soluciones acuosas de muestras acuosas.

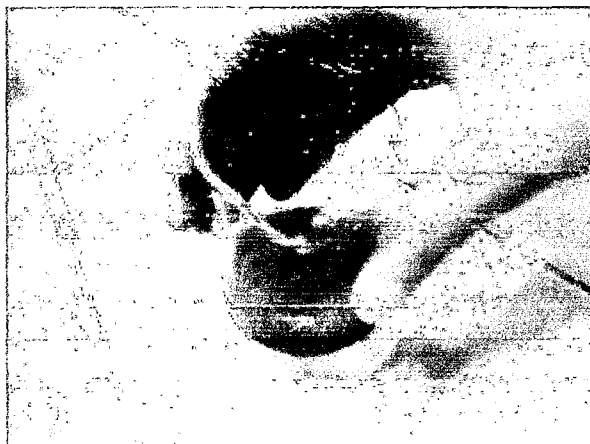
2. Alcance

- ❖ Al análisis por volumetría de muestras acuosas.

3. Definiciones

- ❖ **Solución valorada de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$):** Es una solución que se utiliza para titular en el análisis de ion ferroso (Fe^{2+}) por volumetría. Se trata de un fuerte oxidante de color intenso anaranjado. Normalmente se preparan 3 tipos de soluciones valoradas de $K_2Cr_2O_7$ (fuerte, intermedio y débil), para utilizar de acuerdo a la concentración de Fe^{2+} de la solución a medir.

Figura 6.A. Solución valorada de dicromato de potasio

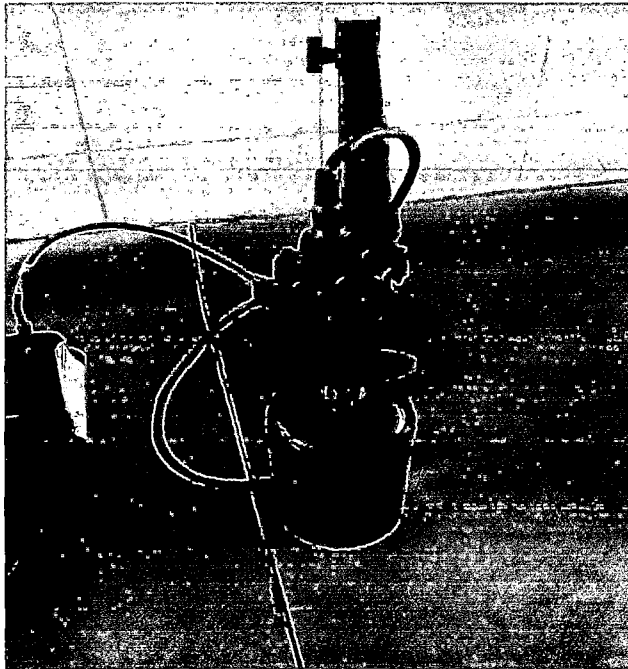


Fuente: Laboratorio Químico Southern Copper Perú

Corparation (Toquepala)

- ❖ **Difenilamina de sodio:** indicador para la determinación del ión ferroso (Fe^{2+}) con dicromato de potasio, el viraje será de incoloro a violeta.
- ❖ **Solución sulfofosfórica:** Solución que fija los iones ferrosos en la titulación.

Figura 6.B. Solución sulfofosfórica y difenilamina de sodio.



**Fuente: Laboratorio Químico Southern Copper Perú
Corparation (Toquepala)**

4. Recursos

4.1. Equipo de protección personal

- ❖ Lentes de seguridad
- ❖ Guantes vinílicos desechables

4.2. Materiales y equipo de trabajo

- ❖ Buretas convencionales o digitales, con soluciones valoradas de dicromato de potasio.
- ❖ Frasco con solución preparada de difenilamina de sodio.
- ❖ Botella con solución sulfofosfórica preparada
- ❖ Papel toalla
- ❖ Matraz de Erlenmeyer de 250 ml
- ❖ Pipeta de 2 ml
- ❖ Bombilla de succión

5. Procedimiento

- ❖ Con una pipeta volumétrica, transferir 2 ml de muestra dentro de un matraz Erlenmeyer de 250 ml previamente bien lavado.
- ❖ Adicionar de (10 a 15) ml de solución sulfofosfórica aproximadamente hasta que se vuelva incolora la solución.
- ❖ Agregar de 2 a 4 gotas aproximadamente de indicador de difenilamina de sodio.
- ❖ Titular con la solución valorada de dicromato de potasio hasta el viraje a violeta. Anotar el volumen gastado.

Figura 6.C. Valoración de dicromato de potasio



**Fuente: Laboratorio Químico Southern Copper Perú
Corparation (Toquepala)**

- ❖ Calcular la concentración del ión ferroso presente en la muestra según la siguiente fórmula:

$$\text{Concentración Fe}^{2+} = \text{Volumen gastado} * \text{Factor del K}_2\text{CrO}_7$$

APÉNDICE 7

Determinación de ácido libre

1. Objetivo

- ❖ Determinar la concentración de ácido libre (H^+) en soluciones acuosas para su control operativo.

2. Alcances

- ❖ Soluciones acuosas de alta acidez (electrolitos, etc.), que contengan altas concentraciones de Fe (menores a 5 g/L).

3. Definiciones

- ❖ **Neutralización:** Es la reacción de un ácido y una base para formar una sal y agua.
- ❖ **Acidez:** Indica el contenido en iones hidrógeno libres, es decir los gramos de H^+ por litro de solución. Se determina mediante una valoración (volumetría) con un reactivo básico.
- ❖ **Anaranjado de metilo:** Indicador ácido/básico de viraje violeta a naranja, preparado a 2 g/L enrasado con alcohol y agua destilada.
- ❖ **Electrolito:** Solución con alta concentración de sulfato de cobre (>30 g/L) y de ácido sulfúrico (>150 g/L)
- ❖ **Hidróxido de Sodio:** Es una base fuerte cuya fórmula es NaOH que se usa para neutralizar (titular) un ácido fuerte.

- ❖ **Indicador:** Es un reactivo que se añade para observar el punto final de una neutralización (titulación).
- ❖ **Titular:** Calcular la concentración de una sustancia usando otra sustancia de concentración conocida a través de una reacción de neutralización.

4. Recursos

4.1. Equipo de protección personal

- ❖ Lentes de seguridad
- ❖ Guantes vinílicos desechables
- ❖ Guantes de nitrilo (verdes)

4.2. Materiales y equipo de trabajo.

- ❖ Bureta con solución valorada de hidróxido de sodio fuerte
- ❖ Anaranjado de metilo
- ❖ Matraz de Erlenmeyer de 250 ml
- ❖ Pipeta de 2 ml
- ❖ Vaso precipitado
- ❖ Gotero
- ❖ Pizeta con agua destilada

5. Procedimiento

- ❖ Medir 2 ml de muestra con una pipeta volumétrica en un matraz Erlenmeyer de 250 ml.
- ❖ Agregue agua destilada 10 ml aproximadamente (opcional).
- ❖ Agregue 2 a 3 gotas de anaranjado de metilo.
- ❖ Con una bureta, titule con solución valorada de hidróxido de sodio fuerte hasta el cambio de color de rojo/rosado fuerte a anaranjado. Esto indica el fin de la titulación.
- ❖ Anotar el volumen gastado. Calcular la concentración de ácido libre de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$[H^+] \text{ g/L} = \text{Factor del NaOH} * \text{Volumen gastado}$$

APÉNDICE 8

Determinación de ácido libre por el método Mountain States R&D

1. Objetivo

- ❖ Determinar la concentración de ácido libre (H^+) en soluciones acuosas para su control operativo.

2. Alcance

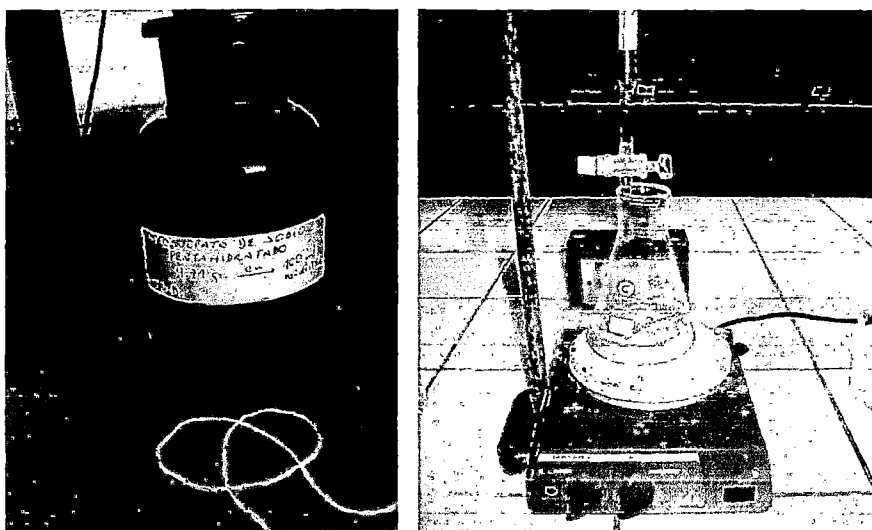
- ❖ Soluciones acuosas (PLS's, refinados, etc), que contengan altas concentraciones de Fe (mayores a 5 g/L).

3. Definiciones

- ❖ **Neutralización:** Es la reacción de un ácido y una base para formar una sal y agua.
- ❖ **Acidez:** Indica el contenido en iones hidrógeno libres, es decir los gramos de H^+ por litro de solución. Se determina mediante una valoración (volumetría) con un reactivo básico.
- ❖ **pH:** Es la escala más común para cuantificar la acidez o basicidad de una solución acuosa. Oscila entre los valores de 0 (más ácido) y 14 (más alcalino). El pH 7 es neutro.
- ❖ **Solución de yoduro de potasio (KI):** Solución preparada a 300 g/L. Forma yodatos de hierro y cobre, su función es enmascarar al hierro (por el Fe^{3+} , fuerte oxidante como los H^+), ya que al momento de titular con el carbonato de sodio, estos iones pueden consumir (neutralización) el titulante dando una falsa acidez.

- ❖ **Solución de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$):** Solución preparada a 200 g/L. Enmascara al cobre presente en la solución.
- ❖ **Solución de carbonato de sodio (Na_2CO_3):** Es una base. Solución preparada a 0,1N.
- ❖ **Anaranjado de metilo:** Indicador de viraje rojo a naranja, preparado a 2 g/L enrasado con alcohol y agua destilada.

