

**TRATAMIENTO HIDROMETALURGICO  
DE POLVOS DE FUNDICION DE COBRE  
PARA LA ELIMINACION DE ARSENICO.**

---

**GUILLERMO DEL CARMEN TIBURCIO MUNIVE  
1993**

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

# UNIVERSIDAD DE SONORA

## APROBACION DEL COMITE ACADEMICO de la tesis presentada por

**Guillermo del Carmen Tiburcio Munive**

Esta tesis ha sido revisada por cada uno de los miembros del comité académico y por mayoría de votos la han encontrado satisfactoria.


28-OCT 1993

**Fecha**

28-OCT-1993

28-OCT. 1993

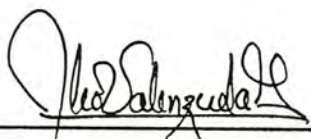
28/oct/93

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. José R. Parga Torres**

  
\_\_\_\_\_  
**M.enC. Jesús Leobardo Valenzuela G.**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Ronaldo Herrera Urbina**

  
\_\_\_\_\_  
**M.enC. Manuel Pérez Tello**

  
\_\_\_\_\_  
**Coordinador del Programa  
de Maestría en Metalurgia Extractiva**

  
\_\_\_\_\_  
**Director de División de Ingeniería**

## **A G R A D E C I M I E N T O S**

**A mi esposa, Martha Cruz Ochoa.**

**A mis hijos: Victor**

**Omar**

**José**

**A la Universidad de Sonora por apoyarme en la realización de esta tesis.**

**Mi agradecimiento en especial al Ing. Arturo Ruiz Manríquez.**

**Al Dr. Salvador Aguayo Salinas, por creer en todo momento en la realización de esta tesis.**

**A mi asesor al M.enC. Leobardo Valenzuela García por sus orientaciones y contribuciones para el desarrollo de esta tesis.**

**TRATAMIENTO HIDROMETALURGICO DE POLVOS  
DE FUNDICION DE COBRE PARA LA ELIMINACION  
DE ARSENICO**

**Por**

**Guillermo del Carmen Tiburcio Munive**

**TESIS**

**presentada para obtener el Grado de**

**Maestro  
en  
Metalurgia Extractiva**

**Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia  
División de Ingeniería  
Universidad de Sonora**

**Noviembre de 1993**

## INDICE DE CONTENIDO

	PAG.
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABLAS	IV
RESUMEN	V
I. INTRODUCCION	1
II. ANTECEDENTES	6
2.1 Lixiviación.	8
2.2 Extracción de Metales por Solventes.	12
2.2.1 Características de la Reacción de Extracción	13
2.2.2 Reactivos Químicos utilizados en el proceso de de Extracción de metales por Solventes.	23
III. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	34
IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA LIXIVIACION	42
4.1 Solubilidad de los Polvos del Horno de Fusión Instantánea en Agua.	43
4.2 Solubilidad de los Polvos del Horno de Fusión Instantánea utilizando diferentes lixiviantes.	45
4.3 Efecto de la Concentración de Reactivo en la Lixiviación Acida.	47
4.4 Efecto de la Velocidad de Agitación en la Lixiviación.	50
4.5 Efecto del Porcentaje de Sólidos en la Lixiviación.	50
4.6 Análisis y Discusión de los Resultados obtenidos en la Lixiviación.	54

<b>V.</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA EXTRACCION DE ARSENICO POR SOLVENTES</b>	<b>56</b>
5.1	Pruebas Preliminares para base de un Diseño de Experimentos.	57
5.1.1	Cinética de Extracción de Arsénico utilizando Extractante LIX 1104.	66
5.1.2	Determinación de la Curva de Equilibrio para la Extracción de Arsénico con Extractante LIX 1104.	68
5.1.3	Efecto de la Temperatura en la Extracción de Arsénico por Solventes.	72
5.1.4	Diagramas de McCabe Thiele.	74
5.2	Diseño de Experimentos para pruebas de Extracción de Arsénico por Solventes utilizando Extractante LIX 1104.	80
5.3	Análisis y Discusión de Resultados Experimentales.	81
<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>85</b>
	<b>APENDICE A</b>	
	Pruebas de Lixiviación de los Polvos del Horno de Fusión Instantánea.	88
	<b>APENDICE B</b>	
	Datos Experimentales de Extracción por Solventes.	96
	<b>APENDICE C</b>	
	Pruebas realizadas a partir del Diseño de Experimentos.	105
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>118</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA No.	PAG.
2.2.1 División de la isoterma de extracción en sus tres distintas zonas.	17
2.3.2 Diagrama de McCabe-Thiele para Arsénico utilizando LIX 1104.	19
3.1 Diagrama Esquemático del Sistema Experimental.	38
3.2 Tanque de Lixiviación con Agitación.	40
4.1 Variación de los g/l de $H_2SO_4$ en el porcentaje de lixiviación de Cu en polvos del Horno de Fusión Instantánea.	48
4.2 Efecto de la Variación de los g/l de $H_2SO_4$ en el porcentaje de la lixiviación de As en polvos del Horno de Fusión Instantánea.	49
4.3 Efecto de la variación del porcentaje de sólidos con los g/l de $H_2SO_4$ .	52
4.4 Efecto de la variación de los g/l de $H_2SO_4$ en el pH a diferentes porcentajes de sólidos.	53
5.1 Proceso de extracción por solventes aplicado a soluciones ácido cupríferas contaminadas.	64
5.1.1 Cinética de la Extracción de Arsénico por Solventes.	67
5.1.2 Isotermas de Extracción para Arsénico.	69
5.1.3 Efecto de la Temperatura en la Extracción de Arsénico por Solventes.	73
5.1.4 Diagrama de McCabe Thiele para arsénico utilizando LIX 1104.	75
5.2.1 Efecto de los factores sobre la extracción de arsénico.	83
5.2.1 Efecto de la factores sobre la variabilidad de extracción de As.	84



## LISTA DE TABLAS

TABLA No.	PAG.
1.1 Producción Mundial de algunas minas de arsénico, reservas calculadas y reservas probables.	4
2.2 Aplicaciones de la Extracción por Solventes.	28
2.3 Modificadores.	30
2.4 Diluyentes comerciales para extracción de metales.	33
3.1.1 Análisis Químico de los Polvos del Horno de Fusión Instantánea.	36
3.1.2 Análisis Mineralógico de los Polvos del Horno de Fusión Instantánea.	37
4.1 Porcentaje de Solubilización de As y Cu utilizando diferentes lixiviantes.	46
5.1 Resumen de datos experimentales preliminares en extracción por solventes.	65
5.2 Diseño de experimentos.	80
APENDICE A Pruebas de lixiviación de los polvos del Horno de Fusión Instantánea.	88
APENDICE B Datos Experimentales de Extracción por Solventes.	96
APENDICE C Pruebas realizadas a partir del Diseño de Experimentos.	105

## RESUMEN

En este trabajo se investigaron los parámetros más importantes en el proceso de lixiviación y la tecnología de extracción por solventes para la recuperación del arsénico. En la etapa de lixiviación los parámetros más importantes que tienen influencia fueron: el tiempo de contacto, el porcentaje de sólidos y la concentración de ácido sulfúrico libre. En la extracción por solventes se analizaron también los parámetros de: tiempo de contacto, relación orgánico/acuoso, acidez libre y temperatura. Se estudió el despojamiento para el extractante LIX 1104 con sulfato de cobre y ácido clorhídrico; debido al alto contenido de hierro, (14-18 g/l, en la solución lixivante), se observó una baja capacidad de carga para la extracción de arsénico. Los resultados obtenidos muestran que el proceso de lixiviación ácida no requiere de altas velocidades de agitación, pero sí la necesaria para llevarse a cabo la lixiviación. También se observó que la concentración de ácido sulfúrico controla la disolución de cobre y arsénico y el tiempo de contacto en la lixiviación fue de 60 minutos.

En el proceso de extracción por solventes la acidez es un parámetro muy importante ya que el extractante es de tipo ácido y trabaja mejor en acidez libre en el rango de 150 - 300 g/l de  $H_2SO_4$ . Las variables óptimas que se determinaron fueron que el tiempo de contacto de las dos fases fue 10 minutos; la velocidad de agitación de 2000 rpm y la relación de orgánico/acuoso de 5/1. Con el empleo de estas variables óptimas se obtuvieron extracciones de 96.2% de arsénico con una capacidad de carga de  $2.5 \text{ mg} \times 10^{-3} \text{ mg}$  de As/ml de extractante con condiciones del 40% para LIX 1104 diluido en queroseno y 30% de acidez libre. También se utilizó un modificador en el extractante siendo este tridecanol.

Una vez cargado el As y el cobre en la fase orgánica el despojamiento de la fase cargada con arsénico se llevó a cabo con sulfato de cobre 40 g/l;

ajustándose esta solución a un pH de 1.9 a 2, para así tratar al orgánico para el despojamiento del arsénico.

El efecto de la temperatura en la extracción del arsénico se observa que no es significativo, sin embargo el modificador si influye en la extracción de arsénico con respecto a la acidez libre.

Tambien se observó que en los primeros 10 minutos el extractante alcanza su máxima capacidad de carga y por lo tanto no es necesario utilizar mayores tiempos de contacto.

De acuerdo a los diagramas de McCabe-Thiele se observó que el número de etapas mínimo requeridas para la extracción del arsénico es variable, sin embargo se puede ver que al utilizarse una relación de flujos de A/O : 1/1, el número de etapas teóricas es de 5 utilizando modificador, una acidez de 300 g/l y 40% de extractante.

# **I. INTRODUCCION**

## I. INTRODUCCION

Una gran cantidad de yacimientos minerales actualmente en explotación en México contienen arsénico, el cual se presenta en los concentrados durante la fundición. La presencia y el alto grado de este elemento hace a los concentrados inadecuados para posteriores procesos químicos y metalúrgicos.

En general el arsénico es considerado como una impureza inconveniente en la fusión y separación de metales no-ferrosos y entonces los minerales que contienen alto arsénico son penalizados por las compañías metalúrgicas o bien sean rechazadas. En base a lo anterior la industria minera en México, presenta graves problemas por la producción de concentrados en alto nivel de esta impureza, sobre todo en las regiones mineras de los estados de Durango, Chihuahua, Zacatecas y San Luis Potosí, las cuales han sufrido consecuencias de ser rechazados sus concentrados debido a la falta de una tecnología que les permita reducir el contenido de arsénico.

Coahuila cuenta con reservas minerales muy grandes de carbonatos, óxidos y sulfuros de zinc en la región de Sierra Mojada. Estando en la actualidad improductivos estos yacimientos debido a su alto contenido de arsénico ( $> 3.0\%$  As).

Los gases expedidos por las industrias metalúrgicas que tratan concentrados en contenidos de arsénico son de alto riesgo para la salud humana, ya que el trióxido de arsénico es altamente tóxico y es un carcinógeno para el ser humano, ya que éste provoca el cáncer en la piel y las vías respiratorias. Este problema es cada vez más serio, puesto que las industrias de esta índole, han quedado dentro de la zona urbana de diferentes ciudades del país, motivo por el cual es necesario tomar medidas para controlar la cantidad de este tipo de elementos que son enviados a la atmósfera, mediante la utilización de concentrados con menor cantidad de estas impurezas.

Actualmente se han desarrollado procesos hidrometalúrgicos como es la lixiviación combinada con extracción por solventes para cobre y arsénico [14] [15].

La extracción por solventes para arsénico se ha estudiado a nivel laboratorio y planta piloto únicamente en soluciones de plantas electrolíticas para cobre. Actualmente se están haciendo estudios para aplicarse en licores de lixiviación de polvos.

A continuación se enlista la importancia de los usos y aplicaciones del arsénico:

### Usos y Aplicaciones de Arsénico

#### Uso del Arsénico

<u>Actividad</u>	<u>%</u>
Preservación de la madera	70
Agricultura (herbicidas)	22
Industria del vidrio y aleaciones no ferrosas	8

En la Tabla 1.1 se muestra la producción mundial del arsénico.

**TABLA 1.1**  
**Producción Mundial de algunas minas de arsénico, reservas calculadas y reservas probables.**

País	Producción Minera		Reservas Calculadas Ton.	Reservas Probables Ton.
	1989	1990		
Estados Unidos	-----	----	50,000	80,000
Bélgica	3,500	3,500		
Canadá	2,000	2,000		
Chile	3,400	6,000		
Finlandia	-----	3,000		
Francia	10,000	10,000		
México	5,100	5,000		
Namibia	2,900	3,000	950,000	142,000
Perú	10,000	1,500		
Filipinas	5,000	5,000		
Suecia	10,000	8,000		
Rusia	8,100	8,000		
Otros Países	1,390	1,000		
Total a nivel mundial (alrededor)	<u>52,000</u>	<u>56,000</u>	<u>1,000,000</u>	<u>1,500,000</u>

Según el mineral COMMODITY SUMMARIES 1991, (U.S. Bureau of Mines).

## OBJETIVO

El objetivo principal de este proyecto de investigación es de disminuir la cantidad de impurezas tales como arsénico en los ánodos de cobre que se producen en la fundición de Mexicana de Cobre.

La presencia de arsénico es penalizado por las plantas electrometalúrgicas (refinerías) hasta en \$3.00 Dólares por cada 0.1% de arsénico contenido en las ánodos.

También, el desarrollar una técnica para eliminar esta impureza, permitiría la explotación de yacimientos con alto grado de arsénico que actualmente están improductivos por esta causa.



## **II. ANTECEDENTES**

## II. ANTECEDENTES

La fundición de la Compañía Mexicana de Cobre produce ánodos de cobre a partir de concentrados de flotación que son enviados de planta concentradora. Estos son introducidos a un secador para eliminar humedad; de aquí son enviados a una tolva de almacenamiento y posteriormente al Horno de Fusión Instantánea, donde se funden una parte de éstos y los restantes se generan como polvos de tamaño de partícula de -400 mallas. Estos polvos considerablemente finos pasan al precipitador electrostático donde son retenidos y luego son reciclados al horno de fusión instantánea como carga fría. El reciclaje de éstos polvos origina que la concentración de arsénico vaya en aumento en las coladas con respecto al tiempo y a veces estos niveles sobrepasan las 2000 ppm.

Los polvos que no pueden ser retenidos en el precipitador electrostático son arrastrados por los gases provenientes de la fusión del concentrado, para así entrar a una torre de humidificación de la planta de ácido sulfúrico; como en esta torre se rocía agua, los polvos tienden a lixiviarse y a disolverse debido al alto grado de sulfatación que poseen.

La cantidad de polvos generados en el precipitador electrostático -caldera-; ascienden a más de 100 toneladas diarias cuyo contenido de cobre oscila entre 20 y 30%, de arsénico 2.0% y de hierro entre 18 y 23% en peso.

El licor secundario proveniente de la planta de ácido sulfúrico es enviado a la planta de neutralización. Este ácido lleva un contenido de 10 a 14 g/l de cobre, 6.0 a 8.0 g/l de hierro y 1.2 a 1.6 g/l de arsénico. Al ponerse en contacto el ácido con la lechada de cal en el primer tanque de neutralización se eleva a pH de 9 para posteriormente pasarse a un segundo tanque donde se acondiciona el pH a 11.3; aquí únicamente se quiere recuperar agua para uso industrial ya que actualmente el cobre no se recupera y de esa manera tanto el hierro, el arsénico y el cobre permanecen en los lodos de la neutralización. Una vez analizada la

problemática tanto de ácido débil como los polvos del horno de fusión instantánea se llevó a cabo el estudio de lixiviación de estos polvos con el ácido débil; acondicionando a este último con ácido sulfúrico producto para obtener mejores porcentajes de extracción de cobre y arsénico.

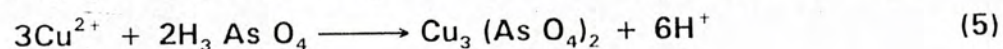
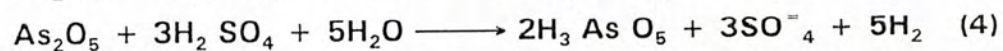
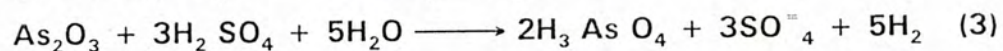
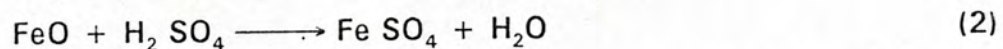
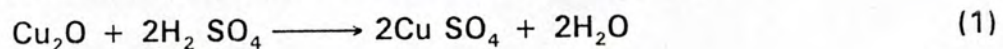
## 2.1 LIXIVIACION

La lixiviación es el proceso de disolución del metal presente en minerales, utilizando reactivos químicos apropiados los cuales depende en gran parte con las características físicas del mineral tales como el tipo de mineralización, facilidad de liberación, y de la naturaleza de otros minerales constituyentes [2].

### 2.1.1 Lixiviación ácida

En la lixiviación ácida se han usado ácido nítrico, ácido clorhídrico y ácido sulfúrico siendo este último el de mayor uso comercial debido a su bajo costo.

Las reacciones de disolución del cobre y arsénico para producir el complejo de sulfato de cobre y ácido arsénico son las siguientes:



Como se aprecia en la reacción (1) el mineral de cobre se pone en contacto con el ácido sulfúrico formando sulfato de cobre [1] y posteriormente en la reacción (2), el hierro con el ácido sulfúrico forma sulfato ferroso.

En la reacción (3), el arsénico trivalente al reaccionar con el ácido sulfúrico

forma el ácido arsenioso.

En la reacción (4), el arsénico pentavalente reacciona con el ácido sulfúrico y forma el ácido arsénico [1].

En la reacción (5) la especie cúprica reacciona con el ácido arsénico para formar el complejo de arsenito de cobre, que es un compuesto contaminante.

En la disolución de las especies mineralógica de cobre y arsénico la acidez se debe de mantener entre 150-200 g/l de  $H_2SO_4$  libre para formar el complejo de arsenitos de cobre.

Las condiciones de lixiviación dependen de las siguientes variables:

- 1) Concentración del ácido
- 2) Grado de oxidación de cobre y arsénico
- 3) Temperatura.
- 4) Tamaño de partícula
- 5) Grado en el cual los minerales de cobre y arsénico están ligadas con la ganga.
- 6) Velocidad de agitación
- 7) Tiempo de contacto

La lixiviación ácida se realiza comúnmente bajo agitación en un recipiente abierto; con suspensiones de sólidos que pueden variar este porcentaje en función de la relación sólido-líquido.

Las principales ventajas del proceso de lixiviación ácida son:

- 1) Por lo general se encuentran menos minerales refractarios al proceso ácido y las extracciones de cobre y arsénico son altas, por encima del 90%.
- 2) El tamaño de partícula requerido, es relativamente pequeño: – 100 mallas.

- 3) La concentración del lixiviante, es bastante baja.
- 4) El tiempo de lixiviación es corto.
- 5) La recuperación del cobre y arsénico se puede efectuar con facilidad por extracción por solventes.

Siendo el principal inconveniente de que requiere del empleo de materiales de construcción resistentes a los ácidos.

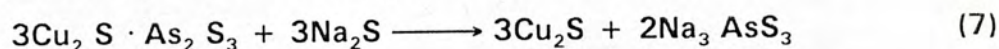
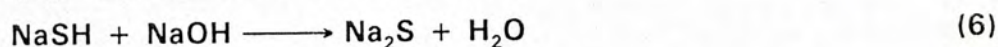
### 2.1.2 Lixiviación alcalina

En la lixiviación alcalina de minerales primarios y secundarios de cobre y arsénico, se utilizan soluciones de hidróxido de sodio, sulfuro de sodio o sulfhidrato de sodio [3].

Este proceso se lleva a cabo en reactores a presión y altas temperaturas, utilizando como oxidante el oxígeno [4], [3].

Las reacciones químicas que tienen lugar son las siguientes:

Reacción con hidróxido de sodio y sulfuro ácido de sodio para la tenantita [Cu<sub>2</sub>As<sub>2</sub>S<sub>4</sub>] temperatura entre 70 - 80°C.



Se utiliza una presión de oxígeno de 800 KPa y temperaturas del orden de 145°C. Por este proceso se han lixiviado minerales de arsénico cuyo contenido oscila de un 5 a 30% de este elemento, reduciéndolo a menos de 0.1% de arsénico. La desventaja de este proceso alcalino es el alto costo de los reactivos y el equipo especial [3].

Según Reynolds [4], [5] este proceso se ha probado para especies minerales de tetrahedrita y tenantita. La especie mineral de arsenopirita con la

sosa cáustica y sulfhidrato de sodio no tiene una extracción de arsénico aceptable ya que oscila entre un 5 y 15% para la eliminación del arsénico en los concentrados de flotación de arsenopiritas auríferas.

Las principales ventajas del proceso de lixiviación alcalina son:

- 1) Las propiedades no corrosivas que facilitan su manejo y hacen más económico el equipo.
- 2) La solución de sosa cáustica y sulfhidrato de sodio tienden a formar sulfuro de sodio para disolver selectivamente al arsénico sin atacar al cobre.
- 3) El cobre en el residuo con bajo arsénico puede ser reciclado a la fundición.

La principal desventaja de la lixiviación alcalina es la de no poder ser utilizada para minerales que contienen óxidos refractarios, como los que contienen alto silicio y titanio.

## 2.2 EXTRACCION DE METALES POR SOLVENTES

La extracción por solventes en metalurgia es una operación de transferencia de masa; la cual se lleva a cabo entre dos fases inmiscibles en contacto; una de estas fases está formada por un reactivo diluido (fase orgánica) y la otra por un licor de lixiviación (fase acuosa), el cual será tratado con el objeto de extraer uno o más componentes mediante un mecanismo de control reversible que permite un ciclo de la fase orgánica en el sistema [6].

El proceso de extracción por solventes consta de dos pasos: la extracción y la reextracción o despojamiento. En el paso de extracción el solvente orgánico se pone en contacto con el licor de lixiviación a tratar, en este paso se efectúa la transferencia de masa de la fase acuosa a la fase orgánica. En el paso de reextracción el solvente orgánico (orgánico cargado) se pone en contacto con una solución acuosa adecuada y la transferencia de masa se invierte.

La extracción por solventes puede ser utilizada para uno o varios objetivos siendo los principales los que se mencionan a continuación:

- La transferencia de valores metálicos desde un licor clarificado hacia una solución más manejable para la etapa subsecuente.
- La concentración de valores metálicos en una solución a partir de un licor clarificado.
- La purificación de valores metálicos de sus contaminantes por medio de una extracción selectiva.
- La purificación de valores metálicos en un licor clarificado por extracción selectiva de uno o más contaminantes.
- La separación de dos o más valores metálicos de un licor clarificado por extracción selectiva, o despojamiento selectivo de los valores metálicos contenidos en la fase orgánica.

- La eliminación de etapas subsecuentes del proceso por medio de la obtención del producto final deseado en la etapa de reextracción.

### **Corrientes del Proceso en extracción por solventes:**

Licor de alimentación. Es el producto de una lixiviación del cual se desea extraer una o más especies metálicas.

Orgánico despojado. Es el flujo de orgánico que proviene de las etapas de reextracción después de haber cedido su carga a la solución reextractante, éste junto con el reflujo de la misma celda se ponen en contacto con el licor de alimentación en cada etapa.

Reflujo. Es la fracción de la corriente de orgánico que se recicla al mezclador de la misma etapa con la finalidad de aumentar la eficiencia.

Licor descargado (Refinado). Es la corriente de acuoso que abandona el sistema después de haberse contactado varias ocasiones con el orgánico al cual cedió gran parte de su contenido en sales metálicas, éste puede ser reciclado al proceso de lixiviación.

Orgánico cargado. Es la corriente de solvente que abandona la sección de extracción cargado con el ion metálico de interés [7].

Orgánico fresco. Es aquel que entra por primera vez al sistema de extracción por solventes con el objeto de reponer las pérdidas de solvente, las cuales pueden ser ocasionadas por diversos factores como: formación de emulsiones, evaporación, fugas, arrastre, solubilidad, etc..

### 2.2.1 Características de la Reacción de Extracción

A continuación se definen los términos que caracterizan la reacción de extracción por solventes:



- a) Coeficiente de extracción
- b) Porcentaje de extracción
- c) Selectividad
- d) Etapa
- e) Isoterma de distribución
- f) Línea de operación
- g) Diagrama de McCabe-Thiele
- h) Eficiencia de Etapa
- i) Dispersión
- j) Emulsiones
- k) Separación de fases

a) Coeficiente de extracción

La habilidad del solvente para extraer un ion metálico A, de la alimentación acuosa, en determinadas condiciones se conoce como coeficiente de extracción,  $E_a^\circ$ . Este valor mide la fuerza impulsora global de la reacción y es análogo a la constante de equilibrio de una ecuación química ordinaria.

$$E_a^\circ = \frac{\text{Concentración de A en la fase orgánica}}{\text{Concentración de A en la fase acuosa}}$$

b) Porcentaje de extracción

La transferencia de un soluto de la fase acuosa a la fase orgánica frecuentemente se expresa cuantitativamente en términos de porcentaje de extracción. El coeficiente de extracción  $E_a^\circ$ , y el porcentaje de extracción están relacionados de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de extracción} = \frac{100}{1 + V_a/(E_a^\circ \cdot V_o)}$$

donde  $V_a$  y  $V_o$  son los volúmenes de la alimentación acuosa y orgánica respectivamente. Una relación de volumen igual a la unidad y  $E_a^\circ = 1$  es equivalente a un 50% de extracción [6].

