

2
2ej'



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"LIXIVIACION DE LAS IMPUREZAS DE As, Sb Y Bi EN CONCENTRADOS DE Cu. UNA ALTERNATIVA PARA EL CONTROL DE CONTAMINANTES"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA QUIMICA METALURGICA

P R E S E N T A :

CLAUDIA VERONICA CRUZ MORALES



MEXICO, D. F.



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

262925



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado:

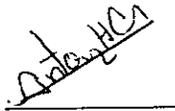
Presidente: Prof. Jorge Ornelas Tabares
Vocal: Prof. Leopoldo Rodríguez Reyes
Secretario: Prof. Antonio Huerta Cerdán
1er. Suplente: Prof. Juan Genesca Llongueras
2o. Suplente: Prof.: Faustino Juárez Sánchez

Sitio donde se desarrollo el tema:

Cia. Mexicana de Cobre, S. A. Unidad "La Caridad". Laboratorio metalúrgico.
Laboratorio de metalurgia extractiva. Facultad de Química. Edificio D. UNAM.

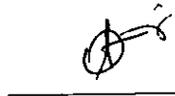
Asesor del tema:

M. en C. Antonio Huerta Cerdán



Supervisor técnico:

Ing. Héctor Obregón Zapata



Sustentante:

Claudia Verónica Cruz Morales



Porque todo lo que tengo

y lo que soy,

es por Tí y para Tí.

Gracias Señor

Agradecimientos

A mis padres

Dévorra Morales y Eduardo Cruz con mucho cariño y admiración. Gracias por darme el derecho a vivir y por la oportunidad de trazarme un camino para lograr mis metas. Por toda su ayuda y apoyo siempre incondicionales, por todo el amor, dedicación y alegría que me han brindado.

Gracias mamá, a través de mi vida has sido una amiga incondicional, porque siempre me has comprendido, aunque mis opiniones y decisiones no fueran tan maduras, sin embargo, me enseñaste a mantener una actitud emprendedora y decidida, Tus movimientos y tu guía han llenado cada uno de mis pasos por la vida. Eres alguien muy importante en mi existencia y ahora sólo quiero que sepas que siento un gran orgullo porque eres mi mamá. Gracias por todas esas palabras de aliento siempre tan oportunas, por enseñarme a no dejarme vencer, y por todo aquello que contribuyó para que lograra llegar a donde siempre había soñado.

Gracias papá, tus consejos me han enseñado a enfrentarme a la vida buscando mi propio camino. La fuerza de tu cariño le da a mi corazón confianza ante las experiencias que cada día se presentan. Tu carácter me ha enseñado a ser fuerte y tus palabras me guían para buscar siempre la armonía en mi interior. Entre tú y yo el cariño es infinito, porque aún ahora siento que me proteges, que te preocupas por mí, que quieres alejarme del miedo o el dolor enseñándome que éstos son parte de la vida. Gracias por creer en mí.

A mis hermanos

Laura y Eduardo, me gusta mucho que sean parte de mi vida, de mis recuerdos y de esas pequeñas y grandes cosas que pasamos juntos al crecer. Son también alguien muy importante en mi presente, porque aunque pase el tiempo sé que están ahí, a un paso de mi corazón, porque los quiero mucho.

A Brenda, mi chiquita, gracias por traer a mi vida muchísimas alegrías y haber despertado en mí un gran amor. Te quiero mucho.

A mis sobrinos

Dany y Brandon por su cariño, por darle a mi vida gratos momentos y mucha felicidad.

A mi abuelita María

Eres para mí el reflejo de la experiencia que el tiempo deja en el ser humano. Tus vivencias llenan tus palabras de sabiduría y me transmites luz inagotable de esperanza. Con tus consejos alejo cualquier pesadumbre, porque con tu ejemplo me has demostrado que la mejor manera de enmarcar a la vida es con buen humor, optimismo y alegría. Hoy quiero demostrarte lo mucho que te quiero y todo lo que te admiro y respeto.

A mis tíos

René y Paquita, Sergio y Mina, Lucio y Lety, Juan, Erick y Gloria, Lourdes y Carlos, Mario y Martha, Lety, Paco y Paty, Hugo y Gema, gracias por el cariño tan grande que me han dado a lo largo de mi vida, por todo su apoyo y por el ejemplo que me han dado.

A mis primos y primas

Por todos esos momentos tan especiales que juntos hemos compartido y que siempre recordaré. Diana, Soraya, Paola, Ericka y Gloria Anel gracias porque además de ser mis primas son mis amigas.

A todos mis amigos

Christian M., Víctor L. y Mónica, Israel G., Lourdes L., Gabriela V., Cristina de la P., Blanca T., Arturo T., Juan C. B., Víctor V., Noel M., Nicolás M., Ma. Elena O., Alfonso L., Manuel R., Enrique B., Edgar E., Trinidad P., Carmen V., Desireé C., Juan José F., Alvaro J., Edgardo M., Sandy P., Rosy M., con quienes he compartido momentos muy agradables y divertidos y de quienes he recibido apoyo, consejos y respeto. Por contar con su amistad y por estar conmigo durante todo este tiempo, gracias.

A mi asesor M. en C. Antonio Huerta Cerdán

Con gran afecto por la valiosa orientación, apoyo, dedicación y paciencia que me brindó para durante la realización de este trabajo.

Al Ing. Héctor Obregón Zapata

Con gran admiración por su valiosa participación en la asesoría técnica de este proyecto. Gracias por su ayuda y dedicación.

Al Ing. Héctor Saltijeral Alvarez

Con admiración y respeto. Gracias, porque sin su valiosa ayuda y colaboración no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

A la Cía. Mexicana de Cobre

Al Sr. Rubén Tello y al Ing. Humberto Arreola y a todo el personal de "La Caridad", que en forma directa o indirecta colaboraron y me dieron las facilidades para la realización de esta tesis.

Al Depto. de Control Metalúrgico

Al Ing. Antonio Villa, Ing. José Romero, Ing. Fidel Saltijeral, Ing. Dolores Duarte, Ing. Patricia Mayo, Evencio Flores, Gastón Munguía, Víctor M. Gutiérrez, Sr. Eduardo Pérez L., Sr. Francisco Leal, Ing. Martín Luna, Q. B. Ana Cifuentes, Q. B. Abel Osorio, Sr. Antonio Ortiz, Sr. Hilario González, Ing. Alejandro Peralta, a todos y cada uno de los muchachos que laboran en este departamento, mil gracias por todo el apoyo y ayuda que me brindaron.

A la UNAM

A la máxima casa de estudios, mi alma mater, por abrirme sus puertas y haberme dado la oportunidad de formarme como profesionista y a la cual estoy orgullosa de pertenecer.
¡ Gracias UNAM !

Contenido

	Resumen	1
CAPITULO 1	1.1 Introducción	2
Introducción y	1.2 Objetivos	8
objetivos		
CAPITULO 2	2.1 Los procesos metalúrgicos	9
Marco teórico	2.1.1 Características generales	9
	2.2 Lixiviación	10
	2.2.1 Generalidades	10
	2.2.2 Agentes lixiviantes	11
	2.3 Principios de la lixiviación	12
	2.3.1 Consideraciones de solubilidad	12
	2.3.2 Disolución con formación de iones complejos	12
	2.3.3 Disolución con oxidación o reducción	15
	2.3.4 Equilibrios a elevadas temperaturas	15
	2.4 Técnicas de lixiviación	16
	2.4.1 Lixiviación alcalina	17
	2.4.2 Lixiviación con agitación	18
	2.5 Termodinámica de la lixiviación	18
	2.5.1 Reacciones de oxidación-reducción	19
	2.5.2 Diagramas de Pourbaix	21
	2.6 Cinética de la lixiviación	23

CAPITULO 3	3.1 Metodología de trabajo	25
Desarrollo	3.2 Balances metalúrgicos	27
experimental	3.3 Condiciones experimentales	29
	3.3.1 Efecto de la relación NaOH/Na ₂ S	30
	3.3.2 Efecto del tiempo de lixiviación	30
	3.3.3 Efecto de la concentración	
	de la solución lixivante	31
	3.3.4 Efecto de la temperatura	31
	3.3.5 Efecto de la velocidad. de agitación	31
CAPITULO 4	4.1 Pruebas de caracterización	32
Resultados	4.2 Pruebas de lixiviación	33
experimentales	4.2.1 Efecto de la relación NaOH/Na ₂ S	33
	4.2.2 Efecto del tiempo de lixiviación	35
	4.2.3 Efecto de la concentración	
	de la solución lixivante	37
	4.2.4 Efecto de la temperatura	39
	4.2.5 Efecto de la velocidad de agitación	41
CAPITULO 5	5.1 Efecto de la relación NaOH/Na ₂ S	44
Análisis	5.2 Efecto del tiempo de lixiviación	51
de resultados	5.3 Efecto de la concentración	
	de la solución lixivante	52
	5.4 Efecto de la temperatura	54
	5.5 Efecto de la velocidad de agitación	55

CAPITULO 6	6.1 Conclusiones	56
Conclusiones	6.2 Recomendaciones	58
y recomendaciones		
Apéndice A	Gráficas de la cinética de lixiviación	59
	Bibliografía	65

Resumen

En el presente trabajo se propone una alternativa de eliminación de impurezas (As, Sb y Bi) contenidas en los concentrados de cobre, siendo un caso específico el de la Compañía Mexicana de Cobre, S. A., unidad "La Caridad", para que de esta manera se puedan evitar ciertos problemas inherentes a la purificación del metal valioso (Cu), así como los referentes a la conservación del medio ambiente y los castigos que se dan al precio del concentrado por estar por encima de los niveles de concentración máximas permitidas por las plantas de fundición (0.16% de As, 0.06% de Sb y 0.02% de Bi) de dichas impurezas.

La mayor parte de la experimentación de este trabajo se llevó a cabo en las instalaciones de dicha compañía, con una muestra de concentrado de cobre originado en la planta concentradora.

Mediante estudios experimentales de lixiviación del concentrado de cobre, se logró solubilizar hasta un 89.23% de arsénico, 100% de antimonio y 10.90 % de bismuto. Como consecuencia de esto, la concentración de impurezas final (0.010% de As, 0.0% de Sb y 0.019% de Bi) en el concentrado de cobre llegó a obtenerse por debajo de las concentraciones máximas mencionadas; mientras que el cobre permaneció en el residuo sólido sin ser atacado por los medios lixiviantes.

Se determinó que las condiciones óptimas para la lixiviación de las impurezas contenidas en estos concentrados fueron: una concentración de la solución de 100g/l de NaOH por 160g/l de Na₂S, un tiempo de residencia de 150 minutos, a una temperatura de 98°C y 1500 rpm; observándose que las variables que tuvieron un efecto más significativo fueron la temperatura y la concentración de la solución (agentes lixiviantes). A un aumento de cada una de estas variables corresponde un aumento en el porcentaje de lixiviación.

CAPITULO 1

INTRODUCCION Y OBJETIVOS

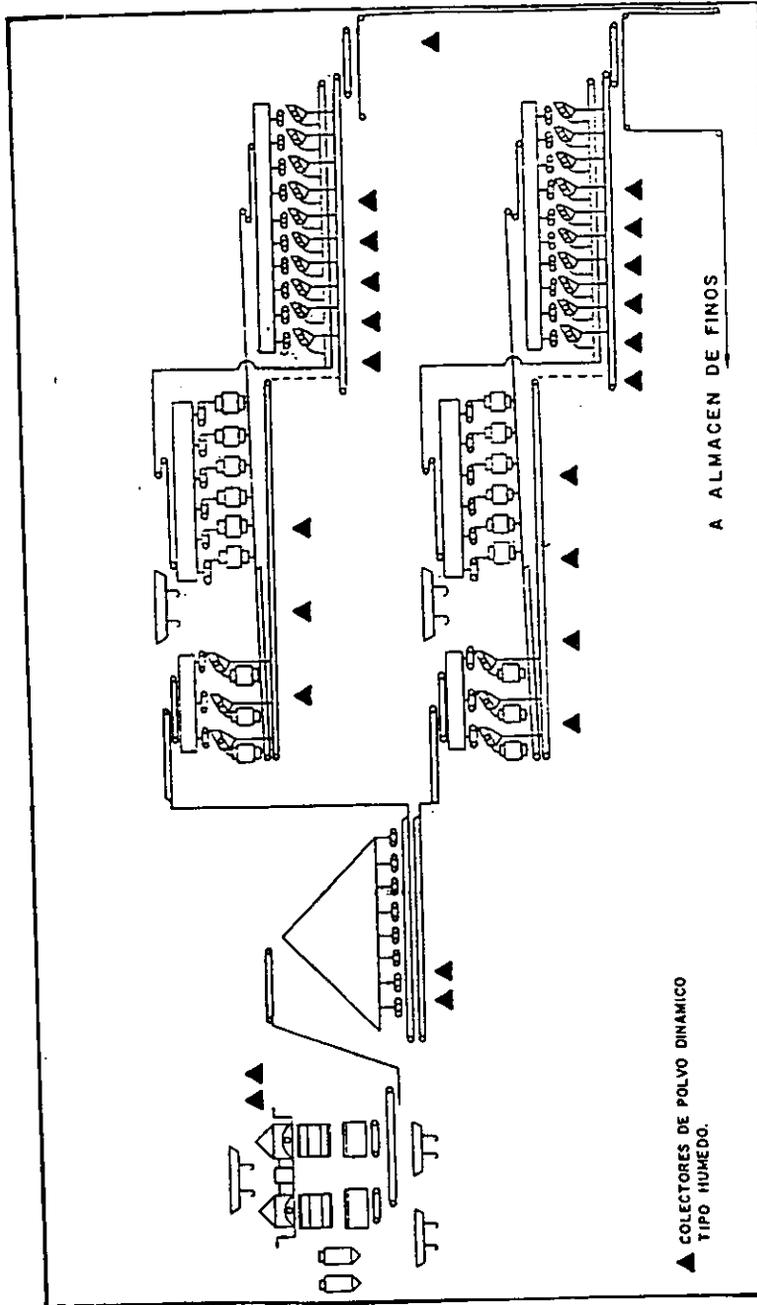
1.1 Introducción.

Mexicana de Cobre S. A, es una compañía minero-metalúrgica que nació como resultado de la localización de un importante depósito de mineral de cobre, ubicado a 20 Km. del suroeste de Nacoziari de García, Sonora.

A partir de 1978 se inició la explotación de la mina a cielo abierto y para el año de 1979 se pusieron en marcha las operaciones de la planta concentradora, misma que en la actualidad tiene capacidad para procesar 100,000 toneladas de mena diarias. Desde entonces el crecimiento de la empresa no ha cesado. En 1982 inició la separación de molibdeno, que permitió, además de la obtención de un nuevo subproducto, mejorar la calidad del concentrado de cobre. La fundición inició sus operaciones en 1986, para extraer el cobre a partir del concentrado a través del proceso pirometalúrgico, instalando un horno de fusión instantánea. La planta E.S.D.E. fue inaugurada en el año de 1994 con el objeto de obtener cátodos de cobre a partir de la lixiviación de mineral de cobre de baja ley.

El proceso de concentración del mineral de cobre en esta Compañía se podría resumir en cinco etapas: a) trituración, b) molienda, c) flotación, d) espesamiento y filtración y e) disposición de las colas.

En la sección de trituración en la planta, el mineral que sale de la mina es quebrado hasta un tamaño de $-1/2''$ en tres etapas y sin el uso de agua, excepto como rocío para controlar el polvo. En la primera etapa de trituración se utilizan dos trituradoras primarias giratorias, las cuales reducen el mineral de $-60''$ hasta $-6''$.



▲ COLECTORES DE POLVO DINAMICO TIPO HUMEDO.

A ALMACEN DE FINOS

TITULO DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO SECO TRITURACION PRIMARIA, SECUNDARIA, CRIBADO TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE MINERAL

DISCIPLINA DIAGRAMA DE FLUJO



MEXICANA DE COBRE, S.A. UNIDAD "LA CARIDAD"

En la segunda etapa se reduce el mineral de -6" a -1.5" y en la tercera etapa de trituración el producto que se obtiene es un mineral de tamaño de 95% menor a 1/2". El tipo de trituradoras que se utilizan en estas dos etapas, son hidráulicas de cono.

El producto procedente de la sección de trituración es alimentado junto con agua a los molinos de bolas, los cuales trabajan en circuito cerrado con hidrociclones, siendo molido hasta el tamaño requerido. La carga de un molino está constituida por bolas de acero de varios tamaños, siendo la mayor cantidad de 3" de diámetro. Dicha carga se añade cada 72 horas operadas del molino, en una cantidad tal de 15 toneladas. El volumen de la carga total, incluyendo las bolas de acero, no excede el 60% del volumen del molino.

El objetivo de la molienda es producir un tamaño de partículas que garantice la suficiente liberación del mineral del material de ganga sin que se produzca una cantidad elevada de finos.

