

117



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO DEL PROCESO DE BENEFICIO DE JALES  
EN ZACATECAS

290796

TESIS MANCOMUNADA  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A N :  
DIEGO MANRIQUE VALLE  
ARMANDO RAFAEL VITE ALCOCER



MEXICO, D.F.,



EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA

2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

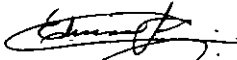



Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

Jurado asignado:

|               |  |
|---------------|--|
| Presidente    | Prof. Elvira Santos Santos               |
| Vocal         | Prof. José Antonio Ortiz Ramírez         |
| Secretario    | Prof. Ernesto Pérez Santana              |
| 1er. Suplente | Prof. Alejandro Iñiguez Hernández        |
| 2do. Suplente | Prof. José Alejandro Rafael Vega Sánchez |

Laboratorio de Gestión Ambiental de la Facultad de Química, UNAM

|                     |                               |   |
|---------------------|-------------------------------|---|
| Asesor:             | Dra. Elvira Santos Santos     |  |
| Supervisor Técnico: | Mta. Irma Cruz Gavilán García |  |
| Sustentantes:       | Diego Manrique Valle          |  |
|                     | Armando Rafael Vite Alcocer   |  |

## INDICE

- Introducción..... pag. 1
- Capítulo I. Antecedentes..... pag. 5
  - 1.1 Historia de la Minería en México
  - 1.2 Zacatecas
- Capítulo II. Mercurio..... pag. 15
  - II.1 Mercurio
  - II.2 Propiedades Físicas, Toxicidad y Normatividad
    - II.2.1 Propiedades Físicas
    - II.2.2 Toxicidad y Efectos a la Salud
    - II.2.3 Normatividad
  - II.3 Amalgamación
    - II.3.1 El Patio
  - II.4 Jales
  - II.5 Emisiones a la Atmósfera
  - II.6 Estimación de Pérdidas de Mercurio al Ambiente
  - II.7 Ciclo de Vida del Mercurio
  - II.8 Importancia del Beneficio de Jales
- Capítulo III. Proceso de Beneficio de Jales en las Empresas Beneficiadoras de Zacatecas..... pag. 25
  - III.1 Antecedentes
  - III.2 Descripción General del Proceso
  - III.3 Proceso de Extracción
    - III.3.1 Lixiviación
      - III.3.1.a Agentes lixiviantes
    - III.3.2 Preparación de las Piletas
    - III.3.3 Preparación del reactivo
    - III.3.4 Solución Extractora
    - III.3.5 Extracción de Metales
    - III.3.6 Lavado y Secado
    - III.3.7 Reacciones en el Proceso de Extracción
  - III.4 Proceso de Reducción Química con Cobre
    - III.4.1 Potenciales
    - III.4.2 Baterías con Cobre
    - III.4.3 Reacciones en el Proceso de Reducción Química con Cobre
  - III.5 Destilación de Mercurio
    - III.5.1 Horno
    - III.5.2 Producción
- Capítulo IV. Análisis del Proceso..... pag. 47
  - IV.1 Análisis de Jales
    - IV.1.1 Análisis de Jale para Beneficio
    - IV.1.2 Análisis de Jale Beneficiado
    - IV.1.3 Comparación de Jale Original Vs. Beneficiado
    - IV.1.4 Análisis de Jale Profundo
  - IV.2 Análisis de la Solución Extractora
    - IV.2.1 Proceso de Extracción
    - IV.2.2 Proceso de Reducción Química con Cobre
  - IV.3 Proceso de Destilación de Mercurio