### c) Selectividad

La selectividad en la extracción está representada por el llamado factor de separación  $S_a^b$ , que mide la efectividad de un solvente dado para extraer un metal de la alimentación acuosa con respecto a otro. Se calcula mediante la razón de los valores de los dos coeficientes de extracción [6].

$$S_a^b = E_a^\circ(A)/E_a^\circ(B)$$

$$\text{donde } E_a^\circ(A) > E_a^\circ(B)$$

La selectividad para las operaciones prácticas de extracción debe exceder a la unidad.

Un factor de separación alto no es un juicio definitivo que indique un sistema práctico, a menos que los coeficientes individuales sean números razonablemente altos.

### d) Etapa

La operación de extracción por solventes se lleva a cabo mezclando el solvente con la alimentación acuosa, provocando una dispersión de las fases con un consecuente aumento en el área interfacial, lo que causa un incremento en la velocidad de transferencia de un soluto, posteriormente las fases dispersas pasan a un asentador en el cual se separan éstas. Un proceso que se lleva a cabo en esta forma recibe el nombre de proceso de una sola etapa. Una etapa ideal o teórica es una etapa donde el tiempo de contacto entre las fases es suficiente para que los efluentes estén realmente en equilibrio y le corresponda una eficiencia de etapa de 100% [6].

### e) Isotherma de distribución

Una isoterma de distribución es una representación gráfica de las concentraciones del soluto en el orgánico cargado contra su concentración en el licor descargado a una temperatura constante.

En la actualidad existen dos formas de obtener datos para construir una isoterma de distribución:

- Contactos simples del licor de alimentación con diferentes volúmenes de orgánico de alimentación.
- Extracción a contracorriente; esto es contactando una alícuota de licor de alimentación consecutivamente con alícuotas de orgánico fresco.

La determinación de una isoterma incluye un punto de saturación; esto es, la composición del orgánico cargado en el equilibrio con la alimentación. El valor de la saturación se determina por repetidos contactos de una alícuota de extractante con alícuotas de licor fresco, hasta que no se transfiera más soluto a la fase orgánica [8], [9].

La isoterma de extracción se divide en tres regiones que se muestran en la figura 2.2.1:

- 1) Porción casi lineal
- 2) Porción curvada, en la cual  $E_a^\circ$  disminuye a medida que se consume el extractante libre.
- 3) Porción casi horizontal, donde se alcanza el límite de saturación o la capacidad de carga máxima del extractante.

La pendiente de una tangente a la isoterma de extracción es el coeficiente de extracción.

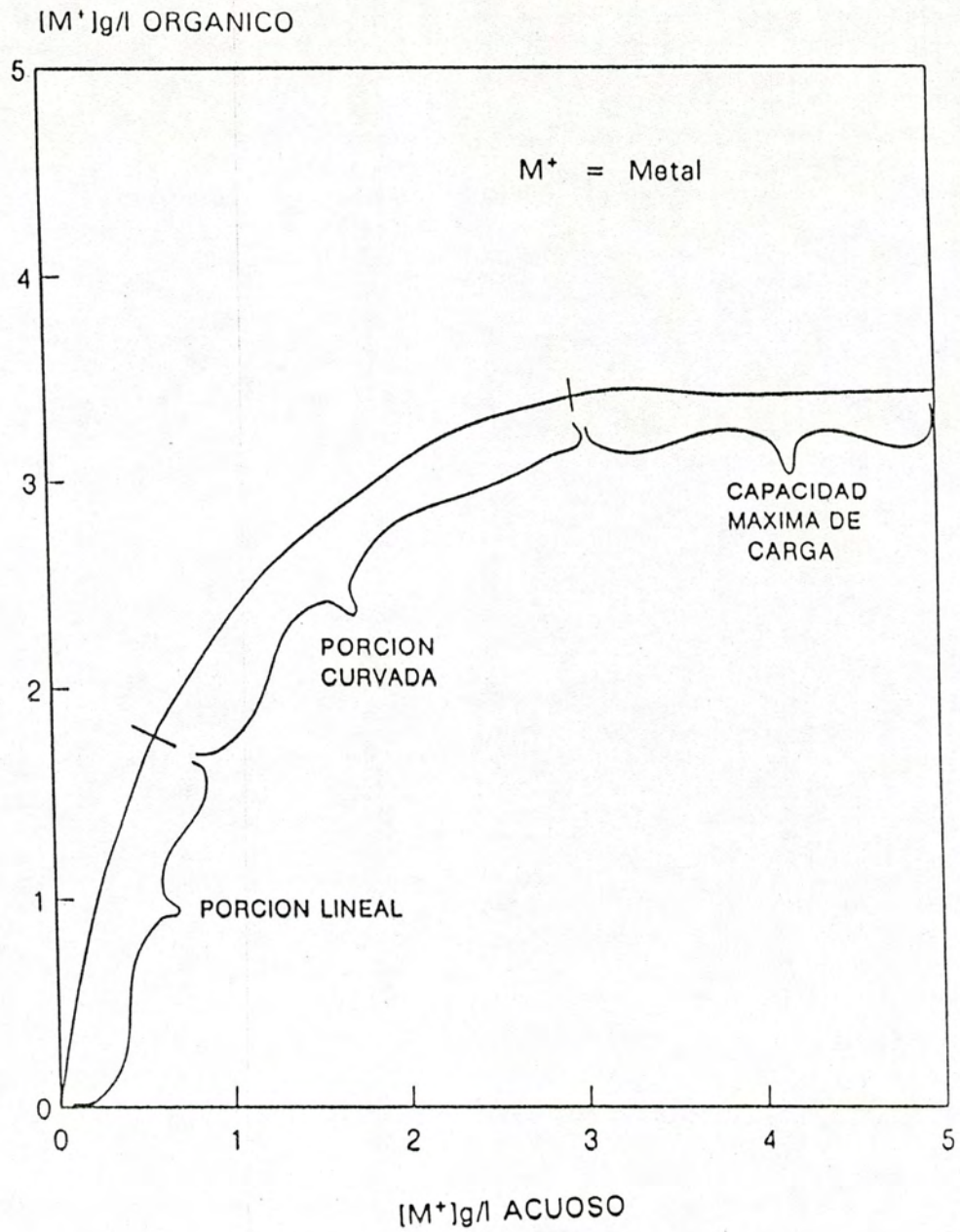


Fig. 2.2.1 División de la isoterma de extracción en sus tres distintas zonas.

#### f) Línea de operación

La línea de operación está basada en la estequiometría (balance de masa); por lo tanto, la concentración de soluto en el orgánico alimentado a la entrada y en el licor descargado a la salida de cualquier etapa son coordenadas de puntos en la línea de operación. Simultáneamente, la concentración de soluto en el licor de alimentación a la entrada y en la fase orgánica (orgánico cargado) a la salida de cualquier etapa son coordenadas de puntos en la línea de operación. Como la línea de operación es recta, esta es determinada por dos puntos cualquiera. Alternativamente, ésta puede ser establecida por un punto solamente y la relación del licor de alimentación a orgánico de alimentación que determina la pendiente de la línea de operación. Ver Fig. 2.2.2.

#### g) Diagrama de McCabe-Thiele

Un diagrama de McCabe-Thiele es útil para estimar el número de etapas teóricas de extracción requeridas para obtener resultados específicos en un sistema de extracción por solventes. El diagrama es una representación gráfica compuesto de la isoterma de distribución y la línea de operación.

La Fig. 2.2.2 muestra la construcción del diagrama, las etapas teóricas o ideales se obtienen extendiendo una línea horizontal desde el extremo más alto de la línea de operación hasta interceptar la isoterma de extracción, seguidamente una vertical intercepta la línea de operación y así sucesivamente, hasta que el otro extremo de la línea de operación es interceptado. Alternativamente, se puede trazar una vertical desde el extremo más bajo de la línea de operación que intercepte la isoterma. Cada ciclo o "escalón" es llamado etapa ideal (teórica). La intersección de cada par de líneas verticales y horizontales con la línea de operación indica el contenido de soluto en el licor descargado a la salida, y en el orgánico a la entrada, para una etapa ideal [7].

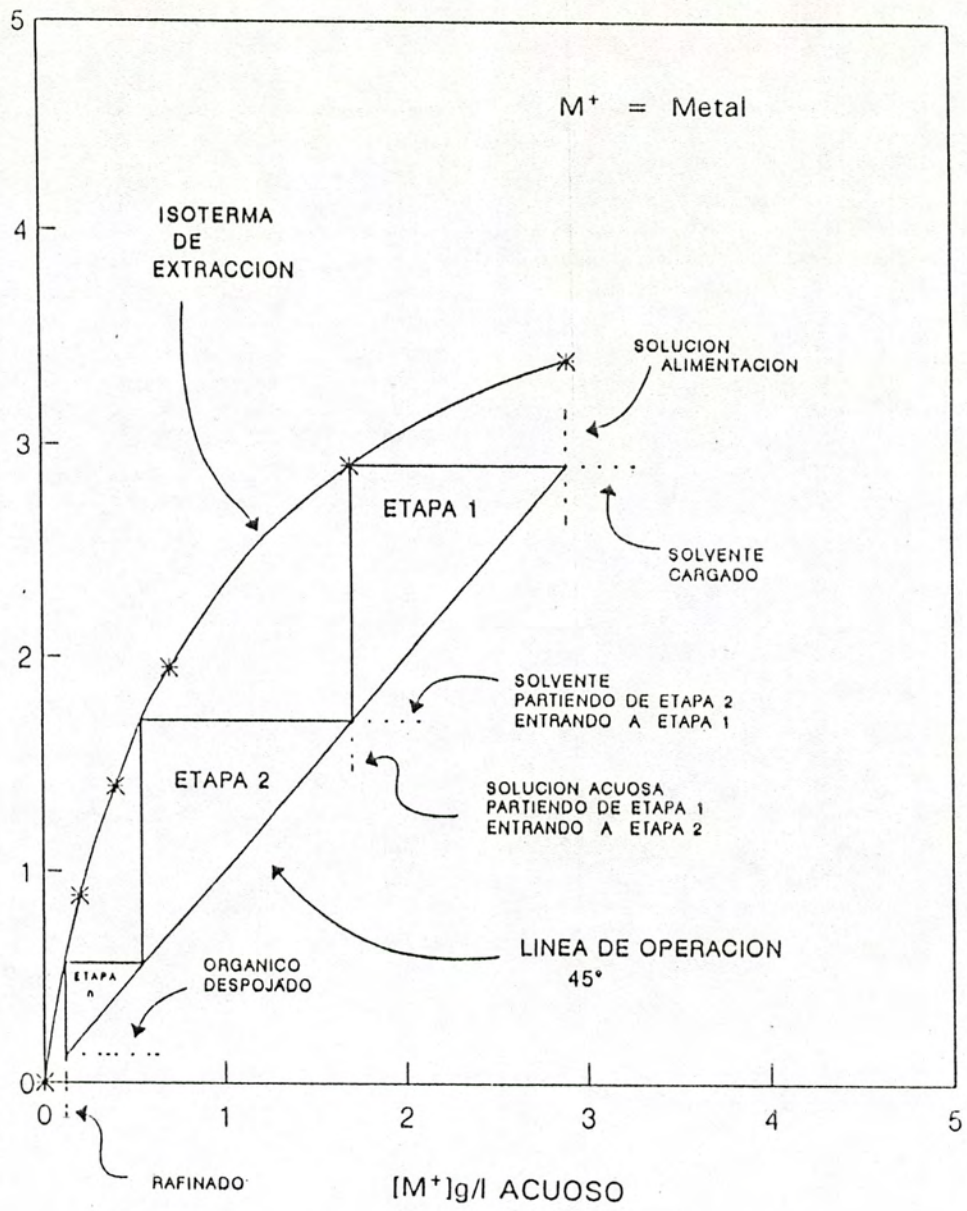


Figura 2.2.2 Diagrama hipotético de McCabe-Thiele

#### h) Eficiencia de etapa

La concentración de soluto metálico en la corriente de orgánico y acuoso a partir de una etapa de contacto se usa en conjunto con el correspondiente valor de equilibrio para determinar la eficiencia de etapa. Los cálculos se ilustran a continuación:

$$\text{Eficiencia} = \frac{Y_n - Y_{n+1}}{Y_n^* - Y_{n+1}}$$

(basada en la corriente orgánica)

$$\text{Eficiencia} = \frac{X_{n-1} - X_n}{X_{n-1} - X_n^*}$$

(basada en la corriente acuosa)

En estas ecuaciones  $Y_n$  y  $X_n$  son las composiciones del efluente orgánico y acuoso respectivamente,  $Y_{n+1}$  y  $X_{n-1}$  son las concentraciones correspondientes en las corrientes de entrada en la etapa "n". Los términos con asteriscos son las concentraciones ideales (equilibrio).

#### i) Dispersión

Para lograr una extracción eficiente el mezclador utilizado debe poner en contacto íntimo a las dos fases. Esto ocurre, que una de las fases se dispersa en forma de gotas en la otra, de tal forma que el área interfacial aumenta considerablemente manteniéndose así el tiempo suficiente para que se lleve a

cabo la extracción.

Para llevar a cabo la dispersión es necesario realizar un trabajo mecánico sobre el sistema. Sin embargo, esto no nos asegura necesariamente un mezclado adecuado. La efectividad del mezclado depende del diseño del mezclador. La eficiencia de etapa depende del grado de dispersión, del tiempo de residencia y de la velocidad de transferencia de masa [6] [7].

La velocidad de transferencia de masa a través de la interfase es una función del área interfacial, la cual también está gobernada por el tipo de mezclador, agitación, tensión superficial y densidades de las fases. Existe un punto donde se alcanza el tamaño de gota óptimo, y es ahí donde la velocidad de transferencia de masa es máxima. Si la dispersión aumenta, el tamaño de las gotas de la fase dispersa disminuye, comportándose éstas como esferas rígidas, disminuyendo así la velocidad de transferencia de masa. Además el tiempo de separación de fases aumenta y por consiguiente el tamaño del asentador.

#### j) Emulsiones

Un factor crítico en la operación de un sistema de extracción por solventes es la relativa facilidad con la que pueden separarse las dos fases. Este factor depende no solamente de las densidades relativas y viscosidades de las fases individuales, sino también de la formación de emulsiones. Una emulsión está formada por pequeñas gotas de líquido disperso a través de un medio continuo. Las emulsiones estables son aquellas que no se asientan rápidamente, y deben ser evitadas ya que ocasionan pérdidas excesivas de reactivo y producto. Para que una emulsión se "rompa", o se separe en sus fases, deberá ocurrir tanto la sedimentación como la separación de la fase dispersa [7].

La velocidad de sedimentación de una emulsión en reposo es mayor si el



tamaño de las gotas y la diferencia de densidad de los líquidos es grande y también si la viscosidad de la fase continua es pequeña. Las emulsiones estables, es decir aquellas cuyo asentamiento se logra solamente después de largos períodos de tiempo, generalmente se forman cuando el diámetro de las gotas dispersas es del orden de 1 a 1.5 micras; las dispersiones de partículas de 1 mm de diámetro o mayores por lo general sedimentan rápidamente. En el caso de emulsiones inestables, después de que se detiene la agitación la mezcla se asienta y se separa rápidamente en las dos fases líquidas a menos que la viscosidad sea alta [6].

#### k) Separación de fases

La separación de fases puede dividirse en dos etapas, una de rompimiento primario, seguida por otra de rompimiento secundario.

El tiempo requerido para que las dos fases se separen en una interfase definida, después del mezclado, se denomina tiempo de rompimiento primario. Ambas fases pueden estar claras en este momento o turbias, que es cuando una fase se encuentra dispersa en la otra. El tiempo para que desaparezca se le denomina tiempo de rompimiento secundario.

El tiempo de rompimiento primario es el que gobierna el diseño del asentador, mientras que el tiempo de rompimiento secundario es la causa principal de las pérdidas de solvente por arrastre mecánico en la fase acuosa.

Otros factores que influyen en la velocidad de separación son: la temperatura, la viscosidad, la densidad, la presencia de sólidos y los materiales modificadores utilizados.

### 2.2.2 Reactivos Químicos Utilizados en el Proceso de Extracción de Metales por Solventes

Es importante considerar que no existe un sistema de extracción por solventes el cual sea universalmente aplicable a todos los tipos de metales y la selección de un sistema para un caso particular dependerá de las características deseables del proceso [7].

Los objetivos del diseño y operación de la extracción de metales por solventes son optimizar la eficiencia y productividad del sistema, minimizar los costos de capital y de operación y maximizar cualquier problema de contaminación ambiental.

Las consideraciones relacionadas con la operación de un sistema de extracción por solventes como un proceso unitario en la recuperación de metales son las que a continuación se indican:

- Constitución del mineral u otras fuentes metálicas.
- Metal(es) que va(n) a ser recuperados y nivel presente.
- Contaminación por otros metales y nivel presente.
- Tratamiento de las soluciones previo a la extracción por solventes (costo).
- Otras condiciones de alimentación (temperatura, pH, acidez/alcalinidad, presencia de sólidos, viscosidad).
- Velocidad de flujo.
- Temperatura de operación.
- Método de recuperación final, medio de despojamiento disponible y costo de éstos.
- Sitio de la planta.
- Facilidades para desechos y almacenamiento de refinado.
- Economía general.

Los factores más importantes involucrados en un sistema de extracción por solventes son las condiciones que prevalecen en la fase acuosa y la composición de la fase orgánica.

La Selección de los reactivos químicos de extracción por solventes dependerá de un análisis cuidadoso de los componentes de la fase orgánica [7].

La selección adecuada puede ser discutida bajo los siguientes factores:

- a). Extractantes
- b). Diluyentes
- c). Modificadores y Sinergistas

Extractantes. El extractante es un soluto orgánico que es la parte activa del solvente, esto significa que el solvente no es el causante directo de la operación de transferencia de masa.

Para la selección del extractante adecuado se deben tomar en cuenta las siguientes características:

- Selectividad. Es la primera propiedad que se estudia de ordinario para definir la aplicabilidad del extractante. Se define como la medida de extracción de una sustancia dada en relación con las demás, para alcanzar una mayor purificación y aprovechar al máximo su capacidad.
- Capacidad de extracción. La capacidad de extraer el soluto es una de las principales condiciones que debe poseer un extractante y se mide por el coeficiente de extracción y la capacidad de saturación.
- Solubilidad mutua. La solubilidad mutua debe ser muy baja para obtener adecuadas concentraciones de soluto y para evitar pérdidas de extractante que generalmente es recirculado.
- Recuperabilidad. En los procesos de extracción por solventes es

necesario separar de los productos el extractante. Esto no sólo es importante para evitar la contaminación de los productos con el extractante sino también para usarlo de nuevo.

- Estabilidad. El solvente debe ser altamente estable de modo que resista muchos ciclos de extracción-reextracción sin necesidad de tratamiento para eliminar los productos de degradación.
- Densidad, Tensión interfacial, Viscosidad. Estas tres propiedades intervienen en los fenómenos de dispersión y separación de fases, así como en las velocidades de flujo permisibles en los equipos continuos. Es deseable para un solvente: alta diferencia de densidades entre las fases, tensión interfacial apropiada para permitir la separación rápida. La viscosidad debe ser baja para efectos de bombeo, transmisión de calor, etc..
- Reactividad química. El extractante debe ser estable e inerte químicamente frente a los demás componentes del sistema y frente a los materiales de construcción.
- Inflamabilidad y Toxicidad. Se deben tomar muy en cuenta estas dos propiedades para evitar problemas de seguridad e higiene en su manejo. De una manera general, el grado de inflamabilidad y toxicidad debe ser bajo, de lo contrario se debe proveer la protección adecuada para ambos casos.
- Costo. El bajo costo y la fácil disponibilidad en cantidades suficientes, son atributos deseables en un extractante.

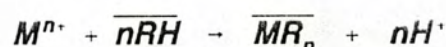
**Extractantes comerciales y su área de aplicación.**

Los extractantes pueden ser clasificados convenientemente de acuerdo al tipo de reacción con el metal que se va a extraer y esta clasificación caerá dentro

de los siguientes grupos:

- 1) Acídicos
- 2) Solvatantes
- 3) Quelatantes
- 4) Iónicos

Para un sistema de intercambio catiónico la reacción entre el extractante y el ión metal puede ser descrita como:

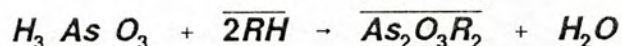


donde:

M = Ion metálico    n = valencia

RH = extractante

y las barras denotan la fase orgánica. En el caso del arsénico la reacción con el ácido arsénico y el ácido hidroxámico LIX 1104 será:



En este caso el cobre no es extraído en el extractante ácido, la única interferencia y que afecta la capacidad de carga, es el  $Fe^{3+}$ .

Schwab [8], menciona que el extractante tiene más afinidad por las especies de  $As^{3+}$  y  $As^{5+}$ . En cuanto al  $Fe^{3+}$  éste es fuertemente extraído en comparación del  $Fe^{2+}$ . En la etapa de despojamiento, en cuanto al arsénico la forma trivalente presenta mayores problemas que la pentavalente, mientras que el  $Fe^{3+}$  éste necesita condiciones con ácido clorhídrico para su despojamiento y un mayor tiempo de contacto. Schwab[8].

En los licores obtenidos por la lixiviación de los polvos del horno de fusión

instantánea se encuentran las especies tanto reducidas como oxidadas de  $\text{As}^{3+}$ ,  $\text{As}^{5+}$ . En base a algunas pruebas de extracción por solventes y en comunicación personal con el fabricante del extractante de HENKEL [9].

Para la operación comercial de un proceso de extracción por solventes, varios criterios tienen que ser expuestos con respecto a la selección del extractante:

- 1) Alta solubilidad en el diluyente orgánico y baja solubilidad en la fase acuosa.
- 2) Disponibilidad y costo del extractante.
- 3) Facilidad de recuperación del metal de la fase orgánica y regeneración del reactivo.
- 4) Formación de un complejo con el metal de interés y alta solubilidad de la especie órgano - metálica en la fase orgánica.
- 5) Selectividad de formación de la especie órgano - metálica con respecto a impurezas de la solución.

Los extractantes disponibles para arsénico que han sido propuestos para su utilización en operaciones hidrometalúrgicas, son: LIX 1104, CYANEX 923, CYANEX 925, TOPO (Oxido de trioctilfosfina), TBP (tributil fosfato). Para obtener una buena selectividad hacia el arsénico se requiere una alta concentración de ácido libre, aproximadamente 200 g/l  $\text{H}_2\text{SO}_4$  [6].

Actualmente un gran número de extractantes están disponibles o han sido propuestos para utilizarse en operaciones hidrometalúrgicas. En la Tabla 2.2 se muestran algunos ejemplos, su clasificación y su aplicación.

TABLA 2.2  
 APLICACIONES DE LA EXTRACCION POR SOLVENTES. [7]

Elemento	Solución de Alimentación	Solución Orgánica	Solución de Despojamiento	Tipo de Reacción
Berilio	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	DEHPA	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Iónica/Ácida
Arsénico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	LIX 1104	CuSO <sub>4</sub>	Ácida
Bromo	Salmuera	Tetrabrometano	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Solvatación
Cobre	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NH <sub>4</sub> OH - (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	LIX-622 LIX-64N	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Solvatación Quelación
Hafnio- Zirconio	HCl-HCNS HNO <sub>3</sub>	MIBK TBP	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O	Solvatación
Molibdeno	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Amina Terciaria	NH <sub>4</sub> OH	Iónica
Fósforo	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> -CaCl <sub>2</sub>	C <sub>4</sub> C <sub>5</sub> alcohol	H <sub>2</sub> O	Solvatación
Tungsteno	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Amina Secundaria Amina Terciaria	NH <sub>4</sub> OH NH <sub>3</sub> (NH <sub>4</sub> )SO <sub>4</sub>	Iónica
Uranio	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -HCl HNO <sub>3</sub>	DEHPA TBP	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O	Ácida Solvatación
Vanadio	HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -HCl	Amina Terciaria DEHPA	NH <sub>3</sub> -NH <sub>4</sub> Cl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Iónica Ácida
Cobalto/ Níquel	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Acido Versatic DEHPA	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácida
Oro	HCl/HNO <sub>3</sub> NaCN	MIBK DBBP	H <sub>2</sub> O	Solvatación

## SISTEMAS INVOLUCRADOS EN LA EXTRACCION POR SOLVENTES

### 1. Sistemas involucrando Formación de Compuestos:

#### a) Extractantes de Quelación:

Hidroximas  
Derivados Oxinas  
Kelex 100, Serie LIX, Acorga

#### b) Extractantes Acídicos:

LIX 1104  
CYANEX 923  
CYANEX 925

Organo Fosforosos

Acidos Carboxílicos - COOH

Acidos Sulfónicos - SO<sub>3</sub>H

### 2. Sistemas involucrando Asociación Iónica:

Extractantes Básicos	Aminas
Amina Primaria	RNH <sub>2</sub>
Amina Secundaria	R <sub>2</sub> NH
Amina Terciaria	R <sub>3</sub> N
Sales Amonio Cuaternarias	R <sub>4</sub> N <sup>+</sup>

### 3. Sistemas involucrando Solvatación:

Enlaces Carbón - Oxígeno

éteres	ésteres	alcoholes	cetonas(MIBK)
C - O - C	- COOR	- C-OH	C = O

Enlaces Oxígeno - Fósforo

ésteres alquil-fosfatos	TBP	(ROO) <sub>3</sub> P = O
ésteres alquil-fosfonatos	DBBP	R(RO) <sub>2</sub> P = O
ésteres alquil-fosfonatos	BDBP	(RO)R <sub>2</sub> P = O
ésteres alquil-fosfínicos	TOPO R <sub>3</sub> P	= O

$R = C_4H_9$  ,  $R = C_8H_{17}$  (TOPO)



## MODIFICADORES

Los alcoholes de cadena larga mejoran la separación de fases, así como también la solubilidad de algunas sales aminadas en queroseno. Varios alcoholes de cadena larga (tridecanol) insolubles en agua, y un número de compuestos organofosfóricos neutrales también se utilizan para evitar la formación de una tercera fase. En los compuestos organofosfóricos probados están incluidos algunos de los trialquilfosfatos, fosfonatos, fosfinatos y óxidos de fosfina.