La etapa de concentración que se realiza en dicha planta es la flotación. Durante la molienda, además de obtener partículas minerales con alto grado de liberación, se aprovecha este reactor como un sistema de acondicionador de pulpa con reactivos especiales, los cuales tienen funciones diferentes y que se agregan por tres razones principales: 1) para afectar la superficie de las partículas de mineral de cobre a efecto de ser flotadas, de tal modo que se adhieran a las burbujas de aire introducidas en la pulpa en la celda de flotación, 2) estabilizar estas burbujas con el fin de hacer posible la formación de una espuma suficientemente homogénea y 3) hacer no flotables ciertos minerales metálicos y otros compuestos que no son de interés en un determinado concentrado. La recuperación de los minerales por flotación es más eficaz en el intervalo de tamaño de 10 a 100 micrómetros.

Después de la operación de molienda y acondicionamiento, la pulpa es llevada a la celda de flotación, en la cual, el aire es insuflado para producir una nube de burbujas ascendentes. Estas llegan a cubrirse con el mineral de cobre en tanto se elevan a la superficie, donde se aglomeran formando una espuma mineralizada, la que continuamente fluye del vertedor de la celda pasando a un canal colector.

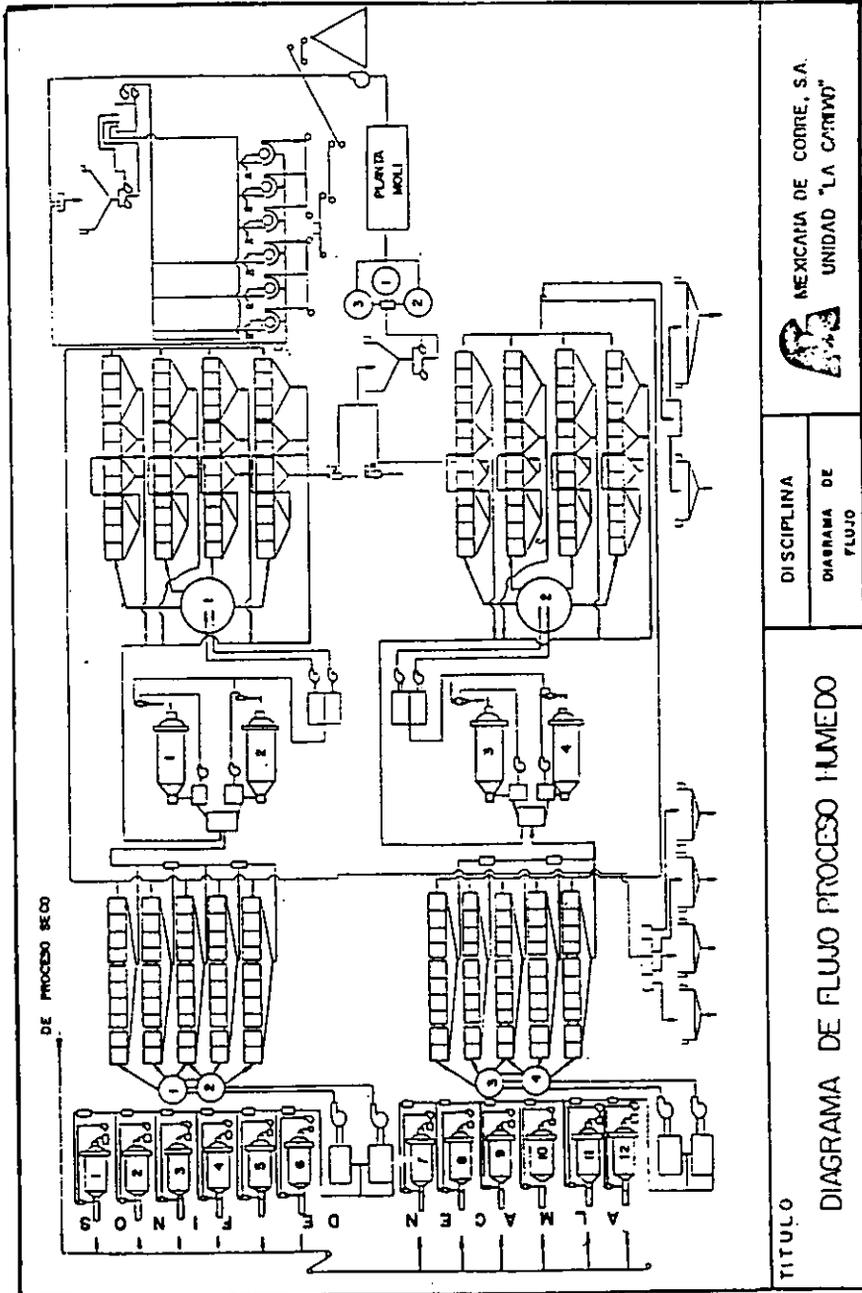
La práctica usual es flotar a un pH natural o en un circuito alcalino ajustado con cal. En la unidad "La Caridad" se utiliza la lechada de cal que tiene como función regular el pH (aproximadamente a 9), deprimir la piritita y modificar el área superficial de las partículas. Como el concentrado que se produce aquí (flotación primaria) no resulta lo suficientemente limpio se pasa a etapas de posterior incremento en calidad de producto, esto es, se reprocesa en celdas de flotación similares, aunque más pequeñas, para que responda al grado de calidad requerido.

El concentrado (Cu-Mo), que se recibe de la planta concentradora normalmente presenta las siguientes características: 30 a 33% de Cu, 24 a 28% de Fe, 0.4 a 0.8 de Mo. Este es alimentado a otro circuito de flotación y en la última etapa de este circuito de flotación se debe obtener un producto con la siguiente composición: Cu menor o igual a 0.4%, Fe menor o igual a 0.5%, Mo mayor o igual a 58%.

La pulpa de concentrado final de cobre, después de haberse recuperado los valores de molibdeno en la planta de separación Cu-Mo, se envía a los procesos de separación sólido-líquido (espesamiento y filtración), con la finalidad de separar y recircular la mayor parte del agua. Finalmente, el concentrado final con 10% de humedad se almacena para posteriormente ser enviado y procesado en la fundición. La disposición de las colas se consigue por espesamiento y asentamiento con recuperación del agua; comprendiendo con ésto la última etapa del tratamiento de la mena. El total de las descargas se combina y fluyen por gravedad a la presa de jales; ningún material sólido o líquido es desechado más allá de esta presa.

PRODUCTO	As	Bi	Sb
Alimentación a flotación	0.010	0.006	0.010
Concentrado final de cobre	0.120	0.031	0.120
Colas finales	0.010	0.004	0.010

Tabla 1.1 Porcentajes de leyes de As, Sb y Bi. Resultados del compuesto anual 1997.




 MEXICANA DE CELULOSE, S.A.
 UNIDAD "LA CARRERA"

DISCIPLINA
 DIAGRAMA DE FLUJO

TITULO
 DIAGRAMA DE FLUJO PROCESO HUMEDO

La mayor parte de la producción de esta Compañía se destina a satisfacer la demanda nacional y el resto se ofrece al mercado internacional, principalmente a los Estados Unidos y a diversos países de Latino América y Europa.

La conservación del medio ambiente es en la actualidad uno de los principales retos de la Compañía Mexicana de Cobre S.A. Debido a que en su proceso de fundición se manejan materiales contaminantes tales como: arsénico, antimonio, bismuto y plomo, se experimenta la posibilidad de obtener a estos como materiales subproducto.

En la fundición de concentrados de cobre la mayoría de las impurezas se separan en la escoria y en los gases de salida. Estos últimos arrastran polvos que contienen principalmente cobre, hierro, arsénico, antimonio, etc. Los polvos comúnmente son recirculados al circuito de fundición, ocasionando que las impurezas vayan concentrándose. Lo anterior es debido a que los minerales cupríferos que se procesan y por ende, los concentrados de cobre que son enviados para su fusión, cada vez se encuentran más contaminados de estas impurezas.

Tipo de material	Composición Química (% ley)			
	Cu	As	Sb	Bi
Concentrados de cobre	30	0.20	0.15	0.040
Polvos de fundición	28	1.80	0.25	0.320

Tabla 1.2 Comparación entre el análisis químico de los concentrados de cobre y los polvos generados durante la fusión.

Así pues, debido a que el concentrado de cobre que se vende a otras compañías, rebasa en ocasiones la concentración máxima permitida de arsénico, antimonio y bismuto y a la problemática que se presenta en la fundición. En el presente estudio experimental, se propone la lixiviación de estas impurezas en los concentrados antes de ser enviados a fundición con el fin de evitar problemas posteriores inherentes a la purificación del cobre y a la contaminación del medio ambiente.

1.2 Objetivos.

Objetivos generales:

* Eliminar el arsénico, el antimonio y el bismuto (impurezas) de los concentrados de cobre de "La Caridad", a concentraciones menores o iguales a 0.16%, 0.06% y 0.02%, respectivamente; por medio de lixiviación con una solución de NaOH-Na₂S.

* Determinar las condiciones óptimas en el proceso de lixiviación de impurezas de los concentrados de cobre.

Objetivos particulares:

* Determinar el efecto de la relación NaOH/Na₂S en la lixiviación de impurezas de los concentrados de cobre.

* Determinar el efecto del tiempo en la lixiviación de impurezas de los concentrados de cobre.

* Determinar el efecto de la concentración de la solución lixivante.

* Determinar el efecto de la temperatura en la lixiviación de impurezas de los concentrados de cobre.

* Determinar el efecto de la velocidad de agitación en la lixiviación de impurezas de los concentrados de cobre.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1 Los procesos metalúrgicos.

2.1.1 Características generales.

Los procesos hidrometalúrgicos⁽¹⁾ son el conjunto de operaciones de tipo químico que se llevan a cabo para el aislamiento y recuperación de metales en fase acuosa (iones) por medio de la interacción con los agentes lixiviantes. Estos abarcan una amplia variedad de sistemas que van desde la disolución (lixiviación) del metal valioso de la mena pasando por la purificación de la solución acuosa (agente lixiviante), hasta la recuperación de metales o sus compuestos mediante precipitación.

La adición de reactivos ácidos, álcalis o ciertas sales al agua puede ayudar a la disolución del mineral requerido. En el proceso de lixiviación, generalmente, la solución cargada contiene varios iones metálicos y por ésto, puede ser necesaria una primera purificación de esta solución mediante la precipitación de algunos metales o compuestos antes de la separación del metal de interés⁽²⁾.

En años recientes, la hidrometalurgia se ha complementado mediante el uso de disolventes como los líquidos orgánicos y resinas orgánicas⁽¹⁾ con el objeto de efectuar purificaciones de valores.

Hoy en día, los procesos hidrometalúrgicos juegan un papel cada vez más importante en la metalurgia extractiva, ya que existen varias razones por las cuales se debe continuar estudiándolos: a) la disminución de contaminantes, especialmente con respecto al medio ambiente; b) la posibilidad de tratar menas de bajo grado o materiales de desecho de las minas y también c) la factibilidad del tratamiento de depósitos relativamente pequeños.

Estos procesos generalmente son menos costosos que los procesos de fundición y son operaciones relativamente fáciles de controlar.

La materia prima que puede ser tratada por procesos de lixiviación son las menas primarias y los metales secundarios. Las primeras son obtenidas directamente a partir de depósitos de menas y los segundos son obtenidos del reciclaje de la chatarra y de los desechos.

La mayor parte de los metales secundarios son recuperados por vía pirometalúrgica. Sin embargo, varios procesos hidrometalúrgicos ya se han propuesto.

La fuente principal de la materia prima son menas que se encuentran en la naturaleza. Estas menas pueden ser menas nativas, menas oxidadas o menas sulfuradas⁽³⁾.

2.2 Lixiviación.

2.2.1 Generalidades.

La lixiviación⁽⁴⁾ es aquella operación que involucra la disolución selectiva del o de los metales de interés. Puede clasificarse de acuerdo al tipo de reacción química o de acuerdo a la ingeniería del proceso. En el primer caso, la clasificación comprende la lixiviación de metales, óxidos, carbonatos o sulfuros, mientras que en el segundo caso la extensión de preprocesamiento del material es el factor determinante para la clasificación en función de su calidad. Así es que, la lixiviación comprende un amplio espectro: desde material marginal, de muy baja ley en el que no hay o es mínimo el manejo del material hasta la disolución de concentrados de alta ley que se obtiene a través de pretratamientos diversos y generalmente complejos.

La aplicación de cualquiera de estos procesos depende principalmente de las impurezas que se deseen eliminar así como del componente por recuperar.

Para lograr obtener un sistema de lixiviación lo más satisfactorio posible, se deben de tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- el valor metálico debe de ser soluble en un solvente que sea económicamente rentable,
- el metal debe de ser económicamente recuperable de la solución, y
- que las impurezas que sean coextraídas durante la lixiviación puedan ser separadas⁽⁵⁾.

2.2.2 Agentes lixiviantes.

Los procesos de lixiviación incluyen, como ya se mencionó, la disolución del metal de interés a partir de la materia prima con el agente lixiviante adecuado en solución acuosa, en un espacio limitado.

La selección de un agente lixiviante depende de su disponibilidad, costo, estabilidad, selectividad, facilidad de producción y regeneración y la facilidad de recuperación del metal de interés⁽³⁾.

Acidos. El ácido sulfúrico es el agente lixiviante más ampliamente utilizado, especialmente en la industria del cobre. Unas de las razones de esto es su fácil disponibilidad y su bajo costo, ya que el ácido sulfúrico es un subproducto de varias fundidoras.

Alcalis. La lixiviación alcalina muestra algunas ventajas sobre la lixiviación ácida entre las cuales podemos mencionar: mayor selectividad, menor corrosión, y menor consumo de reactivo. El hidróxido de sodio, el óxido de calcio y el hidróxido de amonio son los reactivos alcalinos más utilizados.

Agentes oxidantes. El aire y el oxígeno son los agentes oxidantes más económicos y comúnmente utilizados. Sin embargo, debido a la baja solubilidad del oxígeno en soluciones acuosas, algunas veces los iones férrico y cúprico son utilizados como autocatalizadores en el proceso de lixiviación, es decir, que estos iones son utilizados para disolver el metal de interés⁽³⁾.

Agentes complejantes. En un gran número de sistemas de lixiviación que están en uso, se forman iones complejos entre el catión y una especie complejante (o ligando) en la solución. Estos agentes complejantes incluyen a los iones cloruros y cianuros entre otros⁽⁶⁾.

2.3 Principios de la lixiviación.

2.3.1 Consideraciones de solubilidad.

La lixiviación siempre está relacionada con soluciones acuosas en las cuales existe una solubilidad de los minerales o compuestos de valor que se están disolviendo del material que está siendo lixiviado lo suficiente para obtener una concentración aceptable de valores metálicos en la solución. Además es importante que en la misma solución los compuestos y minerales de desecho, que estén siendo rechazados por la reacción de lixiviación, tengan una solubilidad lo suficientemente baja para poder producir una aceptable separación de valores y minerales de desecho durante la lixiviación y para obtener una solución lixivante de pureza aceptable para la subsecuente recuperación del metal. De este modo las solubilidades de los valores y de los compuestos y minerales de desecho se tienen que conocer en términos de las variables sensitivas del sistema, tales como temperatura, presión y concentración de los agentes lixiviantes. La solubilidad de cada sustancia es obtenida a partir del equilibrio químico de la reacción de disolución⁽⁶⁾.

2.3.2 Disolución con formación de iones complejos.

Las interacciones iónicas pueden resultar de la formación de iones complejos, un fenómeno que es de primordial importancia en las reacciones hidrometalúrgicas. La estabilidad de varios iones complejos constituyen la base de algunos procesos hidrometalúrgicos⁽³⁾.

La caracterización de especies iónicas, así como el conocimiento de su potencial de reducción (E_h) son elementos esenciales para comprender los procesos hidrometalúrgicos. Por ejemplo en la modelación matemática de sistemas de lixiviación con reacciones al equilibrio, para conocer el tipo de iones complejos que predominan, en la construcción de diagramas E_h -pH, etc.⁽⁴⁾.

Existe un gran número de sistemas de lixiviación en los cuales iones complejos son formados entre el catión metálico y especies complejantes presentes en la solución. Los ligandos complejantes incluyen al ión cloruro, iones cianuro, amonio, tiosulfato, carbonato y algunas sustancias orgánicas que son solubles en soluciones acuosas y que atacan a los iones metálicos a través de la reacción con grupos que contienen oxígeno, azufre, nitrógeno, carbono, fósforo o arsénico⁽⁶⁾.

Los iones complejos simples son los que se forman por un simple fenómeno de asociación. Los iones de carga contraria asociados a una entidad distinta pueden ser identificados por técnicas experimentales. El enlace es débil y cada componente retiene generalmente sus aguas primarias de hidratación. La mejor ilustración de este tipo de iones está dada por los complejos los cuales se forman entre un catión simple divalente y el radical sulfato.