Figura 8.A. Solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y anaranjado de metilo.



**Fuente: Laboratorio Químico Southern Copper Perú
Corporation (Toquepala)**

4. Recursos

4.1. Equipo de protección personal

- ❖ Lentes de seguridad
- ❖ Guantes vinílicos desechables
- ❖ Guantes de nitrilo (verdes)

4.2. Materiales y equipo de trabajo.

- ❖ Bureta digital con solución valorada de carbonato de sodio 0,1 N.
- ❖ pHmetro Thermo ORION (Model 420).
- ❖ Botella con dispensador de solución de yoduro de potasio.
- ❖ Solución de tiosulfato de sodio.
- ❖ Anaranjado de metilo.
- ❖ Matraz de Erlenmeyer de 250 ml
- ❖ Pipeta de 10 ml
- ❖ Magnetos
- ❖ Agitador magnético
- ❖ Bombilla de succión
- ❖ Vaso precipitado
- ❖ Gotero
- ❖ Pizeta con agua destilada

5. PROCEDIMIENTO

- ❖ Con una pipeta volumétrica, transferir 10 ml de muestra dentro de un matraz Erlenmeyer de 250 ml previamente bien lavado y seco.
- ❖ Adicionar de 10 mL de solución de yoduro de potasio. La solución se torna marrón.

- ❖ Con un gotero, agregar solución de tiosulfato de sodio hasta que la solución se torne transparente o blanco lechoso (agregar una gota de exceso, para asegurar que la totalidad de cobre se ha enmascarado).
- ❖ Adicionar 3 a 4 gotas de anaranjado de metilo.
- ❖ Calibrar el pHmetro con la solución buffer (pH = 4.005 a 20 °C). Prender el pHmetro y ubicarse en modo "pH". Con las teclas direccionales "arriba y abajo" regular temperatura a 20. Lavar y secar el electrodo, introducir en la solución buffer. Presionar la tecla "2nd" y luego "cal"; y esperar el valor 4.005; luego presionar las teclas "Yes", "Measure" y "Yes", en ese orden. Esperar valor que corrobore al de calibración.
- ❖ Colocar el matraz con la solución en el agitador magnético, regulando la velocidad.
- ❖ Colocar un magneto dentro del matraz y el electrodo limpio y seco, ya calibrado.
- ❖ Titular con la solución de Na_2CO_3 0,1N hasta alcanzar un pH = 3,8 (titulación potenciométrica). Se debe corroborar este valor con el viraje a naranja. Anotar el volumen gastado de carbonato.
- ❖ Calcular la concentración de ácido libre de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$[\text{H}^+], \text{ g/L} = \text{Volumen gastado (ml)} * \text{Factor del } \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ 0,1N}$$

APÉNDICE 9

Preparación de titulantes

1. Objetivo

- ❖ Preparar soluciones titulantes para los análisis por volumetría del laboratorio.

2. Alcance

- ❖ A las soluciones para titular de los análisis por volumetría (dicromato de potasio, hidróxido de sodio y carbonato de sodio).

3. Definición

- ❖ **Titulante:** Reactivo en solución utilizado usualmente para neutralizar algún ácido en la titulación de una alícuota en donde se desea conocer algún dato de concentración.

4. Recursos

4.1. Equipo de protección personal

- ❖ Lentes de seguridad.
- ❖ Guantes de nitrilo (verdes).

4.2. Materiales y equipo de trabajo.

- ❖ Vaso precipitado de 600 ml
- ❖ Fiola de 2 L
- ❖ Frasco (botellón) de 20 L

- ❖ Frasco con solución preparada de difenilamina de sodio.
- ❖ Frasco con pellets de hidróxido de sodio (NaOH).
- ❖ Frasco con carbonato de sodio (Na₂CO₃).
- ❖ Frasco con dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇).
- ❖ Cucharita
- ❖ Bureta
- ❖ Agua destilada
- ❖ Bagueta

5. PROCEDIMIENTO

- ❖ Pesar la cantidad del reactivo, según el volumen y concentración requerida (ver Tabla 9.A.)

Tabla 9.A. Pesos de reactivos para la preparación de soluciones titulantes.

Solución	Peso	Volumen	Usos
Dicromato de potasiio	Débil: 0.5 g Mediano: 1 g Fuerte: 2 g	2 Litros 2 Litros 2 Litros	Determinación de ión ferroso
Hidróxido de sodio	180 g	20 Litros	Determinación de acidez por volumetría
Carbonato de sodio	0.05 N (5.3048 g) 0.10 N (10.6096 g)	2 Litros 2 Litros	Determinación de acidez por volumetría (por M. States)

Fuente: Elaboración propia

- ❖ Colocar el reactivo pesado en un vaso de 600 ml y con la ayuda de una bagueta,
- ❖ Disolver agregando aproximadamente 300 ml agua destilada.
- ❖ Trasvasar la solución anterior al frasco de 20 L (Hidróxido de sodio y carbonato de sodio) o fiola de 2 L (Dicromato de potasio), según sea el caso.
- ❖ Enrasar con agua destilada al volumen deseado. Tapar.
- ❖ Agitar la solución vigorosamente en cada recipiente.
- ❖ Calcular el factor del titulante según sea el caso.
- ❖ Verter a su respectivo recipiente (bureta convencional o digital).

Apéndice 10

Viabilidad bacteriana

1. Objetivo

- ❖ Determinar la actividad bacterial de una determinada muestra acuosa.

2. Alcance

- ❖ Se aplica la viabilidad bacteriana para poder estimar tiempo en el cual la bacteria se reproduce y muere.

3. Definiciones

- ❖ **Medio 9K:** Medio en el cual se dan los nutrientes necesarios para que la bacteria pueda vivir y reproducirse óptimamente.
- ❖ **Potencial de oxidación:** Se conoce como (Eh), se entiende que cuanto más alto es, mayor es la capacidad oxidante del sistema y mayor es la concentración de forma reducida. El potencial de oxidación se mide en voltios
- ❖ **pH:** Es la presencia de iones H^+ en una solución acuosa y por ende sabemos si la solución tiene condiciones acidas, básicas o neutras.

4. Recursos

4.1. Equipo de protección personal

- ❖ Lentes de seguridad.
- ❖ Guantes de nitrilo.
- ❖ Guantes vinílicos desechables.

4.2. Materiales y equipo de trabajo

- ❖ Vasos precipitados de 500 ml
- ❖ Equipo para medir el pH
- ❖ Equipo para medir el Eh
- ❖ Equipo de pruebas para baño maría.
- ❖ Equipo de oxigenación
- ❖ Agua acidulada (200 g/L)
- ❖ Agua destilada
- ❖ Pipetas volumétricas de (2, 10 y 20) ml
- ❖ Balanza
- ❖ Probeta de 100 ml
- ❖ Fiolas de (1 y 2) L
- ❖ Baguetas
- ❖ Espátulas

5. Procedimiento

- ❖ Preparar el medio de cultivo 9K (la cantidad depende del número de pruebas que se van a realizar).
- ❖ Se preparan vasos de 500 ml, se anota el peso y se les tara.
- ❖ Se pipetea y agrega 20 ml (en peso, depende de la densidad de percolación) de la muestra que viene a ser el inóculo (PLS, Refino).

- ❖ Para la prueba de viabilidad es necesario preparar el medio el cual es llamado solución 9K (debido a que contiene 9 g de Fe^{2+} por litro de solución). En la Tabla 10.A. se muestra la proporción de reactivos para 3 litros de solución. Con H_2SO_4 de 98 % de pureza, en gotas, se mide y se lleva a un $\text{pH} = 1.80$ (pH necesario para supervivencia de las bacterias). Después se enrasa con agua destilada (tener en cuenta en la regulación del pH , que conforme se agregué el agua destilada el pH irá aumentando).

Tabla 10.A. Proporción de los nutrientes

Medio de cultivo (3 L de solución)	
Nutriente	Peso (g)
$(\text{NH}_4)\text{SO}_4$	9.00
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.50
KH_2PO_4	1.50
KCl	0.30
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	141.83
$\text{Ca}(\text{NO}_3) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.0432

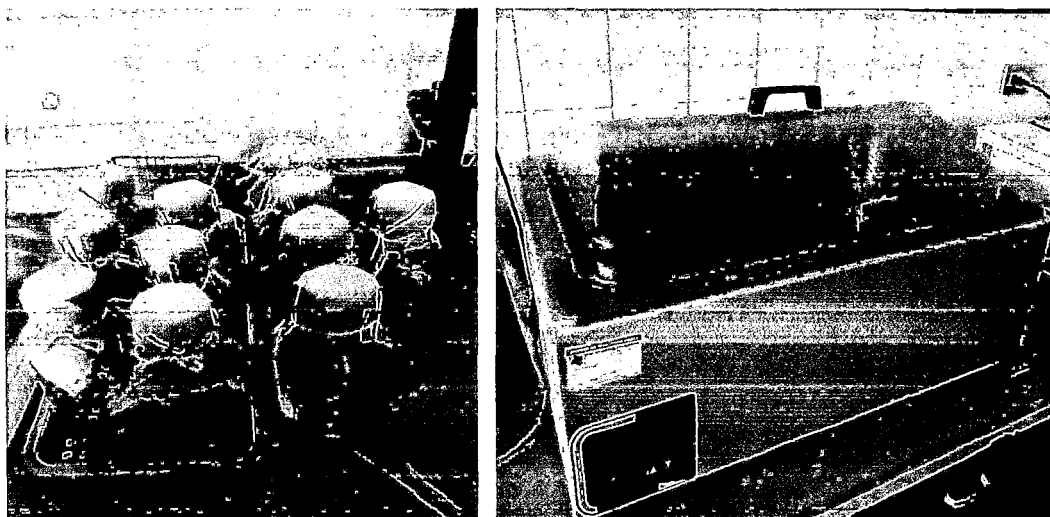
Fuente: Elaboración propia

- ❖ Se le adiciona 280 g (en volumen, depende de la densidad de la percolación) de solución 9K al volumen del inóculo.
- ❖ Se pesa el vaso con la solución 9K y el inóculo (peso total).
- ❖ Se toman las mediciones del pH , Eh, FeT, Fe^{2+} de las mezclas de preparadas de inóculo y medio 9K. Tener cuidado de contaminar las soluciones de mezcla de cada vaso preparado. Se recomienda utilizar solución de ácido sulfúrico a 200 g/L para lavar los electrodos y pipetas

utilizadas para cada vaso, antes de enjuagar con bastante agua destilada.