- Capitulo V. Experimentación ..... pag. 58
  - V.1 Preparación de Reactivos
    - V.1.1 Preparación de Tiosulfato de Calcio ( $\text{CaS}_2\text{O}_3$ )
    - V.1.2 Preparación de Tiosulfato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )
      - V.1.2.a Preparación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$
      - V.1.2.b Preparación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir de  $\text{NaOH}$  al 50%
      - V.1.2.c Preparación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir  $\text{Na}_2\text{CO}_3$
  - V.2 Piletas de Laboratorio
  - V.3 Influencia de la Concentración de Tiosulfato
  - V.4 Influencia del Cobre
  - V.5 Influencia de cloruros
  - V.6 Influencia del pH
  - V.7 Determinación del Reactivo Optimo para la Extracción
- Capitulo VI. Resultados y Análisis ..... pag. 67
  - VI.1 Preparación de Reactivos
    - VI.1.1 Preparación de  $\text{CaS}_2\text{O}_3$  a partir de  $\text{CaO}$
    - VI.1.2 Preparación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir de  $\text{NaOH}$  al 50%
    - VI.1.3 Preparación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$
  - VI.2 Influencia de la Concentración de Tiosulfato
  - VI.3 Influencia de Cobre
  - VI.4 Influencia de Cloruros
  - VI.5 Influencia del pH
  - VI.6 Determinación del Reactivo Optimo para la Extracción
- Capitulo VII. Propuestas y Recomendaciones ..... pag. 73
  - VII.1 Extracción
    - VII.1.1 Reactivo
      - VII.1.1.a Preparación de  $\text{CaS}_2\text{O}_3$  en la Empresa 1
    - VII.1.2.a Preparación de Reactivos en el Laboratorio (Empresa 1)
      - VII.1.2.a.1 Preparación  $\text{CaS}_2\text{O}_3$  a partir de  $\text{CaO}$
      - VII.1.2.a.2 Preparación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir de  $\text{NaOH}$  al 50%
      - VII.1.2.a.3 Preparación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir  $\text{Na}_2\text{CO}_3$
    - VII.1.1.b Preparación de  $\text{CaS}_2\text{O}_3$  en la Empresa 2
    - VII.1.2.b Preparación de Reactivos en el Laboratorio (Empresa 2)
      - VII.1.2.b.1 Preparación  $\text{CaS}_2\text{O}_3$
      - VII.1.2.b.2 Preparación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir de  $\text{NaOH}$  al 50%
      - VII.1.2.b.3 Preparación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir  $\text{Na}_2\text{CO}_3$
    - VII.1.3 Solución Extractora
  - VII.2 Depositación en Cobre
  - VII.3 Destilación de Mercurio
  - VII.4 Recomendaciones para Reducir los Riesgos y Peligros por Contaminación de Mercurio
- Capitulo VIII. Conclusiones ..... pag. 80
- Bibliografía ..... pag. 85
- Gráficas ..... pag. 87

## AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Elvira Santos y a la Q. Irma Gavilán por todos sus conocimientos y apoyo durante el desarrollo de la tesis.

A Jesús Olmos y Fernando Valdés de BEJAZA S.A. de C.V. por todas las facilidades que nos brindaron durante nuestra estancia en Zacatecas, a los dueños y a todas las personas de BEJAZA S.A. de C.V. y Jales de Zacatecas por permitirnos estudiar el proceso de beneficio de jales, por su cooperación y por las facilidades otorgadas en las instalaciones.

A la Comisión para la Cooperación Ambiental del Instituto Nacional de Ecología por crear este tipo de proyectos en beneficio de los estudiantes y las microempresas del país.

A Faustino Juarez del Instituto de Geofísica de la UNAM por sus conocimientos en absorción atómica y por las facilidades otorgadas en su laboratorio.

A Sara Suarez por la ayuda en los análisis de absorción atómica.

Y el mayor agradecimiento a nuestras familias y todas aquellas personas que nos han apoyado a lo largo de nuestras vidas.

# I N T R O D U C C I Ó N

## ***Introducción***

El Plan de Acción Regional de América del Norte para el Mercurio fue aprobado el 7 de Octubre de 1997 por la Comisión para la Cooperación Ambiental. En él se establece un enfoque y un marco de referencia estratégicos que Canadá, Estados Unidos y México pueden usar para fomentar la adopción generalizada de las mejores prácticas para prevenir y reducir las emisiones antropogénicas de mercurio al medio ambiente de la región.

El Acuerdo de América del Norte para la Cooperación Ambiental privilegia las actividades de prevención de la contaminación sobre aquellas dirigidas hacia el control de emisiones de contaminantes hacia el medio ambiente. El espíritu de la prevención de la contaminación es más racional debido a que es más conveniente dejar de producir contaminantes que gastar dinero en tratarlos o disponerlos, lo que implica aplicar soluciones en la fuente donde se generan dichos contaminantes y no al final del proceso.

En México el uso del mercurio está asociado en gran medida con la actividad minera del país. La industria minera de Zacatecas, un estado cuya actividad productiva se ha caracterizado en gran medida por la minería de oro y plata desde hace varios siglos, utilizó cantidades significativas de mercurio en los procesos de beneficio de los minerales, permaneciendo este como contaminante en los jales<sup>1</sup>. Actualmente, se piensa que los compuestos de mercurio contenidos en los jales pueden constituir un riesgo a la salud de los habitantes de la región y al medio ambiente circundante, dependiendo principalmente del tipo de compuestos mercuriales que se encuentren presentes en dichos jales.

En un principio, mediante un convenio con la Comisión para la Cooperación Ambiental, se realizó un estudio en dos empresas beneficiadoras de jales localizadas en el estado de Zacatecas, este estudio tenía como principal objetivo conocer el comportamiento que tiene el mercurio a lo largo de todo el proceso y observar si la forma en que se manipula es segura para la salud de los trabajadores y para el medio ambiente.