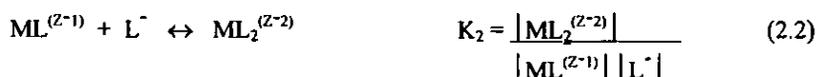
Las estabildades de estos complejos son independientes del ión particular incluido y todos tienen casi la misma constante de disociación. Una situación similar existe para los cationes monovalentes. Esto implica que el complejo es una asociación entre el catión hidratado y el anión.

En otros casos la formación del par iónico parece incluir una interacción química más específica y la fuerza de enlace del par iónico refleja la electronegatividad de los iones participantes, tales como complejos hidroxilos y pares ión carbonato, generalmente las interacciones son de gran interés para los metalúrgicos. La formación de complejos incluye el desplazamiento de moléculas de agua por otros ligandos, los agentes complejantes. Este desplazamiento frecuentemente es acompañado por un cambio en el número de coordinación.

Los ligandos pueden ser cualquier ión negativo o molécula neutral, la cual está directamente ligada a un ión cargado positivamente. Los tipos más comunes de ligandos son los iones negativos monoatómicos o poliatómicos y moléculas polares neutras. Las moléculas neutras tienen uno o más pares de electrones desapareados, por ejemplo tenemos a las moléculas de NH_3 y $\text{H}_2\text{O}^{(3)}$.

Algunos iones complejos pueden ser muy estables, los cuales corresponden a una constante de equilibrio para su formación cuyo valor es muy grande. Además de los complejos estables, puede existir algunos menos estables ya sea entre los distintos iones o entre los iones y el agua. En el último caso se tratará de iones hidratados⁽¹⁾.

En general, un equilibrio complejo es un equilibrio por etapas que puede representarse como⁽⁴⁾ (para $Z = 1$):



La formación de iones complejos durante la lixiviación se puede realizar junto con la disolución ácida de óxidos para darle a ese sistema propiedades de una solución saturada a diferentes concentraciones del metal o del ligando⁽⁶⁾.

2.3.3 Disolución con oxidación o reducción.

Cuando un metal (o un elemento no metálico, como el azufre) está en solución, se encuentra en un estado de oxidación diferente al que se encontraba en el mineral, esto implica que una reacción de oxidación o de reducción ha ocurrido durante el proceso de lixiviación. En tales casos, el sistema de lixiviación está provisto de un agente oxidante o reductor, y la solubilidad del metal está en función de la concentración de dicho agente en equilibrio con el mineral o compuesto que está siendo lixiviado.

El cálculo de la solubilidad como una función de la concentración del agente redox no es muy usual, ya que, el agente es consumido a concentraciones despreciables o en algunos casos el equilibrio es llevado a presiones elevadas. Sin embargo, el cálculo de la solubilidad si se realiza cuando todas las reacciones son expresadas en forma electroquímica, entonces esta solubilidad simplemente es función del potencial de disolución del mineral o compuesto. Como resultado de la relación del potencial, los valores de pH y solubilidad pueden emplearse los diagramas E_h -pH⁽⁶⁾.

2.3.4 Equilibrio a elevadas temperaturas.

Una gran parte del interés se concentra en las reacciones de lixiviación a elevadas temperaturas y a presiones por arriba de la atmosférica, con el objetivo de mantener el estado líquido. Los cálculos para el equilibrio se van complicando al incrementar la temperatura por arriba de los 25°C, ésto es debido a las siguientes razones:

1). Los datos de energía libre y la constante de equilibrios son escasos a elevadas temperaturas comparados con la disponibilidad que tienen estos valores dentro del intervalo de 18° a 25°C.

2). La ecuación de van't Hoff, escrita de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(\log K)}{\partial(1/T)} = \frac{-\Delta H_r^\circ}{2.3R}$$

podría utilizarse para realizar la extrapolación a las temperaturas antes mencionadas (mayores a 25°C). Sin embargo, los valores para ΔH° a temperaturas elevadas generalmente no están disponibles. Además, para reacciones iónicas el ΔH_r° no es constante a temperaturas por arriba de los 100°C.

3). Los datos de energía libre extrapolados con la ecuación

$$\frac{d(\Delta F^\circ)}{d(T)} = \Delta S_r^\circ$$

son igualmente difíciles de encontrar, debido a que los valores de S° no son constantes dentro de un intervalo de temperaturas. Además, los valores de la entropía para iones en solución acuosa son de confiar⁽⁶⁾.

Un método consistente para realizar el cálculo de los equilibrios de soluciones acuosas a temperaturas elevadas, está referido por Criss y Cobble.

2.4 Técnicas de lixiviación.

Existen diferentes métodos de lixiviación⁽³⁾ que son empleados dependiendo de las características físicas y químicas de la mena y de los minerales que se encuentren asociados. El grado de la mena, la solubilidad del metal de interés, la cinética de la disolución, el consumo del agente lixivante, el tipo de mineral, etc., son también factores importantes que se deben de considerar.

A continuación se enlistan los métodos de lixiviación más comunes:

- | | |
|-------------------------------|---------------------------|
| 1). Lixiviación in situ | 4). Lixiviación a presión |
| 2). Lixiviación dump y heap | 5). Lixiviación vat |
| 3). Lixiviación por agitación | 6). Biolixiviación |

2.4.1 Lixiviación alcalina.

Para ciertos minerales o mezclas de minerales la lixiviación alcalina⁽⁶⁾ es un medio efectivo de solubilizar el valor metálico o una alternativa para la lixiviación de compuestos indeseables. Este método generalmente es más selectivo que la lixiviación ácida y es particularmente muy apropiado para menas que consumen grandes cantidades de ácido, debido a la cantidad de carbonatos que contienen. Sin embargo, su selectividad conduce frecuentemente a una baja extracción si el valor metálico deseado no fue suficientemente liberado en la etapa de molienda.

La lixiviación alcalina usando hidróxidos de metales alcalinos y carbonatos es potencialmente aplicable a algunos metales, tales como Al, Sb, As, Cu, Pb, Mo, Sn, Zn, V y otros, con los cuales forman aniones complejos

Los principales agentes utilizados en la lixiviación alcalina son carbonatos de sodio y el amoníaco, pero el hidróxido de potasio, el hidróxido de calcio y el sulfuro de sodio están siendo cada vez más empleados⁽⁶⁾.

El hidróxido de sodio es un agente lixivante muy fuerte, tanto como el carbonato de sodio o el amoníaco. La velocidad de lixiviación puede ser incrementada con el uso de autoclaves cuando el punto de ebullición de la solución sea excedido.

Los minerales sulfurados y las matas de Ni, Co, Cu y Zn pueden ser lixiviados en un sistema amoniacal, el valor metálico es solubilizado como complejo y el azufre es oxidado a sulfato y posteriormente recuperado por cristalización como sulfato de amonio. La lixiviación amoniacal de sulfuros es llevada a cabo bajo condiciones de oxidación a temperatura y presión normales o a temperatura y presión elevadas en autoclave.

Los sulfuros de As, Sb, Sn y Hg pueden ser solubilizados como tiosales por lixiviación con Na_2S . Su lixiviación se lleva a cabo a temperatura y presión elevadas y se agrega NaOH para prevenir la hidrólisis del sulfuro de sodio. Este método puede ser usado para separar arsénico, antimonio y mercurio de menas que contengan otros valores metálicos de interés.

El arsénico y el antimonio pueden ser eliminados de menas arsenicales por lixiviación a presión con NaOH bajo condiciones oxidantes, formando Na_2AsO_4 .

El azufre es oxidado a sulfato (Na_2SO_4) y otros sulfuros metálicos no ferrosos permanecen sin disolverse como residuos en forma de óxidos hidratados⁽⁶⁾.

2.4.2 Lixiviación con agitación.

Con esta técnica de lixiviación se pueden producir altas recuperaciones de valores metálicos en periodos de tiempos cortos, aunque se necesita de la inversión de grandes capitales. Para obtener éstos resultados, se requiere que la mena sea finamente molida para asegurar la suspensión y la máxima exposición de los valores metálicos en la solución lixiviante, dicha suspensión se logra por medio de agitación mecánica o por inyección de aire. Esta operación puede llevarse a cabo en etapas, en forma continua, a corriente o contracorriente, a bajas o altas presiones y a temperaturas mayores a la ambiente⁽⁶⁾.

En el caso de que la lixiviación se realice en forma continua, se pueden utilizar varios tanques en serie para completar la lixiviación. En la agitación mecánica en tanques pueden emplearse uno o más agitadores montados en un eje impulsado por un motor eléctrico para obtener la circulación necesaria de la pulpa⁽⁷⁾.

La lixiviación en etapas es empleada cuando la cantidad de material a procesar es pequeña o también se emplea cuando la condiciones del procesos deben estar bien controladas⁽⁶⁾.

2.5 **Termodinámica de la lixiviación.**

La termodinámica de las reacciones de lixiviación son mejor ilustradas con el uso de los diagramas E_h -pH, conocidos como diagramas de Pourbaix.

Los diagramas de Pourbaix describen principalmente la estabilidad de la fase sólida o acuosa en función de dos variables: el potencial y el pH⁽⁸⁾.

2.5.1 Reacciones de oxidación-reducción.

Las reacciones de oxidación-reducción, particularmente las reacciones electroquímicas, son de considerable importancia en hidrometalurgia. El intercambio de electrones para uno o más elementos da como resultado un cambio en el estado de oxidación del elemento. En las reacciones redox, la pérdida de electrones por un elemento (oxidación) debe de estar acompañada por la correspondiente ganancia de electrones por otro elemento (reducción). Como consecuencia, la reacción puede ser dividida arbitrariamente en dos partes, para escribir cada parte de la reacción en términos de ganancia o pérdida de electrones. La parte de oxidación de la reacción redox es llamada media celda anódica, mientras que la parte de reducción es llamada media celda catódica⁽³⁾.

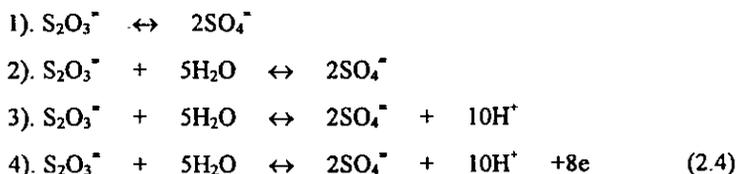
Las reacciones electroquímicas⁽⁹⁾ son reacciones redox heterogéneas, únicas por el hecho de que el intercambio de electrones no ocurre en un punto en el espacio, más bien las medias celdas están separadas por una distancia finita. Esto requiere que la reacción ocurra en una superficie conductora y como resultado de esto se definen las áreas catódica y anódica, las cuales pueden estar separadas por una distancia considerable. Como resultado de estas consideraciones se ve que las bases para dividir una reacción electroquímica en dos partes no es realmente arbitraria, pero tiene un significado físico. Además de que proporcionan un sentido realista de pensar de las reacciones redox, el concepto de media celda provee un método cómodo para balancear las reacciones redox.

El procedimiento consiste de los siguientes cuatro pasos básicos para cada media celda:

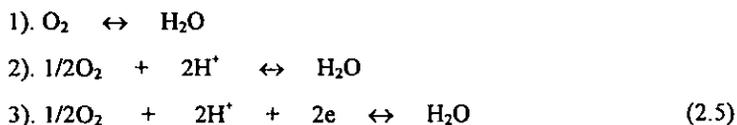
- 1). Establecimiento de las especies que intervienen en la reacción de media celda y el balance de los elementos.
- 2). Balance del oxígeno con H_2O .
- 3). Balance del hidrógeno con H^+ .
- 4). Balance de la carga con electrones.

Este procedimiento es ilustrado abajo con la reacción redox de tiosulfato a sulfato con oxígeno.

Media celda anódica:



Media celda catódica:



La reacción redox total es obtenida multiplicando la media celda catódica (2.5) por 4 y sumando la otra media reacción (2.4):



Las medias celdas balanceadas son ajustadas de modo que el número de electrones cancelados, resultan en la reacción redox total.

La estabilidad de las reacciones de media celda⁽⁹⁾ puede establecerse a partir de datos de energía libre como normalmente se hace en los cálculos de las soluciones en equilibrio. Así mismo, la estabilidad de la reacción de media celda puede representarse con el potencial de media celda, el cuál para reacciones de reducción es relacionado al cambio de energía libre por la siguiente ecuación:

$$\Delta G = -nFE$$

donde:

E = potencial de media celda.

F = constante de Faraday.

En el sistema H^+/H_2 el potencial de media celda es asignado arbitrariamente, dándole un valor de cero y cuando son reportados los demás potenciales de media celda con respecto a este estado de referencia, el potencial de media celda es denominado E_h . Como resultado de esta convención, la energía libre estándar de la formación de H^+ es tomada como cero.

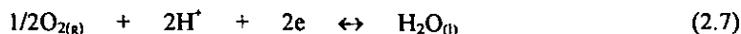
2.5.2 Diagramas de Pourbaix.

Usando este concepto de caracterización de reacciones de media celda con potenciales, es posible la construcción de diagramas de fase electroquímicos para definir las regiones de estabilidad para un sistema dado. Estos diagramas también son conocidos como diagramas de Pourbaix o como diagramas E_h - $pH^{(3)}$. Estos indican las especies predominantes que están presentes al equilibrio, a un potencial de reducción y a una cierta concentración de iones hidrógeno.

La primera etapa en la selección de las condiciones de lixiviación para cualquier material es la identificación de las especies solubles que pueden formarse en el sistema. Si el material no contiene especies solubles bajo ninguna condición entonces puede estudiarse otro sistema. Ahora bien, si los iones metálicos pueden ser disueltos en una o más formas en la solución entonces el intervalo de potencial, la concentración de iones hidrógeno y la concentración de las otras especies iónicas sobre las cuales los iones metálicos predominan en la solución, podrían ser identificadas⁽⁵⁾.

Por definición, el diagrama de fases electroquímico o diagrama de Pourbaix, está restringido por la estabilidad de agua líquida. Para determinar la región de estabilidad del agua se requiere conocer sus límites de estabilidad de oxidación y reducción respectivamente, es decir, los potenciales de descomposición del agua.

La descomposición puede ocurrir cuando la presión del gas oxígeno o la del gas hidrógeno en equilibrio con el agua, excede la presión total del sistema. El punto crítico el cual define la región de estabilidad del agua es cuando la pO_2/pH_2 igualan la presión total del sistema. Las reacciones de media celda, las cuales describen la región de estabilidad del agua en un sistema de una atmósfera de presión son las siguientes:



$$E^\circ = \frac{-\Delta G^\circ}{nF} = \frac{56.7}{(2)(23.06)} = 1.23 \text{ V} \quad (2.8)$$

$$E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln \frac{|H_2O|}{|O_2| |H^+|^2} = E^\circ - \frac{0.059}{2} \log \frac{1}{|H^+|^2} \quad (2.9)$$

$$E = 1.23 - 0.059 \text{ pH} \quad (2.10)$$

y



$$E^\circ = \frac{-\Delta G^\circ}{nF} = 0 \quad (2.12)$$

$$E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln \frac{|H_2|^{1/2}}{|H^+|} = E^\circ - 0.059 \log \frac{1}{|H^+|} \quad (2.13)$$

$$E = -0.059 \text{ pH} \quad (2.14)$$

Los límites del diagrama de fase electroquímico son determinados por las ecuaciones (2.10) y (2.14) las cuales definen el área de estabilidad para el agua. El límite inferior representa la frontera entre H_2O y su producto de reducción, H_2 , mientras que el límite superior define la frontera con su producto de oxidación, $O_2^{(g)}$.

Aunque los diagramas E_h -pH son únicos para cada metal, se puede generalizar lo siguiente: la mayor parte de los óxidos metálicos en su estado de oxidación mayor son fácilmente solubles en medios ácidos o altamente alcalinos; y el mayor número de los metales y óxidos metálicos en su estado de oxidación menor y sulfuros metálicos requieren no solamente de un medio ácido o altamente alcalino, sino que también de agentes oxidantes para su disolución⁽⁸⁾.

2.6 · Cinética de lixiviación.

El estudio de la termodinámica proporciona información sobre el equilibrio químico de una reacción metalúrgica e indica la dirección en que puede evolucionar esa reacción en unas condiciones dadas. Sin embargo, la termodinámica no proporciona información sobre la velocidad de una reacción. Por tanto se necesita tener en cuenta tanto la termodinámica como la cinética de reacción⁽²⁾ para obtener un conocimiento completo de cualquier proceso metalúrgico.

Las reacciones homogéneas son aquellas que tienen lugar en una sola fase, tal como un gas o una solución líquida, mientras que las reacciones heterogéneas son aquellas que se producen entre fases diferentes, tal como una reacción gas-sólido. La mayoría de las reacciones metalúrgicas son reacciones heterogéneas, ya que una gran proporción de reacciones aparentemente homogéneas necesitan otra fase sobre la cual puedan nuclear productos. Las reacciones catalíticas son un ejemplo de este último caso.