- ❖ Luego se ponen las mangueras de oxígeno cuidadosamente procurando que la boca de la manguera este en el fondo del vaso, ajustamos la aireación procurando que no exista demasiado burbujeo, y que sea constante para todos los vasos. Ya en el control diario, se recomienda identificar bien cada manguerilla con su respectivo vaso para evitar posibles contaminaciones de la población bacteriana de cada vaso.
- ❖ Después tapamos el vaso con papel aluminio (identificándolo para cada vaso), para evitar que salpique y que evapore demasiado.
- ❖ Se les deja con aireación en el baño maría a (30-34) °C aproximadamente, diariamente se debe reponer el volumen de agua al baño maría (Figura 10.A.) pues existe evaporación, en caso contrario se corre el riesgo que la resistencia se queme.

Figura 10.A. Baño maría

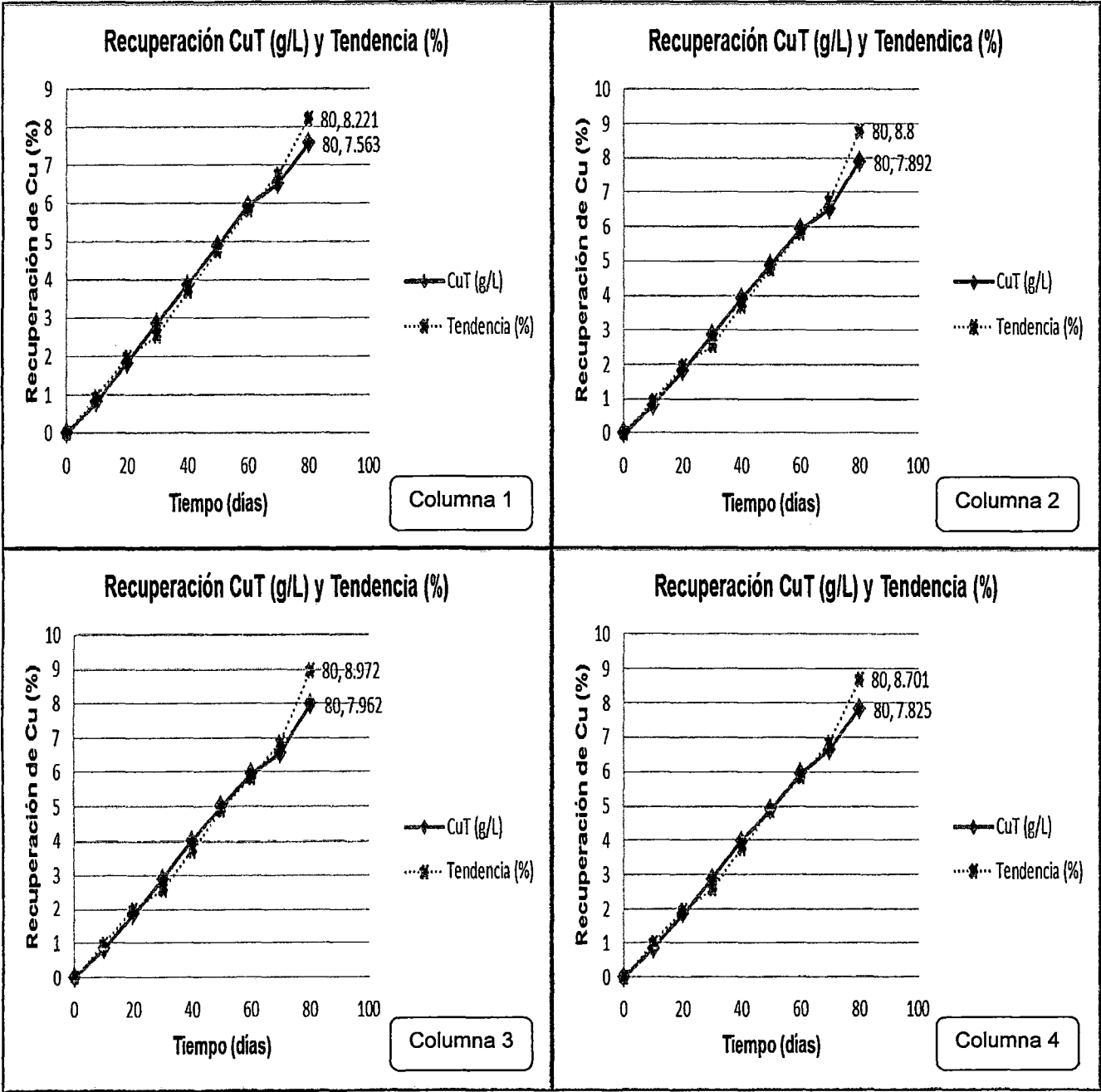


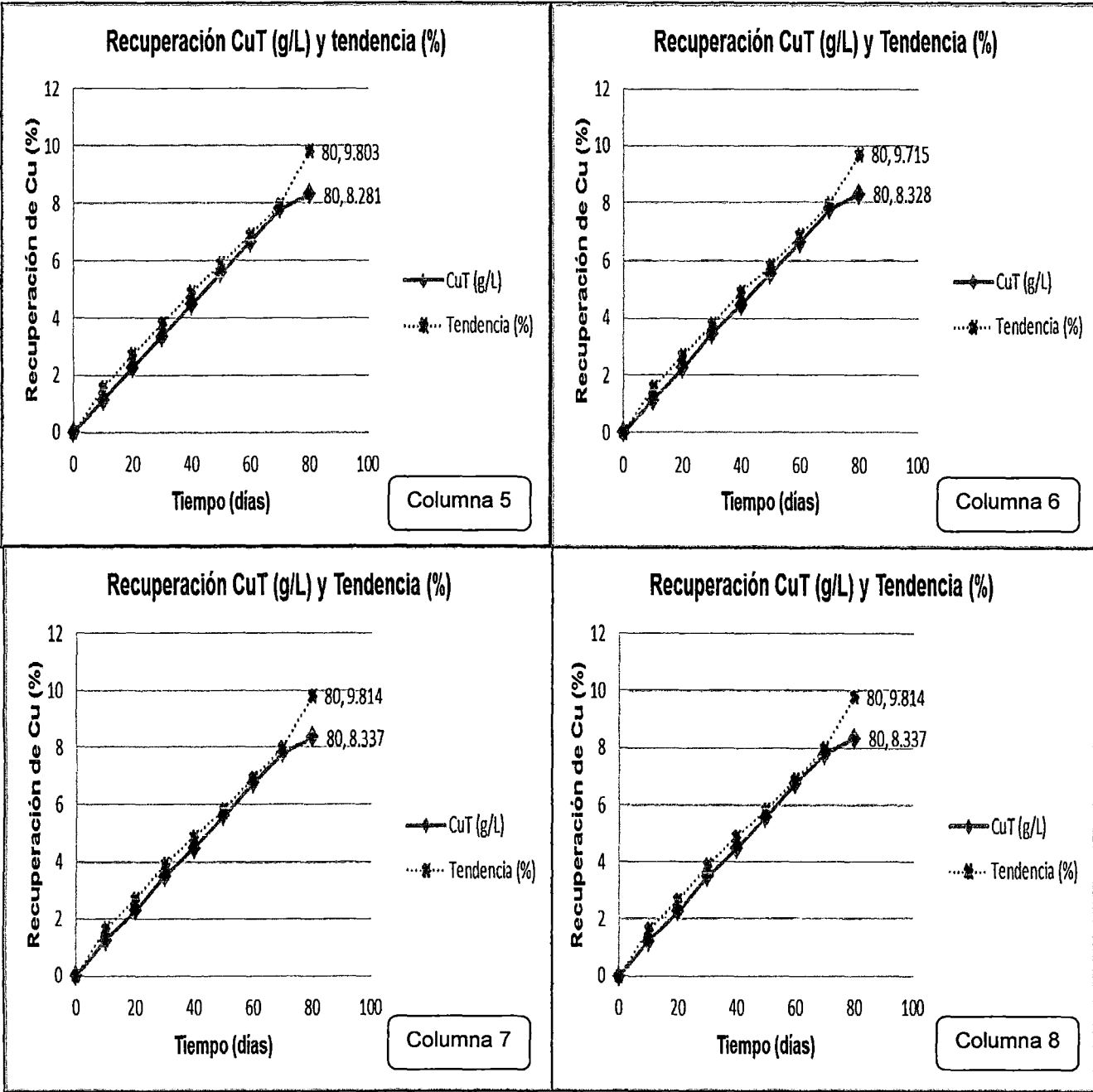
**Fuente: Laboratorio Químico Southern Copper Perú Corporation
(Toquepala)**

- ❖ Se toman las horas inicio y parada.
- ❖ Al día siguiente reponemos el peso tomado para análisis y el volumen que se evaporó, completando con agua destilada o agua industrial. Esto para poder obtener una curva uniforme de la velocidad de oxidación.
- ❖ Controlamos el pH y potencial electroquímico todos los días en una hora puntual.
- ❖ A la vez analizamos el ión ferroso y el fierro total todos los días o cada dos días a la misma hora del control del pH.
- ❖ La prueba finaliza cuando el potencial electroquímico supera los 500 mV (el ión ferroso se reduce a ión férrico).