---

<sup>1</sup> Jales: tierra que contiene mercurio, oro y plata.



Las empresas que accedieron a que se realizara dicho estudio son:

Empresa 1: BEJAZA

Empresa 2: Jales de Zacatecas

Al finalizar el proyecto, se identificaron las medidas de prevención que permitieran reducir la contaminación por compuestos de mercurio en las empresas beneficiadoras, sin embargo, durante todo el estudio se dejó el beneficio de plata en un segundo plano. Al ver el interés de los empresarios por llevar a cabo un estudio completo del proceso, nació el proyecto de tesis que ahora realizamos.

El objetivo general de este proyecto es estudiar el Proceso de Beneficio de Jales que se lleva a cabo en las empresas beneficiadoras de Zacatecas, es decir, encontrar los fundamentos químicos que expliquen lo que sucede en cada etapa del proceso, observar el comportamiento que presentan la plata<sup>\*</sup> y el mercurio<sup>\*</sup> a lo largo de todo el proceso y realizar un análisis en cada empresa para determinar las fortalezas y debilidades y así, poder proponer modificaciones, para elevar la eficiencia de recuperación de metales y mejorar la productividad.

En el capítulo de antecedentes se da un recorrido histórico de la minería en nuestro país para darnos cuenta de la importancia que ha tenido esta actividad desde los primeros pobladores hasta nuestros días, siendo la principal razón para la colonización y la fundación de ciudades. Posteriormente se manifiesta la preocupación que se tiene a nivel mundial por la contaminación de mercurio debido a la actividad humana y a la extracción de oro y plata, se explica como se realizaba el proceso de amalgamación llamado "El Patio", la manera en que se formaron los jales y se muestra el ciclo de vida que tiene el mercurio en el medio ambiente.

---

<sup>\*</sup> Se denominará en forma genérica como plata y mercurio a las diferentes sales de los metales hasta que se logre establecer la naturaleza de los mismos, es decir, su "especiación".

Para entender el proceso de extracción de metales utilizado en Zacatecas, en el capítulo del proceso de beneficio de jales se dan las características de las plantas beneficiadoras y se explica en forma detallada como se desarrolla el proceso desde su inicio. Se dan a conocer las etapas en las que se puede dividir el proceso y los componentes de cada una.

En el cuarto capítulo se lleva a cabo el análisis de cada etapa del proceso con el fin de determinar las fortalezas y las debilidades de cada empresa. Esto nos ayudará a formar un criterio de análisis para proponer mejoras dentro del proceso.

En el capítulo de experimentación se plantea todo el trabajo de laboratorio que se realizó para encontrar alternativas de preparación del reactivo utilizado en el proceso, resolver dudas que surgieron en el análisis del proceso y se propone el uso de otros compuestos para aumentar la eficiencia del proceso. El análisis de resultados nos condujo a las propuestas que creemos que representan una mejora al proceso o a la disminución de costos, para que finalmente podamos concluir los logros alcanzados con este proyecto.

C A P I T U L O I .  
A N T E C E D E N T E S

## **Capítulo I. Antecedentes**

La investigación sobre la importancia de los metales en la vida del hombre nos llevo más allá del inicio de las civilizaciones, por lo que decidimos abarcar únicamente la historia de la minería en nuestro país. Este recorrido nos ayudará a comprender su evolución y trascendencia, abriéndonos un panorama sobre la necesidad del hombre en no solamente obtener el mineral de la naturaleza, sino transformarlo para su beneficio. La recopilación realizada evitará profundizar en fechas y nombres, ya que su única finalidad es la de recrear en una forma general el ambiente minero de nuestros antepasados. Para nuestros objetivos es importante describir el proceso de amalgamación utilizado en el tiempo de la Colonia ya que da origen a la materia prima de investigación.

### **1.1 Historia de la Minería en México**

La historia de la minería en México no empezó con los españoles, sino con sus propios pobladores, esto es en el México Antiguo, lugar donde se desarrollaron culturas de gran riqueza ideológica y científica, pueblos guerreros que plasmaron el paso del tiempo, abriéndonos una ventana a su época. Los códices nos detallan la importancia de sus cultos, ritos y ofrendas que eran esenciales en su vida. La arqueología nos permite examinar toda esa riqueza materializada en pectorales, joyas, narigueras, efigies de dioses, entre otras, trabajadas impecablemente por esas técnicas tan perfeccionadas de martilleo y fundición. La soldadura, filigrana, repujado, modelado, chapeado y dorado tanto en metales como en madera nos dan una clara idea de la importancia de los metales en su sociedad.