Los tipos principales de reacciones que tienen lugar en los procesos metalúrgicos son:

- a). Gas – sólido
- b). Gas – líquido
- c). Líquido – líquido
- d). Líquido – sólido
- e). Sólido - sólido

Las velocidades globales de estas reacciones dependerán de tres etapas o procesos principales que están presentes en todas las reacciones:

- a). Velocidad de transporte de los reactivos al lugar de reacción
- b). Velocidad de la reacción química.
- c). Velocidad de transporte de los productos de la reacción.

La cinética de reacción es un estudio de la velocidad de las reacciones, considerando estas etapas individualizadas, los mecanismos por los que se producen y el efecto de ciertas variables de proceso, tales como concentración de reactivos y temperatura de reacción sobre la velocidad de reacción⁽²⁾.

CAPITULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Metodología de trabajo.

En la primer etapa del presente trabajo se efectuó una caracterización del mineral. Se realizó un estudio menagráfico del concentrado para conocer el tipo de compuestos contenidos en éste. Posteriormente se analizaron leyes para cobre, arsénico, antimonio y bismuto en el laboratorio de ensayos de la misma planta mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica. La muestra de concentrado de cobre que se utilizó para desarrollar estas pruebas, se obtuvo de la planta concentradora "La Caridad".

Tomando como base cierto conocimiento previo que se tenía respecto a la mineralogía del concentrado, a la lixiviación alcalina y con el objeto de estudiar al lixiviación de las impurezas, se realizó una segunda etapa en este trabajo, la cuál consistió en la experimentación de varias pruebas de lixiviación empleando una solución con NaOH y Na₂S, para tratar de disolver las impurezas de arsénico, antimonio y bismuto presentes en los concentrados de cobre. Las variables seleccionadas en esta experimentación fueron la relación de los reactivos lixiviantes (g/l), el tiempo (min.), la concentración de la solución lixiviante (M), la temperatura (°C) y la velocidad de agitación (rpm).

Durante el desarrollo de esta experimentación, además del concentrado de cobre y la solución lixiviante (NaOH-Na₂S), también se utilizaron otros materiales tales como un vaso de precipitados de 500ml como reactor, provisto de un agitador, termómetro, baño de calentamiento, embudo de porcelana, bomba de vacío, balanza de precisión, entre otros.

A continuación se presenta la metodología experimental empleada en todas y cada una de las pruebas de lixiviación:

- Como etapa inicial, se realizó un análisis cuantitativo del concentrado de cobre, utilizando la técnica de espectrofotometría de absorción atómica. Los valores de las leyes promedio en cabeza fueron: 32.4% de Cu, 0.11% de As, 0.095% de Sb y 0.0205% de Bi.
- Posteriormente se llevó a cabo la preparación de la solución lixivante, agregando el hidróxido y sulfuro de sodio necesarios en agua destilada y aforando a 500ml. En el caso de las pruebas donde se estudiaron los efectos de la temperatura, la solución se calentaba previamente para aproximarse a la temperatura a la cual se iba a realizar la prueba.
- La pulpa se preparó adicionando a la solución lixivante 67g de mineral, obteniendo así un 10% de sólidos en promedio.
- Inmediatamente después se colocaba el agitador y se corrían las pruebas a las condiciones que se hubieran establecido.
- Terminada la prueba, los sólidos lixiviados fueron filtrados y lavados con agua destilada. Posteriormente se secaron y se tomó nota del peso del residuo seco. Este fue enviado al laboratorio de ensayos, previa preparación, es decir, se homogeneizó y se cortó una pequeña muestra representativa.
- El licor filtrado que se obtuvo fue aforado a un volumen conocido y también fue enviado para su análisis.

3.2 Balances metalúrgicos.

Los resultados de los análisis realizados a los residuos sólidos se reportaron en por ciento en peso (% peso) y los análisis de los licores en partes por millón (ppm). Después de tener los resultados de los ensayos por los cuatro elementos de interés (Cu, As, Sb y Bi) se procedió a hacer los balances para cada elemento en todas las pruebas.

A continuación se presenta un ejemplo del balance realizado para cada uno de los elementos y pruebas de lixiviación.

Prueba No. 8

Condiciones:

$t = 60\text{min.}$

$T = 98^{\circ}\text{C}$

Velocidad de agitación = 920 rpm

Relación NaOH/Na₂S = 100g/l-160g/l

Pi del mineral sólido = 67g

Pf del residuo sólido = 68.69g

Resultados de los análisis por absorción atómica:

Sólidos (% peso)			
Cu	As	Sb	Bi
31.44	0.07	0.05	0.17

Licor (ppm)			
Cu	As	Sb	Bi
19.01	41.5	27.4	1.37

Pi: peso inicial

Pf: peso final

Fórmulas utilizadas para los balances:

$$Pf(g) * \text{Análisis del sólido} (\%) \div 100 = C.M.\text{Sólido} (g)$$

$$\text{Análisis del líquido (ppm)} = C.M.\text{Líquido} (mg)$$

$$C.M.\text{Líquido} (mg) + C.M.\text{Sólido} (g) * 1000 = C.M.\text{Total} (mg)$$

$$C.M.\text{Total} (g) \div Pi (g) * 100 = \text{Cabeza calculada} (\%)$$

$$C.M.\text{Líquido} (mg) \div C.M.\text{Total} (mg) * 100 = \% \text{ lixiviado}$$

Balance metalúrgico para cada elemento:

Cobre

$$68.69g * 31.44\% \div 100 = 21.5961g$$

$$19.01mg + 21.5961g * 1000 = 21615.1mg$$

$$21.6151g \div 67g * 100 = 32.26 \%$$

$$19mg \div 21615.1mg = 0.088\%$$

$$C.M.\text{Líquido} = 19.01 \text{ mg Cu}$$

$$C.M.\text{Sólido} = 21596.1 \text{ mg Cu}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 32.26\% \text{ Cu}$$

$$\text{Cabeza analizada} = 31.92\% \text{ Cu}$$

$$\text{Cu lixiviado} = 0.088\%$$

Arsénico

$$68.69g * 0.07\% \div 100 = 0.0481g$$

$$41.5mg + 0.0481 * 1000 = 89.6mg$$

$$0.0896g \div 67g * 100 = 0.134\%$$

$$41.5mg \div 89.6mg = 46.32\%$$

$$C.M.\text{Líquido} = 41.5 \text{ mg As}$$

$$C.M.\text{Sólido} = 48.1 \text{ mg As}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 0.134\% \text{ As}$$

$$\text{Cabeza analizada} = 0.120\% \text{ As}$$

$$\text{As lixiviado} = 46.33\%$$

$C.M.\text{Total}$ = Contenido metálico Total

$C.M.\text{Líquido}$ = Contenido metálico del líquido

$C.M.\text{Sólido}$ = Contenido metálico del sólido

Antimonio

$$68.69g * 0.05\% \div 100 = 0.0343g$$

$$27.4mg + 0.0343 * 1000 = 61.7mg$$

$$0.0617g \div 67g * 100 = 0.092\%$$

$$27.4mg \div 61.7mg = 44.38\%$$

$$C.M.Líquido = 27.4 \text{ mg Sb}$$

$$C.M.Sólido = 34.3 \text{ mg Sb}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 0.092\% \text{ Sb}$$

$$\text{Cabeza analizada} = 0.100\% \text{ Sb}$$

$$\text{Sb lixiviado} = 44.38\%$$

Bismuto

$$68.69g * 0.017\% \div 100 = 0.0117g$$

$$1.37mg + 0.0117 * 1000 = 13.07mg$$

$$0.01307g \div 67g * 100 = 0.019\%$$

$$1.37mg \div 13.07mg = 10.50\%$$

$$C.M.Líquido = 1.37 \text{ mg Bi}$$

$$C.M.Sólido = 11.7 \text{ mg Bi}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 0.019\% \text{ Bi}$$

$$\text{Cabeza analizada} = 0.018\% \text{ Bi}$$

$$\text{Bi lixiviado} = 10.50\%$$

Elemento	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (% peso)	Cabeza analizada (% peso)	Análisis del sólido (% peso)	Análisis del líquido (ppm)	C.M. en el sólido (mg)	C.M. en el líquido (mg)	% lixiviado	Tiempo (min.)
Cu	68.69	32.26	31.92	31.44	19.01	21596.1	19.01	0.088	60
As	68.69	0.134	0.120	0.070	41.50	48.10	41.50	46.33	60
Sb	68.69	0.092	0.100	0.050	27.40	34.30	27.40	44.38	60
Bi	68.69	0.019	0.018	0.017	1.37	11.70	1.37	10.50	60

Tabla 3.1 Prueba No. 8. Balance metalúrgico para cobre, arsénico, antimonio y bismuto.
Condiciones: T=98°C 920 rpm 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

3.3 Condiciones Experimentales

Para poder determinar las condiciones óptimas del proceso de lixiviación de las impurezas de los concentrados de cobre de "La Caridad", se eligieron como variables a estudiar: la relación de los agentes lixiviantes, el tiempo, la concentración de la solución lixiviante, la temperatura y la velocidad de agitación. Las pruebas realizadas en esta experimentación fueron diseñadas de la siguiente manera:

Variable	Condiciones						
Relación NaOH/Na ₂ S (g/l)	200/0	150/80	100/160	50/240	0/320	-	-
Tiempo (min.)	15	30	60	90	120	150	180
Concentración de la solución (M)	0.63/0.51	1.25/1.03	1.88/1.54	2.50/2.05	5.00/4.10	-	-
Temperatura (°C)	25	40	55	70	85	98	-
Velocidad de agitación (rpm)	920	1300	1500	1750	1950	2200	-

Los valores que se muestran sombreados son aquellos que se mantuvieron constantes para el resto de las evaluaciones. El efecto de cada variable se estudió manteniendo fijos los demás parámetros, variándose ésta dentro de un intervalo antes establecido. Cabe aclarar que la atmósfera en la que se llevaron a cabo todas las pruebas fue normal, es decir, que no se burbujeó adicionalmente ningún gas y a presión atmosférica.

3.3.1 Efecto de la relación NaOH/Na₂S.

Este primer bloque de pruebas consistió en ir variando la cantidad de hidróxido de sodio, así como la cantidad de sulfuro de sodio, manteniendo constantes las demás variables. Se comenzó con una solución que sólo contenía 100g/l de NaOH y se terminó con una solución lixivante que se preparó solamente con 160g/l de Na₂S, pasando por una serie de soluciones que se prepararon disminuyendo la cantidad inicial de NaOH y agregando en cada prueba una cantidad mayor de Na₂S. Esto con el fin de observar en que proporción influía cada uno de los reactivos sobre cada una de las impurezas en el concentrado de cobre.

3.3.2 Efecto del tiempo de lixiviación.

Después de haber determinado cuál era la mejor relación de agentes lixiviantes se estableció un segundo bloque de pruebas, en el cuál la variable a controlar fue el tiempo. Se comenzó con un tiempo de 15 minutos, la siguiente prueba fue de 30 minutos y a partir de ésta se continuó con una progresión de 30 minutos, hasta llegar a los 180 minutos. La relación de los reactivos, la temperatura, la concentración de la solución y la velocidad de agitación fueron mantenidas constantes.

3.3.3 Efecto de la concentración de la solución lixiviante.

Un tercer bloque fue establecido después de haber determinado la relación de reactivos y el mejor tiempo de lixiviación. La variable en estudio fue la concentración de los reactivos, es decir, que manteniendo constante la relación de éstos, sólo se agregaron en menor o mayor cantidad. Se partió de una solución 0.625M NaOH y 0.513M Na₂S y la última prueba se realizó con una solución 5M NaOH y 4.1M Na₂S.

3.3.4 Efecto de la temperatura.

La temperatura es la variable que se controló en estas pruebas, como las pruebas anteriores se realizaron a 98°C, que es una temperatura relativamente alta, este bloque se diseñó tratando de encontrar una temperatura menor a la cuál se pudieran obtener porcentajes de lixiviación aproximados a los que se habían manejado hasta el momento. Fue así, que se comenzó a trabajar con la temperatura ambiente (25°C), dejando intervalos de 15°C entre cada prueba, hasta llegar a los 98 °C.

3.3.5 Efecto de la velocidad de agitación.

En el quinto y último bloque de pruebas, manteniendo constantes a las condiciones ya estudiadas se procedió a observar el efecto de la velocidad de agitación sobre el proceso de lixiviación de impurezas en los concentrados de cobre. Entonces basándonos en la velocidad que se había venido manejando hasta ahora (920 rpm), se decidió aumentarla y se hicieron pruebas con una velocidad de agitación de hasta 2200 rpm.

Con estas últimas pruebas se dio fin a la determinación de las condiciones óptimas del proceso de lixiviación de impurezas (As, Sb y Bi) en los concentrados de cobre de la planta concentradora "La Caridad", teniendo en cuenta los requerimientos de la misma, es decir , las siguientes concentraciones máximas de impurezas: 0.16% de arsénico, 0.06% de antimonio y 0.02% de bismuto.

CAPITULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Pruebas de caracterización.

Para la realización de las pruebas experimentales fue necesario tener una caracterización del concentrado para determinar la composición de la muestra. Los resultados que se presentan a continuación, fueron tomados de un estudio menagráfico efectuado recientemente por la misma compañía. La pirita (FeS) es el sulfuro que se encuentra en mayor porcentaje, seguido de la covelita (CuS), la calcopirita (CuFeS), la calcocita (Cu₂S) y la esfalerita (ZnS). La molibdenita (MoS) y la tetraedrita ((Cu, Fe) (As, Sb)S) se encontraron en un porcentaje mucho menor.

Mineral	Por ciento de ocurrencia
Pirita libre	20%
Pirita con avances de calcocita	14%
Pirita incluida con covelita	Trazas
Covelita libre	18%
Covelita incluida con calcopirita	4%
Calcocita libre	10%
Calcocita incluida con pirita	Trazas
Calcopirita libre	12%
Calcopirita incluida con covelita	4%
Esfalerita libre	8%
Exolución de esfalerita y calcopirita	Trazas
Tetraedrita	3%
Molibdenita	1%
Cuarzo, Feldespato y Mica (ganga)	6%

El propósito de este análisis fue identificar los compuestos minerales que contienen arsénico, antimonio y bismuto, que son las impurezas con las que en mayor número de ocasiones tiene problemas la compañía. El examen microscópico reveló que el concentrado de cobre en estudio presentó el tres por ciento de tetraedrita. La tetraedrita es un sulfuro complejo de cobre, el cual, además del cobre y el fierro, está asociada a otros elementos tales como el arsénico, el antimonio, el bismuto, etc. Generalmente la tetraedrita contiene del 1.5% al 2.5 % de arsénico y del 4% al 27% de antimonio en su red cristalina (la tetraedrita arsenical es llamada tenantita y contiene del 16% al 20% de arsénico).

En lo que respecta a las pruebas de eliminación de impurezas de los concentrados de cobre, varias pruebas con una solución lixivante que se preparó con hidróxido de sodio y sulfuro de sodio fueron realizadas variando, como ya se mencionó, la relación de los reactivos, el tiempo, la concentración de la solución, la temperatura y la velocidad de agitación.

4.2 Pruebas de lixiviación.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas de lixiviación que fueron realizadas en el desarrollo de este trabajo:

4.2.1 Efecto de la relación NaOH/Na₂S (g/l).

COBRE

No. de Fructo	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Cu lixiviado	NaOH (g/l)	Na ₂ S (g/l)
1	68.78	32.81	32.95	31.96	1.51	21982.0	1.51	0.007	200	0
2	67.82	31.79	32.95	31.40	1.70	21295.5	1.70	0.008	150	80
3	69.48	32.43	32.95	31.24	19.9	21705.5	19.9	0.090	100	160
4	67.76	31.30	32.95	30.94	4.16	20969.2	4.16	0.020	50	240
5	67.77	32.12	32.95	31.75	3.78	21517.0	3.78	0.018	0	320

Tabla 4.1 Balance metalúrgico para Cu. T=98°C t=150 min. 920 rpm.

ARSENICO

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% As Incinerado	NaOH (g/l)	Na ₂ S (g/l)
1	68.78	0.092	0.10	0.085	3.07	58.46	3.07	4.99	200	0
2	67.82	0.083	0.10	0.045	25.05	30.52	25.05	45.08	150	80
3	69.48	0.132	0.10	0.030	67.50	20.84	67.5	76.41	100	160
4	67.76	0.080	0.10	0.030	33.32	20.33	33.32	62.11	50	240
5	67.77	0.080	0.10	0.030	33.55	20.33	33.55	62.27	0	320

Tabla 4.2 Balance metalúrgico para As. T=98°C t=150 min. 920 rpm.