Los reactivos modificadores generalmente se emplean como inhibidores de una tercera fase. Su acción es incrementar la solubilidad de la especie extraída en la fase solvente. Los modificadores también pueden ayudar a inhibir la formación de emulsiones. Sin embargo, como en el caso de los diluyentes, no se puede hacer una selección a priori. A diferencia de los diluyentes, los modificadores sí pueden influenciar las características de extracción y despojamiento del solvente orgánico. Los modificadores más comúnmente usados actualmente en escala comercial en los procesos de extracción por solventes se enlistan en la Tabla 2.3.

TABLA 2.3  
Modificadores

MODIFICADOR	GRAVEDAD ESPECIFICA	PUNTO DE EBULLICION °C	PUNTO DE EVAPORACION °C
2-Etilexanol	0.834	185	85
Isodecanol	0.840	220	104
Tributil Fosfato	0.973	178	193
P-Nonilfenol	0.940		

Referencia: Ritcey G.M. and Ashbrook A.W., "Solvent Extraction", Elsevier, Amsterdam (1984).

## DILUYENTES

Aproximadamente el 90% de la fase orgánica en el sistema de extracción por solventes está formado por el diluyente. Este es un compuesto inerte cuya función principal es actuar como acarreador o diluyente. Generalmente se utiliza queroseno como diluyente debido a su bajo costo y al alto punto de ignición, aun cuando pueden utilizarse otros compuestos orgánicos como el aceite combustible, el tolueno, el tetracloruro de carbono, o la mayoría de los productos derivados del petróleo. La selección del diluyente tiene un significativo efecto sobre el coeficiente de extracción [6].

En el proceso de extracción de metales por solventes el diluyente formando la fase orgánica ha jugado un rol pasivo, ya que es un medio propiamente acarreador para facilitar el contacto entre el extractante líquido muy viscoso y la solución acuosa.

El diluyente orgánico debe tener las siguientes características

- i) Disolver al extractante acomplejado y no acomplejado, después y antes de la reacción de extracción, respectivamente.
- ii) Tener una muy baja solubilidad en la corriente acuosa con el propósito de evitar pérdidas de orgánico.
- iii) Tener un punto de evaporación relativamente alto (sobre 150°F), para evitar peligro potencial de incendio.
- iv) Ser estable en un amplio intervalo de condiciones de operación.

Así en el caso de los extractantes catiónicos, el queroseno, ha venido a ser el diluyente más común utilizado originalmente.

Con los últimos desarrollos en las técnicas de extracción por solventes el diluyente ha jugado un papel mucho más importante en relación a su efecto sobre las propiedades del extractante, principalmente en el diseño del sistema de contacto y en general sobre la economía del proceso de extracción por solventes.

Dependiendo de su tipo, los diluyentes involucrados afectan la eficiencia del extractante (y a la vez el diseño óptimo del equipo) como sigue:

- i) Mejoran o bajan las características de selectividad del extractante:
- ii) Incrementan o disminuyen la cinética (rapidez de extracción y despojamiento) la cual podría afectar la cantidad de extractante requerido en el tamaño del mezclador y/o la energía requerida. Al mismo tiempo afectan la velocidad y posición de equilibrio y la cantidad de metal producido por cada paso;
- iii) Incrementa o disminuye la velocidad de separación entre las fases orgánica y acuosa lo cual afecta directamente en el tamaño del área de asentamiento.

En el sistema más ampliamente examinado (en la extracción de cobre por extractantes de tipo hidroxioximas) la principal influencia de la constitución química del diluyente hidrocarbonado es el % de moléculas aromáticas en el hidrocarburo. La presencia de moléculas aromáticas tiende a disminuir las características de carga del extractante y disminuye la eficiencia cinética a la vez que adversamente afecta la posición de equilibrio del sistema. Las moléculas aromáticas, sin embargo, son superiores a las parafinas y nafténicas en su habilidad para solubilizar el complejo cúprico. Su presencia también puede ayudar a mejorar la selectividad y posiblemente las características de separación de la capa de la interfase.

La selección del diluyente; o en esencia su composición física y química dependerá de las circunstancias involucradas (metal que se va a extraer, como extractante a utilizar y su concentración, pH del licor de lixiviación, equipo involucrado, etc.) y podría cambiar el proceso de un lugar a otro.

Algunos diluyentes disponibles comercialmente se enlistan en la tabla 2.4.

TABLA 2.4.- Diluyentes comerciales para extracción de metales

<b>Alta</b> <b>Aromaticidad</b>	Gravedad Específica 20°	Punto de Ebullición °C	Punto de Evaporación °C	Contenido de Aromaticidad %
Solvesso 100	0.876	157	44	99
Solvesso 150	0.985	188	66	97
HAN	0.933	181	41	89
Chevron 3	0.888	182	63	98
Chevron 25	0.875	158	46	99
Chevron 40L	0.886	182	61	78
Chevron 44L	0.893	186	68	70
<b>Media a baja</b> <b>aromaticidad</b>				
Escaid 100	0.790	191	76	20
Napoleum 470	0.811	210	79	12
<b>Baja</b> <b>Aromaticidad</b>				Contenido de Alifáticos %
Isopar L	0.767	190	62	93
Isopar E	0.723	110	20	99.9
Isopar M	0.782	208	78	80
Norpar 12	0.751	195	67	98
Shell 140	0.785	185	61	45
Shell MSM 210	0.783	-	75	45
DX 3641	0.793	182	60	52
Escaid 200	0.796	195	69	

Referencia: Bailes, P.J. and Hanson C., "Liquid-liquid extraction: Metals" McGraw Hill, Chem. Eng., Aug 30, 1976 [11]

### **III. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

### III. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para esta investigación se utilizaron los polvos del Horno de Fusión Instantánea de la Cía. Mexicana de Cobre.

#### 3.1 ANALISIS QUÍMICO Y CARACTERIZACION DE LOS POLVOS DEL HORNO DE FUSION INSTANTANEA.

Para conocer las diferentes especies minerales y porcentajes de los elementos que se encuentran asociadas en los polvos del horno de fusión instantánea se procedió a efectuar el análisis químico por fluorescencia de rayos X para obtener el porcentaje de cada elemento y por difracción de rayos X las especies minerales asociadas. Estas dos técnicas instrumentales son de gran importancia en la caracterización de minerales para seleccionar un proceso ya sea de flotación o de lixiviación; en base al contenido de minerales oxidados o sulfurosos y tipo de lixiviación a utilizar.

##### Análisis Químico por Fluorescencia de Rayos X

Se analizaron un total de siete muestras representativas de los polvos del horno de fusión instantánea. El método de fluorescencia se utilizó para comprobar otras técnicas analíticas como son absorción atómica y vía húmeda en la reproducibilidad de resultados, observándose que casi no existen diferencias entre métodos. Los resultados de fluorescencia de rayos X se dan en la Tabla 3.1.1.

Tabla 3.1.1 Análisis Químico de los Polvos del Horno de Fusión Instantánea de la Cía. Mexicana de Cobre

MUESTRAS (en %)							
Elemento	1	2	3	4	5	6	7
Al	2.0	3.0	3.0	2.5	2.6	3.7	3.2
S	1.6	12.5	13.9	12.0	15.2	18.3	21.9
Si	3.4	3.6	3.8	3.2	3.4	4.1	3.7
K	0.5	0.7	0.5	0.7	0.9	1.3	0.7
Ca	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Ti	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Fe	25.4	17.3	16.8	17.6	15.5	11.9	23.8
Cu	30.0	32.0	31.5	32.1	31.4	31.5	30.8
Zn	3.7	4.8	3.9	4.4	4.6	4.2	2.3
As	1.1	2.8	2.1	2.6	1.8	4.3	1.8

Difracción de Rayos X: Las especies cristalinas enlistadas en la tabla 3.1.2, se identificaron por difracción de Rayos X, en su totalidad son especies oxidadas, con alto grado de sulfatación; por ejemplo, especies oxidadas de cobre, hierro, y arsénico y sulfatadas.

El compuesto de arsénico no se detectó por Difracción de rayos X debido al alto rango de detección en el equipo.

Por técnicas microquímicas se indentifican las especies oxidadas de arsénico trivalente y pentavalente.

Tabla 3.1.2 Análisis Mineralógico de los Polvos del Horno de Fusión Instantánea de Cía Mexicana de Cobre

MUESTRAS (en %)								
NOMBRE	FORMULA	1	2	3	4	5	6	7
Calcocianita	CuSO <sub>4</sub>	0	10	10	10	12	18	30
Cuprita	Cu <sub>2</sub> O	6	18	15	21	23	19	0
Delafosita	CuFeO <sub>2</sub>	27	40	26	27	27	21	0
Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	38	16	29	22	17	21	47
Tenorita	CuO	18	0	6	3	2	0	10
No Conocidos	-	0	0	0	0	0	0	5
Amorfos	-	11	16	14	17	19	21	8

Con solución de lixiviación se preparó, acondicionándose con ácido producto (sulfúrico concentrado) para obtener diferentes concentraciones de ácido libre en g/l. Esta acidez con que se acondicionan los polvos tiene la finalidad de formar el complejo de ácido arsénico y sulfato de cobre.

Las corridas experimentales para la lixiviación se llevaron a cabo en un reactor de vidrio de 2000 ml de capacidad, marca ACE Glass incorporated, con tapa de cuatro orificios, un agitador marca T Line Laboratory Stirrer, modelo 102, girando a 500-7500 rpm y un reóstato marca Staco Energy Products Co., entrada 120v, salida 0-120/140 V, 10 A, 50/60 Hz, tipo 3PN1010.

La figura 3.1 muestra un diagrama esquemático del sistema experimental utilizado; para los distintos análisis se tomaron muestras de solución a intervalos de tiempo de una hora. Las concentraciones de arsénico y cobre en solución fue obtenida por espectrofotometría de absorción atómica, utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin-Elmer, modelo 5000, con



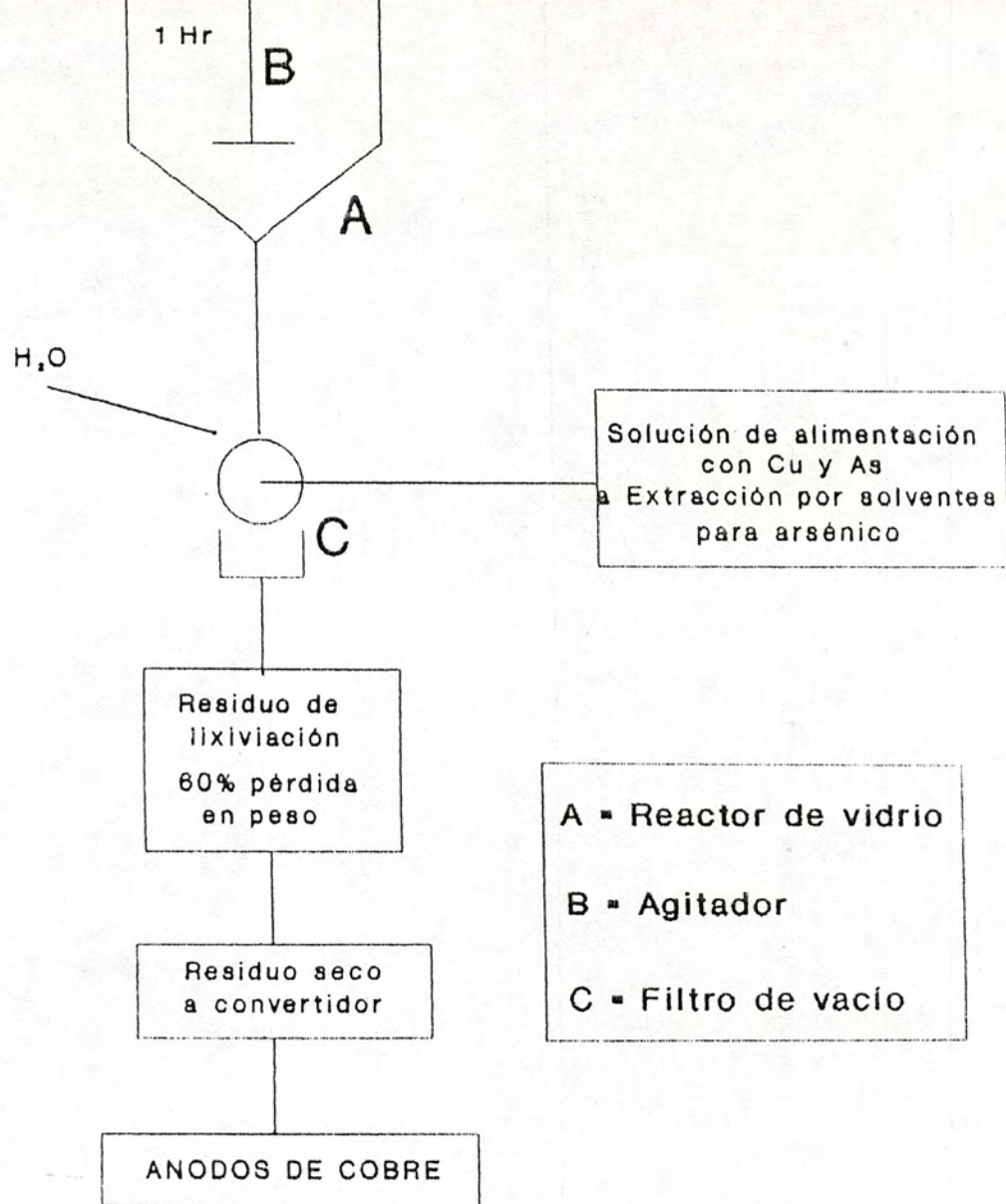


Fig. 3.1 Diagrama Esquemático del Sistema Experimental de Lixiviación

lámparas de descarga y cátodo hueco, utilizando para el arsénico llama de óxido nitroso-acetileno, y para cobre la llama de aire-acetileno. Para la determinación de la concentración de acidez libre, se usó el método del ferrocianuro de potasio, enmascarándose las sales hidrolizables [17].

Una vez determinado el proceso de lixiviación ácida, los licores fueron filtrados, se clasificaron según su acidez libre y pH para obtenerse así licores de alimentación al proceso de extracción y reextracción por solventes utilizando como extractante LIX 1104, tridecanol como desemulsificante y como diluyente Escaid 100.

Las primeras corridas experimentales se realizaron variando la relación de Orgánico-Acuoso y la concentración del LIX 1104, para posteriormente se seleccionó un diseño de experimentos para un mejor control de los diferentes parámetros en la extracción por solventes. Estas pruebas se realizaron en vasos de precipitado de 200, 400, 500, 1000, 2000 ml; para las distintas relaciones de O/A. La agitación se llevó a cabo con un agitador tipo turbina que cuenta con seis ranuras radiales, Fig. 3.2.

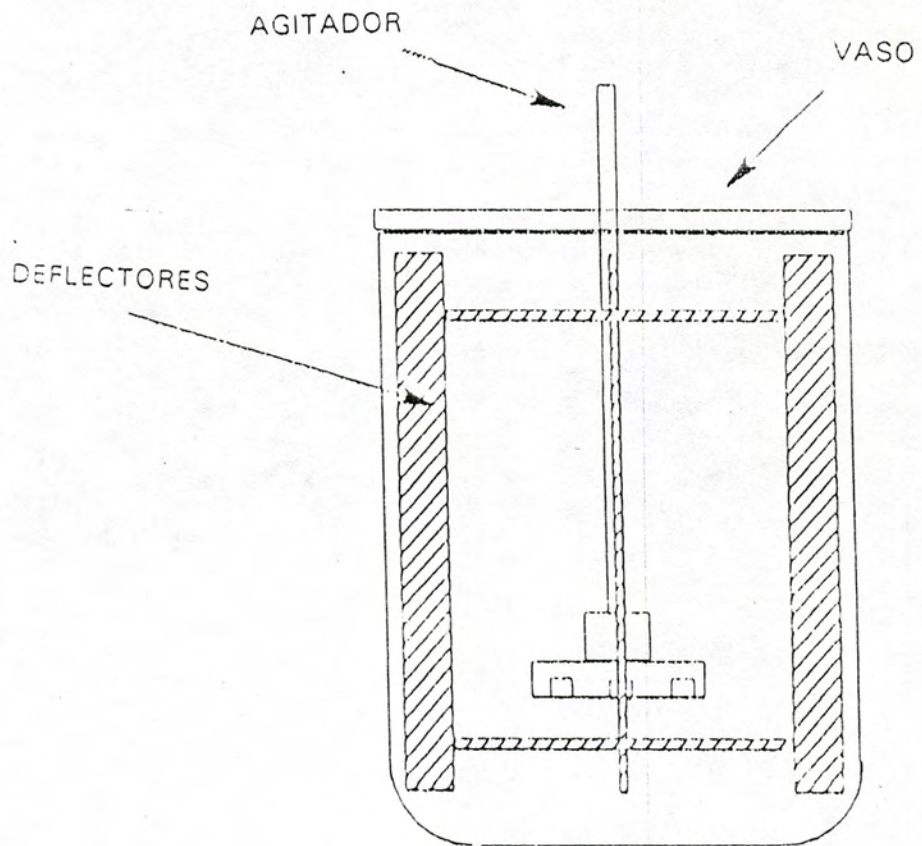


Fig. 3.2 Tanque de Lixiviación con Agitación

Los parámetros que se evaluaron en este trabajo fueron los siguientes:

A) Lixiviación ácida

- \* Velocidad de agitación  $V = 1600 - 2500$  rpm
- \* Concentración de ácido sulfúrico 0 - 10%
- \* Porcentaje de sólidos 10, 15, 20%

El tiempo de contacto se mantuvo constante en el resto de las evaluaciones (60 min).

B) En el proceso de extracción por solventes se investigaron las siguientes variables:

- \* Velocidad de agitación: 2000 rpm
- \* Acidez libre; 100, 200, 300 g/l de  $H_2SO_4$
- \* Relación acuoso/orgánico; (A/O): 2/1, 1/1, 1/2, 1/3, 1/5
- \* Tiempo de contacto: 10, 20 minutos
- \* Concentración del extractante: 20 y 40% LIX 1104
- \* Adición de un modificador (tridecanol) 0, 15%

## **IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA LIXIVIACION**

## 4.1 SOLUBILIDAD DE LOS POLVOS DEL HORNO DE FUSION INSTANTANEA EN AGUA

En esta prueba el objetivo principal fue determinar la solubilidad de los polvos del Horno de Fusión Instantánea en agua.

Los resultados obtenidos se muestran en la prueba No. 1.

### PRUEBA # 1

#### SOLUBILIDAD EN AGUA DEL ARSENICO Y COBRE DE LOS POLVOS

##### CONDICIONES PARA As y Cu

$V_{H_2O} = 100$  ml  
 $T = 80^{\circ}C$   
 $T = 60$  min  
Peso 1 gr  
Sin agitación  
pH inicial = 7.1  
pH con mineral = 2.3

##### Resultados Experimentales:

As soluble en  $H_2O = 41.6\%$   
Cu soluble en  $H_2O = 74.0\%$   
Fe soluble en  $H_2O = 1.2\%$

Arsénico en el residuo (analizado): As = 6.1%

### Balance de los polvos generados en el Horno de Fusión Instantánea.

Considerando una carga de alimentación de 80 Ton/Hr al Horno de Fusión Instantánea, se generan 134 Ton de Polvo/día que respresenta un 7% de la carga de alimentación. Estos polvos generados en el Precipitador Electrostático tienen un contenido de 2.4% As.

La cantidad de arsénico presente en estos polvos será  
 $(134.4 \text{ Ton/Día}) (0.024) = 3.23 \text{ Ton As/Día}$

Datos acerca de la lixiviación en agua.

Al realizar la lixiviación de los polvos con agua se tiene:

Reducción en peso = 60%

Reducción en sólidos = 40%

Extracción de arsénico = 2%

As en residuos sólidos = 98% del inicial presente

### Balance:

Residuos sólidos = 0.4 (134.4 Ton/Día)

Residuos sólidos = 53.76 Ton/Día

Cantidad de arsénico

en residuos =  $(3.23 \text{ Ton/Día}) (0.98) = 3.17 \text{ Ton As/día}$

$\% \text{ As en residuos} = \frac{(3.17 \text{ Ton/Día})}{(53.76 \text{ Ton/Día})} \times 100 = 5.90\% \text{ As}$

Residuos = 5.90% de Arsénico (calculado por balance)

## 4.2. SOLUBILIDAD DE LOS POLVOS DEL HORNO DE FUSION INSTANTANEA UTILIZANDO DIFERENTES LIXIVIANTES

**Objetivo.**- Extracción de arsénico y cobre de los polvos del Horno de Fusión Instantánea con diferentes mezclas de compuestos químicos como son: Hidróxido de amonio y Cloruro de amonio, Hidróxido de amonio y Nitrato de amonio, Hidróxido de amonio y sulfato de amonio,

Cloruro de potasio

Cloruro de sodio

Acido sulfúrico débil

Hidróxido de sodio - Sulfato de sodio

### PARTE EXPERIMENTAL

En un vaso de precipitado de 1000 ml, se agregaron los polvos del Horno de fusión Instantánea, con una relación sólido/líquido del 15%. Los resultados se resumen en la tabla 4.1.

### ANALISIS DE LOS RESULTADO OBTENIDOS

Todos estos compuestos lixiviantes tienen afinidad hacia el cobre y el arsénico. El principal es el carbonato de amonio que extrae un 73.8% de cobre y un 55.7% de arsénico y el que menos arsénico disuelve es el Nitrato de amonio.

Los cloruros de sodio y de potasio no son selectivos debido a la formación de subproductos de sulfato de sodio y potasio. La sosa cáustica disuelve selectivamente al arsénico sin extraer cobre cuya característica es debido a la formación de Hidróxido de cobre insoluble a pH alcalino y formando así un sulfuro de cobre, manteniéndose así la insolubilidad del sulfuro de cobre ( $K_{ps}$ ) y forman un complejo de tioarsenito de sodio [3].



Porcentaje de solubilización de As y Cu utilizando diferentes lixiviantes durante 60 minutos.

TABLA 4.1

Solución lixiviante	Conc. (Molar)	pH Inicial	%Extrac. Cu	%Extrac. As	pH Final
Hidróxido de amonio $\text{NH}_4\text{OH}$ Sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	3	10.6	56.5	3.5	10.7
Hidróxido de amonio $\text{NH}_4\text{OH}$ Nitrato de amonio $\text{NH}_4\text{NO}_3$	3	10.5	60.6	0.2	10.6
Hidróxido de amonio $\text{NH}_4\text{OH}$ Carbonato de amonio $\text{NH}_4\text{CO}_3$	3	10.7	73.8	55.7	10.8
Hidróxido de amonio $\text{NH}_4\text{OH}$ Cloruro de amonio $\text{NH}_4\text{Cl}$	3	10.7	64.0	0.3	10.9
Cloruro de potasio (KCl)	3	10.5	25.0	15.0	10.6
Cloruro de sodio (NaCl)	3	10.2	48.0	20.2	10.4
Acido débil ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )	1.0	1.2	97.0	95.0	1.3
Agua potable ( $\text{H}_2\text{O}$ )	-	7.2	60.0	4.0	3.8
Hidróxido de sodio NaOH Sulfuro de sodio $\text{Na}_2\text{S}$	2	12.2	0	25.0	12.4

#### 4.3 EFECTO DE LA CONCENTRACION DE REACTIVO EN LA LIXIVIACION ACIDA

##### Procedimiento experimental

En un vaso de precipitados de 2 litros se agregó el ácido débil y lentamente se dosificaron los polvos del horno de fusión instantánea; aumentando la velocidad de agitación a 2500 rpm por espacio de 1 hora, tomando las muestras correspondientes a intervalos de 10 minutos. Al término de 1 hr se concluía la lixiviación y se procedía a filtrar y lavar el residuo.