Apéndice 11

Curvas de extracción metalúrgica del CuT

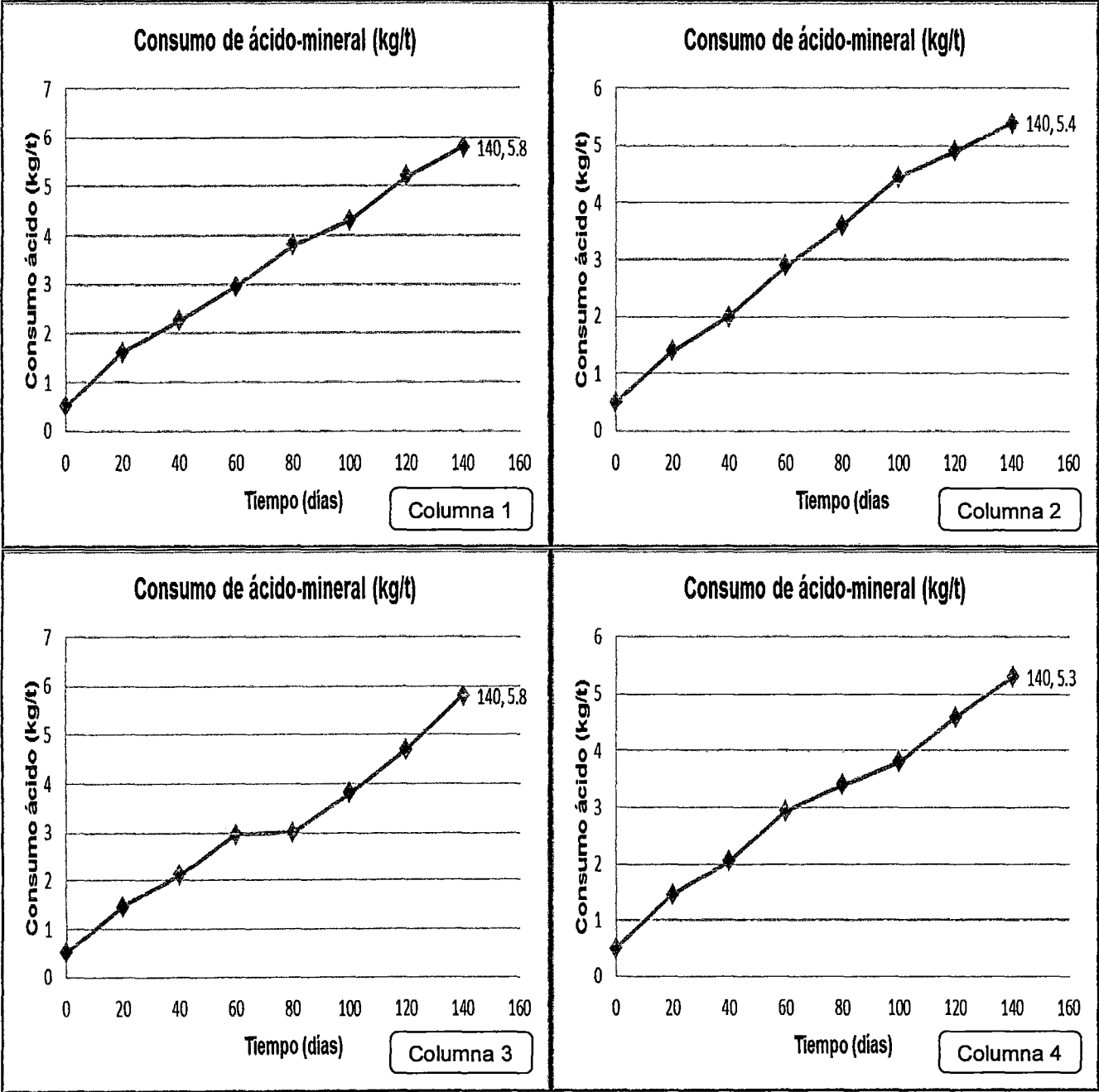


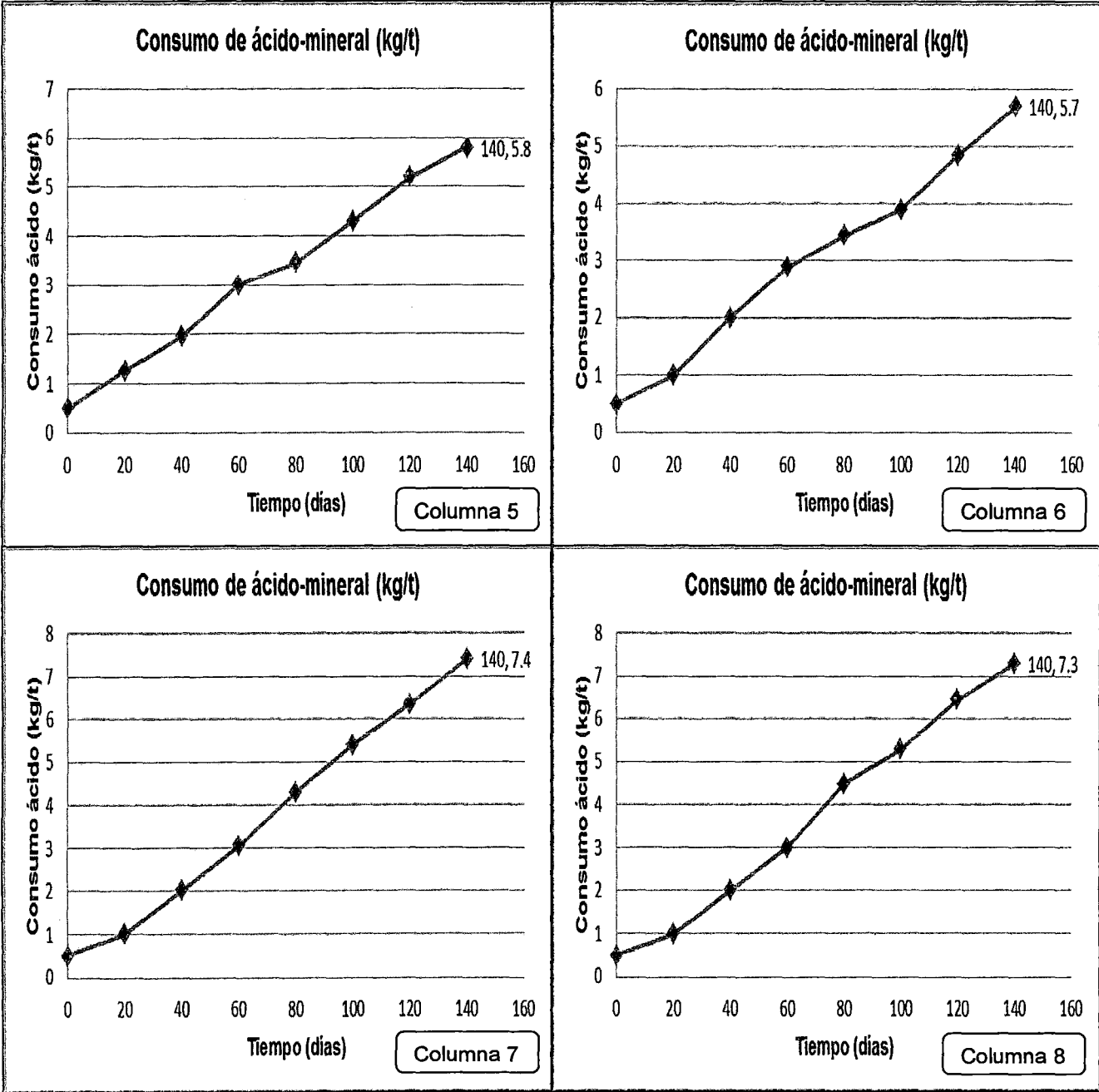


Fuente: Elaboración propia

Apéndice 12

Curvas de consumo de ácido

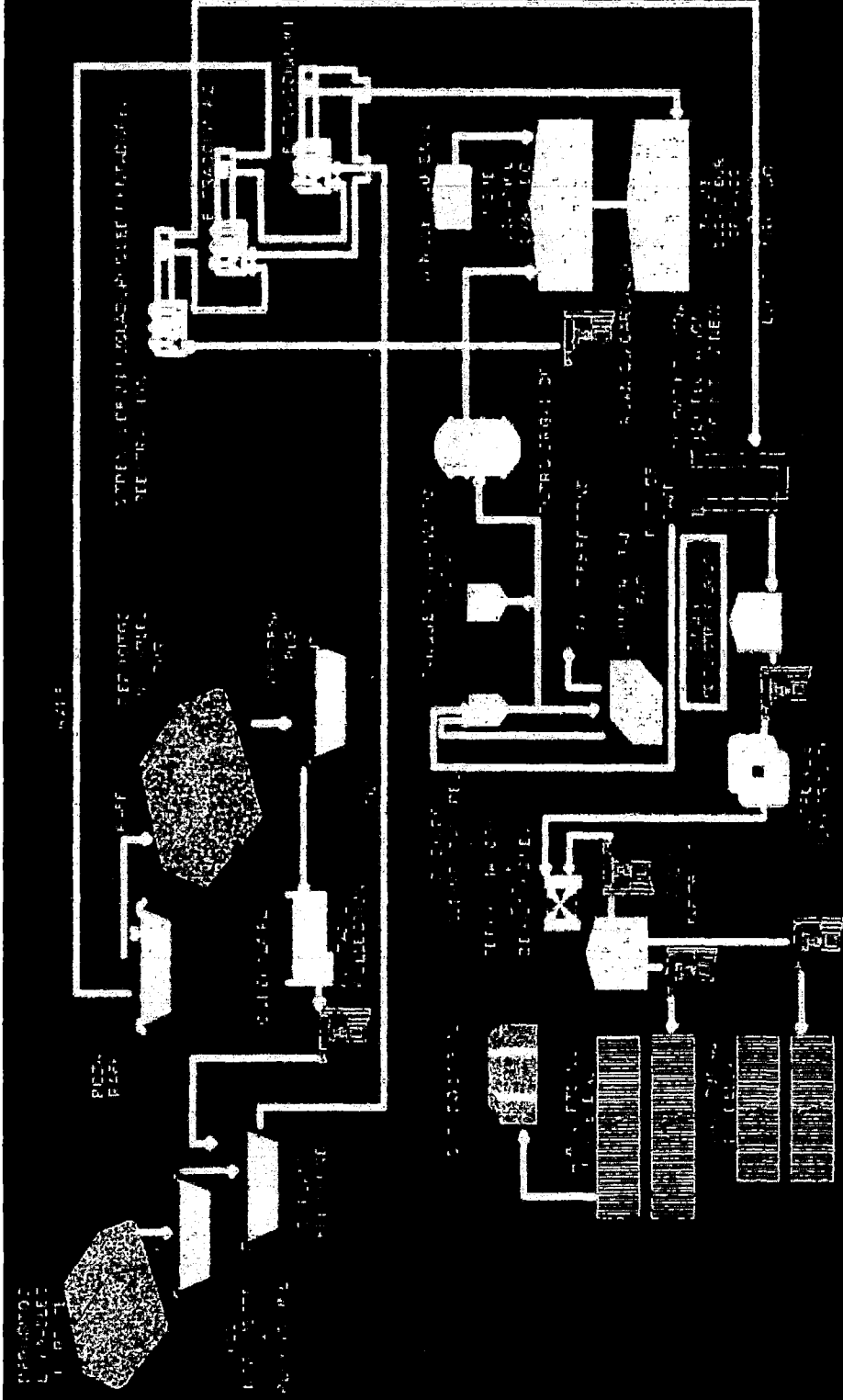




Fuente: Elaboración propia

Apéndice 13

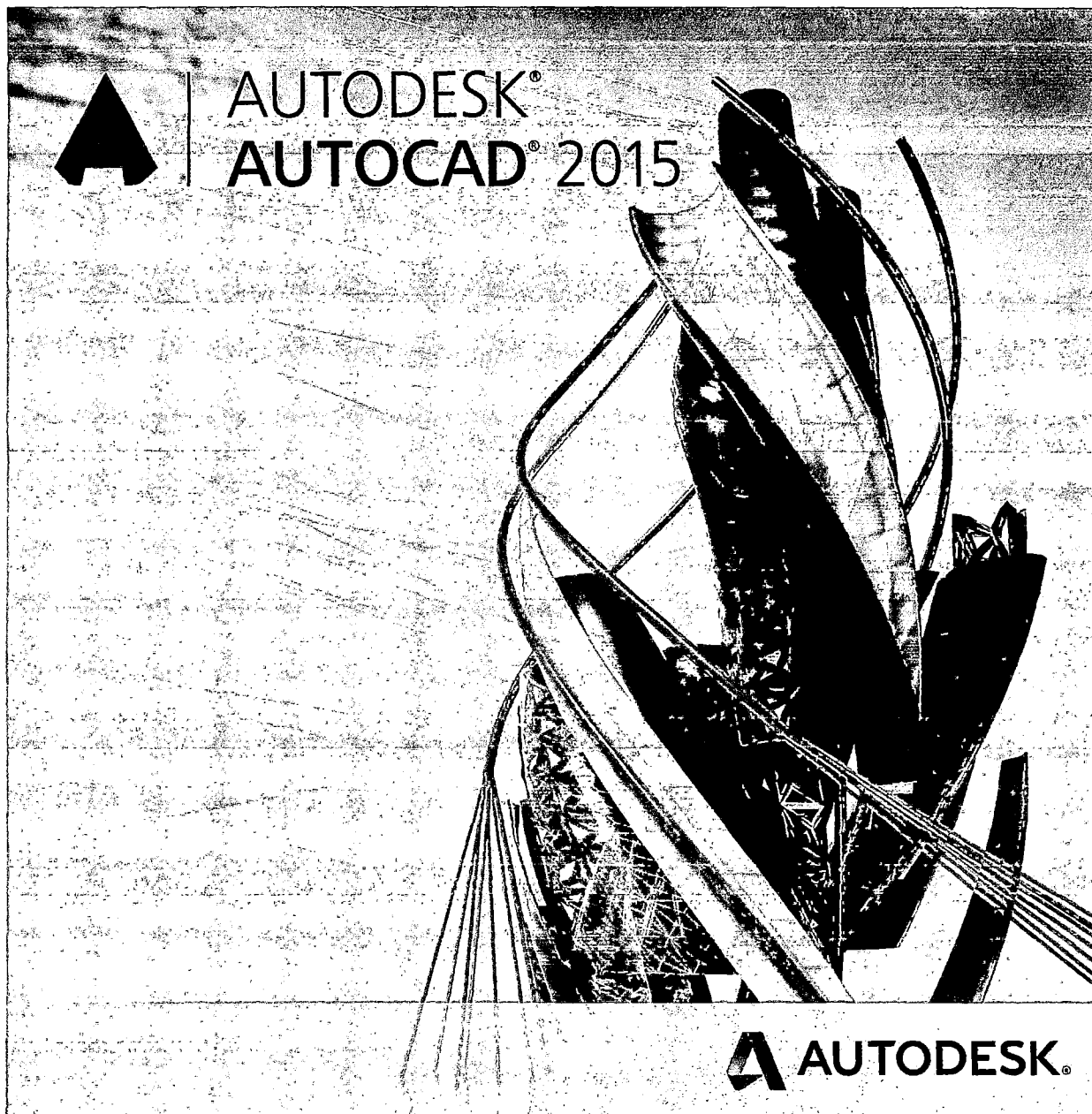
Diagrama de flujo de la planta LESDE-Toquepala



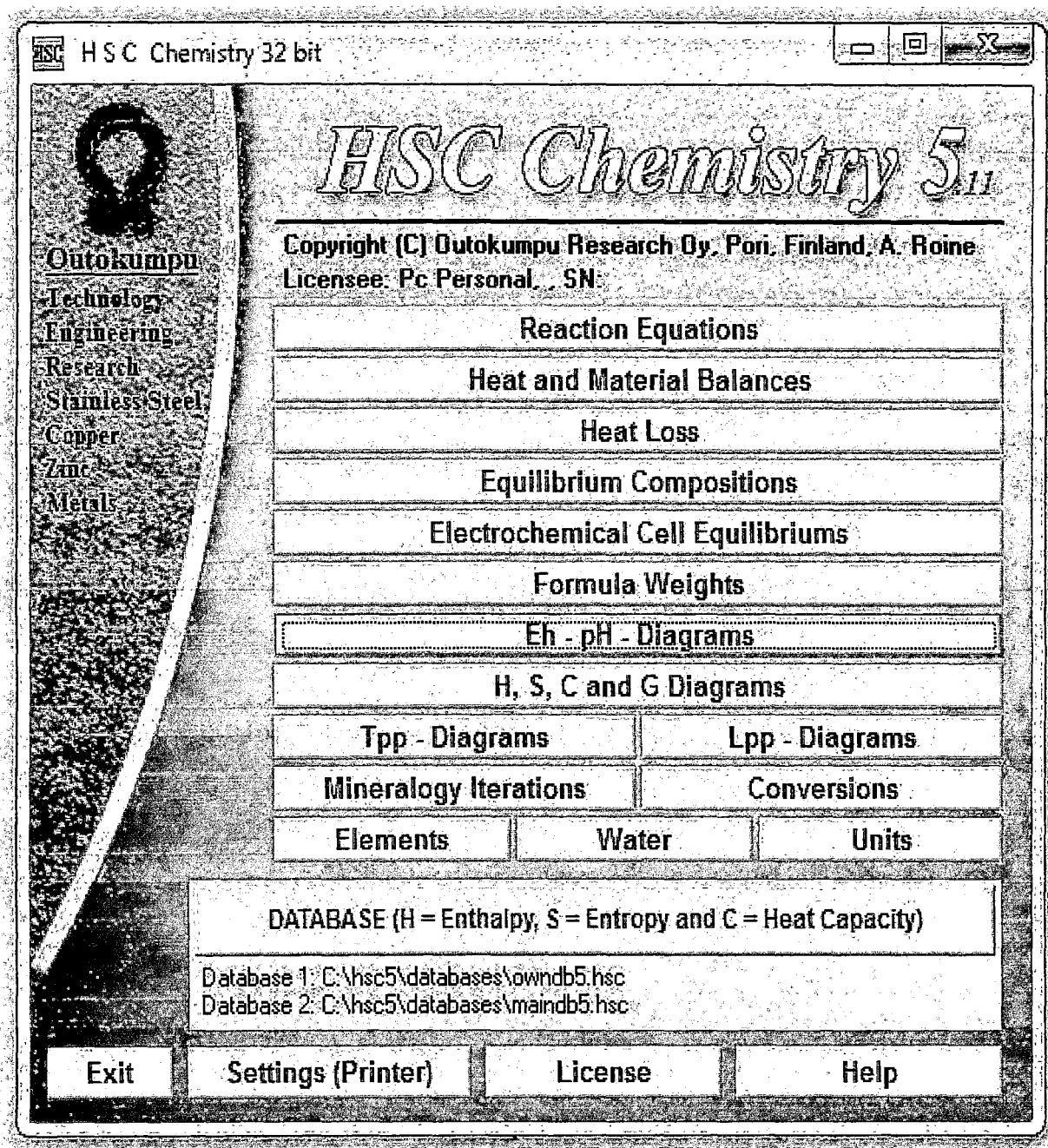
ANEXOS

Anexo 1: Información adicional

Autocad 2015 para diseño de planta LESDE-Toquepala



Software de Pourbaix para diagramas de Eh-pH



Anexo 2: Hoja de especificaciones

Espectrofotómetro de absorción atómico con campana extractora

BECO
INTERNACIONAL
LTDA.

Representantes exclusivos de:



CASILLA 3388

LA PAZ BOLIVIA

Rosendo Gutiérrez 608
Teléfono: 241 5446
Fax: 591-2-241 0639
e-mail: beco@entelnet.bo

REQUISITOS DE INSTALACIÓN PARA UN ESPECTROFOTOMETRO DE ABSORCIÓN ATÓMICA

HOJA 9

TABLA I. DIMENSIONES DEL INSTRUMENTO Y ACCESORIOS (cm):

ESPECTROFOTOMETRO DE ABSORCION ATOMICA.	Largo	Alto	Profundidad	Poder.	Peso
	A	B	C	Watts	Kg
MODELO AANALYST 200	70	65	65	200	49
MODELO AANALYST 400	96	46	68	250	68