ANTIMONIO

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Sb Incinerado	NaOH (g/l)	Na ₂ S (g/l)
1	68.78	0.097	0.09	0.090	3.45	61.90	3.45	5.28	200	0
2	67.82	0.093	0.09	0.060	21.74	40.69	21.74	34.82	150	80
3	69.48	0.093	0.09	0.020	48.20	13.89	48.20	77.62	100	160
4	67.76	0.092	0.09	0.045	31.00	30.49	31.00	50.41	50	240
5	67.77	0.097	0.09	0.050	31.05	33.89	31.05	47.81	0	320

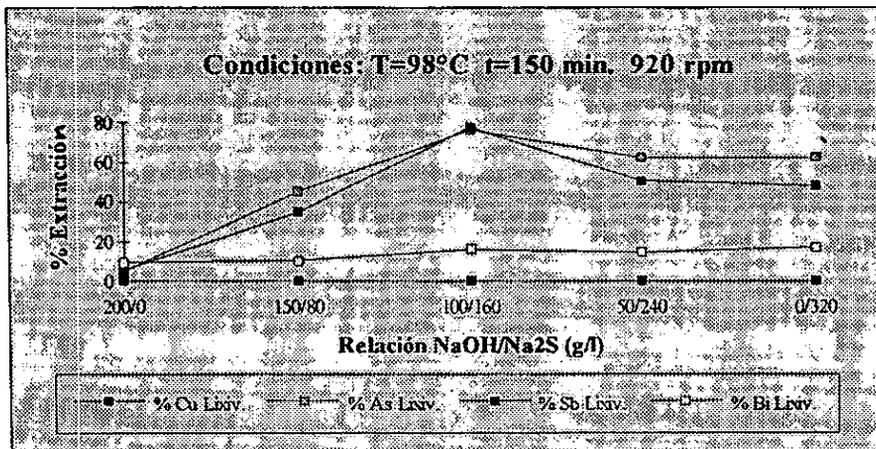
Tabla 4.3 Balance metalúrgico para Sb. T=98°C t=150 min. 920 rpm.

BISMUTO

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Bi Incinerado	NaOH (g/l)	Na ₂ S (g/l)
1	68.78	0.025	0.023	0.022	1.53	15.13	1.53	9.18	200	0
2	67.82	0.026	0.023	0.023	1.76	15.60	1.76	10.14	150	80
3	69.48	0.019	0.023	0.015	1.98	10.42	1.98	15.97	100	160
4	67.76	0.027	0.023	0.023	2.63	15.58	2.63	14.44	50	240
5	67.77	0.027	0.023	0.022	3.08	14.91	3.08	17.12	0	320

Tabla 4.4 Balance metalúrgico para Bi. T=98°C t=150 min. 920 rpm.

En la gráfica 4.1 se presentan los porcentajes de lixiviación de los cuatro elementos analizados en cada una de las pruebas, donde la variable en estudio fue la relación de los agentes lixiviantes (NaOH/Na₂S).



Gráfica 4.1 Efecto de la relación de NaOH/Na₂S en la lixiviación de impurezas de concentrados de cobre.

4.2.2 Efecto del tiempo de lixiviación (min.).

COBRE

Nº. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Cu lixiviado	Tiempo (min.)
6	66.91	32.53	31.92	32.55	18.60	21779.2	18.60	0.085	15
7	67.78	31.84	31.92	31.44	20.00	21410.0	20.00	0.094	30
8	68.69	32.26	31.92	31.44	19.01	21596.1	19.01	0.088	60
9	68.99	32.29	31.92	31.34	18.30	21621.5	18.30	0.085	90
10	68.65	31.21	31.92	30.43	19.80	20890.2	19.80	0.095	120
3	69.48	32.43	32.95	31.24	19.90	21705.6	19.90	0.092	150
11	73.74	33.74	31.92	30.63	19.80	22586.6	19.80	0.088	180

Tabla 4.5 Balance metalúrgico para Cu. T=98°C 920 rpm 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

ARSENICO

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	%As lixivado	Tiempo (min.)
6	66.91	0.139	0.12	0.11	19.60	73.60	19.60	21.03	15
7	67.78	0.124	0.12	0.09	22.00	61.00	22.00	26.51	30
8	68.69	0.134	0.12	0.07	41.50	48.08	41.50	46.33	60
9	68.99	0.131	0.12	0.05	53.00	34.50	53.00	60.58	90
10	68.65	0.105	0.12	0.02	54.80	15.79	54.80	77.63	120
3	69.48	0.132	0.10	0.03	67.50	20.84	67.50	76.41	150
11	73.74	0.120	0.12	0.02	67.10	13.27	67.10	83.49	180

Tabla 4.6 Balance metalúrgico para As. T=98°C 920 rpm 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

ANTIMONIO

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	%Sb lixivado	Tiempo (min.)
6	66.91	0.088	0.10	0.070	12.10	46.84	12.10	20.53	15
7	67.78	0.092	0.10	0.070	14.30	47.45	14.30	23.16	30
8	68.69	0.092	0.10	0.050	27.40	34.35	27.40	44.38	60
9	68.99	0.087	0.10	0.030	37.60	20.68	37.60	62.28	90
10	68.65	0.089	0.10	0.033	37.40	22.65	37.40	64.50	120
3	69.48	0.093	0.09	0.020	48.20	13.89	48.20	77.62	150
11	73.74	0.081	0.10	0.008	48.10	5.89	48.10	89.08	180

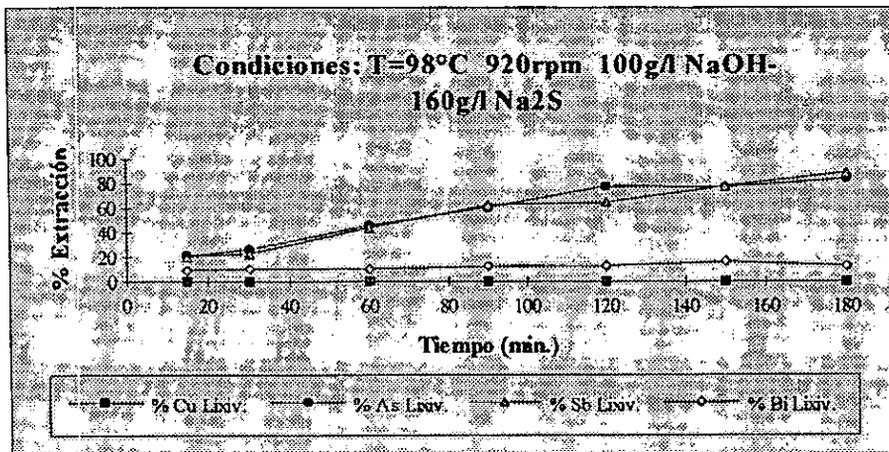
Tabla 4.7 Balance metalúrgico para Sb. T=98°C 920 rpm 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

BISMUTO

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	%Bi lixivado	Tiempo (min.)
6	66.91	0.019	0.018	0.017	1.19	11.37	1.19	9.47	15
7	67.78	0.018	0.018	0.016	1.23	10.84	1.23	10.19	30
8	68.69	0.019	0.018	0.017	1.37	11.68	1.37	10.50	60
9	68.99	0.018	0.018	0.015	1.44	10.35	1.44	12.22	90
10	68.65	0.018	0.018	0.015	1.47	10.29	1.47	12.49	120
3	69.48	0.019	0.023	0.015	1.98	10.42	1.98	15.97	150
11	73.74	0.016	0.018	0.013	1.36	9.59	1.36	12.42	180

Tabla 4.8 Balance metalúrgico para Bi. T=98°C 920 rpm 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

A continuación se presentan los resultados del porcentaje de lixiviación de los cuatro elementos analizados, donde la variable que se manejó fue el tiempo de lixiviación. correspondientes a las tablas 4.5 a 4.8.



Gráfica 4.2 Efecto del tiempo en la lixiviación de impurezas de concentrados de cobre.

4.2.3 Efecto de la concentración de la solución lixivante (M).

COBRE

Nº de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Cu lixiviado	NaOH (M)	Na ₂ S (M)
12	66.43	32.35	31.92	32.62	4.20	21669.5	4.20	0.020	0.63	0.51
13	67.22	33.55	31.92	33.43	7.30	22471.6	7.30	0.030	1.25	1.03
14	67.55	32.44	31.92	32.15	15.30	21717.3	15.30	0.070	1.88	1.54
3	69.48	32.43	32.95	31.24	19.90	21705.6	19.90	0.092	2.50	2.05
15	67.97	30.69	31.92	30.09	112.00	20564.2	112.00	0.545	5.00	4.10

Tabla 4.9 Balance metalúrgico para Cu. T=98°C t=150 min. 920 rpm.

ARSENICO

Nº de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% As lixiviado	NaOH (M)	Na ₂ S (M)
12	66.43	0.067	0.12	0.06	4.80	39.86	4.80	10.75	0.63	0.51
13	67.22	0.129	0.12	0.09	26.50	60.50	26.50	30.46	1.25	1.03
14	67.55	0.119	0.12	0.07	33.00	47.29	33.00	41.10	1.88	1.54
3	69.48	0.132	0.10	0.03	67.50	20.84	67.50	76.41	2.50	2.05
15	67.97	0.065	0.12	0.01	37.00	6.79	37.00	84.49	5.00	4.10

Tabla 4.10 Balance metalúrgico para As. T=98°C t=150 min. 920 rpm.

ANTIMONIO

Nº de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Sb lixiviado	NaOH (M)	Na ₂ S (M)
12	66.43	0.114	0.10	0.070	30.00	46.50	30.00	39.22	0.63	0.51
13	67.22	0.114	0.10	0.090	16.20	60.50	16.20	21.12	1.25	1.03
14	67.55	0.082	0.10	0.050	21.10	33.78	21.10	38.45	1.88	1.54
3	69.48	0.093	0.09	0.020	48.20	13.89	48.20	77.62	2.50	2.05
15	67.97	0.043	0.10	0.000	29.00	0.000	29.00	100.00	5.00	4.10

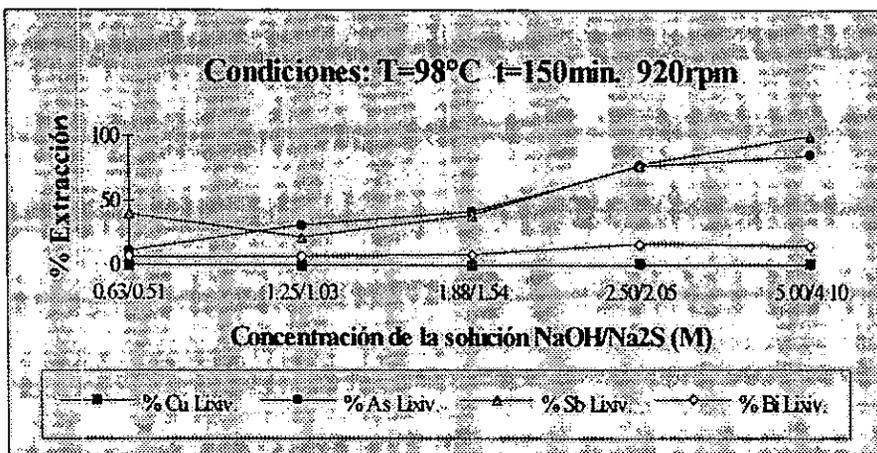
Tabla 4.11 Balance metalúrgico para Sb. T=98°C t=150 min. 920 rpm.

BISMUTO

Nº de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Bi lixiviado	NaOH (M)	Na ₂ S (M)
12	66.43	0.017	0.018	0.016	0.06	10.63	0.64	5.68	0.63	0.51
13	67.22	0.020	0.018	0.019	0.09	12.77	0.85	6.24	1.25	1.03
14	67.55	0.026	0.018	0.024	1.37	16.21	1.37	7.79	1.88	1.54
3	69.48	0.019	0.023	0.015	1.98	10.42	1.98	15.97	2.50	2.05
15	67.97	0.022	0.018	0.019	2.20	12.91	2.20	14.56	5.00	4.10

Tabla 4.12 Balance metalúrgico para Bi. T=98°C t=150 min. 920 rpm.

La gráfica 4.3 corresponde a las tablas 4.9 a 4.12. Aquí se comparan los resultados del porcentaje de lixiviación de los cuatro elementos analizados, donde se estudió el efecto de la concentración de la solución lixivante.



Gráfica 4.3 Efecto de la concentración de la solución lixivante sobre la lixiviación de impurezas de concentrados de cobre.

4.2.4 Efecto de la temperatura (°C).

COBRE

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (µg)	% Cu lixivado	Temp (°C)
16	66.56	32.21	32.95	32.41	5.96	21572.1	5.96	0.028	25
17	67.29	32.55	32.95	32.41	3.49	21808.7	3.49	0.016	40
18	67.73	31.57	32.95	31.23	1.07	21152.1	1.07	0.005	55
19	66.67	31.39	32.95	31.55	1.49	21034.4	1.49	0.007	70
20	67.69	33.29	32.95	32.95	1.92	22303.9	1.92	0.009	85
3	69.48	32.43	32.95	31.24	19.9	21705.6	19.9	0.092	98

Tabla 4.13 Balance metalúrgico para Cu. T=150 min. 920 rpm 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

ARSENICO

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% As lixiviado	Temp. (°C)
16	66.56	0.096	0.10	0.095	1.11	63.23	1.11	1.72	25
17	67.29	0.099	0.10	0.090	5.56	60.56	5.56	8.41	40
18	67.73	0.093	0.10	0.080	7.91	54.18	7.91	12.74	55
19	66.67	0.110	0.10	0.095	8.77	63.34	8.77	12.16	70
20	67.69	0.090	0.10	0.050	25.11	33.83	25.11	42.59	85
3	69.48	0.132	0.10	0.030	67.50	20.84	65.70	76.41	98

Tabla 4.14 Balance metalúrgico para As. T=150 min. 920 rpm 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

ANTIMONIO

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Sb lixiviado	Temp. (°C)
16	66.56	0.094	0.09	0.090	2.92	59.90	2.92	4.65	25
17	67.29	0.089	0.09	0.090	5.23	53.83	5.23	8.86	40
18	67.73	0.091	0.09	0.090	6.48	54.18	6.48	10.68	55
19	66.67	0.099	0.09	0.090	6.70	60.00	6.70	10.04	70
20	67.69	0.092	0.09	0.090	20.74	40.61	20.74	33.81	85
3	69.48	0.093	0.09	0.090	48.20	13.89	48.20	77.62	98

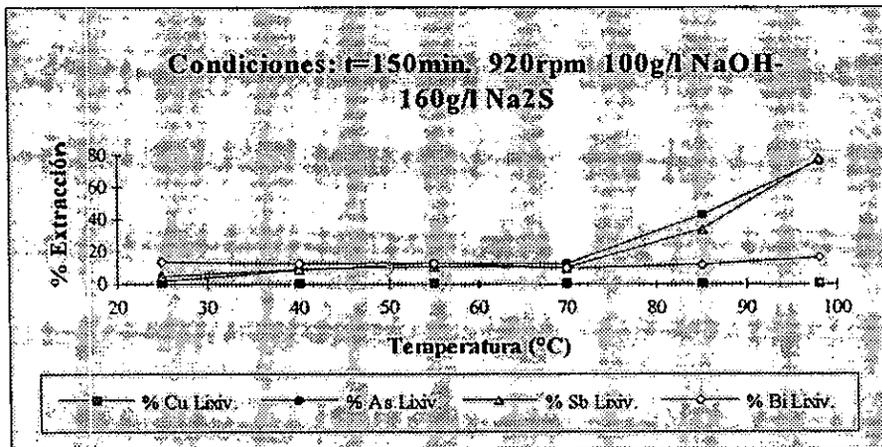
Tabla 4.15 Balance metalúrgico para Sb. T=150 min. 920 rpm 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

BISMUTO

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Bi lixiviado	Temp. (°C)
16	66.56	0.026	0.023	0.023	2.39	15.31	2.39	13.50	25
17	67.29	0.025	0.023	0.022	2.05	14.80	2.05	12.17	40
18	67.73	0.025	0.023	0.022	2.21	14.90	2.21	12.92	55
19	66.67	0.025	0.023	0.023	1.64	15.33	1.64	9.66	70
20	67.69	0.026	0.023	0.023	2.10	15.57	2.10	11.88	85
3	69.48	0.019	0.023	0.015	1.98	10.42	1.98	15.97	98

Tabla 4.16 Balance metalúrgico para Bi. T=150 min. 920 rpm 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

La gráfica 4.4 que a continuación se presenta, corresponde a las tablas 4.13 a 4.16. En ésta podemos observar los porcentajes de lixiviación de los cuatro elementos analizados donde la variable que se controló fue la temperatura de lixiviación.



Gráfica 4.4 Comparación del efecto de la temperatura en la lixiviación de las impurezas en los concentrados de cobre.