Midiéndose los volúmenes de las fracciones líquidas, analizando los licores en los diferentes intervalos de tiempo, el residuo sólido se procedía a secar en una estufa de desecación para seguidamente disgregarlo en un molino de anillos y así posteriormente se pesó el residuo para después analizarse para cobre, hierro y arsénico. En base a los análisis se hicieron los cálculos para la extracción sólida y líquida.

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestra cómo varía el porcentaje de extracción de cobre y arsénico, respectivamente, en función de los g/l de  $H_2SO_4$  libre. Si se aumentan los g/l de ácido sulfúrico libre se incrementa la extracción de cobre, arsénico. Es un factor importante el porcentaje de sólidos ya que esto conlleva a la saturación y la formación de los cristales de sulfato de cobre si se sobrepasa de una concentración de 90 - 100 g/l de dicho compuesto. Estos cristales tienden a formarse pues el límite de solubilidad del cobre es cercano a los 80 - 90 g/l.

El porcentaje de sólidos es del orden del 10 - 15% utilizando concentraciones de ácido de 90 g/l a 120 g/l para así obtener licores de 50 - 60 g/l de cobre. Esta característica nos permite que podamos llevar al cobre directamente a electrodeposición en hierro (14 g/l), pero con baja eficiencia de corriente debido al alto contenido, sin hacer una extracción por solventes para este elemento.

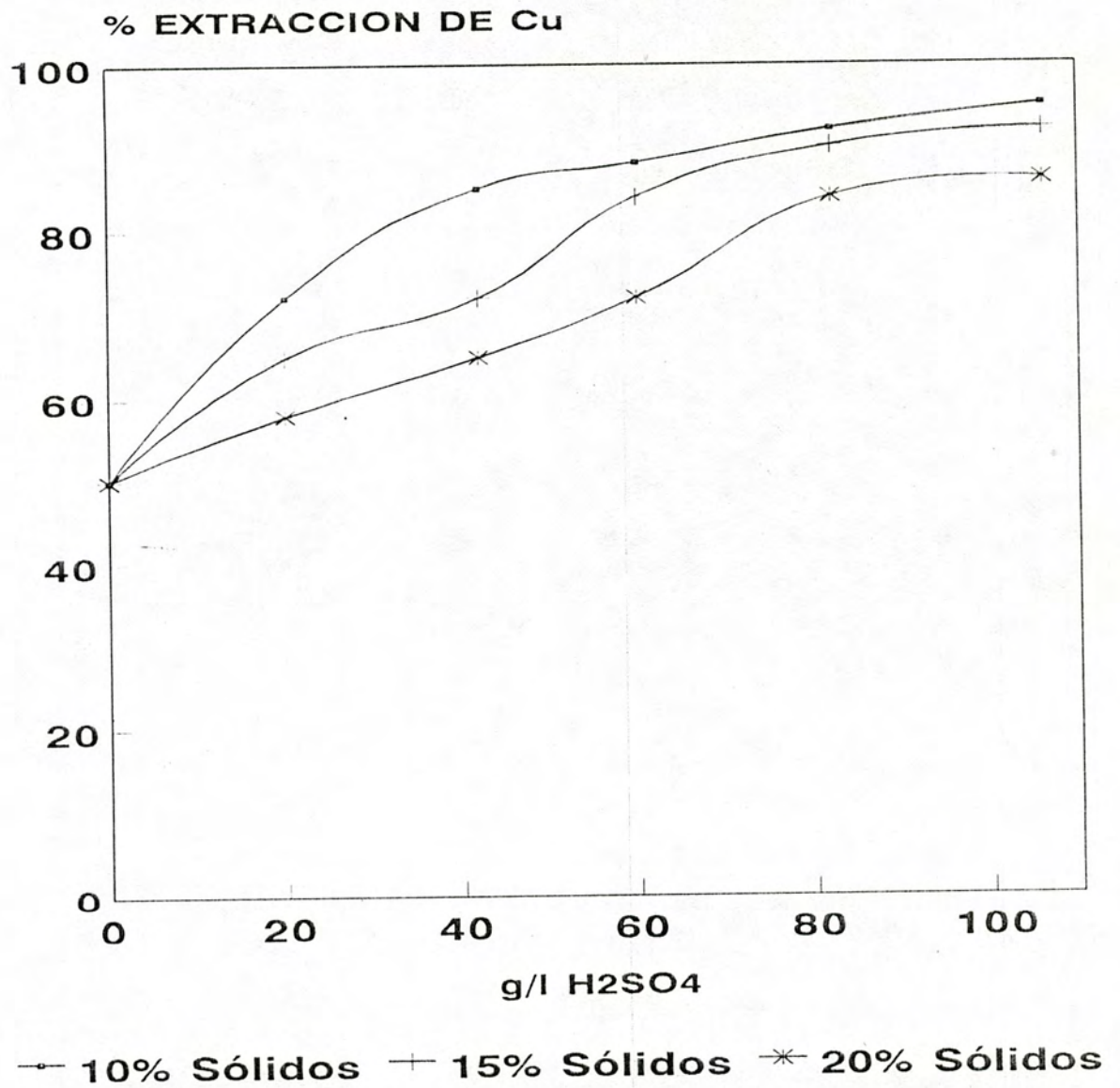
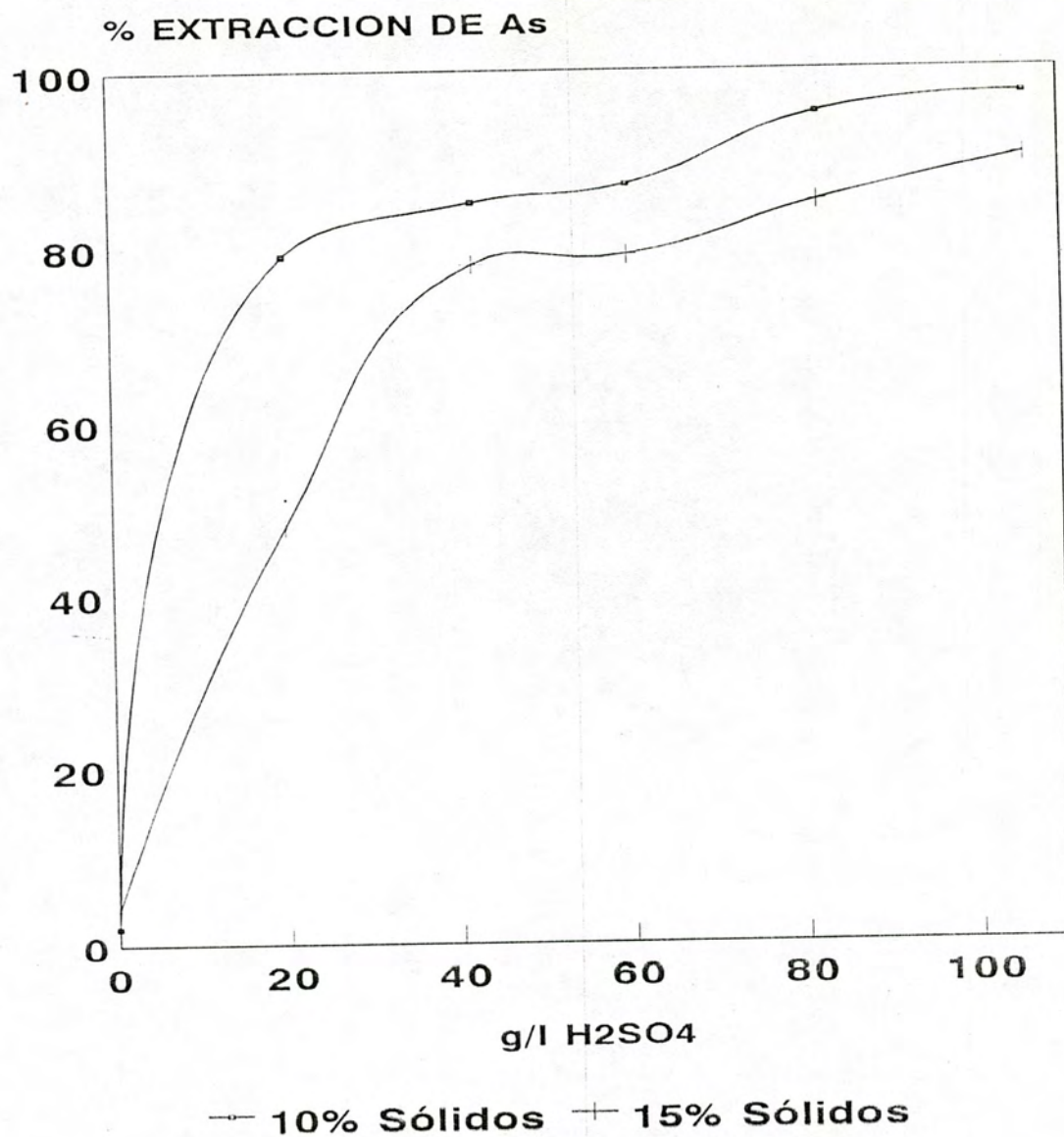


Fig. 4.1 Efecto de la variación de los g/l de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en el % de lixiviación de Cu en polvos HFI



**Fig. 4.2 Efecto de la variación de los g/l de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en el % de lixiviación de As en polvos HFI**

#### 4.4 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE AGITACION EN LA LIXIVIACION

Se hicieron varias pruebas a diferentes velocidades de agitación con el fin de determinar el efecto de esta variable, encontrándose que en un intervalo superior a 1200 rpm se obtienen buenos resultados en la lixiviación tanto desde el punto de vista de extracción de cobre, como de hierro y arsénico. Se tomó 2500 rpm como valor estándar para realizar algunas de las pruebas.

Los polvos del horno de fusión instantánea consisten en parte de cristales de sulfato de cobre (mineralógicamente conocido como calcocianita), que son muy solubles en agua, lo cual determina que a velocidades moderadas de agitación, se obtengan también buenos resultados. En algunas pruebas se corrieron a 1500 rpm, obteniéndose así resultados idénticos que a velocidades de agitación mas altas.

#### 4.5 PORCENTAJE DE SOLIDOS EN LA LIXIVIACION

Estas pruebas se realizaron variando la relación sólido: líquido para observar el comportamiento del porcentaje de sólidos comenzando con 10, 15, 20 y 50%; comprobando así que a un 20 y 50% de sólidos, se forman los cristales de sulfato de cobre, lo cual se debe a la saturación de la solución. No se reporta en este estudio con el 50% de sólidos debido a la problemática antes mencionada. En base a esto se logró disminuir el porcentaje de sólidos entre los intervalos de 10, 15 y 20% ; lo que se observó que no se presentaba el fenómeno de saturación.

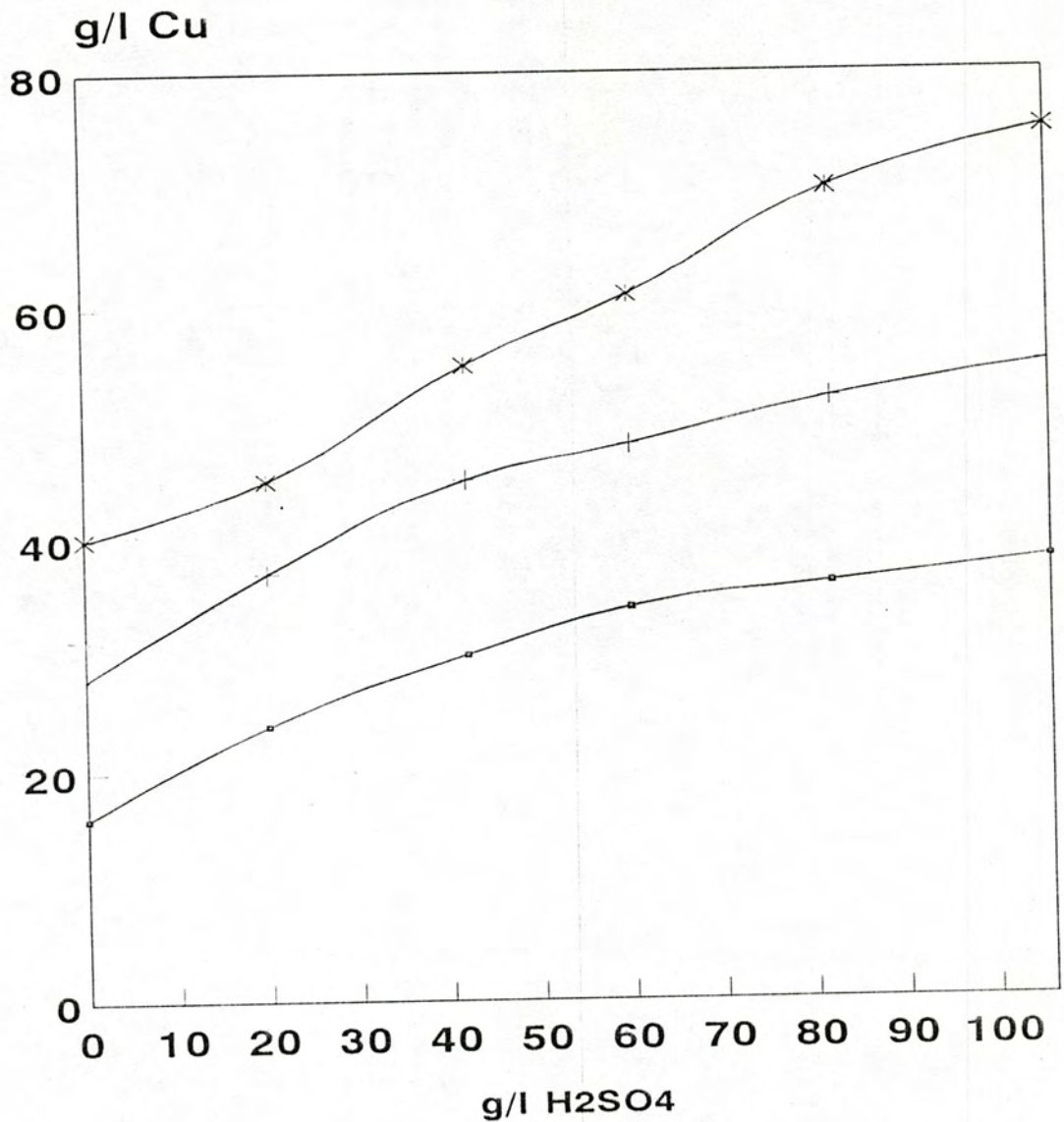
Entonces las extracciones con un menor porcentaje de sólidos se ven incrementados para cobre y arsénico, variando así alrededor de un 90 a 97 %.

Se comprobó una fuerte reducción en lo referente al peso de la pulpa inicial, con respecto al residuo final lo cual se observó una pérdida del 60% siendo esta una característica en el peso, una ventaja para el proceso ya que si se va a

reciclar al horno el residuo, la carga es mucho menor y el contenido de arsénico disminuye.

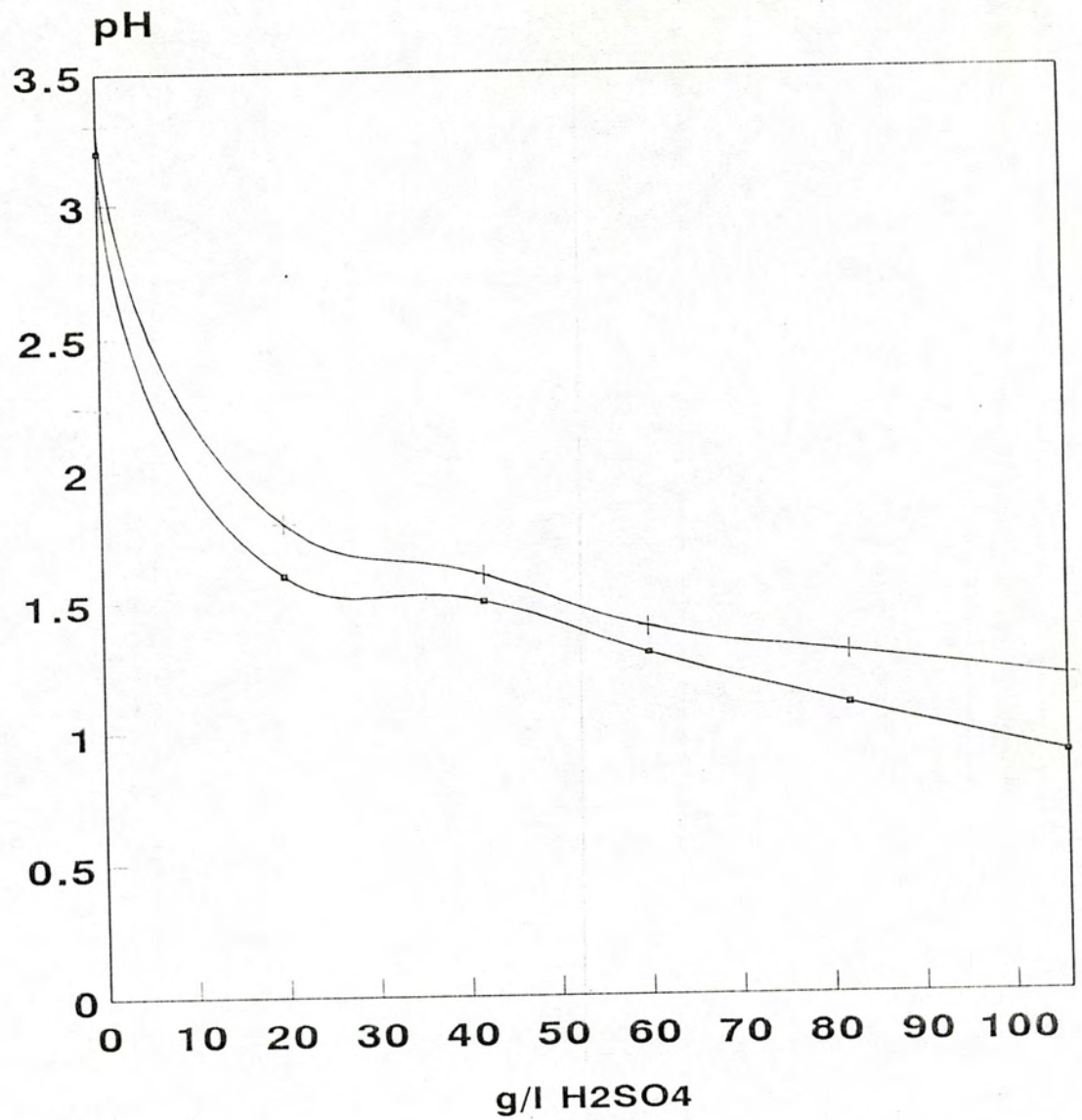
En la figura 4.3 se puede observar el efecto de la concentración inicial de la g/l de  $H_2SO_4$  sobre el % de extracción de cobre, observándose que a mayor concentración se obtiene mayor extracción. Los valores típicos de la concentración de cobre con 10% de sólidos es de 35 g/l Cu y 106 g/l de  $H_2SO_4$ , 15% de sólidos y 106 g/l de  $H_2SO_4$  se tienen valores de 50 g/l, y de 20% se sólidos se tiene una concentración de cobre de 75 g/l.

La figura 4.4 se observa el comportamiento del pH final con respecto a su concentración inicial de ácido sulfúrico y se puede ver que los valores requeridos de pH 1.5 - 2.0, se obtienen al utilizar de 20 a 30 g/l de  $H_2SO_4$ . Las curvas de 10% de sólidos y 15% son casi iguales. Al terminar la lixiviación se comprobó que el pH no pasó de 1.3 y la acidez libre se conservó en 80 g/l con un consumo de ácido libre en la lixiviación de 25 g/l.



—□— 10% Sólidos    —+— 15% Sólidos    —\*— 20% Sólidos

Fig. 4.3 Efecto de la variación del % de sólidos con los g/l de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



—■— 10% Sólidos —+— 15% Sólidos

Fig. 4.4 Efecto de la variación de los g/l de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en el pH a 10 y 15% de sólidos



#### 4.6 ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA LIXIVIACION

Los resultados de lixiviación indican que al disolver los cristales de calcocianita con agua se logra extraer el 50% del cobre; combinando el ácido débil con los polvos del horno de fusión instantánea se encontraron las condiciones experimentales para las siguientes variables:

i) Acidez libre de la solución lixivante afecta directamente proporcional en la extracción de cobre y arsénico, encontrándose una concentración óptima de 90-106 g/l de  $H_2SO_4$ .

ii) El porcentaje de sólidos influye en proporción inversa a la extracción. El mejor valor se encontró entre 10-15% de sólidos, intervalos en el cual se mantienen altas las concentraciones de cobre y arsénico en el licor de lixiviación.

iii) Tiempo de contacto requerido es de 60 minutos, considerando que la disolución de cobre y arsénico ocurre en los primeros 30 minutos.

iv) Velocidad de agitación, influye en forma directamente proporcional a la extracción de cobre y arsénico, teniéndose a 1600 rpm el valor adecuado.

El porcentaje de extracción principalmente depende de la concentración de acidez libre y del porcentaje de sólidos. Utilizando 100 g/l de  $H_2SO_4$  y 15% de sólidos, se obtuvieron extracciones para cobre del orden de 90-93% y para arsénico entre 93-97%.

Aprovechando el alto grado de sulfatación de los polvos, se procedió a lixiviarlos con agua, lográndose extracciones del 50% para cobre y 10% para arsénico.

Utilizando el subproducto de ácido débil para lixiviar los polvos, se puede observar que con 20 g/l de ácido sulfúrico libre se obtienen extracciones que van del orden de 68-72% para cobre y de 50-70% para arsénico, quedando un pH final de 1.3.

En función de los resultados obtenidos en el laboratorio, se procedió a lixiviar con ácido débil, acondicionándolo con ácido sulfúrico producto para obtener el nivel de acidez libre apropiado.

Una vez que se tiene el control de estas variables de lixiviación, se obtienen concentraciones de cobre de 60 g/l en la solución rica, apropiadas para llevar a cabo una depositación electrolítica. El problema se presenta por los altos niveles de arsénico y hierro, pero se busca solucionarlo realizando estudios de extracción por solventes para estos dos elementos.

**V. RESULTADOS EXPERIMENTALES  
DE LA EXTRACCION DE ARSENICO  
POR SOLVENTES**

## 5.1 PRUEBAS PRELIMINARES PARA BASE DE UN DISEÑO DE EXPERIMENTOS.

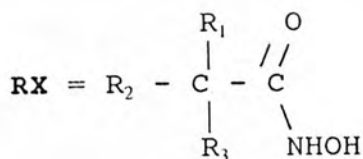
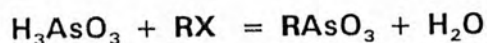
El proceso de extracción por solventes es una técnica de primordial importancia en la purificación y concentración de metales a partir de soluciones acuosas.

De acuerdo a las características de la solución de ácido débil, es posible combinar dos circuitos de extracción: uno para arsénico y el otro para cobre.

En primera instancia, se propone que se haga la extracción del arsénico, considerando que se tienen altas concentraciones de ácido sulfúrico ( $\text{pH} < 1$ ), lo cual resulta inconveniente para la extracción de cobre. Esto es analizando las isotermas de pH vs. carga en varios solventes orgánicos como es el caso de los extractantes acídicos (DEHPA) y de quelación (LIX 84, LIX 622).