MODELO AANALYST 600	110	55	70	5000	175
MODELO AANALYST 700	110	65	70	3600	147
MODELO AANALYST 800	110	65	70	5000	187
MODELO SIMAA-6100	105	65	70	7700	205
COMPONENTES DE HORNO DE GRAFITO					
CONTROLADOR HGA-850	30	46	68	5300	55
AUTOMUESTREADOR AS800	28	20	45	NR	6
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO HGA	30	42	45	250	19
SISTEMA DE MERCURIO HIDRUROS					
MHS-15	16	38	40	NR	3
SISTEMA DE INYECCION DE FLUJO					
FIAS 100/400	42	18	41	600	11
FIMS 100/400	42	26	41	450	12
DISPOSITIVO DE AMALGAMA	25	25	24	300	5
COMPUTADORA					
CPU	38	16	42	145	15
MONITOR	36	31	39	170	12
TECLADO	46	4	17	NR	2
IMPRESORA					
H-P DESKJET	44	21	39	150	2

NR= NO REQUIERE

Rot tap

Générateurs de vibrations électrostatiques

LAVAL LAB INC.
Generating creative solutions

RO-TAP® RX-29 and RO-TAP® RX-30 MODELS

The industry standard in test sieve shakers, W.S. Tyler's™ Ro-Tap® has a unique two-dimensional operation: a horizontal, circular motion and a vertical, tapping motion. This special action allows material particles to stratify and "seek" critical openings in the test media. The result is the most accurate and consistent particle analysis testing.