4.2.5 Efecto de la velocidad de agitación (rpm).

COBRE

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Cu lixiviado	Velocidad de agitación (rpm)
3	69.48	32.29	32.95	31.24	19.90	21611.8	19.90	0.092	920
21	68.56	32.93	32.21	32.15	22.00	22042.0	22.00	0.099	1300
22	68.81	32.06	32.21	31.19	21.00	21461.8	21.00	0.098	1500
23	68.93	31.89	32.21	30.98	18.00	21354.5	18.00	0.084	1750
24	65.89	31.34	32.21	31.83	22.00	20972.8	22.00	0.105	1950
25	69.39	32.32	32.21	31.19	12.00	21642.7	12.00	0.055	2200

Tabla 4.17 Balance metalúrgico para Cu. T=98°C t=150min 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

ARSENICO

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Ar lixiviado	Velocidad de agitación (rpm)
3	69.48	0.132	0.10	0.030	67.50	20.75	67.50	76.48	920
21	68.56	0.109	0.11	0.040	46.00	27.42	46.00	62.65	1300
22	68.81	0.095	0.11	0.010	57.00	6.88	57.00	89.23	1500
23	68.93	0.099	0.11	0.020	53.00	13.79	53.00	79.36	1750
24	65.89	0.089	0.11	0.030	40.00	19.77	40.00	66.93	1950
25	69.39	0.096	0.11	0.010	58.00	6.94	58.00	89.31	2200

Tabla 4.18 Balance metalúrgico para As. T=98°C t=150min. 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

ANTIMONIO

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Sb lixiviado	Velocidad de agitación (rpm)
3	69.48	0.093	0.09	0.020	48.20	13.84	48.20	77.70	920
21	68.56	0.081	0.09	0.030	34.00	20.57	34.00	62.31	1300
22	68.81	0.069	0.09	0.000	46.00	0.00	46.00	100.00	1500
23	68.93	0.070	0.09	0.010	40.00	6.89	4.00	85.30	1750
24	65.89	0.063	0.09	0.020	29.00	13.18	29.00	68.76	1950
25	69.39	0.069	0.09	0.000	46.00	0.00	46.00	100.00	2200

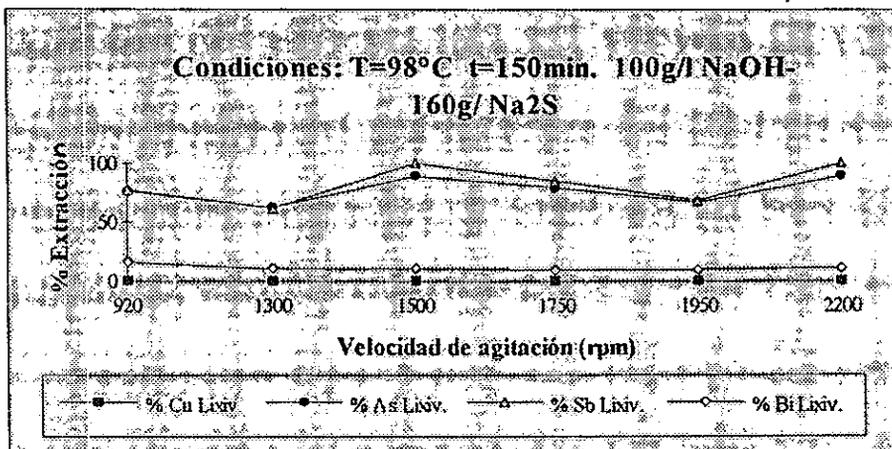
Tabla 4.19 Balance metalúrgico para Sb. T=98°C t=150min. 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

BISMUTO

No. de Prueba	Peso final del sólido (g)	Cabeza calculada (%peso)	Cabeza analizada (%peso)	Análisis del sólido (%peso)	Análisis del líquido (ppm)	C. M. en el sólido (mg)	C. M. en el líquido (mg)	% Bi lixiviado	Velocidad de agitación (rpm)
3	69.48	0.018	0.023	0.015	1.98	10.38	1.98	16.01	920
21	68.56	0.024	0.018	0.021	1.70	14.39	1.70	10.56	1300
22	68.81	0.022	0.018	0.019	1.60	13.07	1.60	10.90	1500
23	68.93	0.023	0.018	0.020	1.50	13.79	1.50	9.81	1750
24	65.89	0.021	0.018	0.019	1.40	12.52	1.40	10.06	1950
25	69.39	0.022	0.018	0.019	1.70	13.18	1.70	11.42	2200

Tabla 4.20 Balance metalúrgico para Bi. T=98°C t=150min. 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

Los resultados de las tablas 4.17 a 4.20 se muestran en la gráfica 4.5, donde se presentan los resultados de los porcentajes de lixiviación de los cuatro elementos que fueron analizados estudiando el efecto de la velocidad de agitación.



Gráfica 4.5 Efecto de la velocidad de agitación en la lixiviación de impurezas de concentrados de cobre.

CAPITULO 5

ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Efecto de la relación NaOH/Na₂S.

Los resultados obtenidos del primer bloque de pruebas se presentan en las tablas 4.1 a 4.4, donde también se encuentran los resultados de los balances metalúrgicos para cada elemento analizado, As, Sb, Bi y Cu.

El objeto de estas pruebas fue el determinar la relación idónea de reactivos para llevar a cabo la disolución simultánea de impurezas, es decir, durante la experimentación se utilizaron varias soluciones con diferentes cantidades tanto de hidróxido de sodio como de sulfuro de sodio, para observar el efecto que causaban sobre las impurezas (As, Sb y Bi) en conjunto, ya que sólo se tenían algunos resultados reportados^{(12) (13)} utilizando cada reactivo por separado y actuando sobre un elemento en especial.

De la gráfica 4.1 se puede observar que existe una sola relación de agentes lixiviantes a la cuál se obtuvieron los mejores porcentajes de lixiviación, tomando en consideración las tres impurezas en forma conjunta. Ahora bien, refiriéndonos al grado máximo de cada una de las impurezas, (0.16% As, 0.06% Sb, 0.02% Bi), que se requiere para que los concentrados de cobre no sean castigados en el mercado, vemos que las impurezas aquí tratadas ya no representan problema alguno, pues los resultados de los análisis mostraron que éstas se encuentran por debajo de dichos grados. Por otro lado, solamente el arsénico y el antimonio presentaron en general, niveles de disolución elevados, en tanto que el bismuto siempre presentó porcentajes de disolución mucho menores.

Ahora analizando los resultados para el cobre, vemos que el porcentaje de disolución de éste también presenta un máximo, pero es tan pequeño que se puede decir que prácticamente no hay lixiviación de cobre, o que es despreciable. Esto es debido a que la lixiviación de minerales de cobre se lleva a cabo en condiciones totalmente ácidas.

Se sabe que en medios altamente alcalinos tanto el arsénico, el antimonio y el bismuto son solubles. Con el objeto de proponer y considerar a las especies que se están formando al realizar la separación de impurezas presentes en los concentrados de cobre, se realizaron los correspondientes análisis de los diagramas E_h -pH para los siguientes sistemas: As-H₂O, Sb-H₂O, Bi-H₂O y S-H₂O (Figura 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4, respectivamente) tomando en consideración las interacciones entre las formas estables de los sistemas. Se representó la dependencia de E_h -pH en el sistema ternario metal-S-H₂O correspondiente. Para este análisis se tomó más en cuenta la influencia del Na₂S, porque como podemos observar en la gráfica 4.1, al aumentar la concentración del sulfuro de sodio se van incrementando los porcentajes de lixiviación, mientras que el hidróxido de sodio no parece influir de una manera significativa al ir disminuyendo su concentración, por lo que podemos decir que éste juega un papel muy importante al impedir la hidrolización del sulfuro de sodio, esto claro está, sin restarle la importancia que tiene sobre la disolución de las impurezas.

A partir del diagrama As-S-H₂O podemos decir que a valores de pH superiores a 8, el arsénico se presenta en las siguientes formas iónicas: AsO_2^- , $As_3S_6^{3-}$, AsS_2^- , $HAs_2S_4^-$ y $H_2As_2S_4$. En el diagrama Sb-S-H₂O observamos que a valores de pH también por arriba de 3 se tienen las siguientes especies: SbO_3^- , SbO_2^- , SbS_2^- , SbS_3^{3-} , SbS_4^{3-} , $HSb_2S_4^-$, $H_2Sb_2S_4$, mientras que para el sistema Bi-S-H₂O tenemos que se presentan: Bi_2O_3 , BiO_2^- , BiS_2^- , BiS_3^{3-} , $HBi_2S_4^-$, $H_2Bi_2S_4$.

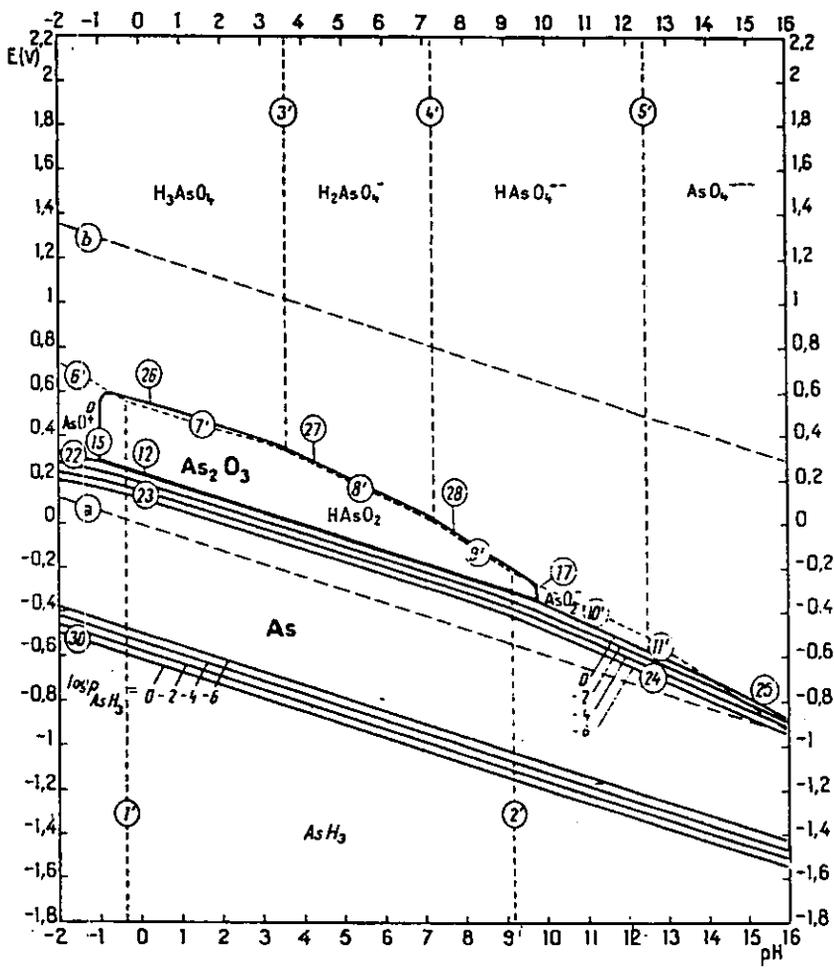


Figura 5.1 Diagrama de Pourbaix (Eh-pH) para el sistema As-H₂O, a 25°C:

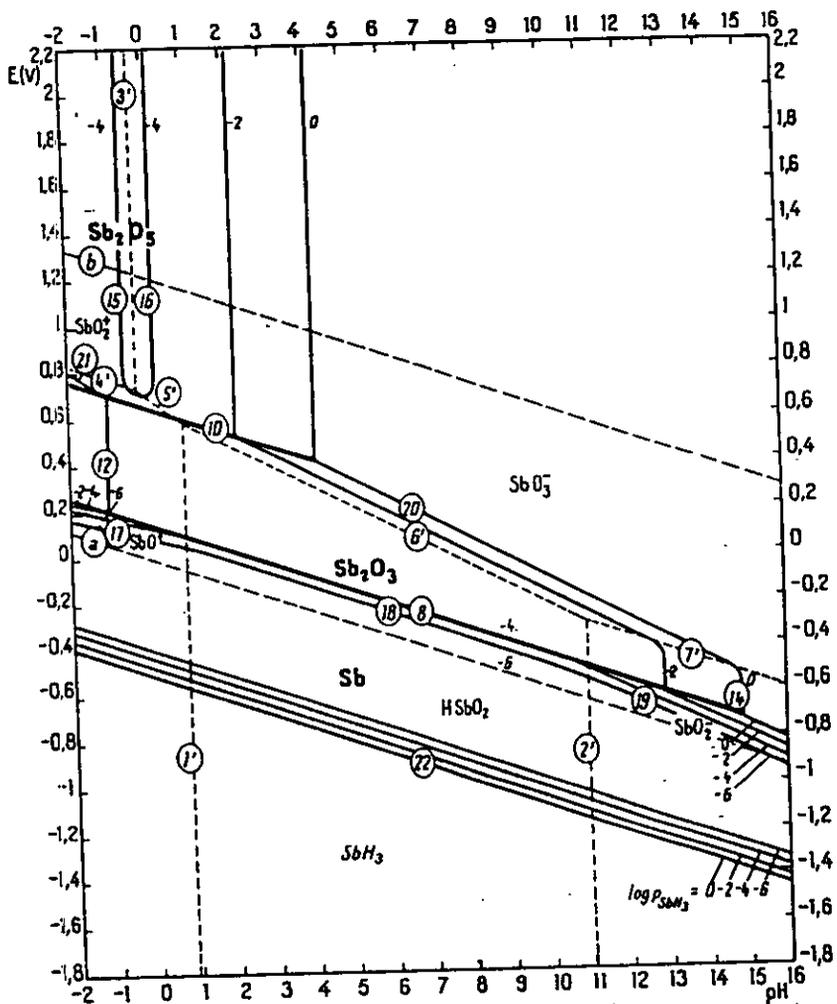
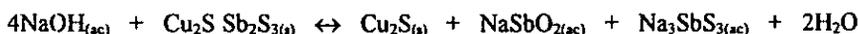
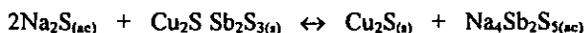
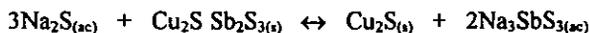
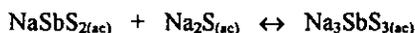
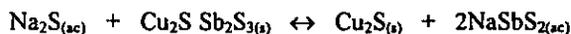


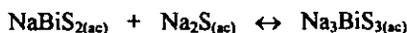
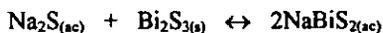
Figura 5.2 Diagrama de Pourbaix (Eh-pH) para el sistema Sb-H₂O, a 25°C.

Por lo anteriormente expuesto y considerando los sistemas experimentales desarrollados en esta tesis, se proponen los siguientes equilibrios:



Equilibrios similares a los anteriores serían propuestos para la tenanita, es decir para el arsénico.

Para la bismutita se proponen los siguientes equilibrios:



Analizando estos equilibrios propuestos con la ayuda de los diagramas de Pourbaix, podemos concluir que varias de las especies anteriormente citadas son formadas en una forma muy probable dentro del sistema en estudio. De esta manera se explican los resultados de disolución de las impurezas de arsénico, antimonio y bismuto en los concentrados de cobre de "La Caridad".

Después de haber discutido los resultados se concluye que la relación óptima de reactivos es 100g/l NaOH-160g/l Na₂S.

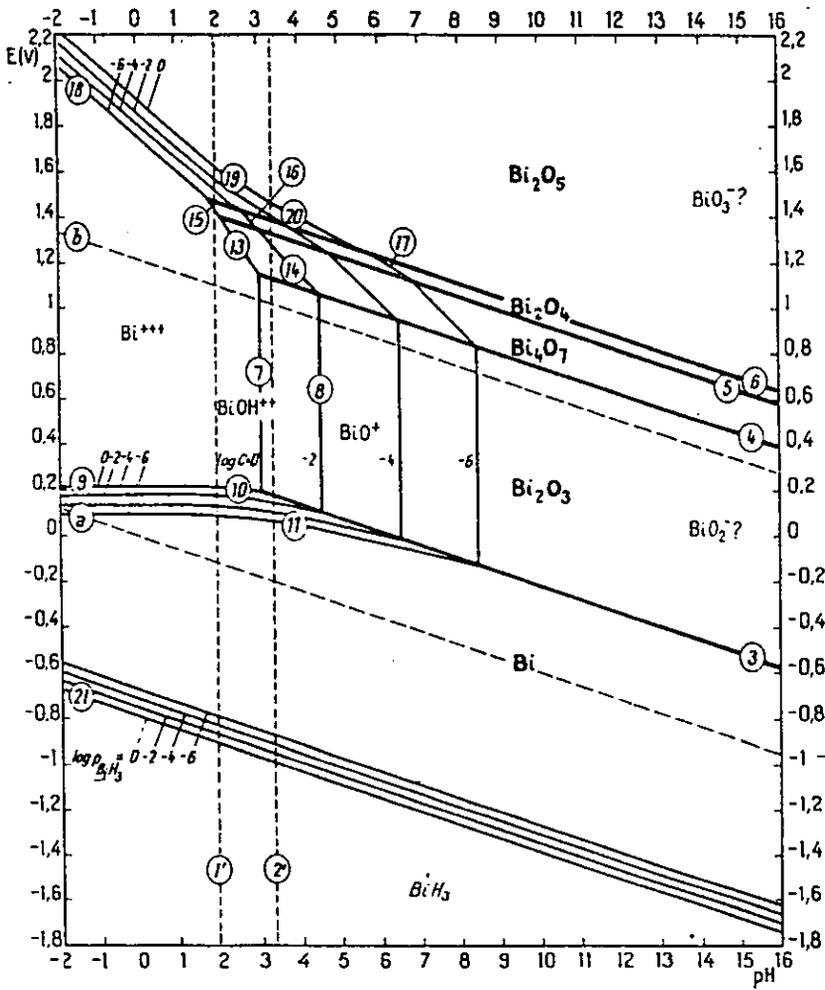


Figura 5.3 Diagrama de Pourbaix (Eh-pH) para el sistema Bi-H₂O, a 25°C.