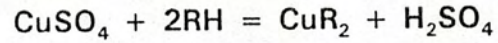
Se han propuesto varios extractantes para la extracción de arsénico: LIX 1104, CYANEX 923, TBP (tributilfosfato) y TOPO (óxido de tri-octil fosfina)). En pruebas preliminares de laboratorio, utilizando embudos de separación, se ha utilizado LIX 1104 para arsénico y LIX 622 para cobre de acuerdo al diagrama de bloques de la Fig.5.1 y en base a las siguientes reacciones [8], [10]:

i) Extracción de arsénico utilizando LIX 1104



ácido hidroxámico

ii) Extracción de cobre utilizando LIX 622



RX = dodecilsalicilaldoxima

PRUEBA #1

### EXTRACCION POR SOLVENTES

Experimentación

Solución de la pila de ácido débil

Licor de alimentación

Análisis químico

$\text{Cu}_T = 2800 \text{ mg/l}$

$\text{Fe}_T = 3000 \text{ mg/l}$

$\text{As}_T = 2200 \text{ mg/l}$

$\text{H}_2\text{SO}_4\text{-L} = 32.8 \text{ g/l}$

pH = 1.3

Primera etapa para extracción de arsénico

Relación de fases O/A = 1/1

Tiempo de contacto = 5 min

Temperatura ambiente

Concentración de reactivo = 20% LIX 1104

**Solución acuosa de salida:**

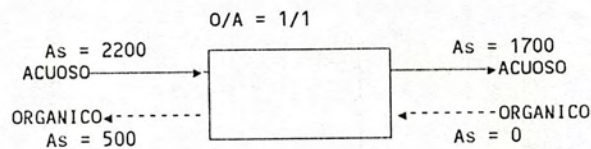
$$\text{Cu}_T = 2800 \text{ mg/l}$$

$$\text{Fe}_T = 870 \text{ mg/l}$$

$$\text{As}_T = 1700 \text{ mg/l}$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4\text{-L} = 12.5 \text{ g/l}$$

**Balance de masa de la primera etapa de extracción de arsénico por solventes:**



$$V_A(2200 - 1700) = V_o(x - 0)$$

$$V_A = 1$$

$$V_o = 1$$

$$x = 500 \text{ mg/l As}$$

**Primera etapa para despojamiento (Reextracción) de arsénico**

$$\text{Relación de fases O/A} = 4/1$$

$$\text{Tiempo de contacto} = 5 \text{ min}$$

Temperatura ambiente

**Solución acuosa de salida:**

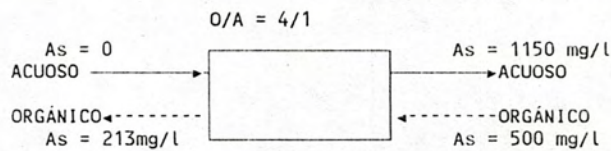
$$\text{Cu}_T = 2200 \text{ mg/l}$$

$$\text{Fe}_T = 20 \text{ mg/l}$$

$$\text{As}_T = 1150 \text{ mg/l}$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4\text{-L} = 4.2 \text{ g/l}$$

**Balance de masa de la primera etapa para reextracción de Arsénico**



$$V_o(500-x) = V_A(1150-0)$$

$$4(500-x) = 1(1150)$$

$$2000 - 4x = 1150$$

$$x = \frac{2000 - 1150}{4} = 213$$

$$x = 213 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{ As}$$

**Segunda etapa para despojamiento de arsénico**

Relación de fases O/A = 4/1

Tiempo de contacto = 5 min

Temperatura ambiente

Solución de despojamiento = agua destilada

**Solución acuosa de salida:**

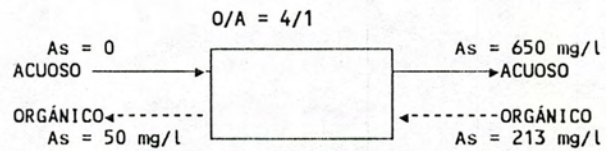
$$\text{Cu}_T = 20 \text{ mg/l}$$

$$\text{Fe}_T = 0.1 \text{ mg/l}$$

$$\text{As}_T = 650 \text{ mg/l}$$

$$\text{H}_2\text{SO}_4\text{-L} = 2.4 \text{ g/l}$$

**Balance de masa de la segunda etapa para reextracción de Arsénico**



$$v_o(213-x) = V_A(650-0)$$

$$4(213-x) = 1(650)$$

$$852-x = 650$$

$$x = \frac{852-650}{4} = 50.5$$

$$x = 50.5 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{ As}$$



**Primera etapa para extracción de cobre**

Relación de fases O/A = 1/1

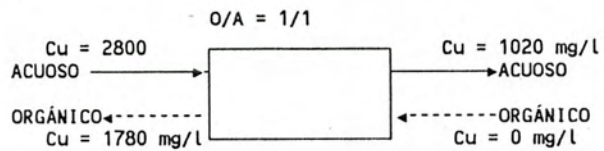
Tiempo de contacto = 4 min

Temperatura ambiente

Concentración de reactivo = 7 v/o LIX 622

Entrada	Salida
$Cu_T = 2800 \text{ mg/l}$	1020 mg/l
$Fe_T = 870 \text{ mg/l}$	860 mg/l
$As_T = 1700 \text{ mg/l}$	1650 mg/l
$H_2SO_4 = 12500 \text{ mg/l}$	16420 mg/l

Balance de masa de la primera etapa de extracción de cobre por solventes:



$$V_o(x - 0) = V_A(2800 - 1020) \quad V_o = 1$$

$$x = 1780 \text{ mg/l Cu} \quad V_A = 1$$

**Primera etapa para despojamiento de cobre**

Relación de fases O/A = 1/1

Tiempo de contacto = 4 min

Temperatura ambiente

Solución de despojamiento = 15 v/o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (= 276 g/l)  
SG = 1.84

**Acuoso de salida:**

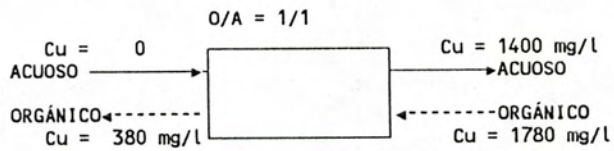
Cu<sub>T</sub> = 1400 mg/l

Fe<sub>T</sub> = 50 mg/l

As<sub>T</sub> = 100 mg/l

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 255 g/l

**Balance de masa de la primera etapa de despojamiento de cobre:**



$$V_o(1780-x) = V_A(1400 - 0) \quad V_o = 1$$

$$x = 380 \text{ mg/l Cu} \quad V_A = 1$$

## PROCESOS DE EXTRACCION POR SOLVENTES

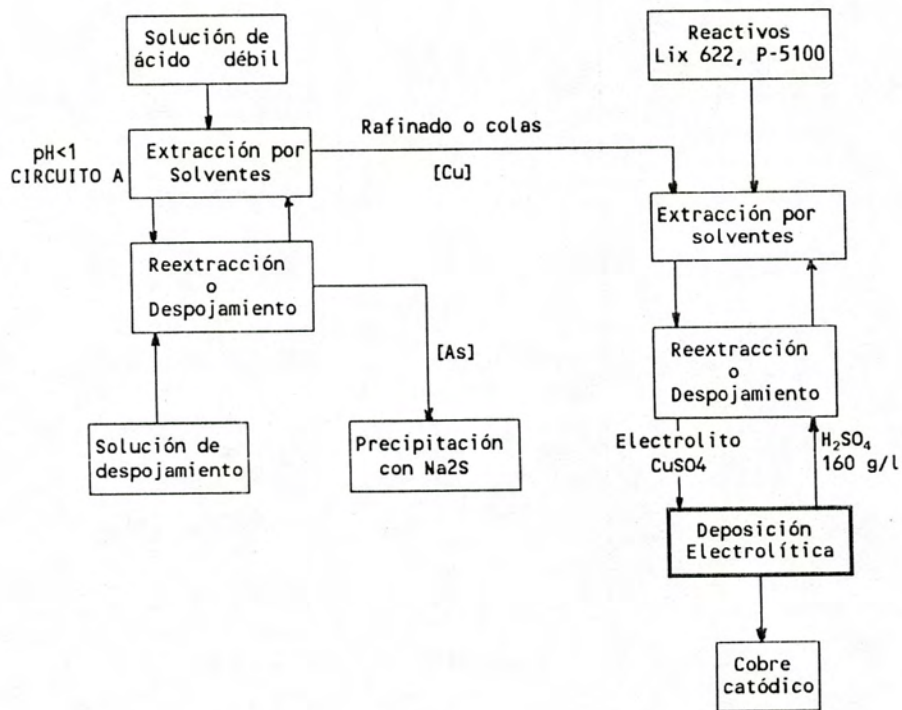


Fig. 5.1 Proceso de extracción por solventes aplicado a soluciones ácidas cupríferas contaminadas

**TABLA 5.1**  
**Resumen de datos experimentales**

[mg/l]	Cu	Fe	As	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
<b>Extracción /LIX 1104</b>				
Alimentación	2800	3000	2200	32800
Rafinado	2800	870	1700	12500
<b>Primera etapa de Reextracción /LIX 1104</b>				
Orgánico cargado	0	2130	500	
Orgánico despojado	-	2120	213	
Acuoso de salida	-	20	1150	4170
<b>Segunda etapa de reextracción /LIX 1104</b>				
Orgánico cargado	0	2120	213	
Orgánico despojado	-	2120	50	
Acuoso de salida	-	0.1	650	2400
<b>Extracción /LIX 622</b>				
Alimentación	2800	870	1700	12500
Rafinado	1020	860	1650	16420
<b>Reextracción /LIX 622</b>				
Orgánico cargado	1780	10	50	
Orgánico despojado	380	-	-	
Electrólito rico	1400	50	100	255 000

De acuerdo a los estudios preliminares es necesario realizar un programa de Pruebas de Laboratorio que deberá incluir las siguientes variables:

- i) Selectividad sobre el metal o compuesto de interés
- ii) % Extracción a diferentes condiciones
- iii) Relación de Fases Orgánico/Acuoso
- iv) Temperatura
- v) Cinética de extracción
- vi) Capacidad de carga

Para la evaluación de estas condiciones se hace necesario la obtención de Curvas de Equilibrio para cada uno de los extractantes así como los Diagramas de Equilibrio (de McCabe - Thiele) [6].

#### 5.1.1 Cinética de Extracción de arsénico utilizando LIX 1104.

Estas pruebas tienen la finalidad de encontrar el tiempo de contacto sin variar el porcentaje de extractante LIX 1104; y variando el porcentaje del modificador y teniendo una relación de fases de  $A/O = 1/1$ .

Los resultados experimentales se dan en la Fig. 5.1.1, donde se puede observar que en tiempos menores de 10 minutos sin modificador, el comportamiento es variable.

También en la Fig. 5.1.1 se observa un comportamiento más estable tanto para el análisis químico, como para su estabilidad en la separación de fases, cuando utilizamos el modificador al 15%.

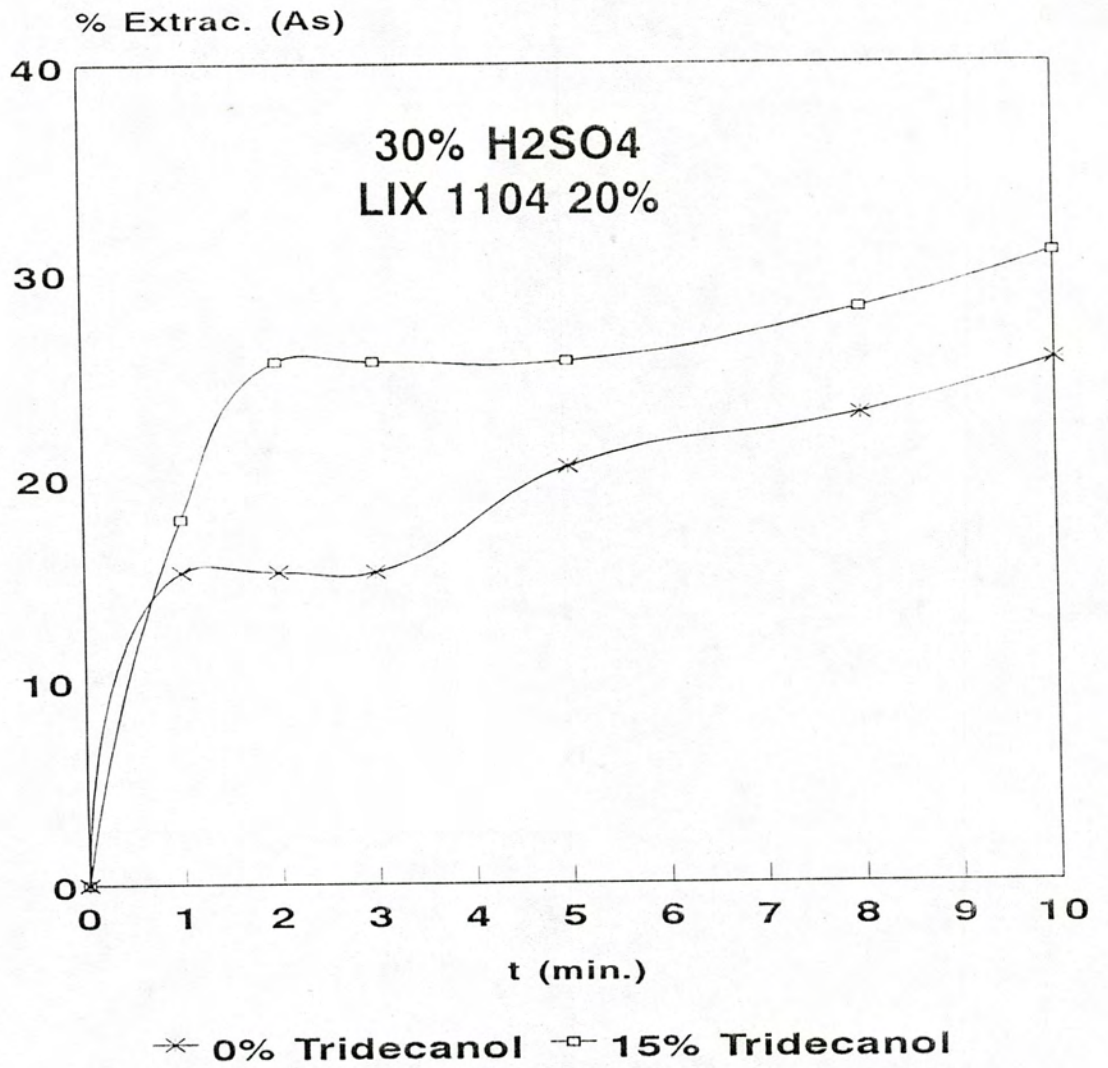
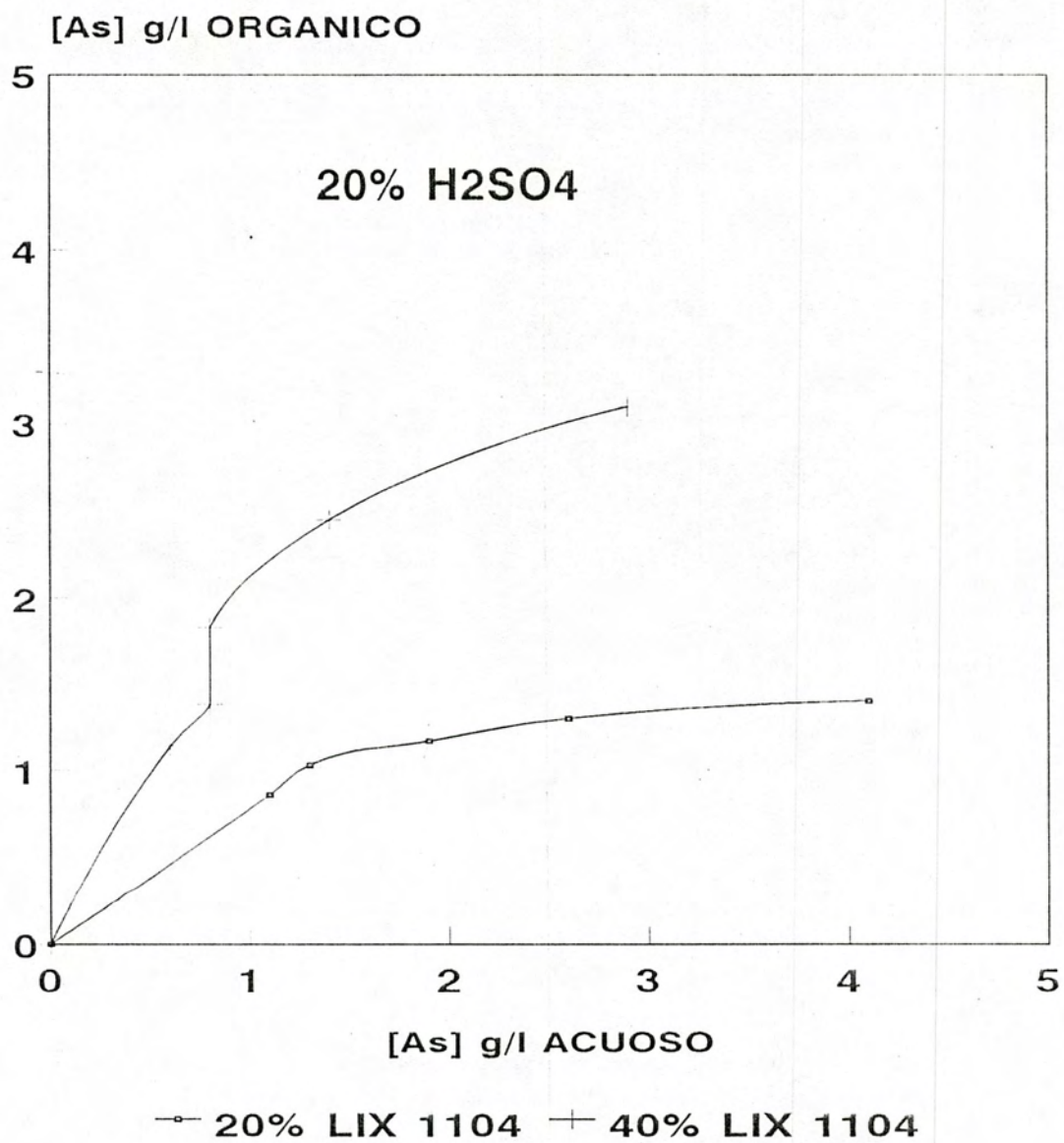


Fig. 5.1.1 Cinética de la extracción de Arsénico

### **5.1.2 DETERMINACION DE LA CURVA DE EQUILIBRIO PARA LA EXTRACCION DE ARSENICO CON EL EXTRACTANTE LIX 1104.**

Estas pruebas se realizaron variando la concentración del extractante del 20 al 40% LIX 1104 diluido en queroseno; sin modificador; variando la relación de A/O. El tiempo de contacto fue de 10 minutos. La acidez libre fue de 200 g/l de  $H_2SO_4$ ; esto se hizo con el fin de determinar el efecto de acidez libre con el extractante, lo cual se comprobó que a mayor acidez en el acuoso se ve favorecido el porcentaje de extracción de arsénico en las figura 5.1.2(b), se observa que el comportamiento de la isoterma de extracción tendría una aplicación más aceptable en cuanto al número de etapas teóricas que requeriría el proceso de extracción por solventes.

En la figura 5.1.2(a) el comportamiento es más hacia el eje del acuoso; lo cual implica un mayor número de etapas teóricas. La figura 5.1.2.(c) de la Isoterma de Extracción para arsénico nos representa que, al fijar las condiciones experimentales a 40% LIX 1104, 30% acidez y 15% Tridecanol, el comportamiento es más hacia el eje del orgánico, lo que viene a favorecer en el número de etapas requeridas.



**Fig 5.1.2(a) Isotherma de extracción para Arsénico**



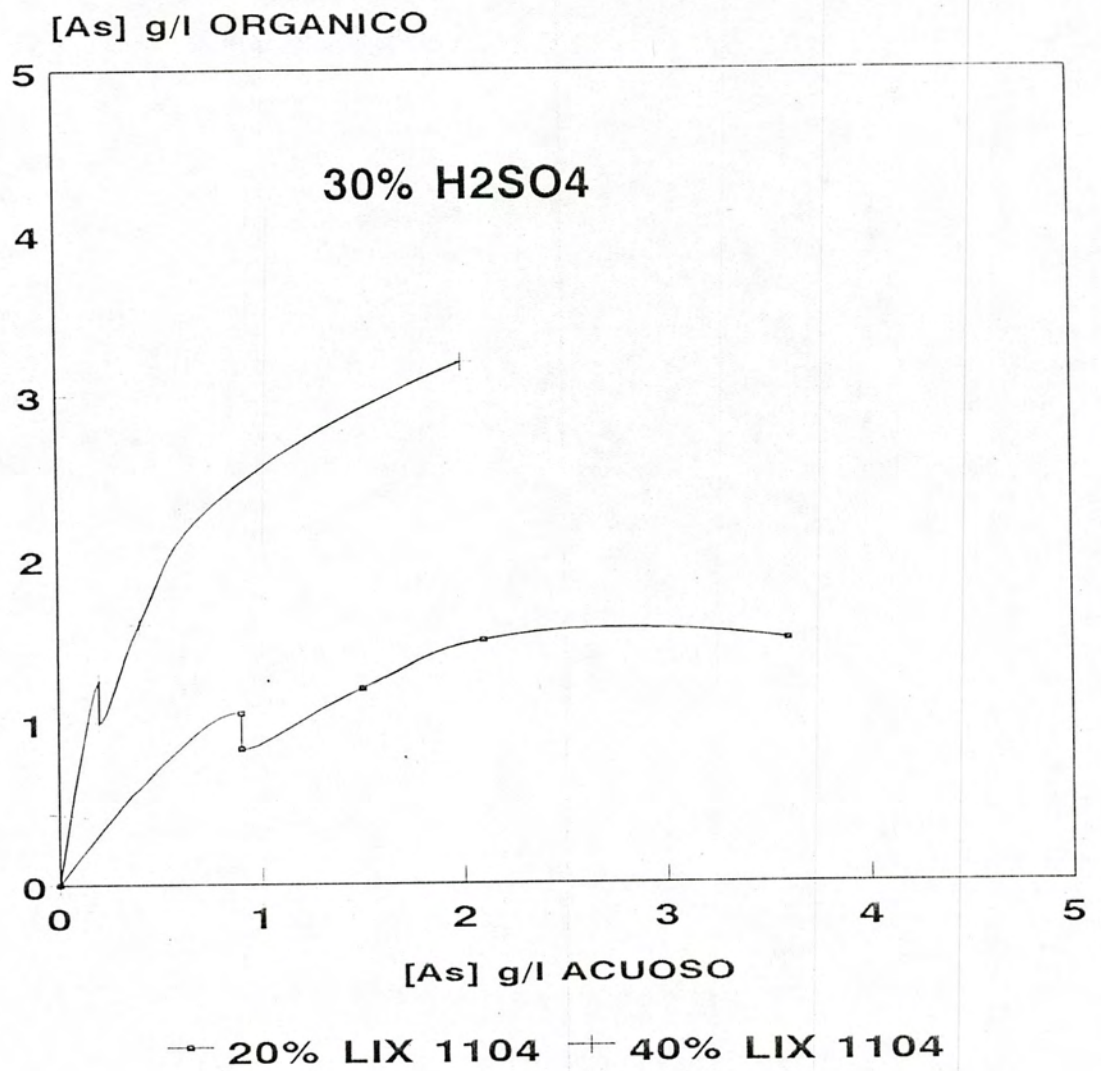


Fig. 5.1.2(b) Isotherma de extracción para Arsénico

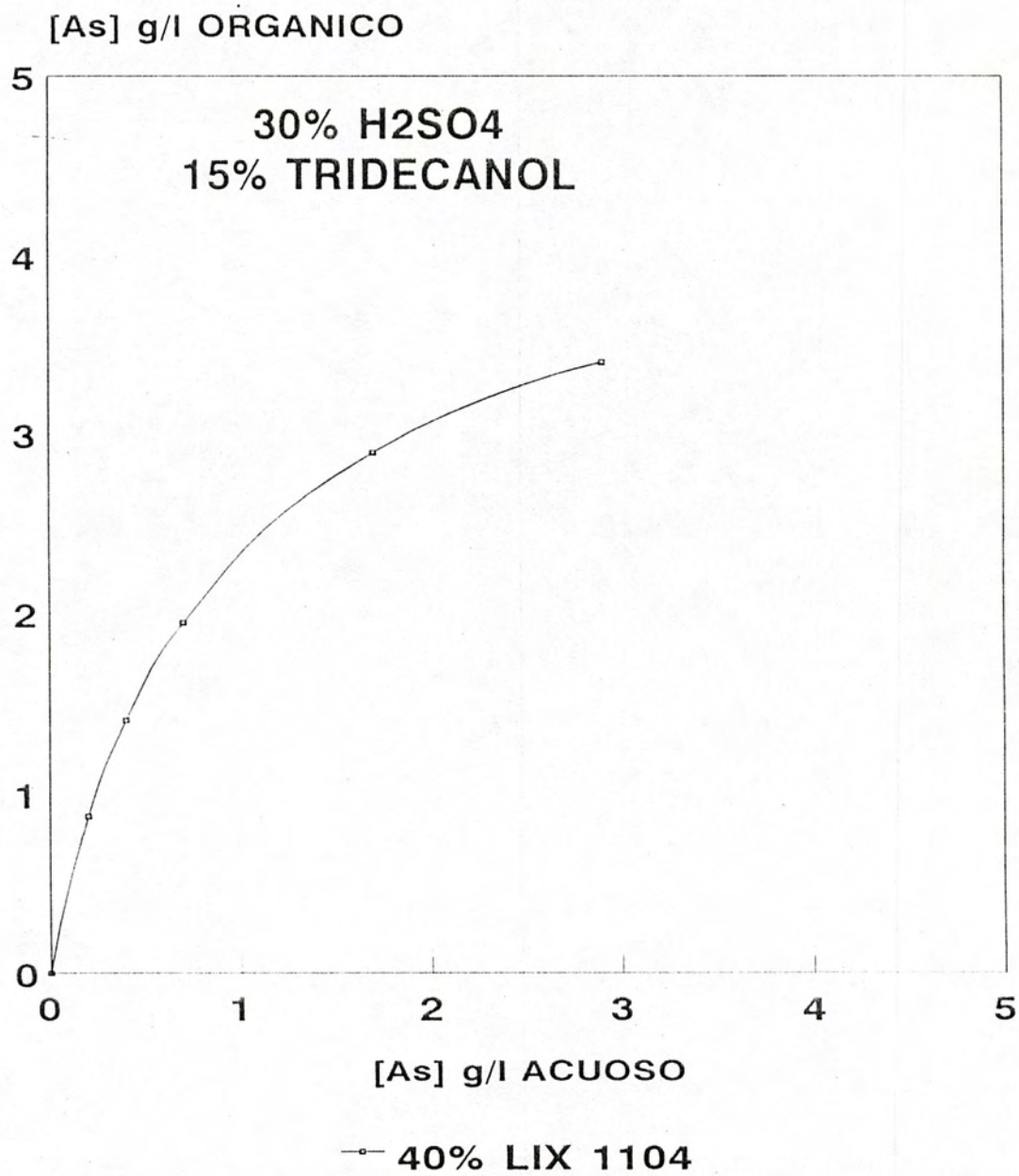


Fig. 5.1.2(c) Isotherma de extracción para Arsénico

### **5.1.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA EXTRACCION DE ARSENICO POR SOLVENTES**

Para tener una idea del efecto de la temperatura en la extracción del arsénico se procedió a calentar el acuoso a 30°C y 45°C se escogió una prueba a la temperatura ambiente de 20°C.