En el México antiguo se utilizaron cerca de 35 minerales no metalíferos y aproximadamente otros 14 que sí lo son, por ejemplo óxidos de hierro, malaquita, carbonato básico de cobre y el cinabrio o protosulfuro de mercurio utilizados como colorantes, además de otros como la galena, pirita, marcasita y hematita.

Se han encontrado cuevas y socavones que parecían tener el propósito de obtener algún mineral, los cuales están fechados como previos al periodo clásico mesoamericano, es decir, anteriores a la era cristiana. La presencia de cerámica olmecoide lleva a pensar en una etapa de iniciación minera a partir del siglo III o IV a.C.

Los indígenas de México, así como los de Perú, hacían uso de diversos metales, entre los cuales destacan el oro, la plata, el cobre, el estaño y el plomo. Se realizaban obras subterráneas para beneficiar las vetas, abriendo galerías, pozos y tiros de comunicación o ventilación con ayuda de martillos de piedra (de diorita o de andesita) con mangos de madera. La extracción se llevaba a cabo con puntas de hueso y navajones de obsidiana, para desmenuzar el mineral utilizaban morteros de piedra y cuñas de madera. Su sistema de alumbrado consistía de teas de ocote y fibras vegetales recubiertas de resina y finalmente para la transportación se empleaban vasijas de barro, canastos y cuerdas. Mediante estos métodos los aztecas extraían plomo y estaño de las vetas de Taxco y cinabrio de las minas de Chilapan. Otros lugares de extracción prehispánica eran Zacatollan y Coahuixco donde obtenían cobre (metal más comúnmente usado) y en la Sierra de Querétaro fueron encontradas centenares de antiguas bocaminas de donde se extraía, cinabrio, calcita, fluorita y minerales de plata y plomo.

La obtención del oro casi siempre se llevaba mediante el lavado de arenas de ríos y arroyos. Bernal Díaz del Castillo alude varias veces a este procedimiento, hablando del oro que solían traer a Moctezuma desde Zacatula, de esta manera "... lo cogian con xicales (jicaras) y que lavaban la tierra para que allí queden unos granos menudos después del lavado..."<sup>2</sup>.

Entre otros procedimientos adoptados para extraer los minerales estaban los que técnicamente se conocen como rebaje abierto, corte y relleno y el de torrefacción, para resquebrajar las rocas.

---

<sup>2</sup> Historia Verdadera de la Conquista de la Nueva España, edición preparada por Joaquín Ramírez Cabañas, v.2, México, editorial Porrúa, 1955, t. Y, pag. 316

Para la extracción de cobre se calentaba la roca por medio de fuego, se dejaba enfriar lentamente o se vertía agua para acelerar la operación; la matriz y el mineral se reventaban ofreciendo resquebrajaduras sobre las cuales obraban con las cuñas o los mazos.

Los descubrimientos mencionados demuestran la existencia de actividades mineras desde mucho antes de que se desarrollara la metalurgia<sup>3</sup> en el México Antiguo. Textos indígenas, códices y algunos objetos de metal demuestran la existencia de varias técnicas y tipos de trabajo, se cree que la metalurgia se inició probablemente a partir del siglo X d.C.

Los textos en náhuatl describen los atributos y técnicas de los orfebres, estableciendo algunas de las distintas tareas que a continuación mencionaremos:

- Purificación del metal. Esta era una de las principales tareas, mezclaban trozos del mineral metalífero con carbón en hornos u hornillas de barro, los cuales, tenían orificios donde introducían canutos o tubos para soplar y avivar el fuego, el metal se recogía en el fondo del horno.
- Martilleo del metal. Consistía en dar a los metales las formas deseadas, entre ellas están objetos de oro, cobre o plata laminados. Dentro de esta tarea encontramos el repujado, o sea, el trabajo de labrar con martillo las láminas de metal.
- Fundición. Fue una de las técnicas más desarrolladas, también denominada como "los que componen o dan termino adecuadamente a algo". Considerados como artistas que entre otras tareas se ocupaban del recubrimiento en caliente, aleaciones, soldaduras y el vaciado en moldes.
- Pulido o bruñido. Técnica complementaria al vaciado en molde o aplicada en forma independiente. Consistía en pulir el metal con una piedra, dar un baño de alumbre y calentar nuevamente.

---

<sup>3</sup> La metalurgia va más allá de la mera obtención de un metal en estado nativo, es el arte y ciencia de beneficiar los minerales para extraer de ellos los metales y disponerlos con miras a su ulterior empleo en la fabricación de instrumentos y de objetos de toda índole.