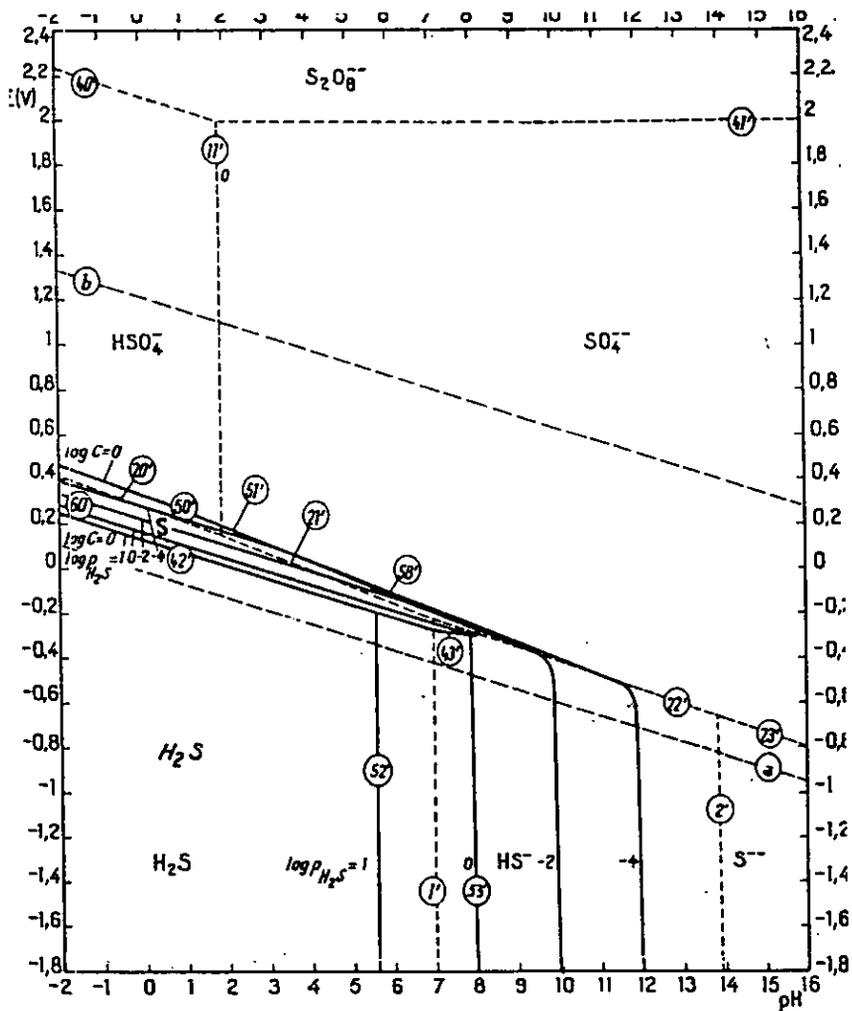


Figura 5.4 Diagrama de pourbaix (Eh vs pH) para el sistema S-H₂O, a 25°C.

5.2 Efecto del tiempo de lixiviación.

El efecto del tiempo de lixiviación se estudió después de haber establecido la relación óptima de los agentes lixiviantes. Los resultados de estas pruebas, así como los balances metalúrgicos, los podemos revisar en las tablas 4.5 a 4.8.

Analizando la gráfica 4.2 observamos que al aumentar el tiempo de residencia, aumenta el porcentaje de lixiviación de cada una de las impurezas. Esto se explica debido a que al dar mayor tiempo de lixiviación dejamos que la reacción de disolución evolucione e incluso pudiera llegar a terminar.

También se observa que el porcentaje de lixiviación para el arsénico y para el antimonio, se incrementó considerablemente a los 60 minutos, a partir de este tiempo la disolución de dichas impurezas siguió aumentando aunque de una forma menos notable. Para el bismuto el porcentaje de extracción también aumentó, pero de una manera menos marcada y constante, es decir, a cada intervalo de tiempo se incrementa la eliminación de 2 a 3%. En cambio la disolución del cobre, aunque es despreciable, se mantuvo constante.

Para tratar de explicar lo sucedido, debemos de apoyarnos en la cinética de lixiviación. A partir de las gráficas mostradas en el apéndice A, donde se ajustaron los dos modelos cinéticos más empleados en lixiviación, se trató de conocer el mecanismo controlante del proceso, aunque cabe aclarar, que este estudio no fue lo suficientemente profundo debido a los datos operados. Podemos observar que la cinética de lixiviación de impurezas es controlada por un mecanismo mixto, en donde controlan tanto la reacción química, como la difusión a través de la capa de producto.

Por lo anterior, podemos suponer que además de que la reacción entre la solución y el mineral es lenta por sí misma, el producto que se genera también opone cierta resistencia a la difusión de las especies en solución hacia el seno de la partícula, ya que si observamos con más cuidado, las gráficas muestran una pequeña variación en la eliminación de impurezas a partir del minuto 90. Explicándose así el hecho de que se necesiten tiempos de residencia relativamente grandes para lograr altos porcentajes de extracción.

Por lo tanto, podemos determinar que se obtuvieron resultados aceptables a un tiempo de 150 minutos, siendo éste el tiempo óptimo para nuestro proceso de lixiviación de impurezas en concentrados de cobre.

5.3 Efecto de la concentración de la solución lixivante.

Después de haber determinado el tiempo óptimo de lixiviación, se realizó el estudio del efecto de la concentración de la solución, manteniendo la relación de reactivos establecida anteriormente. Estos dos últimos parámetros guardan una relación muy estrecha, y por esto es que en este apartado ya no se discutirán los probables equilibrios que se estén llevando a cabo durante la lixiviación. Sin embargo, se considera el análisis complementario a partir de la cinética del proceso.

Los resultados de estas pruebas se muestran en las tablas 4.9 a 4.12. Analizando la gráfica 4.3, podemos observar que a medida que aumenta la concentración de la solución, (reactivos o agentes lixiviantes), aumenta el porcentaje de arsénico, antimonio y bismuto extraídos, mientras que la disolución del cobre aunque también aumenta en una forma más notable que en los otros bloques de pruebas, aún sigue siendo despreciable.

El hecho de que los porcentajes de lixiviación de impurezas aumenten conforme se incrementa la concentración de la solución lixivante, lo podemos explicar tomando en consideración la cinética presente en nuestro sistema. Como ya se mencionó, nuestro proceso está controlado por un mecanismo mixto, a saber por reacción química y por difusión a través de la capa de producto, pero tratándolo desde un punto de vista más estricto al calcular los coeficientes de correlación para las curvas de los dos modelos cinéticos (ver apéndice A), se observa una ligera variación que nos indica que el mecanismo que presenta un efecto ligeramente más significativo en la cinética de lixiviación del arsénico y del antimonio es la difusión a través de la capa de producto.

Mientras que para la lixiviación del bismuto esta pequeña diferencia nos indica que influye más la etapa de reacción química. Tal vez esta sea la respuesta al hecho de que el bismuto siempre presentó porcentajes de eliminación muy pequeños comparados con las otras dos impurezas, ya que al ser la reacción química la que controla su cinética de lixiviación, implica que los reactivos lixiviantes atacan levemente a los compuestos de bismuto.

Con respecto al arsénico y al antimonio, como ya vimos, la difusión a través de la capa de productos es la etapa que controla sobre la reacción química en la cinética de lixiviación. Entonces al incrementar la concentración de la solución lixivante, aumenta en cierta medida la fuerza motriz de los iones en solución haciendo que éstos aumenten la rapidez de la reacción química, además de que existe una mayor tendencia al equilibrio estequiométrico y/o incluso, se llega a tener cierto exceso de reactivos lixiviantes. De esta manera se favorece la reacción entre el mineral y la solución lixivante, y por lo tanto se facilita un poco la difusión de los reactivos hacia el interior de la partícula, así como la de los productos hacia el seno de nuestro sistema.

En este caso la concentración que se determinó como óptima para el proceso de lixiviación de impurezas de arsénico, antimonio y bismuto presentes en los concentrados de cobre fue de 2.5 M de NaOH - 2.05 M de Na₂S.

5.4 Efecto de la temperatura.

Hasta este momento se han determinado la relación de NaOH/Na₂S, el tiempo de lixiviación y la concentración de la solución lixivante óptimos para el proceso en estudio. Ahora analizaremos las pruebas realizadas donde la variable en estudio fue la temperatura con el objeto de determinar el efecto que tiene sobre la extracción del arsénico, el antimonio y el bismuto.

En las tablas 4.13 a 4.16 podemos observar tanto los resultados experimentales, como los obtenidos a partir del balance metalúrgico para cobre, arsénico, antimonio y bismuto. Este estudio se realizó desde los 25°C hasta los 98°C, manteniendo las demás condiciones constantes.

En la gráfica 4.4 se presenta el por ciento de extracción contra la temperatura. Aquí se observa que a medida que se aumenta la temperatura, aumenta el porcentaje de impurezas extraídas de los concentrados de cobre, dándonos también cuenta que esta variable es una de las más significativas en este proceso. Esto se nota claramente al comparar las pruebas 20 y 3. En la prueba 20, efectuada a 85°C, la extracción tanto de arsénico como de antimonio apenas rebasan el 42%, mientras que en la prueba 3, efectuada a 98°C, dicha extracción da un salto muy grande y sobrepasa el 75% de extracción para ambas impurezas. El bismuto, aunque sus niveles de eliminación son menores, también presenta un salto un tanto notorio, éste va de 11.88% a 85°C y sube a 15.97% a 98°C.

Esto se debe a que la temperatura influye de una manera también positiva en la velocidad de disolución de las impurezas, es decir, que al aumentar la temperatura se favorece la reacción en un sentido hacia la formación de productos. Por lo que aumenta tanto el porcentaje de impurezas disueltas como la velocidad de disolución de las mismas.

Aunque el objetivo de estas pruebas fue el encontrar una temperatura menor a los 98°C, a la cual se obtuvieran resultados favorables de lixiviación de impurezas, se determinó, sin embargo, que ésta fue la temperatura óptima para nuestro proceso.

5.5 Efecto de la velocidad de agitación.

La velocidad de agitación fue el parámetro con el que se dio por terminado el estudio del proceso de lixiviación de impurezas en los concentrados de cobre de "La Caridad". En la gráfica 4.5, se puede observar que la velocidad de agitación presenta un comportamiento oscilante a diferencia de las otras variables que se estudiaron, las cuales mostraron una tendencia bien marcada, es decir, a medida que aumentamos el número de revoluciones por minuto el porcentaje de lixiviación de las impurezas varía de forma que no se presenta ningún tipo de tendencia, sino que en ocasiones aumenta y en otras disminuye.

Se puede suponer que este fenómeno sucede debido a que en algunas ocasiones la capa límite que se forma no llega a romperse totalmente y esta disminución es suficiente para que se presente cierto grado de disolución, pero al continuar el proceso, debido a que la reacción química también tiene un efecto determinante en la cinética de este proceso, dicha capa vuelve a formarse o aumentar de espesor, haciendo que la disolución antes lograda disminuya.

El hecho de que la velocidad de agitación no presentó un comportamiento bien definido, hace que al momento de realizar la lixiviación de las impurezas deba ser notablemente considerada, pues sino se mantiene bien controlada dicha velocidad puede hacer que la eficiencia del proceso disminuya.

Para los fines de este trabajo y después de realizar el análisis de los resultados experimentales, se determinó que la velocidad de agitación óptima es de 1500 rpm.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones.

* A partir de los resultados obtenidos podemos concluir que el principal objetivo del presente estudio fue alcanzado, es decir, se realizó la lixiviación de las impurezas de As, Sb y Bi presentes en los concentrados de cobre de la planta concentradora "La Caridad", con resultados favorables: 89.23% del arsénico, 100% del antimonio, 10.90% del bismuto.

* Comparando las concentraciones finales de impurezas obtenidas en esta experimentación (0.010% de As, 0.0% de Sb y 0.019% de Bi), con las máximas permisibles (0.16% de As, 0.06% de Sb y 0.02% de Bi), se concluye que también se logró el objetivo, aunque el bismuto presenta una diferencia muy pequeña.

* Se logró determinar las condiciones óptimas para el proceso de lixiviación de impurezas siendo éstas las siguientes:

~Relación de agentes lixiviantes:	100g/l NaOH-160g/l Na ₂ S.
~Tiempo de lixiviación:	150 minutos.
~Concentración de la solución lixiviante:	2.5M NaOH - 2.05M Na ₂ S.
~Temperatura de lixiviación:	98°C.
~Velocidad de agitación:	1500 rpm.

* Ya que la velocidad de agitación presenta un efecto oscilante en la lixiviación de impurezas, se debe de tener un perfecto control sobre ésta. De no ser así repercutirá directamente en la eficiencia de este proceso.

* Las variables que repercuten en forma más significativa y que proporcionan los porcentajes de lixiviación de impurezas más altos son la concentración de la solución lixivante y la temperatura.

* Los mecanismos que controlan la cinética de la lixiviación de impurezas en los concentrados de cobre son: la reacción química y la difusión a través de la capa de productos, esto quiere decir, que es un mecanismo mixto.

6.2 Recomendaciones.

* Como los objetivos principales de este trabajo fueron lixiviar la impurezas contenidas en los concentrados de cobre y determinar las condiciones óptimas para el mismo, se sugiere realizar estudios más profundos sobre las reacciones que se están llevando a cabo en dicho proceso, es decir, determinar los productos de reacción formados, así como los mecanismos que están ocurriendo. Complementándolo también con un estudio completo de la cinética de lixiviación.

* Aplicar otro tipo de técnicas para el análisis de los residuos sólidos, para tener una idea más precisa de la cantidad de impurezas extraídas de los concentrados de cobre, así como analizar simultáneamente el comportamiento de otros elementos tales como el fierro, plomo, cadmio, entre otros.

* Realizar estudios sobre las técnicas de recuperación existentes, electrobeneficio, extracción por solventes, resinas de intercambio iónico, cementación, etc., para tener una panorámica completa sobre el procesamiento de las impurezas tratadas en el presente trabajo.

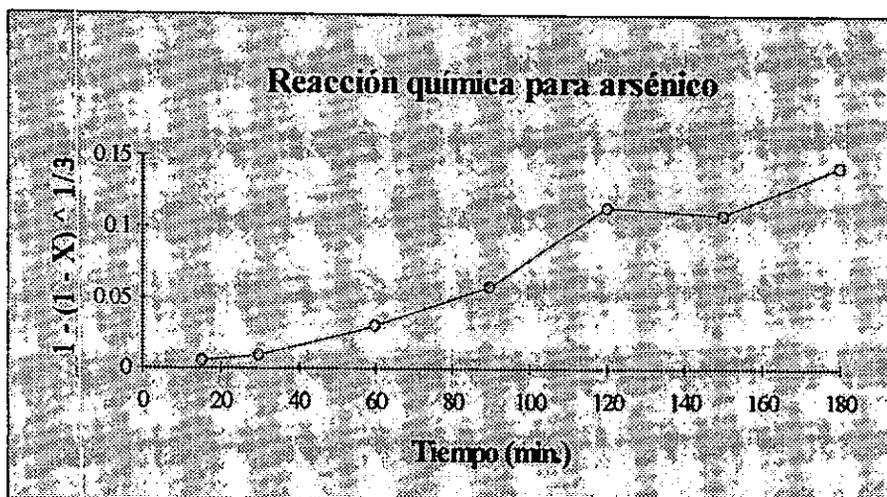
ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Gráficas de la cinética de lixiviación.