The RX-29 model is recommended for testing with 8" or 200 mm diameter test sieves; the RX-30 model is recommended for testing with 12" or 305 mm diameter test sieves.

- Testing applications
 - RX-29: 2" (50 mm) down through 635 mesh (20 micron)
 - RX-30: 5" (125 mm) down through 500 mesh (25 micron)
- Requires minimal maintenance
- Heavy-duty use
- Features 99 minute digital timer/clock
- Each unit test run and serialised prior to shipment.

Specifications

- Oscillations per Minute: 270
- Oscillations Displacement: 1" x .75"
- Taps per Minute: 150
- Hammer Weight: 5 lbs., 6 oz.

Recommendations regarding the maximum number of test sieves that can be used with Ro-Tap® Test Sieve Shakers:

MODEL	NUMBER OF SIEVES	
	FULL HEIGHT	HALF HEIGHT
RX-29 (8" or 200mm Dia.)	6 Sieves with Pan	13 Sieves with Pan
RX-30 (12" or 300mm Dia.)	4 Sieves with Pan or 6 Sieves with Pan*	8 Sieves with Pan

* Intermediate height.

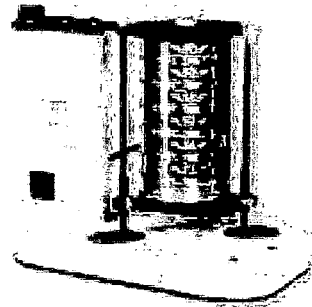
A top cover is required for testing with all of the above.

Dimensions: Unit: 28" wide x 31" deep x 25" high (71cm x 84cm x 64cm)

Shipping: 31" wide x 33" deep x 30" high (77cm x 89cm x 77cm)

Weight: Unit: 160 lbs. (82 kg)

Shipping: 150 lbs. (68 kg)



ACCESSORIES

Sound Enclosure Cabinet

Test Stand

AT 1750 RPM, 60 CYCLE CURRENT (60HZ)	
PART #	DESCRIPTION
RX-29	110v (8" Test Sieves)
RX-29-16	220v (8" Test Sieves)
RX-30	110v (12" Test Sieves)
RX-30-16	220v (12" Test Sieves)

AT 1450 RPM, 50 CYCLE CURRENT (50HZ)	
PART #	DESCRIPTION
RX-29-2	110v (8" Test Sieves)
RX-29-10	220v (8" Test Sieves)
RX-30-2	110v (12" Test Sieves)
RX-30-10	220v (12" Test Sieves)

Prices do not include test sieves.

All models are wired for single phase current only.

RX-29 LABKIT 60HZ Includes RX-29 Ro-Tap®, Sound Enclosure cabinet and Test Stand

RX-30 LABKIT 60HZ Includes RX-30 Ro-Tap®, Sound Enclosure cabinet and Test Stand

RX-29-50HZ LABKIT Includes RX-29 Ro-Tap®, Sound Enclosure cabinet and Test Stand

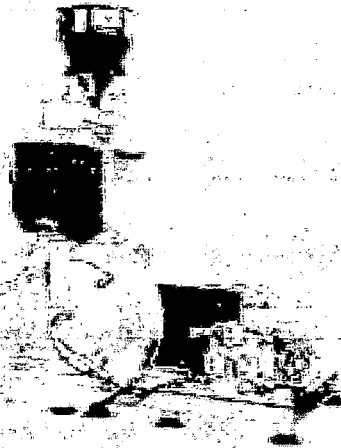
RX-30-50HZ LABKIT Includes RX-30 Ro-Tap®, Sound Enclosure cabinet and Test Stand

LAVAL LAB INC.
2657 Gormesey Blvd. Laval (Québec) H7T 2P2 Canada
Tel: +1 456 681-3683 (Toll Free USA / Canada 1-888-667-7577)
Fax: +1 456-681-3653 Email: info@lavalab.com

ZERMA

THE HOME OF SIZE REDUCTION

PM
PULVERIZADOR DE ALTA VELOCIDAD Y PRECISIÓN



Los Pulverizadores PM de Zerma pueden reducir los tamaños de partículas de gran variedad de materiales a tamaños muy finos.



Este molino reduce la mayoría de los materiales por debajo de la mayoría de los mallas de muestreo y permite que la muestra se mueva a una velocidad.



El molino de alta velocidad de Zerma puede reducir los tamaños de partículas de gran variedad de materiales a tamaños muy finos.

DESCRIPCION GENERAL

Los Pulverizadores PM de Zerma son dispositivos de alta velocidad con 300 y 400 RPM. La velocidad de rotación de la muela es suficiente para reducir los tamaños de partículas de gran variedad de materiales a tamaños muy finos. El molino de alta velocidad de Zerma puede reducir los tamaños de partículas de gran variedad de materiales a tamaños muy finos. La alta velocidad de rotación de la muela permite que la muestra se mueva a una velocidad de 300 y 400 RPM. La alta velocidad de rotación de la muela permite que la muestra se mueva a una velocidad de 300 y 400 RPM.

APLICACIONES

El molino de alta velocidad de Zerma se puede utilizar para reducir los tamaños de partículas de gran variedad de materiales a tamaños muy finos. El molino de alta velocidad de Zerma se puede utilizar para reducir los tamaños de partículas de gran variedad de materiales a tamaños muy finos. El molino de alta velocidad de Zerma se puede utilizar para reducir los tamaños de partículas de gran variedad de materiales a tamaños muy finos.

VENTAJAS

- Fácil ajuste del "gap" entre muelas.
- Se puede elegir entre cinco mallas de muestreo.
- Alto nivel de producción con bajo consumo de energía.
- Diseño innovador y eficiente.
- Amplia variedad de accesorios.
- Fácil control de temperatura.

PARA OBTENER MÁS INFORMACIÓN
CONTACTE A NUESTRO EQUIPO DE VENTAS
O VISITE NUESTRO SITIO WEB

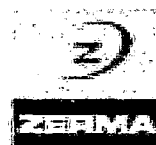


PM

PULVERIZADOR DE ALTA VELOCIDAD Y PRECISION



ZERMA THE
WORLD OF SIZE
REDUCTION

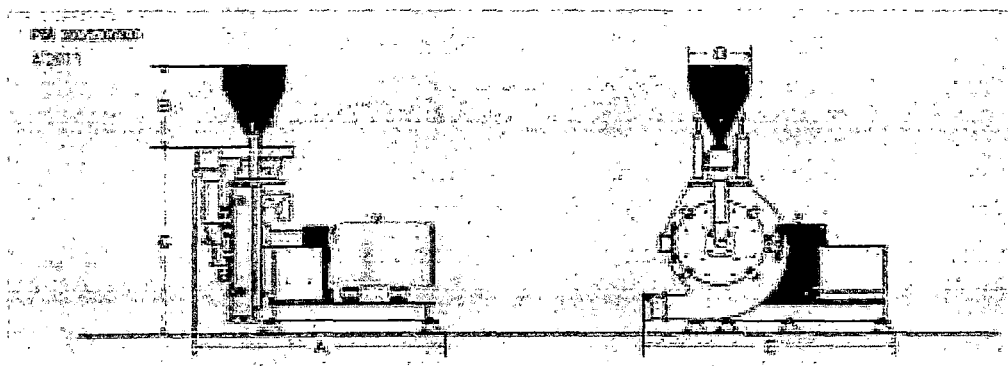


Modelo 100 1000
Modelo 200 2000

ESPECIFICACIONES

Tipo PM	100	200	400
Diámetro de las cimas (mm)	110	150	200
Potencia (kW)	15	30	60
Peso aproximado (kg)	400	1500	2500
Capacidad aproximada (kg/h)	20-300	100-1500	500-1000
A (mm)	1000	1000	1000
B (mm)	600	600	600
C (mm)	1000	1000	1000
D (mm)	400	400	400
E (mm)	1000	1000	1000

DIMENSIONES



ZERMA Maschinenbau GmbH
D-42699 Solingen
Tel: +49 212 655-1000 Fax: +49 212 655-1001
E-Mail: info@zerma.com