En la Fig. 5.1.3 con 200 g/l de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y una relación de fases de O/A = 5/1; se obtiene un 91.6% a 20°C, por lo tanto se puede observar que a menor temperatura se tiene un aumento en el porcentaje de extracción de arsénico y se tiene una disminución a 45°C. Esto puede deberse a que cuando se incrementa la temperatura, disminuye su viscosidad y en esta forma no es competitivo para la extracción de arsénico.

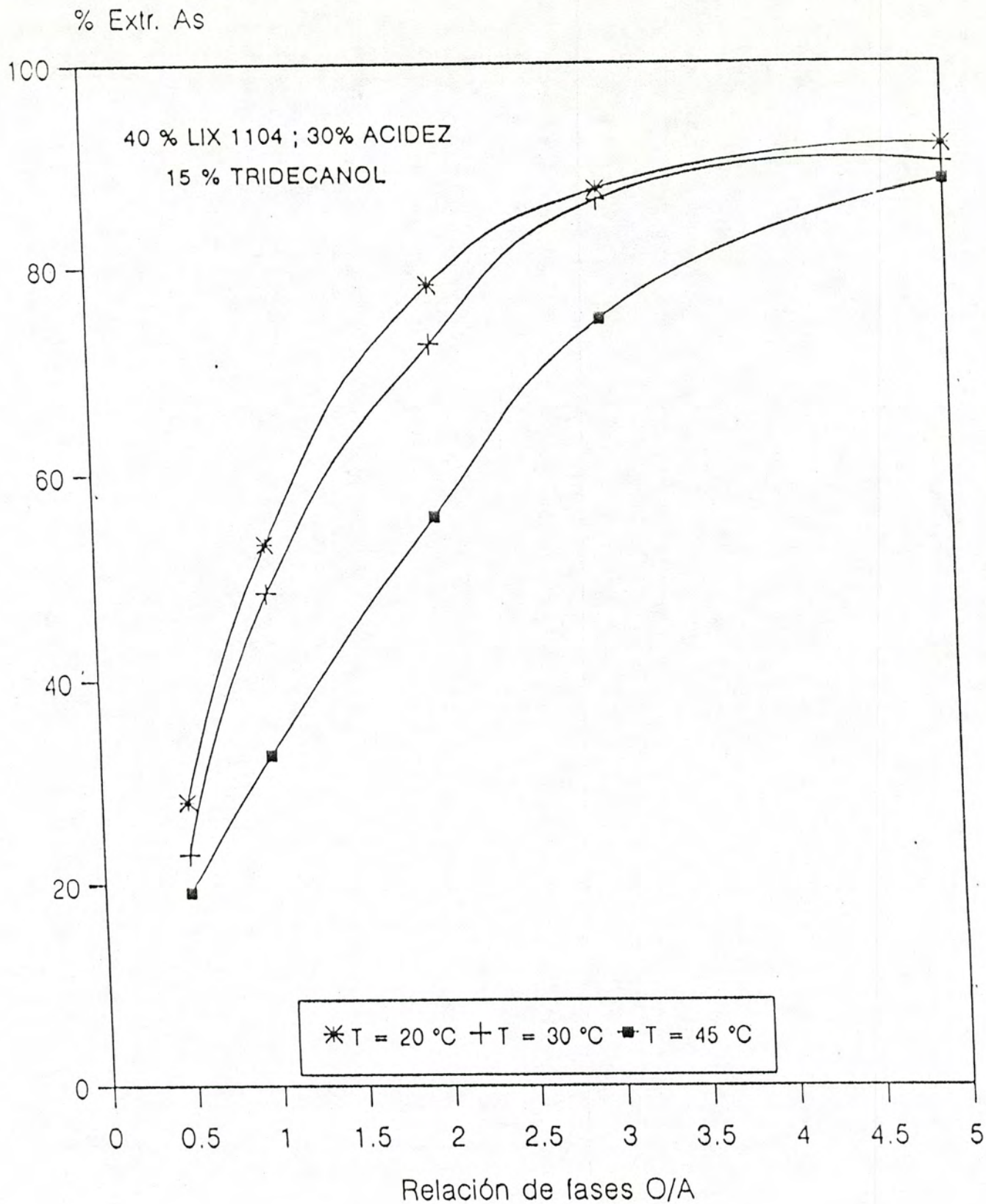


Fig.-5.1.3 ; Efecto de la temperatura en la extracción de arsénico por solventes.

#### 5.1.4 Diagrama de McCabe-Thiele

Una vez que se tuvieron las isotermas de equilibrio y analizado las mejores curvas, se procedió a construir los diagramas de McCabe-Thiele, éstos nos sirven para encontrar las etapas requeridas en un sistema de extracción.

En la figura 5.1.4(a) se puede observar que a partir de la curva de equilibrio con una alimentación de arsénico de 5.2 g/l y 40% del extractante; se obtuvo una relación de  $A/O = 3/4$  de pendiente lo cual nos dio tres etapas de extracción utilizando una acidez de 300 g/l y sin modificador.

En la figura 5.1.4(b) con 20% del extractante, 15% del modificador y 100 g/l de  $H_2SO_4$  con una solución de  $A/O = 1/1$ , dio un total de 5 etapas de extracción.

Figura 5.1.4(c); con 40% del extractante, 15% del modificador y 100 g/l de  $H_2SO_4$  con relación de  $A/O = 1/3$ ; da tres etapas de extracción.

Figura 5.1.4(d); con 40% del extractante 15% del modificador y acidez de 200 g/l con relación de  $A/O = 1/2$  da un total de tres etapas de extracción.

Figura 5.1.4(e) con 40% de extractante y 15% del modificador y 300 g/l de  $H_2SO_4$ ; da un total de dos etapas utilizando la relación de  $A/O = 1/2$ .

Como se puede observar que la línea de operación  $A/O$ ; nos varía con respecto a la alimentación. Es necesario tener una alimentación constante de  $A/O$  para evitar este problema.

Analizando todos los diagramas de McCabe Thiele; se puede decir que existe una fuerte tendencia hacia la acidez y al modificador. Se podría trabajar ya sea con una solución de  $A/O = 1/2$  con dos etapas o  $A/O = 1/1$  con cinco etapas.

Esto se puede analizar en planta piloto.

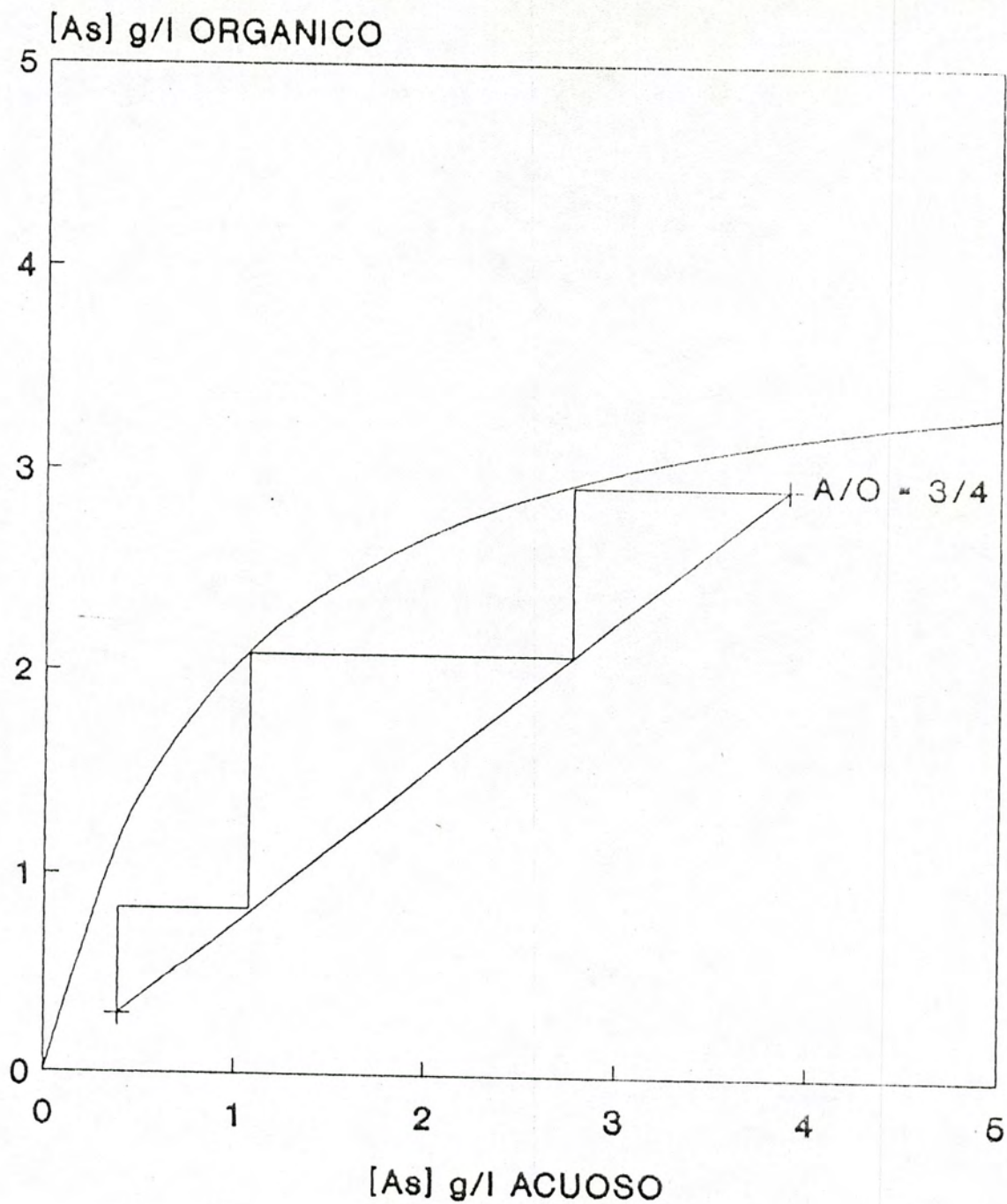


Fig. 5.1.4(a) Diagrama de McCabe Thiele para arsénico utilizando LIX 1104

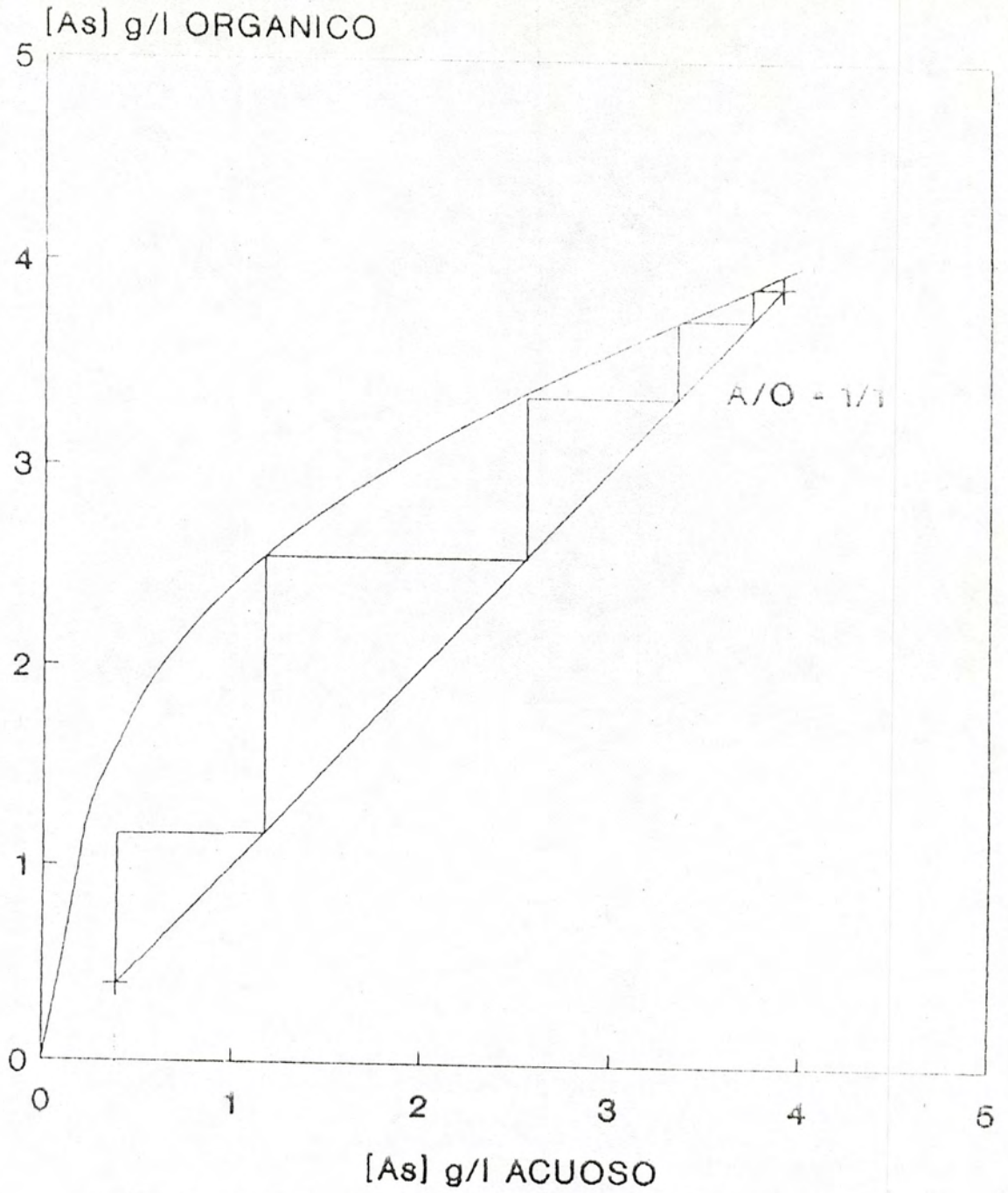


Fig. 5.1.4(b) Diagrama de McCabe Thiele para arsénico utilizando LIX 1104

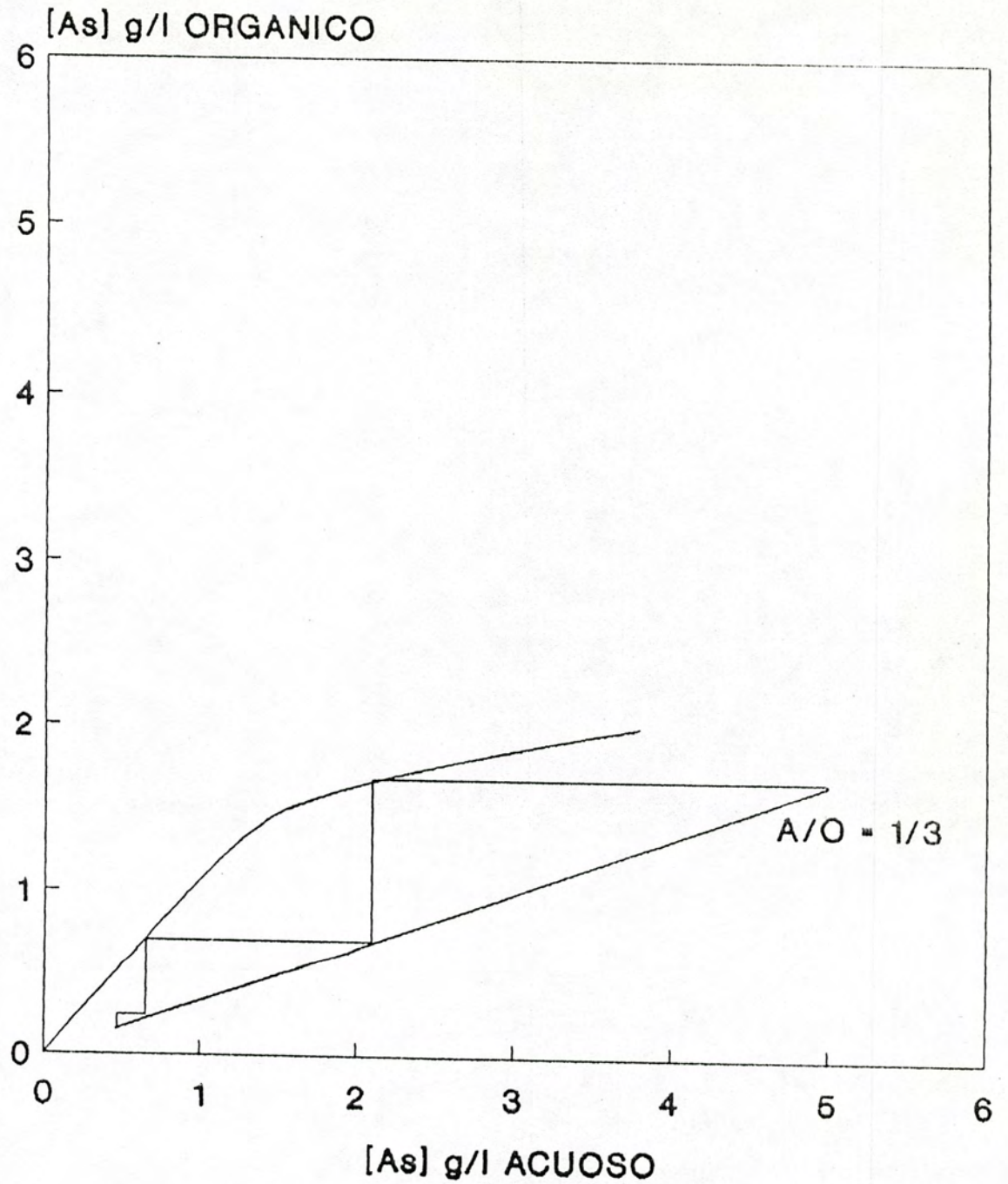


Fig. 5.1.4(c) Diagrama de McCabe Thiele para arsénico utilizando LIX 1104



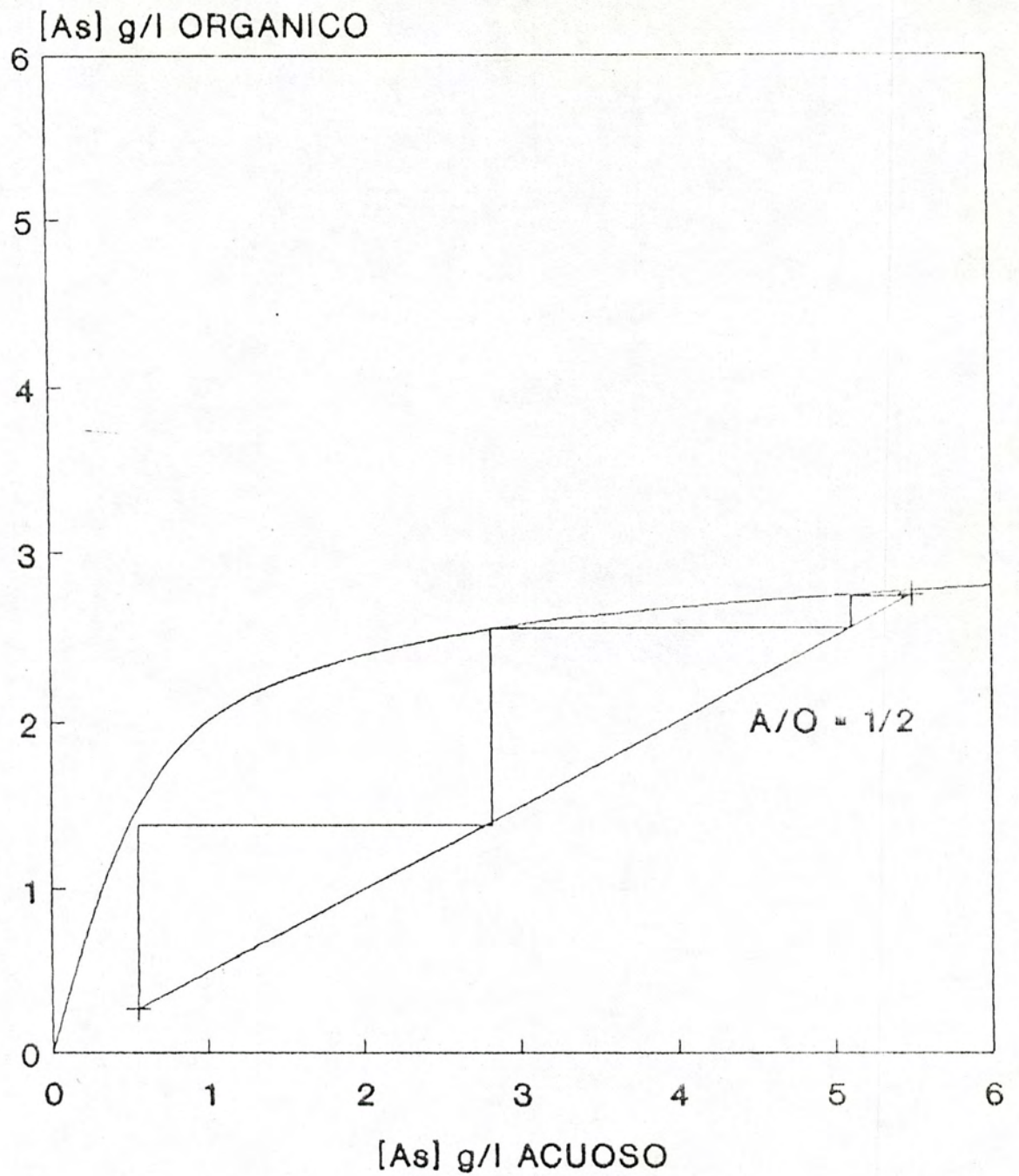


Fig. 5.1.4(d) Diagrama de McCabe Thiele para arsénico utilizando LIX 1104

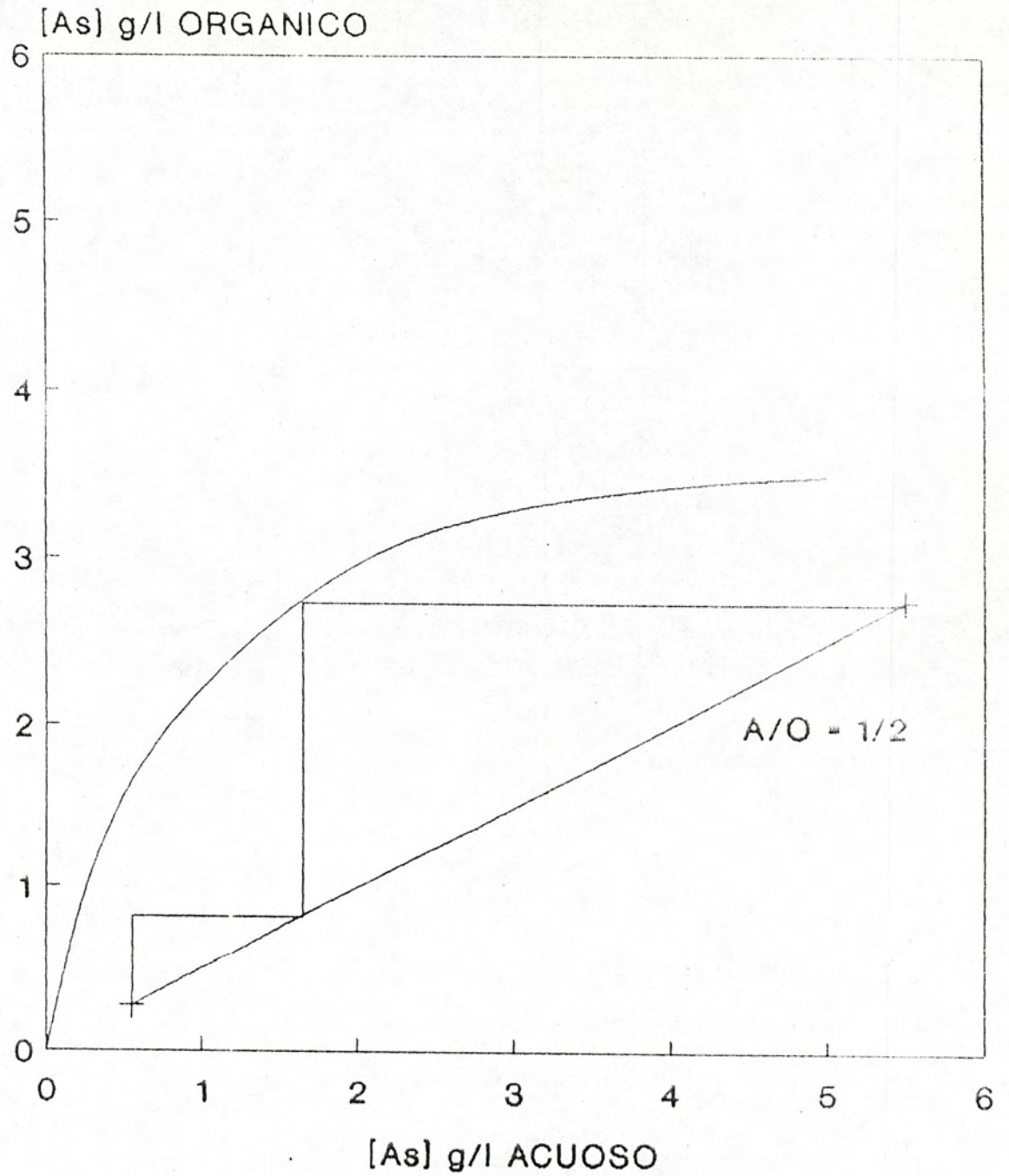


Fig. 5.1.4(e) Diagrama de McCabe Thiele para arsénico utilizando LIX 1104

## 5.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para pruebas de Extracción de Arsénico por Solventes utilizando Extractante LIX 1104.