Gracias a la metalurgia se perfeccionaron los procesos de extracción mediante el empleo de algunos utensilios metálicos como lo son cinceles, hachas y pinzas, entre otros. En opinión de Alfonso Caso, "las técnicas metalúrgicas se introdujeron en Mesoamérica desde Costa Rica y Panamá"<sup>4</sup>, justificando así la semejanza en técnicas y objetos encontrados.

Hasta este momento de la historia podemos constatar la importancia que los metales y sobre todo la metalurgia han tenido en las civilizaciones prehispánicas. El hecho de empezar a darle forma a los metales trae muchos beneficios y avances en las culturas, desarrollando tecnologías nuevas en distintas áreas de la vida cotidiana y para la guerra, innovando con objetos para satisfacer de una manera mucho más amplia sus necesidades básicas, sin embargo, sus desarrollos no solamente cubren estas áreas. La riqueza ideológica de todas estas culturas impulsa de una manera dramática el perfeccionamiento de las técnicas existentes, realizando objetos decorativos de impresionante trabajo y de minucioso detalle. La gran parte de estas obras de arte de incalculable valor material contenían uno espiritual mucho más elevado, teniendo la finalidad de ser un regalo o una representación de sus dioses. Los lugares donde albergaban la mayoría de estos objetos se utilizaban como adoratorios, los cuales al ser visitados por los españoles impresionaron por su riqueza.

Los hallazgos de Colón durante sus viajes de descubrimiento fueron la pauta de expediciones encaminadas a buscar tierras ricas y gente que tuviera oro, plata o cualquier riqueza. Uno de los primeros sitios descubiertos por los españoles fue Yucatán en donde encontraron trabajos de orfebrería de gran belleza, los cuales, se cree que eran realizados en la capital del imperio y no en esa zona, es decir, eran obsequios mandados por Moctezuma para Quetzalcóatl. Sin saber esto, buscaron exhaustivamente minas de oro o plata para su explotación y la frustración de lo poco encontrado los llevó a recorrer la costa del sudeste de

---

<sup>4</sup> Alfonso Caso, "Lapidary Work, Goldwork, Copperwork: Oaxaca", Handbook of Middle American Indian, V. III, Austin, University of Texas Press, 1965, pag. 915.

México, en donde su suerte cambió encontrando mayores riquezas. Estos hallazgos y el ansia que se tenía por poseerlas se tradujeron en conquistas, las cuales eran esenciales para poder realizar su debida explotación, es decir, estos eran los inicios de la Conquista de la Nueva España.

Enterado Moctezuma del arribo de los europeos mandó un par de embajadores, los cuales se presentaron ante los españoles, Hernán Cortés les dijo que deseaba saber si el oro de esa tierra era como el de Castilla y como prueba pidió que le enviaran un casco de soldado lleno de granos de oro. Uno de los embajadores convencido de que Cortés era Quetzalcóatl mandó a pedir oro y Moctezuma, a fin de satisfacerlo, le obsequió un fabuloso lote de oro y plata de gran calidad artística, el cual fue inmediatamente llevado a España.

El lujo que despliega Moctezuma en el recibimiento y los presentes que ofrece a Cortés, sorprenden a los españoles, pero en realidad tenían el objetivo de que regresaran a su tierra lo antes posible, cosa de por sí ingenua, pues entre más oro les mandaba, más interés tenían en ir al lugar donde procedía.

Llegando los españoles a la cabeza del Imperio se inicia la investigación por conocer los lugares que producían metales preciosos. Los mexicas tenían unos libros en los que llevaban el control de los productos de cada uno de los señoríos o pueblos sujetos al Imperio, por medio de estos libros Cortés se enteraría de los pueblos que principalmente cubrían tributos con metales preciosos. Los tres lugares de donde más oro le traían eran: Zacatula, Tustepeque y de las provincias Chinotecas y Zapotecas. Por lo que mandó expediciones para que probaran las riquezas de las tierras, de las cuales Tustepeque, Malinaltepeque y Chimantla, todo lo que hoy es el estado de Oaxaca, fueron declaradas tierras buenas para poblar por su riqueza minera. Así consecutivamente fueron poblando diversos lugares, juzgándolos como convenientes o no de la misma manera. Siguiendo esos lineamientos se conquistó la provincia del Pánuco, Michoacán, la Villa del Espíritu Santo en el río Coatzacoalcos y Ciudad Real (lo que es ahora San Cristóbal de las Casas) en Chiapas, entre otras.