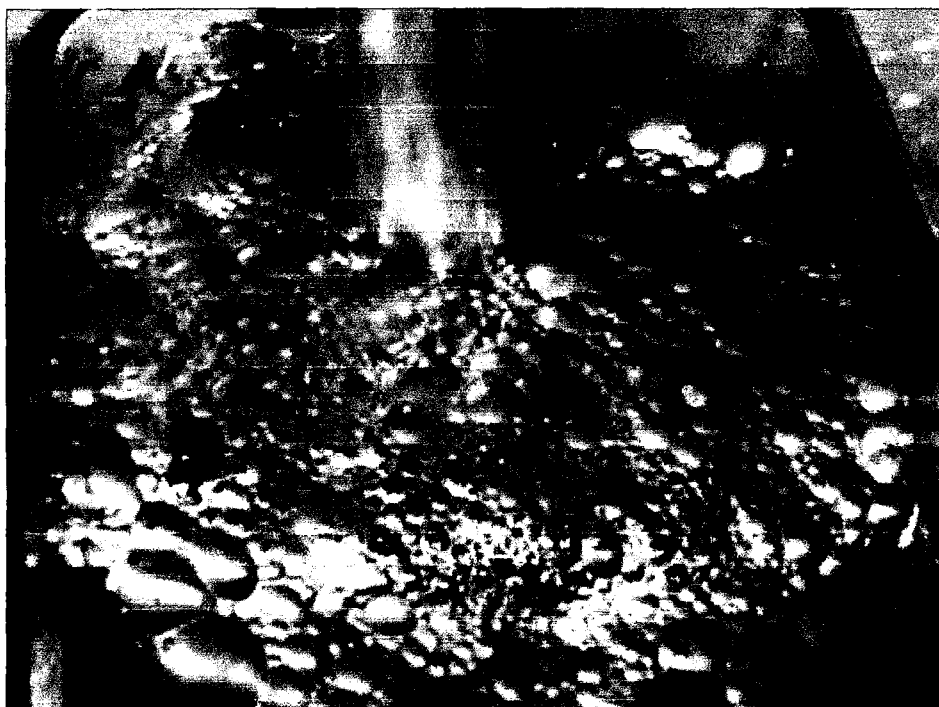
ZERMA MACHINERY & EQUIPMENT TECHNOLOGY CO. LTD.
CHINA

WWW.ZERMA.COM

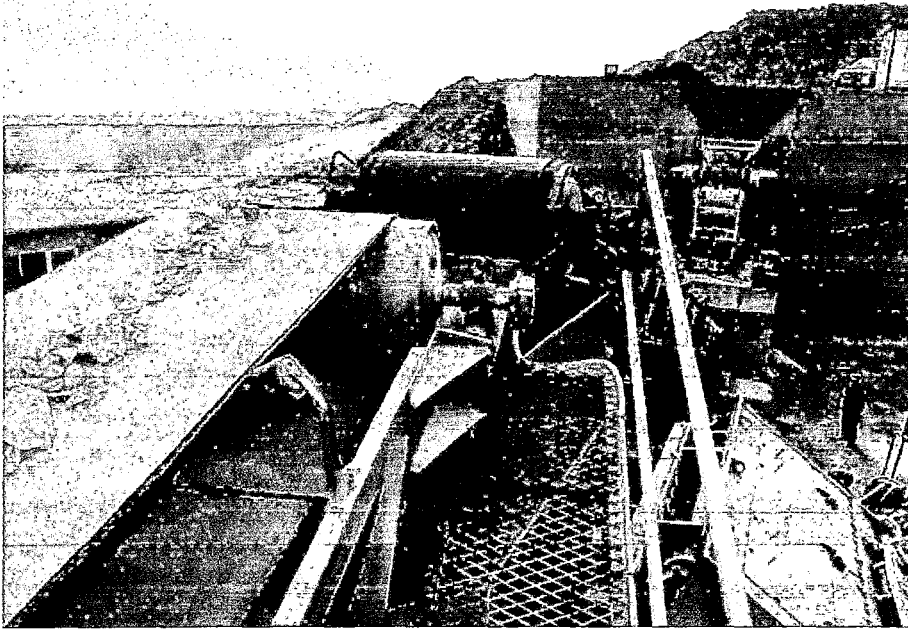
Diagrama de dimensionamiento

Anexo 3: Fotografías de la parte experimental

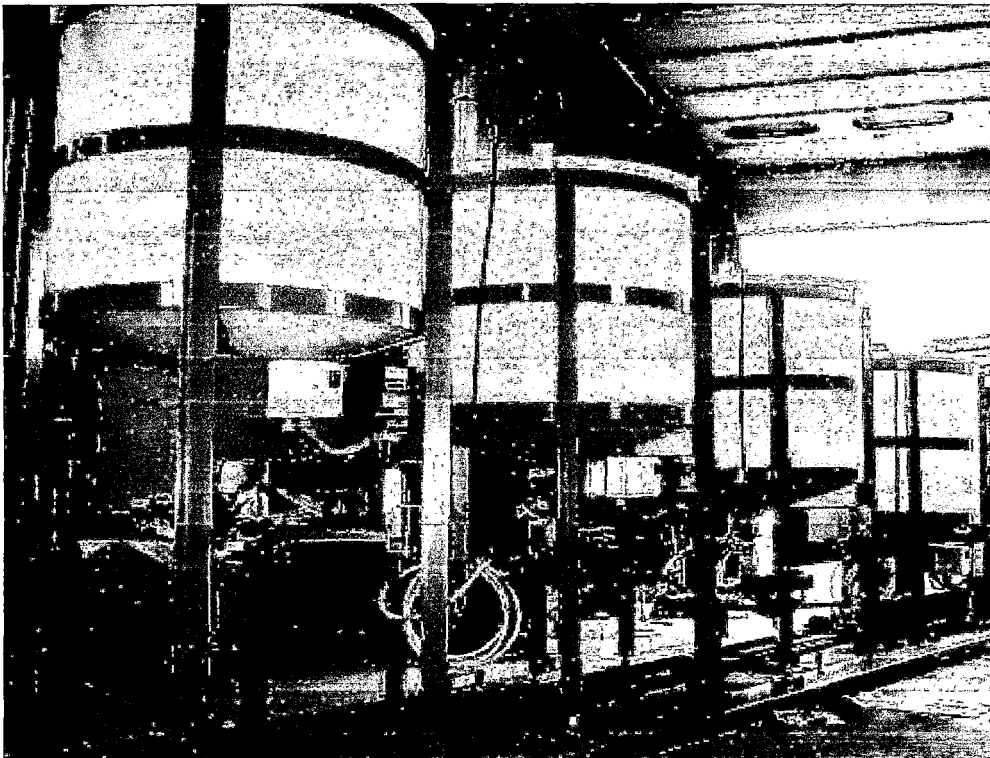
Pruebas del mineral en columnas de lixiviación



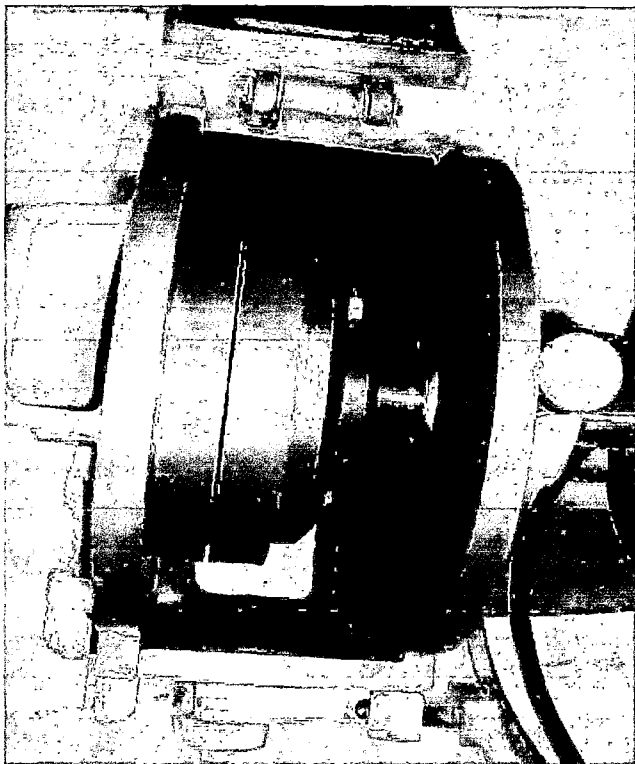
Partes de una chancadora de quijadas



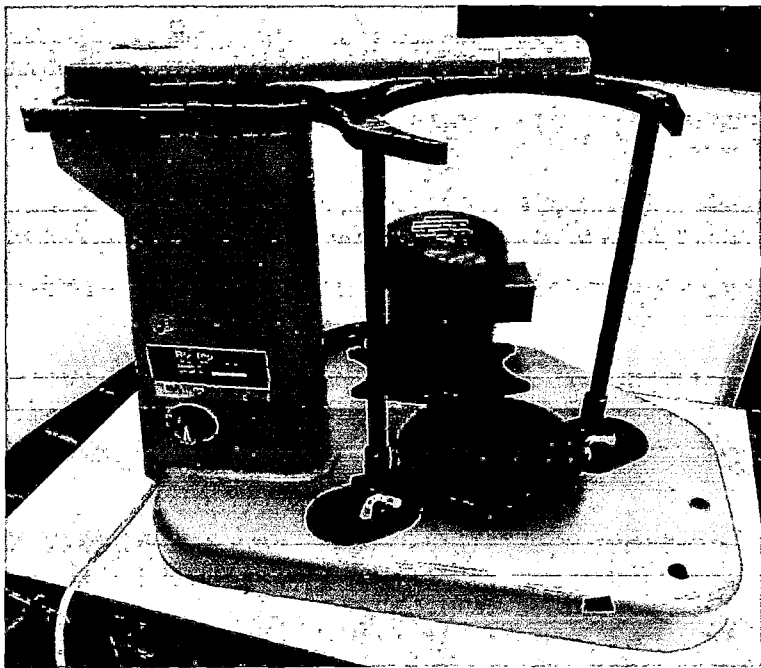
**Tanques de alimentación para una planta piloto de extracción para
solventes SX**



Pulverizador de discos para molienda fina



Ro tap para mallas de -m10 y +m10



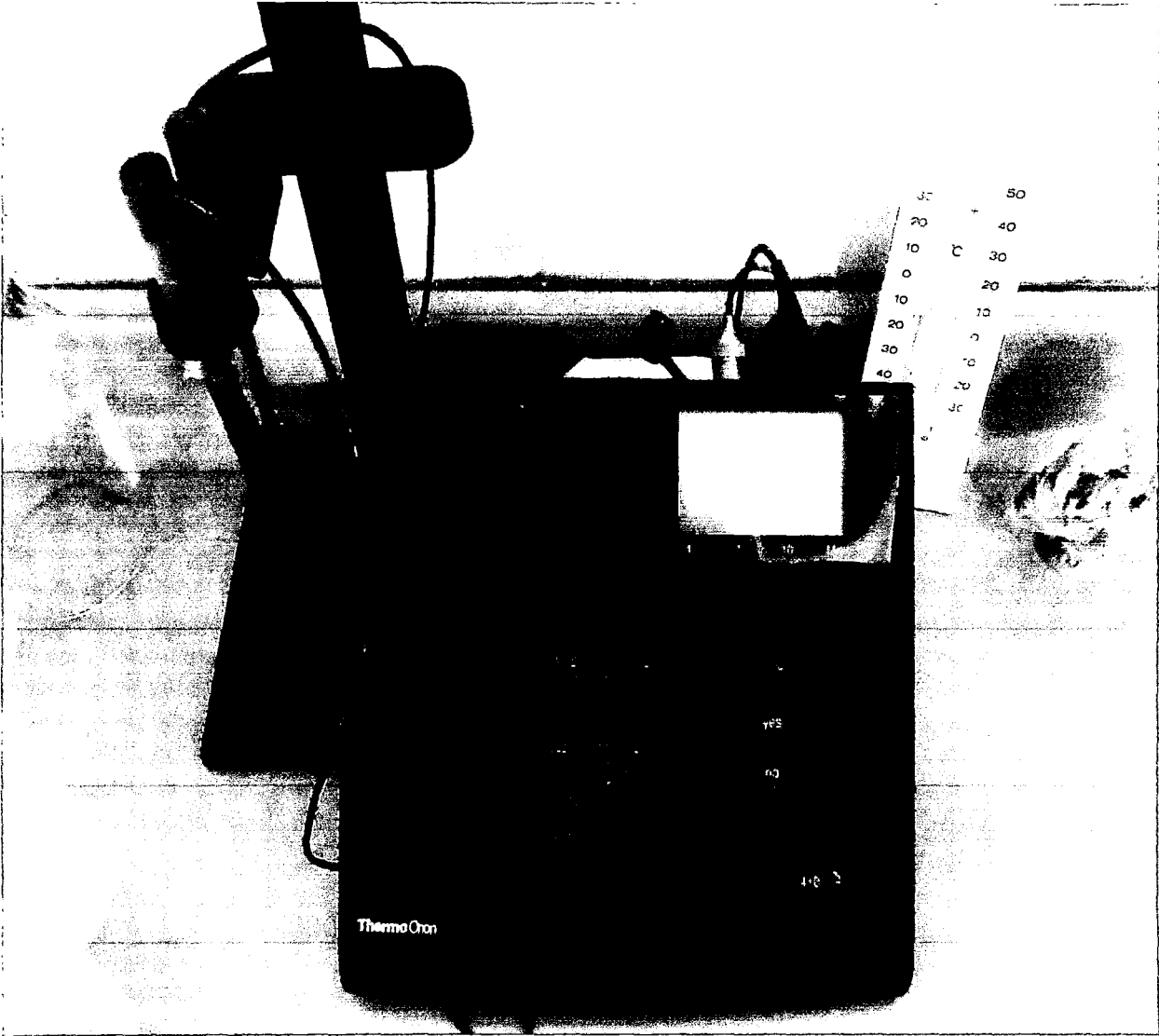
Mallas para análisis granulométrico de las muestras