Se seleccionan tres factores; dos de ellos a dos niveles y uno a tres, resultando un diseño factorial de 2 x 2 x 3 con dos réplicas.

A continuación se reporta la matriz de diseño resultante de los datos experimentales en la tabla 5.2, se seleccionarán como constantes el tiempo de contacto y la velocidad de agitación en base a las pruebas preliminares.

Los detalles de las pruebas se muestran en el Apéndice B.

TABLA 5.2

Diseño de experimentos para pruebas de Extracción por Solventes para Arsénico con LIX 1104.

Prueba No.	Experimento	% LIX 1104	% Acidez en licor	% Tridecanol en Orgánico	% Extracción As
1	6	20	10	0	22.92
2	3	20	10	15	28.26
3	7	20	20	0	12.50
4	2	20	20	15	28.57
5	12	20	30	0	21.43
6	11	20	30	15	45.24
7	5	40	10	0	43.48
8	4	40	10	15	43.48
9	8	40	20	0	31.58
10	1	40	20	15	49.09
11	9	40	30	0	52.17
12	10	40	30	15	63.04

### 5.3 ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Previo al estudio de un diseño de experimentos, se hicieron un promedio de 40 pruebas preliminares para conocer el comportamiento de las variables que afectan el proceso de extracción por solventes. Las primeras variables que consideraron en estudio fueron: tiempo de residencia, velocidad de agitación, temperatura, acidez libre, pH, concentración del extractante y efecto del modificador.

En base a las pruebas preliminares se procedió a plantear un diseño de experimentos de 2 x 2 x 3. El arreglo fue de la siguiente manera:

	<u>% LIX 1104</u>	<u>% Tridecanol</u>	<u>% Acidez libre</u>
Variable	ALTA	ALTA	ALTA
			MEDIA
Variable	BAJA	BAJA	BAJA

Las combinaciones resultantes fueron 12 en total que se muestran en la tabla 5.2.

Efecto sobre la recuperación: (gráfica 5.2.1).

El factor A (% LIX 1104) es el más significativo en la recuperación de arsénico: al pasar de su nivel bajo al alto, la recuperación se incrementa en 20.6 unidades porcentuales.

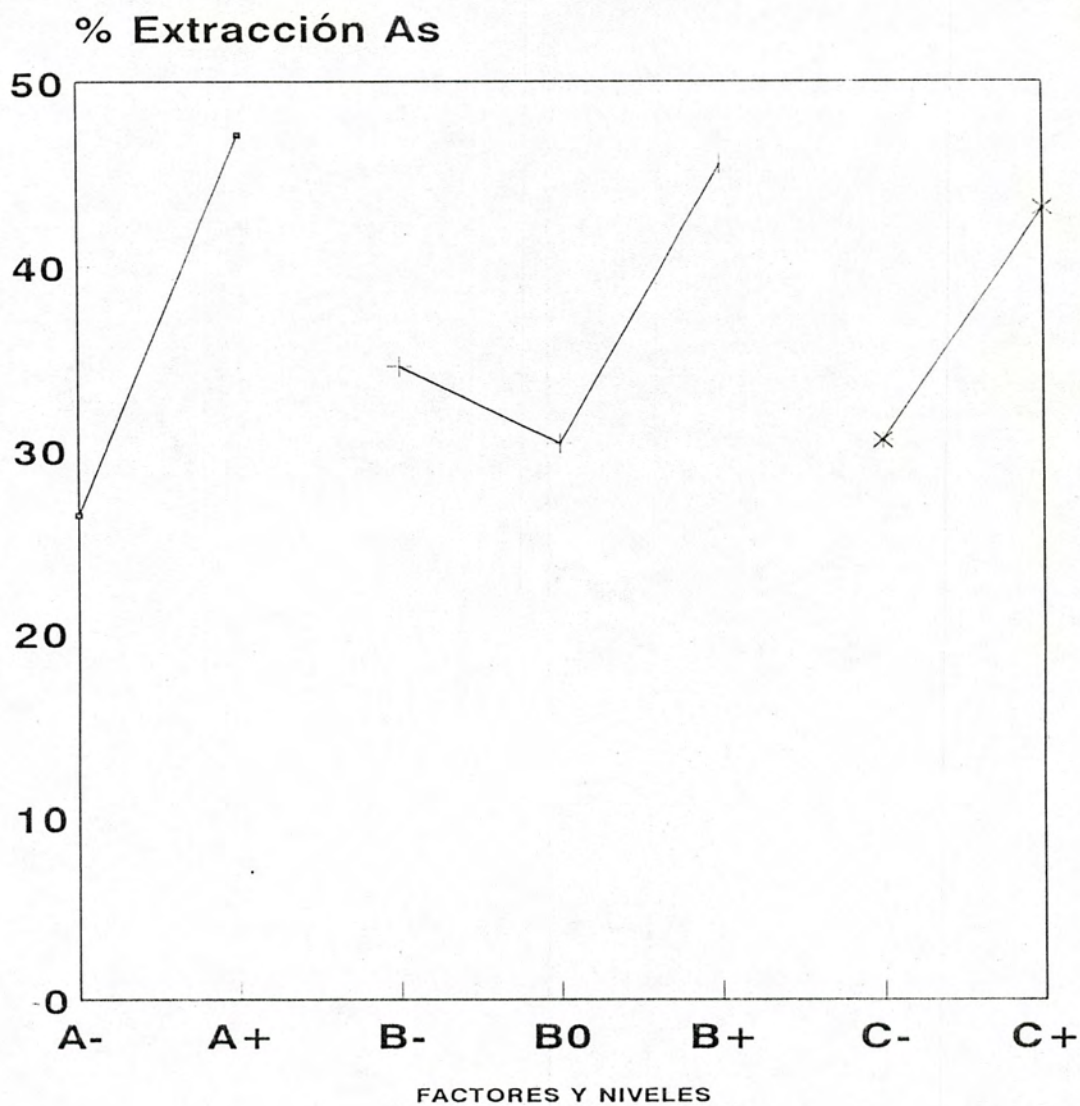
El factor B (% acidez produce efectos de curvatura en la respuesta del sistema, lo cual indica interacciones importantes con alguno de los otros dos factores: el cambio de la respuesta cuando B pasa de su nivel bajo al intermedio es de 4.15 unidades porcentuales; al incrementar nuevamente el valor de B, la recuperación se incrementa nuevamente en 15.1 unidades. Los efectos opuestos de B en el intervalo estudiado, sugieren la posibilidad de reacciones secundarias

en el sistema de lixiviación; es decir, en la primera parte, cuando B se cambia de su nivel bajo al medio, se presentan reacciones secundarias de Fe(II) y Fe(III) a As(III) y As(V), así como también las especies de  $\text{CuSO}_4$ . Del intervalo medio al alto de B, la reacción es más energética, debido a la concentración de ácido, formando el compuesto de  $\text{H}_3\text{AsO}_4$  (ácido arsénico), viéndose favorecida la disolución del arsénico.

Finalmente, el incremento en el factor C (% tridecanol) aumenta la recuperación de arsénico. Esto se explica en la selectividad en la extracción, ya que a mayor cantidad de tridecanol la extracción del arsénico se favorece, inhibiendo la formación de una tercera fase dispersa.

#### Efecto sobre la variabilidad:

En general, los tres factores afectan en poco grado la variabilidad del proceso: las diferencias de ésta para los diferentes niveles de los factores, de los factores es del orden de decimales en el porciento de recuperación. A partir de la gráfica (5.2.2), se recomendaría operar en los niveles altos de todos los factores, disminuyendo con esto la posibilidad de descontrol del proceso.



○ % LIX 1104    + % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>    \* % Tridecanol

Fig. 5.2.1 Efecto de los factores sobre la extracción de As

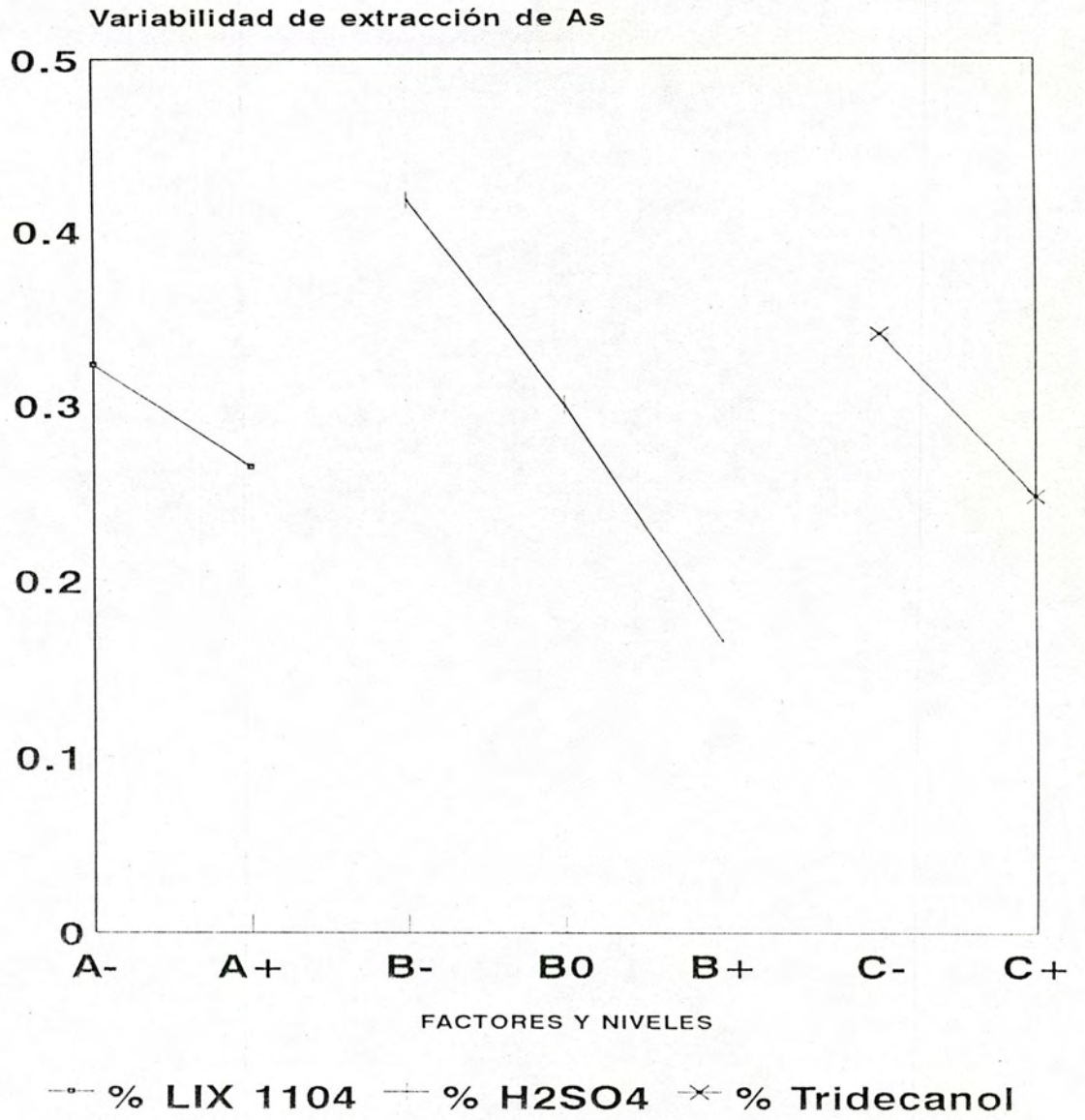


Fig. 5.2.2 Efecto de los factores sobre la variabilidad de extracción de As

**VI. CONCLUSIONES  
Y  
RECOMENDACIONES**



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el proceso de lixiviación para los polvos del Horno de Fusión Instantánea se obtuvieron buenas extracciones, tanto para cobre como para arsénico, combinando el ácido débil ( $H_2SO_4$ ) y controlándose la acidez libre con ácido sulfúrico concentrado. El consumo de ácido depende del grado de sulfatación de los polvos. Ajustando las condiciones experimentales a un 10% de sólidos y 106 g/l de ácido sulfúrico libre se obtiene una extracción del 95% para cobre y un 97% para arsénico. Se obtuvo un pH final de 1.3 en la lixiviación. El tiempo de contacto fue de 60 minutos, ocurriendo la mayor velocidad de disolución para cobre y arsénico en los primeros 30 minutos.

De acuerdo al análisis de los resultados experimentales se puede notar que las mejores condiciones para la extracción de arsénico por solventes se obtuvieron a una concentración de 15% de tridecanol como modificador, 40% LIX 1104 en la solución orgánica y 300 g/l de ácido sulfúrico en la solución acuosa.

De este estudio se puede concluir que las variables que afectan el proceso de extracción de arsénico son las siguientes:

Concentración de extractante y modificador en el orgánico, porcentaje de acidez libre en acuoso, concentración de hierro férrico, relación de fases acuoso-orgánico, tiempo de contacto, presencia de sólidos en suspensión, condiciones mecánicas de agitación y temperatura. Se puede decir que es posible utilizar un proceso combinado de lixiviación-extracción por solventes para reducir los niveles de impurezas (arsénico) en los polvos del horno de fusión instantánea y el subproducto (ácido débil) de la planta de ácido sulfúrico.

Se recomienda llevar a cabo un estudio más completo de extracción por solventes, utilizando otros extractantes propuestos: CYANEX 923, TBP, TOPO, D2EHPA.

Previo a la extracción de arsénico por solventes se propone extraer al hierro trivalente con el propósito de evitar la competitividad con el extractante LIX 1104.

Para un estudio posterior se recomienda un programa de pruebas en un sistema continuo, primero en planta semipiloto y posteriormente en una planta piloto para el análisis real de las variables estudiadas a nivel laboratorio, tomando como referencia las curvas de equilibrio obtenidas en los embudos de separación, y de esta manera construir los Diagramas de McCabe-Thiele para obtener el número de etapas reales del proceso.

**APENDICE A**  
**Pruebas de lixiviación de los polvos**  
**del Horno de Fusión Instantánea**

Las condiciones experimentales que se utilizaron en la variación de la acidez fueron las siguientes:

Sólidos = 10%  
Tiempo de contacto = 60 minutos.  
Velocidad de agitación = 2500 rpm  
Temperatura = 20 °C  
Acidez libre = variable

TABLA 4.1.1

DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 4.1

Efecto de la variación de la acidez libre para observar el comportamiento de la extracción de cobre en la lixiviación con ácido débil.

g/l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l de Cu	% extracción de Cu
0	10	50
20	25	72
42	28	85
60	30	88
82	35	92
106	37	95

Las condiciones experimentales que se utilizaron en la variación de la acidez fueron las siguientes:

Sólidos = 15%  
Tiempo de contacto = 60 minutos.  
Velocidad de agitación = 2500 rpm  
Temperatura = 20 °C  
Acidez libre = variable

TABLA 4.1.2

DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 4.1

Efecto de la variación de la acidez libre para observar el comportamiento de la extracción de cobre en la lixiviación con ácido débil.

g/l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l de Cu	% extracción de Cu
0	28	50
20	37	65
42	43	72
60	48	84
82	55	90
106	60	92

Las condiciones experimentales que se utilizaron en la variación de la acidez fueron las siguientes:

Sólidos = 20 %

Tiempo de contacto = 60 minutos.

Velocidad de agitación = 2500 rpm

Temperatura = 20 °C

Acidez libre = variable

TABLA 4.1.3

DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 4.1  
Efecto de la variación de la acidez libre para observar el comportamiento de la extracción de cobre en la lixiviación con ácido débil.

g/l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l de Cu	% extracción de Cu
0	-	50
20	-	58
42	-	65
60	65	72
82	72	84
106	80	86

Las condiciones experimentales que se utilizaron en la variación de la acidez fueron las siguientes:

Sólidos = 10 %  
Tiempo de contacto = 60 minutos.  
Velocidad de agitación = 2500 rpm  
Temperatura = 20 °C  
Acidez libre = variable

TABLA 4.1.4

DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 4.2

Efecto de la variación de la acidez libre para observar el comportamiento de la extracción de arsénico en la lixiviación con ácido débil.

g/l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l de As	% extracción de As
0	0.12	2
20	2.16	79
42	3.24	85
60	3.78	87
82	4.32	95
106	4.50	97

Las condiciones experimentales que se utilizaron en la variación de la acidez fueron las siguientes:

Sólidos = 15 %  
Tiempo de contacto = 60 minutos.  
Velocidad de agitación = 2500 rpm  
Temperatura = 20°C  
Acidez libre = variable

TABLA 4.1.5

DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 4.2

Efecto de la variación de la acidez libre para observar el comportamiento de la extracción de arsénico en la lixiviación con ácido débil.

g/l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l de As	% extracción de As
0	0.24	4
20	3.78	48
42	5.04	78
60	5.40	79
82	6.12	85
106	6.80	90



DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 4.3

EFFECTO DE LA VARIACION DEL % DE SOLIDOS EN  
LOS g/l DE H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

TABLA 4.1.6

10% Sólidos		15% Sólidos	20% Sólidos
g/l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	g/l Cu	g/l Cu	g/l Cu
0	16	28	40
20	24	37	45
42	30	45	55
60	34	48	61
82	36	52	70
106	38	55	75

**DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 4.4**  
**EFFECTO DE LA VARIACION DE H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> EN EL pH**

**TABLA 4.1.7**

10% Sólidos		15% Sólidos
g/l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	pH	pH
0	3.2	3.3
20	1.6	1.8
42	1.5	1.6
60	1.3	1.4
82	1.1	1.3
106	0.9	1.2

**APENDICE B**  
**Datos Experimentales**  
**de Extracción por Solventes**

**TABLA B1**  
**DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 5.1.1**

**DETERMINACION DE LA CINETICA DE EXTRACCION DE ARSENICO;**

**EXTRACTANTE: LIX 1104      20%**

**MODIFICADOR: TRIDECANOL    15%**

**DILUYENTE: QUEROSENO      65%**

**RELACION DE FASES: A/O = 1/1**

Solución de Alimentación As: 3.9 g/l

Fe: 14.1 g/l

Cu: 26.5 g/l

Acidez: 300 g/l

**Datos Experimentales Concentración (g/l)**

Cu	Fe	As	pH	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
25.6	13.1	3.2	1.20	302.3
25.6	13.3	2.9	1.28	306.1
25.9	13.0	2.9	1.33	308.3
25.8	13.0	3.0	1.46	304.5
25.2	13.0	2.8	1.45	315.9
25.0	13.0	2.5	1.57	305.3

**Tiempo de Contacto (min)      % Ext.-As**

0	0
1	17.95
2	25.64
3	25.64
5	23.08
8	28.21
10	30.00

**TABLA B2**  
**DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 5.1.1**

**DETERMINACION DE LA CINETICA DE EXTRACCION DE ARSENICO**

EXTRACTANTE: LIX 1104      20 %  
 MODIFICADOR: TRIDECANOL      0%  
 DILUYENTE: QUEROSENO      80%  
 Relación de Fases: A/O = 1/1

Solución de Alimentación As: 3.9 g/l  
 Fe: 14.1 g/l  
 Cu: 26.5 g/l  
 Acidez: 300 g/l

Datos Experimentales Concentración (g/l)

Muestra	Cu	Fe	As	pH	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
L.original	26.5	14.1	3.9	0.79	309.12
M-1	25.8	13.7	3.3	1.43	312.4
M-2	25.6	13.8	3.3	1.34	310.8
M-3	26.0	13.9	3.3	1.35	310.1
M-4	25.8	13.8	3.1	1.31	308.5
M-5	24.9	13.8	3.0	1.22	308.5
M-6	25.6	13.8	2.5	0.94	300.7

Tiempo de Contacto (min)      % Ext.-As

0	0
1	15.38
2	15.38
3	15.38
5	20.51
8	23.08
10	25.48

**TABLA B3**

**DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 5.1.2(a)**

**ISOTERMA DE EXTRACCION PARA ARSENICO**

Solvente Orgánico                      20% LIX 1104 diluído en Queroseno

Solución Alimentación              Cu: 44 g/l  
   Fe: 16.2 g/l  
   As: 5.4 g/l  
Acidez: 200 g/l H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Tiempo de Contacto 10 min.

Concentración en Equilibrio, As (g/l)

A/O	Orgánico	Acuoso
1/1	1.30	4.1
1/2	1.40	2.6
1/3	1.17	1.9
1/4	1.03	1.3
1/5	0.86	1.1

**TABLA B4**  
**DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 5.1.2(b)**

**ISOTERMA DE EXTRACCION PARA ARSENICO**

**Solvente Orgánico**                      **40% LIX 1104 diluído en Queroseno**

**Solución Alimentación**              **Cu: 44.7 g/l**  
    **Fe: 16.2 g/l**  
    **As: 6.3 g/l**  
    **Acidez: 200 g/l**

**Tiempo de Contacto 10 min.**

**Concentración en Equilibrio, As(g/l)**

A/O	Orgánico	Acuoso
1/1	3.10	2.90
1/2	2.45	1.40
1/3	1.83	0.80
1/4	1.38	0.80
1/5	1.14	0.60

**TABLA B5**

**DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 5.1.2(c)**

**ISOTERMA DE EXTRACCION PARA ARSENICO**

**Solvente Orgánico**                      **20% LIX 1104 diluído en Queroseno**

**Solución Alimentación**              **Cu: 31.4 g/l**  
   **Fe: 14.6 g/l**  
   **As: 5.1 g/l**  
   **Acidez: 300 g/l**

**Tiempo de Contacto 10 min.**

**Concentración en Equilibrio As, (g/l)**

<b>A/O</b>	<b>Orgánico</b>	<b>Acuoso</b>
1/1	1.50	3.60
1/2	1.50	2.10
1/3	1.20	1.50
1/4	1.05	0.90
1/5	0.84	0.90



**TABLA B6**

**DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 5.1.2(d)**

**ISOTERMA DE EXTRACCION PARA ARSENICO**

**Solvente Orgánico**      40% LIX 1104 diluido en Queroseno

**Solución Alimentación**    Cu: 31.3 g/l  
   Fe: 15.0 g/l  
   As: 5.2 g/l  
   Acidez: 300 g/l

**Tiempo de Contacto** 10 min.

**Concentración en Equilibrio, As(g/l)**

A/O	Orgánico	Acuoso
1/1	3.20	2.00
1/2	2.25	0.70
1/3	1.60	0.40
1/4	1.25	0.20
1/5	1.00	0.20

**TABLA B7**  
**DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 5.1.3(a)**  
**Efecto de la Temperatura**  
**en la Extracción de Arsénico por Solventes**

<u>Condiciones Experimentales</u>	<u>Solvente Orgánico</u>
	Extractante: 40% LIX 1104
Velocidad de Agitación = 2000 rpm	Modificador: 15% Tridecanol
Tiempo de Contacto = 10 min.	Diluyente: 45% Queroseno
Solución Alimentación	
Cu: 52.0 g/l	
Fe: 17.0 g/l	
As: 5.2 g/l	
Acidez : 200 g/l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	

% Extracción, As

A/O	T = 20°C	T = 30°C	T = 45°C
2/1	27.08	15.38	5.77
1/1	52.08	38.46	21.15
1/2	77.10	71.15	48.08
1/3	87.50	82.69	55.77
1/5	91.60	90.38	76.92

**TABLA B8**  
**DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 5.1.3(b)**

**Efecto de la Temperatura  
en la Extracción de Arsénico por Solventes**

Condiciones Experimentales

Solvente Orgánico

Velocidad  
de Agitación = 2000 rpm

Extractante: 40% LIX 1104

Tiempo de Contacto = 10 min.