Mientras tanto los indígenas se manifestaban rebeldes y reacios a las promesas, a los halagos y aun a las amenazas de los españoles y no les mostraban los criaderos metalíferos, ya fuese por que realmente no los conocían, o, lo que es más probable, por que no querían que los conquistadores se enseñorearan para siempre de aquellas tierras. Los apóstoles fueron los que por medio de exhortaciones y de súplicas iban aplazando la sublevación general de los indios. La obsesión que los españoles tenían por el oro, a veces no era muy comprendida entre los indígenas, como lo demuestra la incertidumbre del rey de los Tarascos preguntando, mientras entregaba oro a los españoles": ¿Para que quieren este oro?, débenlo de comer estos dioses, por eso lo quieren tanto" Otro pasaje que demuestra como los españoles anulaban totalmente las necesidades básicas de los indígenas es el siguiente: "Estando, pues, una tarde en un portalillo, atrio de su casa, todas ocupadas en su labor de manos, llegó un indio y dijo; "señoras, ¿tenéis una tortilla que dar me por amor de Dios?" Leonor de Arias le respondió: "siéntate hijo"; y mandó a una de las niñas que moliesen un poco de chimole, que en España llaman pimientos. Comió el indio y al despedirse dijo agradecido: "Dios te lo pague señora, y ten confianza en Dios, que te ha de dar tanto oro y plata, que te sobren muchos millares", es importante mencionar que Leonor de Arias era una noble dama española, se dice que al tercer día volvió el indio con un tercio de mineral rico en las espaldas para ella, sin condición de ninguna clase. Doña Leonor agradecida de tan rica ofrenda acompañó al indio a ver la mina, la cual estaba situada cerca de Compostela, y la nombró "Espíritu Santo", comenzó a extraer de ella metales muy ricos de oro y plata. Este descubrimiento fue muy importante en el Reino, ya que llegaban diariamente españoles y criollos por el rumor de la bonanza en dicho lugar, de hecho, en Compostela se establecieron las primeras Cajas Reales del Reino. Este hallazgo sucedió en el año de 1543 y fue la primer mina descubierta en México durante la conquista, más no fue el único de esta época ya que fueron encontradas más minas en Xocotlán, Guazcatlán, Ixtlán y Xaltepec. En el año de 1549 fueron descubiertas ricas vetas minerales en Taxco, Sultepec y Temastepec.

Los avances en la conquista hicieron que se fundara Jalisco, Colima, San Miguel de Culiacán, Guadalajara, Sinaloa, Zacatecas y Sonora. Como podemos darnos cuenta, continuar con la conquista nos resultaría abarcar diversos estados más detalladamente, ya que se encontraron minas en varios lugares de la República Mexicana, por lo que decidimos enfocar solamente el caso de Zacatecas, ya que es donde se desarrolla la investigación de nuestra Tesis.

## **1.2 Zacatecas**

Varios historiadores dicen vagamente que los conquistadores hicieron algunas entradas a este estado desde 1535, pero al parecer estas expediciones se vieron frustradas y no llegaron hasta el cerro de la Bufo, pues los indios nayaritas y zacatecanos se fortificaron en los cerros, obteniendo contra los españoles algunos triunfos importantes. Los zacatecanos vivían de la caza y como montañeses eran ágiles y muy experimentados en la guerra, de lo cual, dieron repetidas pruebas en sus largas y sangrientas luchas con los españoles. Pasaron todavía algunos años sin que fuera ocupada por los españoles, ya que no tenían idea de la riqueza de esa tierra. Se dice que en el mes de agosto de 1546 un indígena agradecido por el buen trato que había recibido del conquistador Juan de Tolosa, le enseñó unas muestras de rico mineral argentífero y le dijo que él podía llevarlo al lugar de donde provenían, enseguida se organizó una expedición que concluyó el día 8 de septiembre de 1546 al pie del cerro de la Bufo.

Los zacatecanos mantenían siempre fortificado el Peñón de la Bufo, ya que este les había servido como refugio ante los frecuentes y duros combates que mantenían con sus tribus enemigas. Aquél era perfecto, ya que existían veneros de agua potable y cuevas donde almacenaban armas, municiones y víveres para su sostenimiento. Al estudiar la situación no quedó más remedio para don Juan de Tolosa que hablar con los indígenas y darles brillantes promesas de libertad, de abundancia y de riqueza para el porvenir. Los zacatecanos se resistían a hacer las paces, pero cedieron al fin de ocho días de diálogo, bajando del Peñón

los caciques principales sellaron la paz con los españoles, recibiendo espléndidos banquetes. Los cuestionamientos acerca de la existencia y localización de las minas no se dejaron esperar, pero la repugnancia de los zacatecanos para descubrirle las minas a los españoles se extendió hasta el 21 de marzo de 1548 con el descubrimiento de la mina de Albarrada, perteneciente al sistema Veta Grande, más tarde el 11 de junio del mismo año se descubrió San Bernabé, del sistema Mala Noche y el 1 de noviembre los Tajos de Pánuco. Gracias a estos descubrimientos Zacatecas alcanzó un grado de prosperidad envidiable, llamando con sus cuantiosas riquezas la atención del mundo entero, recibiendo el título de Muy Noble y Leal Ciudad por el Rey de España, don Felipe II.