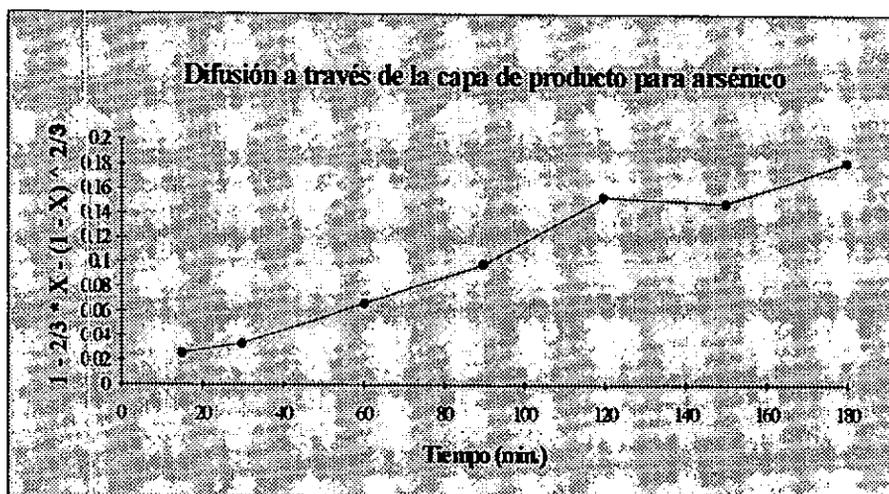
Los cambios que deben efectuarse para extraer valores metálicos a partir de menas minerales ocurren por lo general mediante procesos heterogéneos. Aunque la mayoría de las reacciones involucran un conjunto muy complicado de etapas y pueden requerir tratamientos individuales, son comunes ciertos aspectos elementales de la reacción global a un gran número de reacciones.

Hasta hace poco tiempo se reconoció que la etapa que controla la cinética puede cambiar dependiendo de las condiciones de la reacción y, así, la información cinética obtenida bajo un conjunto determinado de condiciones puede no ser aplicable bajo otro grupo distinto. Además, puede ser frecuente que no exista una única etapa controlante de la cinética porque varias etapas pueden tener efectos más o menos iguales en la determinación de la cinética global. La importancia relativa de estas etapas puede cambiar también durante el transcurso de la reacción. Por tanto, es importante entender cómo interaccionan entre sí las etapas individuales de la reacción, no sólo para saber cuál es la etapa que controla la cinética en determinadas condiciones de reacción, sino también para determinar si hay que considerar más de una sola etapa al expresar la cinética global⁽¹⁵⁾.

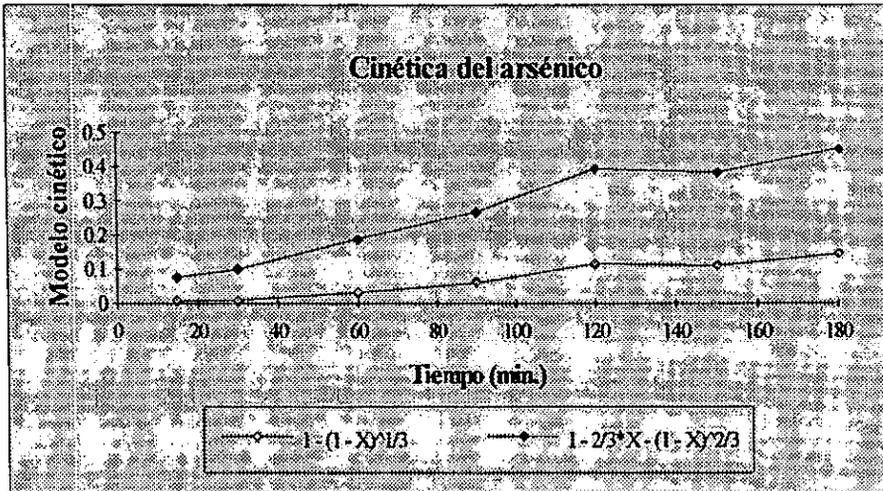
A continuación se presentan las gráficas donde se ajustan los modelos cinéticos de reacción química y de difusión a través de la capa de producto, para tener una idea de la etapa que está controlando en el proceso de lixiviación de impurezas de los concentrados de cobre.



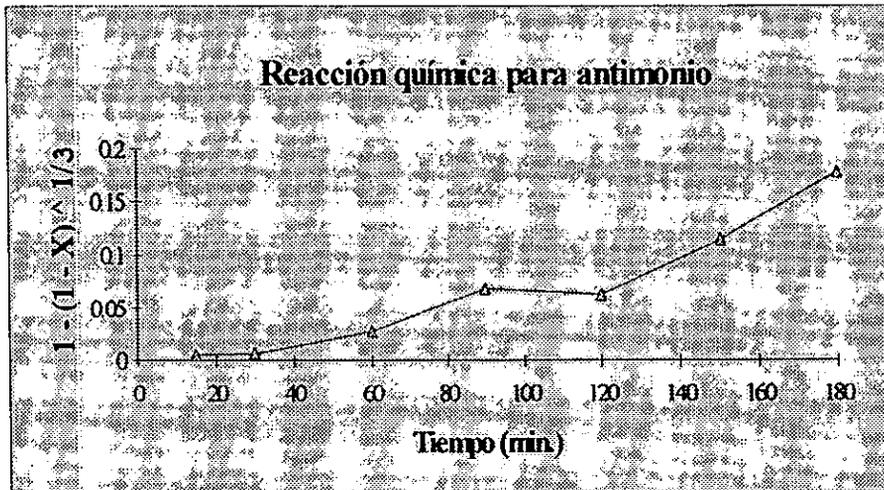
Gráfica 6.1 Ajuste del modelo cinético de reacción química para la lixiviación de As presente en los concentrados de cobre. Coeficiente de correlación, $r = 0.9792$.



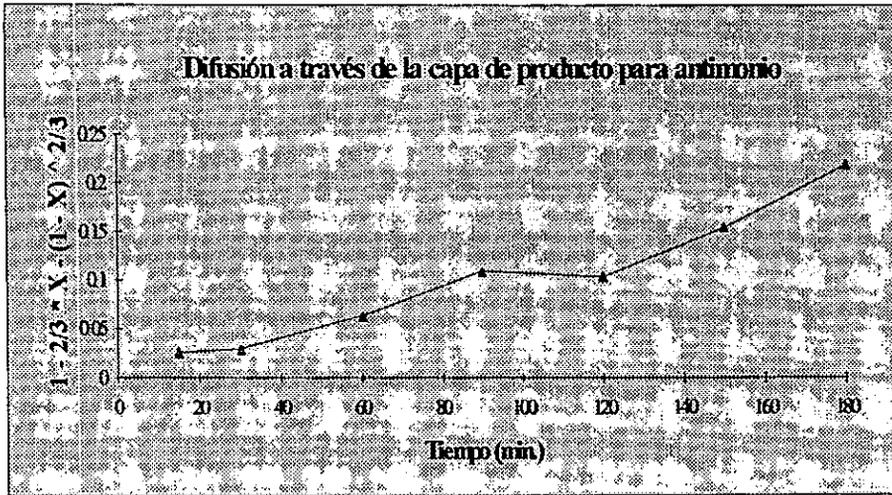
Gráfica 6.2 Ajuste del modelo cinético de difusión a través de la capa de producto para la lixiviación de As presente en los concentrados de cobre. Coeficiente de correlación, $r = 0.9805$.



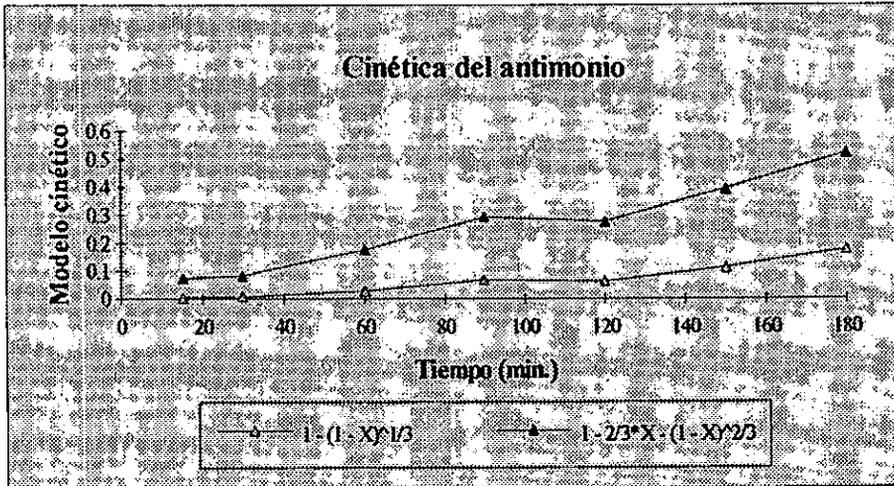
Gráfica 6.3 Comparación del ajuste de los modelos cinéticos (para reacción química y difusión a través de la capa de producto) para la lixiviación del arsénico.



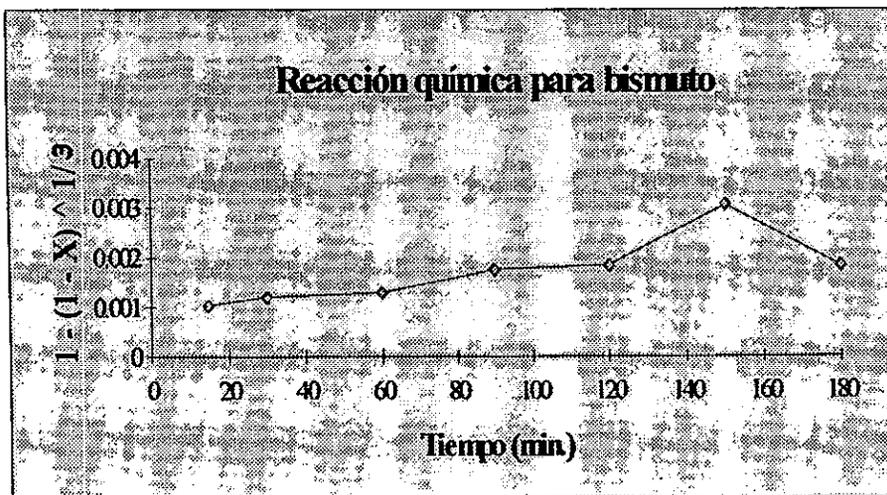
Gráfica 6.4 Ajuste del modelo cinético de reacción química para la lixiviación de Sb presente en los concentrados de cobre. Coeficiente de correlación, $r = 0.9575$.



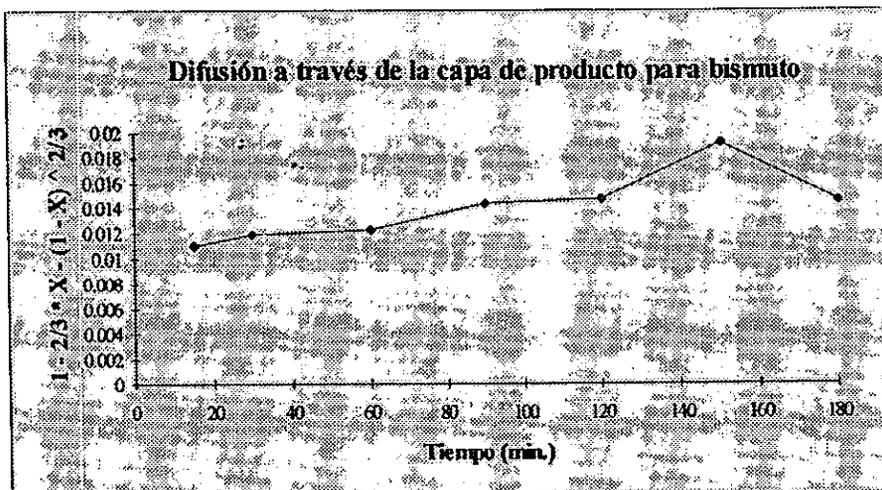
Gráfica 6.5 Ajuste del modelo cinético de difusión a través de la capa de producto para la lixiviación de Sb presente en los concentrados de cobre. Coeficiente de correlación, $r = 0.9802$.



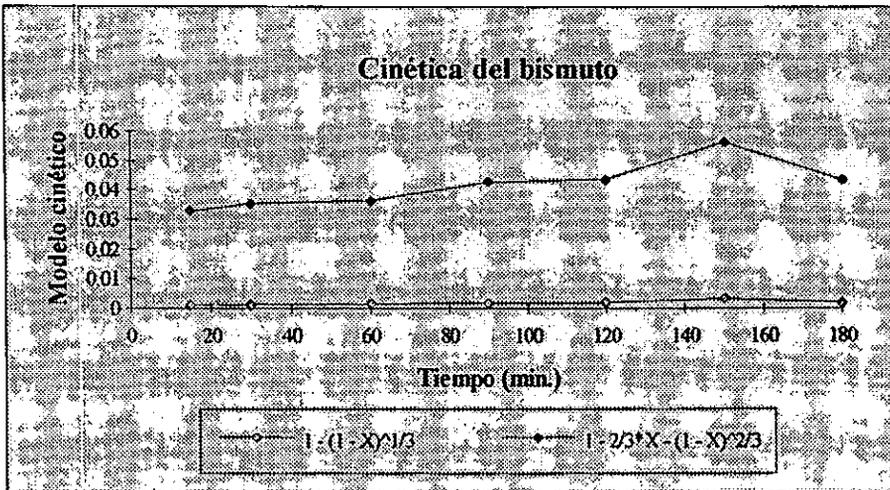
Gráfica 6.6 Comparación del ajuste de los modelos cinéticos (para reacción química y difusión a través de la capa de producto) para la lixiviación del antimonio.



Gráfica 6.7 Ajuste del modelo cinético de reacción química para la lixiviación de Bi presente en los concentrados de cobre. Coeficiente de correlación, $r = 0.7527$.



Gráfica 6.8 Ajuste del modelo cinético de difusión a través de la capa de producto para la lixiviación de Bi presente en los concentrados de cobre. Coeficiente de correlación, $r = 0.7395$.



Gráfica 6.9 Comparación del ajuste de los modelos cinéticos (para reacción química y difusión a través de la capa de producto) para la lixiviación del bismuto.

Realizando el análisis de las gráficas anteriores podemos observar claramente que tanto la reacción química como la difusión a través de la capa de producto tienen un efecto más o menos igual en la lixiviación de las impurezas de arsénico, antimonio y bismuto presentes en los concentrados de cobre de "La Caridad". Por todo lo anterior, podemos decir que en este proceso a estas condiciones ($T=98^{\circ}\text{C}$, 100g/l de NaOH, 160g/l de Na_2S y 1500 rpm), es probable que el mecanismo que esté controlando la cinética global sea mixto, es decir que no existe una sola etapa controlante, sino que la reacción química, así como la difusión a través de la capa de producto están controlando en la misma forma.

Bibliografía

- (1). Rosenquist, Terkel. "Fundamentos de metalurgia extractiva". Editorial Limusa. México, 1987. pp. 449, 459.
- (2). Moore, J. J. "Chemical metallurgy". Butterworths & Co. (Publishers) Ltd. 1993. pp. 260-261.
- (3). "Unit process in extractive metallurgy". Hydrometallurgy. A modular tutorial course designed for self paced learning. Supported by the national science foundation.
- (4). Apuntes de hidrometalurgia, recopilados por el Ing. Héctor Obregón Zapata. Cía. Mexicana de Cobre, S. A. 1995. pp. 4, 30-31, 38-39, 45-47.
- (5). Hayes, Peter. "Process principles in minerals and materials production". Hayes publishing Co. Australia. 1993. pp. 227, 229, 235.
- (6). Weiss, Norman L. "SME. Mineral Processing Handbook". Volume 2. Capítulo 13. Society of mining engineers. New York, New York. 1985. pp, 6-12, 20-21.
- (7). Evans, James W. "The production of inorganic materials". Editorial Maxwell McMillan International. University of California at Berkeley. 1992. pp. 290-295.
- (8). Evans, D., Shoemaker. "International symposium on hydrometallurgy". The american institute of mining, metallurgical & petroleum engineers, inc. New York, New York. 1973. pp. 205-208.

- (9). Bockris, J. O'M. and Reddy, A. K. N. "Modern Electrochemistry". Plenum Press. New York, New York. 1977.
- (10). Robles Vega, A., Serna. E. "Lixiviación alcalina del arsénico de los polvos de fundición de cobre y la regeneración de la solución lixiviante": VII Encuentro de procesamiento de minerales. Instituto de metalurgia, U. A. S. L. P. San Luis Potos, S. L. P. 1996.
- (11). Vircikova E., Fedor, J. "Leaching behaviour of arsenic trisulphide with sodium hydroxide solution". Hydrometallurgy. Volume 27. 1991. Elsevier science publishers B. V. 1-6.
- (12). Anderson, Corby G., Nordwick, Suzzann M. "Processing of antimony at the Sunshine mine". Residues and effluents. The minerals, metals & materials society. 1991.
- (13). Nadakmi, R. M., Kusik, C. L. "Hydrometallurgical removal of arsenic from copper concentrates". Residues and effluents. The minerals, metals & materials society. 1991.
- (14). Sánchez Corrales, V. M., Castrejón Lemus, R. A. "Lixiviación alcalina de polvos de fundición de cobre". XXI Convención de la A. I. M. M. G. 1995.
- (15): Sohn, Hong Y., Wadsworth, Milton E. "Cinética de los procesos de la metalurgia extractiva". Editorial Trillas. México, 1986. pp. 15, 16.