Modificador: 15% Tridecanol

Diluyente: 45% Queroseno

Solución Alimentación

Cu: 52.0 g/l

Fe: 17.0 g/l

As: 5.2 g/l

Acidez : 300 g/l H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

% Extracción, As

A/O	T = 20°C	T = 30°C	T = 45°C
2/1	28.10	23.01	19.23
1/1	53.20	48.46	32.69
1/2	78.20	72.69	55.77
1/3	87.60	86.53	75.00
1/5	91.90	90.15	88.46

**APENDICE C**  
**Pruebas realizadas a partir**  
**del Diseño de Experimentos**

**TABLA C1**

**PRUEBAS DE EXTRACCION POR SOLVENTES**

EXTRACTANTE: LIX 1104 20%  
 MODIFICADOR: TRIDECANOL 0%  
 DILUYENTE: QUEROSENO 80%  
 ACIDEZ LIBRE = 100 g/l  
 Tiempo de contacto (min) 10

ALIMENTA 4.8 g/l As  
 13.6 g/l Fe  
 57.9 g/l Cu

No	A/O	ACUOSO (g/l)			ORGANICO (BALANCE)			% DE EXTRACCION		
		As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu
1	2/1	4.40	13.30	55.90	0.80	0.60	4.00	8.33	2.21	3.45
2	1/1	3.70	13.00	55.30	1.10	0.60	2.60	22.92	4.41	4.49
3	1/2	2.70	12.20	55.30	1.05	0.70	1.30	43.75	10.29	4.49
4	1/3	2.00	12.10	55.20	0.93	0.50	0.90	58.33	11.03	4.68
5	1/5	1.20	11.60	54.30	0.72	0.40	0.72	75.00	14.71	6.22

**DESPOJAMIENTO DEL ORGANICO  
 CON SOLUCION DE 40 g/l DE  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$**

A/O = 1/1  
 T = 5 min

No	g/l ORGANICO DESPOJADO			ACUOSO DE DESPOJAM.			% DESPOJAMIENTO	
	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe
1	0.20	0.72	0.90	0.60	0.64	7.90	75.00	107.33
2	0.20	0.56	1.40	0.80	0.34	7.90	72.73	56.67
3	0.30	0.50	1.60	0.70	0.25	7.80	66.67	35.29
4	0.30	0.42	1.90	0.60	0.18	7.60	64.29	35.60
5	0.20	0.30	2.00	0.50	0.33	7.60	69.44	83.25

TABLA C2

DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 5.1.4(b)

PRUEBAS DE EXTRACCION POR SOLVENTES

EXTRACTANTE: LIX 1104 20%

MODIFICADOR: TRIDECANOL 15%

DILUYENTE: QUEROSENO 65%

ACIDEZ LIBRE = 100 g/l

Tiempo de contacto (min) 10

ALIMENTA 4.6 g/l As

13.7 g/l Fe

56.7 g/l Cu

No	A/O	ACUOSO (g/l)			ORGANICO (BALANCE)			% DE EXTRACCION		
		As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu
1	2/1	4.00	13.70	56.50	1.20	0.00	0.40	13.04	0.00	0.35
2	1/1	3.30	13.50	56.10	1.30	0.20	0.60	28.26	1.46	1.06
3	1/2	2.20	13.10	56.60	1.20	0.30	0.05	52.17	4.38	0.18
4	1/3	1.60	12.80	56.50	1.00	0.30	0.07	65.22	6.57	0.35
5	1/5	1.00	12.50	56.20	0.72	0.24	0.10	78.26	8.76	0.88

DESPOJAMIENTO DEL ORGANICO  
CON SOLUCION DE 40 g/l DE  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

A/O = 1/1

T = 5 min

No	g/l ORGANICO DESPOJADO			ACUOSO DE DESPOJAM.			% DESPOJAMIENTO	
	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe
1	0.40	0.28	0.77	0.70	0.20	8.40	58.33	ERR
2	0.50	0.55	0.94	0.80	0.15	8.20	61.54	73.50
3	0.60	0.49	1.30	0.70	0.07	7.90	58.33	24.00
4	0.40	0.21	1.40	0.60	0.14	7.90	60.00	47.67
5	0.30	0.17	1.70	0.40	0.04	7.60	55.56	15.00

TABLA C3

PRUEBAS DE EXTRACCION POR SOLVENTES

EXTRACTANTE: LIX 1104 20%  
 MODIFICADOR: TRIDECANOL 0%  
 DILUYENTE: QUEROSENO 80%  
 ACIDEZ LIBRE = 200 g/l  
 Tiempo de contacto (min) 10

ALIMENTA 5.6 g/l As  
 17.0 g/l Fe  
 48.0 g/l Cu

No	A/O	ACUOSO (g/l)			ORGANICO (BALANCE)			% DE EXTRACCION		
		As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu
1	2/1	5.30	16.90	46.80	0.60	0.20	2.40	5.36	0.59	2.50
2	1/1	4.90	16.10	46.00	0.70	0.90	2.00	12.50	5.29	4.17
3	1/2	3.50	15.50	41.00	1.05	0.75	3.50	37.50	8.82	14.58
4	1/3	2.80	14.90	40.00	0.93	0.70	2.67	50.00	12.35	16.67
5	1/5	1.70	13.90	39.00	0.78	0.62	1.80	69.64	18.24	18.75

DESPOJAMIENTO DEL ORGANICO  
 CON SOLUCION DE 40 g/l DE  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

A/O = 1/1  
 T = 5 min

No	g/l			ORGANICO DESPOJADO			ACUOSO DE DESPOJAM.			% DESPOJAMIENTO	
	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	As	Fe	
1	0.20	0.67	0.34	0.40	0.20	8.50	66.67	100.00			
2	0.30	0.86	0.46	0.40	0.15	8.30	57.14	16.67			
3	0.40	0.75	0.65	0.40	0.13	8.20	38.10	17.33			
4	0.60	0.64	0.87	0.40	0.03	8.00	42.86	4.29			
5	0.50	0.63	1.18	0.40	0.03	7.90	51.28	4.84			

TABLA C4

PRUEBAS DE EXTRACCION POR SOLVENTES

EXTRACTANTE: LIX 1104 20%

MODIFICADOR: TRIDECANOL 15%

DILUYENTE: QUEROSENO 65%

ACIDEZ LIBRE = 200 g/l

Tiempo de contacto (min) 10

ALIMENTA 5.6 g/l As

17.0 g/l Fe

40.6 g/l Cu

No	A/O	ACUOSO (g/l)			ORGANICO (BALANCE)			% DE EXTRACCION		
		As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu
1	2/1	4.80	17.00	40.30	1.60	0.00	0.60	14.29	0.00	0.74
2	1/1	4.00	16.80	40.40	1.60	0.20	0.20	28.57	1.18	0.49
3	1/2	2.30	16.00	40.40	1.65	0.50	0.10	58.93	5.88	0.49
4	1/3	1.50	16.00	39.90	1.37	0.33	0.23	73.21	5.88	1.72
5	1/5	0.80	15.30	39.30	0.96	0.34	1.26	85.71	10.00	3.20

DESPOJAMIENTO DEL ORGANICO  
CON SOLUCION DE 40 g/l DE  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

A/O = 1/1

T = 5 min

No	g/l ORGANICO DESPOJADO			ACUOSO DE DESPOJAM.			% DESPOJAMIENTO	
	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe
1	1.00	0.33	0.50	0.60	0.20	8.20	37.50	ERR
2	0.90	0.50	0.53	0.80	0.30	8.10	50.00	150.00
3	0.80	0.54	0.79	0.70	0.10	7.90	42.42	20.00
4	0.80	0.49	0.91	0.60	0.10	7.70	43.90	30.00
5	0.50	0.40	1.08	0.50	0.10	7.70	52.08	29.41



**TABLA C5**

**PRUEBAS DE EXTRACCION POR SOLVENTES**

EXTRACTANTE: LIX 1104      20%  
 MODIFICADOR: TRIDECANOL      0%  
 DILUYENTE: QUEROSENO      80%  
 ACIDEZ LIBRE = 300 g/l  
 Tiempo de contacto min 10

ALIMENTA 4.200 g/l As  
 15.000 g/l Fe  
 24.800 g/l Cu

No	A/O	ACUOSO (g/l)			ORGANICO (BALANCE)			% DE EXTRACCION		
		As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu
1	2/1	4.10	14.30	22.90	0.20	1.40	3.80	2.38	4.67	7.66
2	1/1	3.30	13.60	23.70	0.90	1.40	1.10	21.43	9.33	4.44
3	1/2	1.70	12.90	23.00	1.25	1.05	0.90	59.52	14.00	7.26
4	1/3	1.20	12.30	23.10	1.00	0.90	0.57	71.43	18.00	6.85
5	1/5	0.50	11.30	22.30	0.74	0.74	0.50	88.10	24.67	10.08

**DESPOJAMIENTO DEL ORGANICO  
 CON SOLUCION DE 40 = g/l DE CuSO4.5H2O**

A/O = 1/1  
 T = 5 min

No	ORGANICO DESPOJADO			ACUOSO DE DESPOJAM.			% DESPOJAMIENTO	
	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe
1	0.40	0.50	0.28	0.60	0.26	8.50	300.00	18.71
2	0.50	0.68	0.44	0.60	0.12	8.40	66.67	8.57
3	0.60	0.64	0.65	0.50	0.08	8.30	40.00	7.24
4	0.40	0.60	0.83	0.50	0.07	8.20	50.00	7.89
5	0.30	0.50	1.19	0.40	0.02	8.00	54.05	2.43

TABLA C6

PRUEBAS DE EXTRACCION POR SOLVENTES

EXTRACTANTE: LIX 1104 20%

MODIFICADOR: TRIDECANOL 15%

DILUYENTE: QUEROSENO 65%

ACIDEZ LIBRE = 300 g/l

Tiempo de contacto (min) 10

ALIMENTA 5.4 g/l As

18.0 g/l Fe

23.2 g/l Cu

No	A/O	ACUOSO (g/l)			ORGANICO (BALANCE)			% DE EXTRACCION		
		As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu
1	2/1	4.50	18.40	21.40	1.80	0.80	3.60	16.67	2.13	7.76
2	1/1	3.30	18.70	21.50	2.10	0.10	1.70	38.89	0.53	7.33
3	1/2	1.50	17.50	19.90	1.95	0.65	1.65	72.22	6.91	14.22
4	1/3	1.00	17.40	20.80	1.47	0.47	0.80	81.48	7.45	10.34
5	1/5	0.50	16.40	20.90	0.98	0.48	0.46	90.74	12.77	9.91

DESPOJAMIENTO DEL ORGANICO  
CON SOLUCION DE 40 g/l DE  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

A/O = 1/1

T = 5 min

No	g/l ORGANICO DESPOJADO			ACUOSO DE DESPOJAM.			% DESPOJAMIENTO	
	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe
1	1.10	0.16	0.22	0.90	0.30	8.30	50.00	37.50
2	1.40	0.15	0.31	1.00	0.30	8.20	47.62	300.00
3	1.30	0.37	0.57	0.90	0.20	8.00	46.15	30.77
4	0.90	0.47	0.71	0.70	0.11	8.00	47.73	24.00
5	0.60	0.46	0.78	0.50	0.06	7.90	51.02	12.08

**TABLA C7**

**DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 5.1.4(c)**

**PRUEBAS DE EXTRACCION POR SOLVENTES**

EXTRACTANTE: LIX 1104 40%

MODIFICADOR: TRIDECANOL 15%

DISOLVENTE: QUEROSENO 45%

ACIDEZ LIBRE = 100 g/l

Tiempo de Contacto (min) = 10

ALIMENTA 4.600 g/l As

13.800 g/l Fe

56.300 g/l Cu

No	A/O	ACUOSO (g/l)			ORGANICO (BALANCE)			% DE EXTRACCION		
		As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu
1	2/1	3.80	13.20	55.40	1.60	1.20	1.80	17.39	4.35	1.60
2	1/1	2.60	13.00	55.40	2.00	0.80	0.90	43.48	5.80	1.60
3	1/2	1.50	12.00	55.40	1.55	0.90	0.45	67.39	13.04	1.60
4	1/3	1.10	11.70	55.20	1.17	0.70	0.37	76.09	15.22	1.95
5	1/5	0.70	11.10	54.10	0.78	0.54	0.44	84.78	19.57	3.91

**DESPOJAMIENTO DEL ORGANICO  
CON SOLUCION DE 40 g/l DE CuSO4.5H2O**

A/O = 1/1

T = 5 min.

No	g/l ORGANICO DESPOJADO			ACUOSO DE DESPOJAM.			% DESPOJAMIENTO	
	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe
1	0.80	0.26	2.30	1.10	0.15	7.80	68.75	12.58
2	0.80	0.13	3.00	1.20	0.12	7.40	60.00	14.75
3	0.70	0.34	3.10	0.80	0.06	7.10	51.61	6.67
4	0.50	0.14	3.40	0.60	0.05	6.90	51.43	6.71
5	0.40	0.35	3.50	0.40	0.08	7.00	51.28	15.56

**TABLA C8**

**PRUEBAS DE EXTRACCION POR SOLVENTES**

EXTRACTANTE: LIX 1104 40%

MODIFICADOR: TRIDECANOL 15%

DILUYENTE: QUEROSENO 45%

ACIDEZ LIBRE = 100 g/l

Tiempo de contacto (min) 10

ALIMENTA 4.6 g/l As

13.8 g/l Fe

56.3 g/l Cu

No	A/O	ACUOSO (g/l)			ORGANICO (BALANCE)			% DE EXTRACCION		
		As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu
1	2/1	3.70	13.10	55.10	1.80	1.40	2.40	19.57	5.07	2.13
2	1/1	2.60	13.00	55.90	2.00	0.80	0.40	43.48	5.80	0.71
3	1/2	1.40	12.70	56.10	1.60	0.55	0.10	69.57	7.97	0.36
4	1/3	0.90	12.30	55.20	1.23	0.50	0.37	80.43	10.87	1.95
5	1/5	0.50	12.10	55.20	0.82	0.34	0.22	89.13	12.32	1.95

**DESPOJAMIENTO DEL ORGANICO  
CON SOLUCION DE 40 g/l DE  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$**

A/O = 1/1

T = 5 min

No	g/l ORGANICO DESPOJADO			ACUOSO DE DESPOJAM.			% DESPOJAMIENTO	
	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe
1	0.80	0.23	1.50	1.00	0.19	8.20	55.56	13.86
2	0.80	0.09	1.90	1.20	0.12	7.80	60.00	15.500
3	0.70	0.09	2.30	0.90	0.10	7.60	56.25	18.18
4	0.60	0.07	2.50	0.70	0.10	7.60	56.76	20.00
5	0.90	0.19	2.70	0.40	0.05	7.30	48.78	13.53

**TABLA C9**

**PRUEBAS DE EXTRACCION POR SOLVENTES**

EXTRACTANTE: LIX 1104 40%  
 MODIFICADOR: TRIDECANOL 0%  
 DILUYENTE: QUEROSENO 60%  
 ACIDEZ LIBRE = 200 g/l  
 Tiempo de contacto (min) 10

ALIMENTA 5.7 g/l As  
 17.2 g/l Fe  
 41.0 g/l Cu

No	A/O	ACUOSO (g/l)			ORGANICO (BALANCE)			% DE EXTRACCION		
		As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu
1	2/1	5.30	15.50	44.00	0.80	3.40	-6.00	7.02	9.88	-7.32
2	1/1	3.90	14.80	42.00	1.80	2.40	-1.00	31.58	13.95	-2.44
3	1/2	2.10	13.90	43.00	1.80	1.65	-1.00	63.16	19.19	-4.88
4	1/3	1.10	13.20	42.00	1.53	1.33	-0.33	80.70	23.26	-2.44
5	1/5	0.60	12.80	42.00	1.02	0.88	-0.20	89.47	25.58	-2.44

**DESPOJAMIENTO DEL ORGANICO  
 CON SOLUCION DE 40 g/l DE  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$**

A/O = 1/1  
 T = 5 min

No	g/l ORGANICO DESPOJADO			ACUOSO DE DESPOJAM.			% DESPOJAMIENTO	
	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe
1	0.60	1.58	0.90	0.70	0.20	8.40	87.50	6.00
2	1.10	1.35	1.70	0.90	0.26	8.00	50.00	10.62
3	1.20	1.03	2.00	0.80	0.09	7.70	44.44	5.27
4	1.00	0.56	2.40	0.70	0.06	7.50	45.65	4.35
5	0.60	0.35	2.90	0.50	0.04	7.20	49.02	4.32

**TABLA C10**

**DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 5.1.4(d)**

**PRUEBAS DE EXTRACCION POR SOLVENTES**

EXTRACTANTE: LIX 1104 40%  
 MODIFICADOR: TRIDECANOL 15%  
 DILUYENTE: QUEROSENO 45%  
 ACIDEZ LIBRE = 200 g/l  
 Tiempo de contacto min 10

ALIMENTA 5.500 g/l As  
 16.600 g/l Fe  
 19.000 g/l Cu

No	A/O	ACUOSO (g/l)			ORGANICO (BALANCE)			% DE EXTRACCION		
		As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu
1	2/1	4.20	15.80	18.70	2.60	1.60	0.60	23.64	4.82	1.58
2	1/1	2.80	15.60	19.70	2.70	1.00	-0.70	49.09	6.02	-3.68
3	1/2	1.10	14.00	17.40	2.20	1.30	0.80	80.00	15.66	8.42
4	1/3	0.60	13.80	19.90	1.63	0.93	-0.30	89.09	16.87	-4.74
5	1/5	0.30	13.70	20.20	1.04	0.58	-0.24	94.55	17.47	-6.32

**DESPOJAMIENTO DEL ORGANICO**  
 CON SOLUCION DE 40 = g/l DE  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$   
 A/O = 1/1  
 T = 5 min

No	g/l ORGANICO DESPOJADO			ACUOSO DE DESPOJAM.			% DESPOJAMIENTO	
	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe
1	1.80	1.21	1.05	1.00	0.07	8.60	38.46	4.31
2	2.00	0.85	1.13	1.00	0.07	8.60	37.04	6.70
3	1.50	0.75	1.66	0.80	0.08	7.90	36.36	5.85
4	1.10	0.54	1.82	0.60	0.02	7.70	36.73	1.93
5	0.80	0.32	2.38	0.40	0.02	7.70	38.46	2.93

**TABLA C11**

**PRUEBAS DE EXTRACCION POR SOLVENTES**

EXTRACTANTE: LIX 1104 40%

MODIFICADOR: TRIDECANOL 0%

DILUYENTE: QUEROSENO 60%

ACIDEZ LIBRE = 300 g/l

Tiempo de contacto min 10

ALIMENTA 4.6 g/l As

16.4 g/l Fe

30.4 g/l Cu

No	A/O	ACUOSO (g/l)			ORGANICO (BALANCE)			% DE EXTRACCION		
		As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu
1	2/1	3.50	15.30	26.40	2.20	2.20	8.00	23.91	6.71	13.16
2	1/1	2.20	14.80	25.30	2.40	1.60	5.10	52.17	9.76	16.78
3	1/2	0.90	13.30	25.10	1.85	1.55	2.65	80.43	18.90	17.43
4	1/3	0.40	13.00	25.40	1.40	1.13	1.67	91.30	20.73	16.45
5	1/5	0.20	12.90	25.50	0.88	0.70	0.98	95.65	21.34	16.12

**DESPOJAMIENTO DEL ORGANICO  
CON SOLUCION DE 40 g/l DE CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O**

A/O = 1/1

T = 5 min

No	g/l ORGANICO DESPOJADO			ACUOSO DE DESPOJAM.			% DESPOJAMIENTO	
	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe
1	1.00	1.35	0.73	1.00	0.13	6.60	45.45	5.91
2	1.20	1.25	1.08	1.03	0.11	6.40	42.92	6.69
3	0.90	0.72	1.61	0.82	0.08	6.20	44.32	5.35
4	0.70	0.89	1.97	0.57	0.05	5.70	40.71	4.06
5	0.50	0.64	2.19	0.36	0.04	5.50	40.91	5.14

TABLA C12

DATOS EXPERIMENTALES DE LA Fig. 5.1.4(e)

PRUEBAS DE EXTRACCION POR SOLVENTES

EXTRACTANTE: LIX 1104 40%

MODIFICADOR: TRIDECANOL 15%

DILUYENTE: QUEROSENO 45%

ACIDEZ LIBRE = 300 g/l

Tiempo de contacto min 10

ALIMENTA 4.6 g/l As

16.4 g/l Fe

30.4 g/l Cu

No	A/O	ACUOSO (g/l)			ORGANICO (BALANCE)			% DE EXTRACCION		
		As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu
1	2/1	2.90	15.70	30.50	3.40	1.40	-0.20	36.96	4.27	-0.33
2	1/1	1.70	14.70	29.40	2.90	1.70	1.00	63.04	10.37	3.29
3	1/2	0.70	14.00	28.70	1.95	1.20	0.85	84.78	14.63	5.59
4	1/3	0.40	13.30	28.50	1.40	1.03	0.63	91.30	18.90	6.25
5	1/5	0.20	12.60	28.30	0.88	0.76	0.42	95.65	23.17	6.91

DESPOJAMIENTO DEL ORGANICO  
CON SOLUCION DE 40 g/l DE  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$

A/O = 1/1

T = 5 min

No	g/l ORGANICO DESPOJADO			ACUOSO DE DESPOJAM.			% DESPOJAMIENTO	
	As	Fe	Cu	As	Fe	Cu	As	Fe
1	1.90	0.58	0.91	1.20	0.30	6.50	35.29	21.43
2	1.60	0.77	1.03	1.10	0.10	6.30	37.93	5.88
3	1.10	0.62	1.06	0.80	0.10	6.20	41.03	8.33
4	0.80	0.49	1.56	0.60	0.10	5.90	42.86	9.68
5	0.50	0.25	1.74	0.40	0.00	5.80	45.45	0.00



## **BIBLIOGRAFIA**

## BIBLIOGRAFIA

1. Holmes, J.A. Deuchar, A.D., Stewart, L.N., and Parker, J.D. "Design, Construction and Commissioning of the N'changa Tailings Leach Plant", International Symposium on Copper Extraction and Refining, AIME Annual Meeting, Las Vegas, Nevada, February 22-26, 1976.
2. Jones, R.L., "Cyprus Bagdad's LIX Complex", SME Fall Meeting, Salt Lake City, Utah, September 10-12, 1975.
3. Steele, D.K., and Gritton, K.S. "Metal Recovery From Acid-Leach Processing of Arsenic -Containing Copper Wastes. Paper presented at the 1991 SME Annual Meeting, Denver, Colorado. February 25-28, 1991.
4. Reynolds, J.E, and Coltrinari, E.L., Process for recovering metal values from materials containing arsenic, U.S. Patent 4 244 734, January 13, 1981.
5. Madsen, B.W. Dolezal, H. and Bloom, P.A. ' Processing arsenical flue dusts with sulfur dioxide and sulfuric acid to produce arsenic trioxide, paper TMS A 81-63 presented at 110<sup>th</sup> AIME Annual Meeting, Chicago, February, 1981.
6. Ritcey, G.M., and Ashbrook, A.W.  
Solvent Extraction, Elsevier, 1984.
7. Valenzuela, J.L. "Fundamentos de la Extracción por Solventes en Hidrometalurgia" Notas de Clase, Universidad de Sonora, 1991.
8. Schwab, W., and Hroke, H. "Purification of Copper Tankhouse Electrolytes by Solvent Extraction", Arsenic Metallurgy Fundamentals and Applications, Reddy, R.G., Hendrix, J.L., and Queneau, P.B., Eds, The Metallurgical Society, Warrendale, PA, PP 249-263.

9. Schwab, W., and Dorlac, J.P., HENKEL Engineering, Comunicación Personal.
10. \_\_\_\_\_ CYANAMID, Boletín Técnico 1992 CYANEX 923 Extractant, Typical Properties.
11. Bailes, P.J., Hanson S., and Hughes, M.A., "Liquid-Liquid Extraction: Metals", Chem, Eng. Nov. 6, 1978, pp. 247-256.
12. Blake, C.A., Brown, K.B., and Kordosky, G.A., "The Sulfite System- A New Hydrometallurgical Process for Zinc", AIME Annual Meeting, Denver, Colorado, February 26-March 2, 1978.
13. Bloom, P.A., Maysillea, J.H., and Dolezal, H., "Hydrometallurgical Treatment of arsenic- containing lead-smelter flue dust", USBM Report of Investigations 8679, 1972.
14. Kordosky, G.A., Mackay, K.D., Viring, M.J., "A New Generation Copper Extractant", AIME Annual Meeting, Las Vegas, Nevada, February 22-26, 1976.
15. Kordosky, G.A., Sierakosky, J.M. and House, J.E., "The LIX 860 Series: Un modified Copper Extraction Reagents", Proceedings of the International Solvent Extraction Conference (1983), Denver, Colorado, August 26-September 2, 1983.
16. Robins, R.G., "The stabilities of arsenic (V) and arsenic (VI) compounds in aqueous metal extraction systems", in Hidrometallurgy: Research, Development and Plant Practice, Eds. K. Osseo-Asare and J.D. Miller Editors, Proceedings of the 3rd International Symposium on Hidrometallurgy, Atlanta, Georgia, March 6-10, 1983 TMS-AIME, New York, 1983.
17. \_\_\_\_\_ "Standard Methods of Chemical Analysis", Vol. II A, Sixth Edition, p-185, Van Nostrand Reinhold Company, New York.

18. Tozawa, K., Umetsu, Y., and Nishimura, T., "Hydrometallurgical recovery for removal of arsenic from copper smelter by-products, Paper presented 110<sup>th</sup> AIME Annual Meeting. Denver, February 1978.
19. Jones, R.L. "Cyprus Bagdad's Solvent Extraction Process", Mining Engineering, September 1977, pp 38-42.
20. Kordosky, G.A., LIX 34, Isn't New Reagent Evaluation Fun?", Arizona Section of AIME Hydrometallurgical Division, Spring Meeting, Tucson, Arizona, August 10, 1976.