Como ya lo mencionamos, los indígenas trabajaban minas antes de la conquista y es probable que los conquistadores siguieran en la mayoría de los casos los trabajos comenzados por ellos. El descubrimiento del eminente y célebre metalúrgico Bartolomé de Medina, quien estableció el beneficio del Patio en el año de 1554, en la Hacienda de Purísima, fue la causa de un nuevo y vigoroso impulso de la industria minera en la Nueva España. Este grandioso y admirable sistema de amalgamación, no había sido practicado antes ni en Europa ni en América. La mayor ventaja de este descubrimiento fue, sobre todo, la facilidad de ejecución. Para 1562 ya existían en Zacatecas 35 haciendas de beneficio por amalgamación. Durante este siglo, los recursos monetarios de Zacatecas sirvieron para financiar la colonización de Coahuila, Chihuahua, Sonora, Nuevo México y Texas, por lo que se le dio el nombre de La Civilizadora del Norte.

Entre 1615 y 1635 la producción de plata alcanzó grandes volúmenes a pesar de ser una época de calamidades, como epidemias, inundaciones, falta de mineros y de mercurio. Para el comienzo del siglo XVIII la minería experimentó un rápido crecimiento, ya que se realizaron grandes inversiones en la profundización y desagüe de las minas, provocando un gran auge que duró hasta 1730.

Posteriormente la falta de mercurio, las bajas leyes de oro y plata y los altos costos de extracción hacen que la minería disminuya y más tarde con la Guerra

de Independencia y su consolidación se provoca un decaimiento drástico en las actividades mineras, dejando en total descuido las minas, lo cual provocó la inundación de la mayoría de ellas y el derrumbe de otras. Esta situación de total inactividad minera prevalece hasta 1824, época en la que algunos capitalistas ingleses emprendieron la obra de rehabilitar las más importantes, trabajándolas durante diez años, en cuyo tiempo sufrieron grandes pérdidas, debido principalmente a la falta de ferrocarriles, lo que les obligaba a llevar la maquinaria sobre los lomos de mulas. El interés internacional por la minería zacatecana llega a diversos lugares del mundo, atrayendo a varios especialistas alemanes, ingleses y franceses con nuevas técnicas minero-metalúrgicas, dando como resultado niveles de explotación que no se habían logrado desde el siglo anterior.

La minería en México es de gran importancia en el ámbito internacional del siglo XX, figurando como el segundo país productor de cobre, séptimo productor de oro y mayor productor de plata, siendo Zacatecas el principal aportador, además es productor de antimonio, estaño, mercurio y desde 1905 bismuto cuando se descubrió como sulfuro en la mina de Cristo.

C A P I T U L O   I I .  
M E R C U R I O

## **Capítulo II. Mercurio**

### **II.1 Mercurio**

El mercurio utilizado por el hombre va más allá de todos los registros, ya que se cree que en los tiempos prehistóricos el cinabrio, que es un mineral compuesto de sulfuro de mercurio, fue utilizado como colorante. El mercurio metálico aparece en la historia hace más de 3500 años, al encontrarse una vasija llena de mercurio en una tumba en Kurna, Egipto fechada de 1600 a 1700 a.C.

El mercurio es considerado uno de los peores peligros antropogénicos creados para el ambiente, ya que es uno de los pocos contaminantes metálicos que ha causado muertes. Se estima que en el mundo entero han muerto más de 1400 personas y más de 20000 han sido afectadas por envenenamiento de mercurio (WHO 1976; D'Itri and D'Itri 1977; Lodenius 1985; D'Itri 1992).

En la villa pescadora de Minamata en Japón, en tan solo 4 años (1956 - 1960), más de 150 personas murieron y más de 1000 quedaron incapacitados de por vida debido al consumo de pescado contaminado por mercurio. La contaminación comenzó entre 40 y 50 años antes de aparecer los primeros síntomas de envenenamiento al desecharse compuestos de mercurio inorgánico, los cuales mediante la actividad bacteriana se transformaron de mercurio inorgánico a compuestos de metil-mercurio altamente tóxicos (Fujika 1963). Más tarde, en 1964, en Niigata Japón por la misma situación se presentaron 6 muertes y 47 enfermos graves. En Diciembre de 1987 más de 17000 personas fueron afectadas por envenenamiento de metil-mercurio y 999 murieron (D'Itri 1992).