Phmetro de rutina



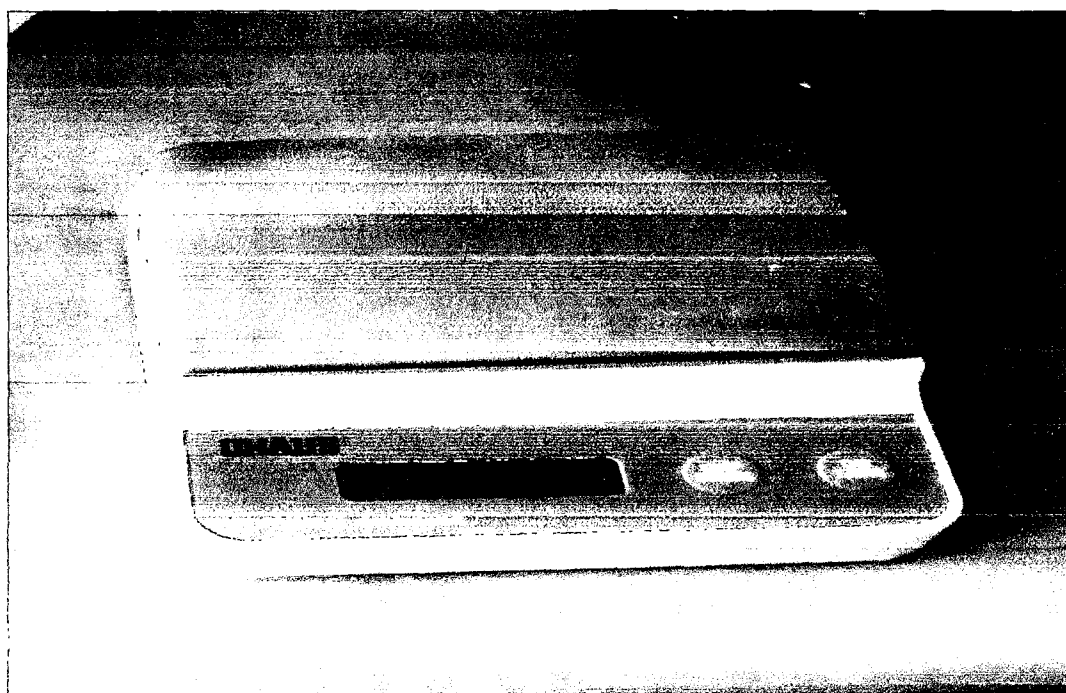
Phmetro calibrador con conexión a impresora



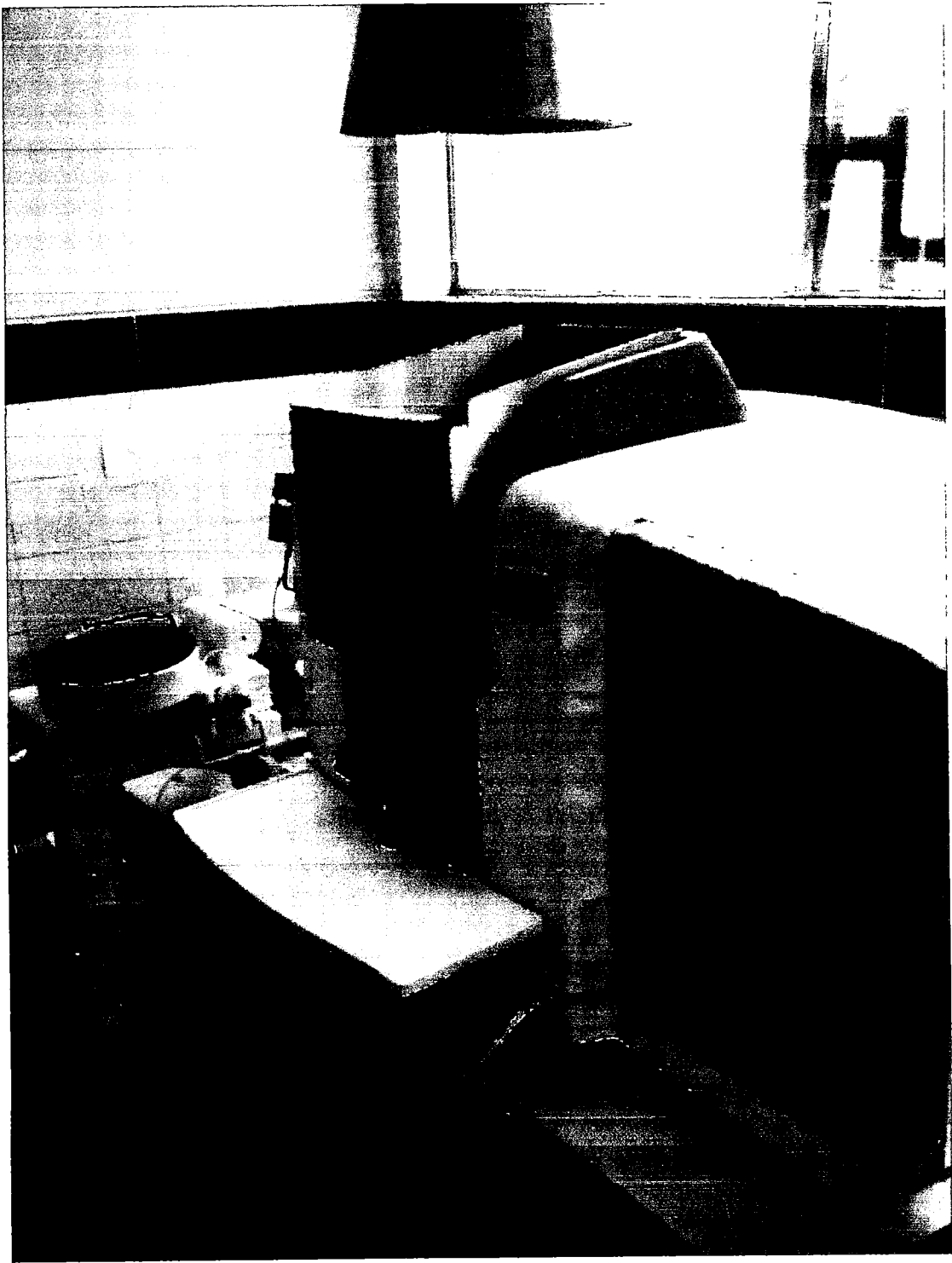
Reactivos químicos para pruebas

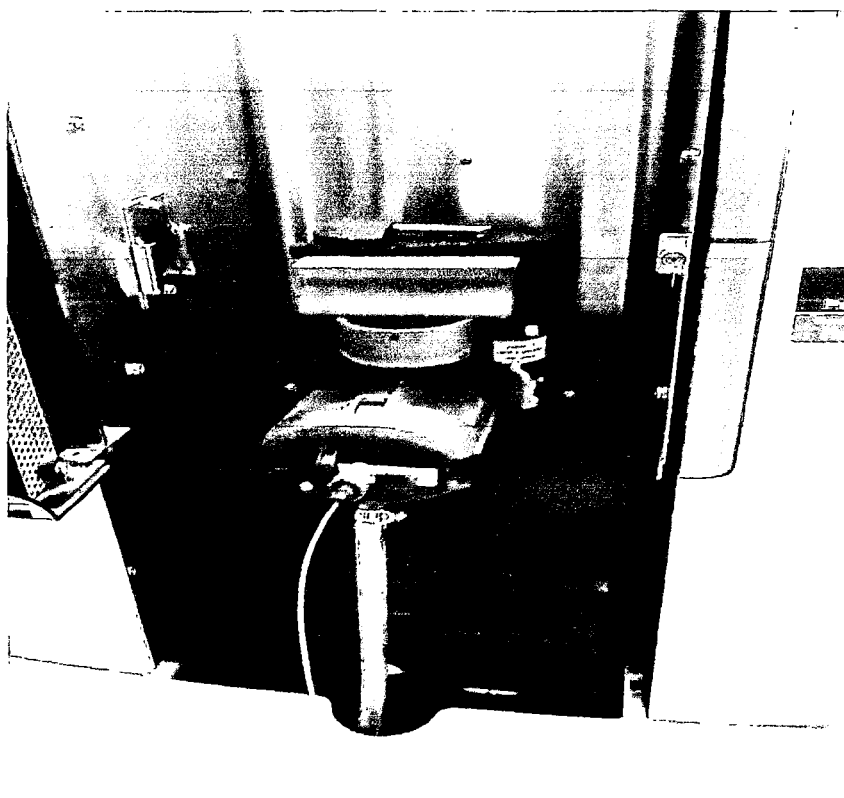


Balanza para peso de muestras



Espectrofotómetro de absorción atómico con campana extractora y sus partes







**Simulación de cianuración en medio alcalino siendo estudiado a diferentes
tiempos**