En 1972, en Iraq, las semillas de trigo cubiertas con sales de metil-mercurio para la protección contra hongos, fueron consumidas en poblaciones rurales de las provincias Ninevah, Kirkuk y Acbil ocasionando 6000 personas envenenadas y 459 muertos (Bakir et al. 1973). En Brasil, a finales de los 70's, el mercurio utilizado para la protección de la caña de azúcar, causó serios problemas a la salud de los granjeros (Camara 1985, 1986). En Nuevo México, E.U., semillas contaminadas con mercurio utilizadas para la alimentación de cerdos también causaron serios problemas en los consumidores (Mitra 1986).

En Escandinavia, los niveles de mercurio en peces de agua fría incrementaron a pesar de que se han decrementado las emisiones y deposiciones de mercurio en varias décadas. Esto se debe a la removilización de mercurio localizado en el suelo desde hace décadas por la acidificación de los suelos.

Los problemas de contaminación de mercurio causados por la minería de oro y plata se han reportado desde el tiempo de los romanos. Alrededor del año 77 d.C. autoridades romanas importaban cerca de 5000 Kg por año de mercurio de España para la amalgamación de oro en Italia. Después de 100 años esta actividad fue extrañamente prohibida, es muy posible que esta prohibición haya sido una respuesta a problemas de salud ambiental causados por esta actividad.

## ***II.2 Propiedades Físicas, Toxicidad y Normatividad***

### ***II.2.1 Propiedades Físicas***

| <b>Propiedades Físicas</b>     |             |
|--------------------------------|-------------|
| Punto de Ebullición            | 357°C       |
| Punto de Fusión                | -39°C       |
| Gravedad Específica            | 13.5        |
| Solubilidad (H <sub>2</sub> O) | < 0.1 %     |
| Presión de Vapor (20°C)        | 0.001 mm Hg |

### ***II.2.2 Toxicidad y Efectos a la Salud***

El mercurio elemental es absorbido principalmente por inhalación, las sales inorgánicas se absorben por la ingestión y son altamente irritantes, causando daño en las mucosas y los compuestos de mercurio orgánicos son absorbidos por cualquier ruta.

Los efectos agudos que pueden ser ocasionados por el mercurio son la fatiga, dolor de cabeza, náuseas, vómito, depresión, dermatitis, dientes flojos y memoria deteriorada. Los efectos crónicos son daño renal, daño hepático, afecta sistema nervioso central, daño cerebral, afecta sistema respiratorio y acumulación de mercurio en el cerebro.

### II.2.3 Normatividad

| Estados Unidos     |                        |                        |                        |                       |
|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Referencia         | Hg elemental           | Hg inorgánico          | Hg alquil              | Hg aril               |
| Aire               |                        |                        |                        |                       |
| EPA                | N.R.                   | N.R.                   | N.R.                   | N.R.                  |
| OSHA               | 0.1 mg/m <sup>3</sup>  | 0.1 mg/m <sup>3</sup>  | 0.04 mg/m <sup>3</sup> | N.R.                  |
| NIOSH              | 0.05 mg/m <sup>3</sup> | 0.05 mg/m <sup>3</sup> | N.R.                   | N.R.                  |
| ACGIH              | 0.05 mg/m <sup>3</sup> | 0.05 mg/m <sup>3</sup> | 0.01 mg/m <sup>3</sup> | 0.1 mg/m <sup>3</sup> |
| Suelos             |                        |                        |                        |                       |
| EPA                | N.R.                   | N.R.                   | N.R.                   | N.R.                  |
| Cadena alimenticia |                        |                        |                        |                       |
| FDA Pescado        | 1 ppm                  | 1 ppm                  | 1 ppm                  | 1 ppm                 |

N.R.= No Reportado

EPA = Environmental Protection Agency

OSHA = Occupational Safety and Health Administration

NIOSH = National Institute for Occupational Safety and Health

ACGIH = American Conference of Governmental Hygienist

FDA = Food and Drugs Administration

### II.3 Amalgamación

El uso del mercurio en la industria minera para amalgamar y concentrar metales preciosos posiblemente data antes de los fenicios y cartaginenses quienes comercializaban el mercurio desde hace 2700 años. Los Romanos utilizaban el proceso de amalgamación alrededor del año 50 a.C. Los procesos de amalgamación de hace más de 2100 años tienen varias similitudes con los procesos actualmente utilizados en la minería del oro alrededor del mundo.

En las minas de Potosí entre 1545 y 1803 más de 25000 toneladas de plata fueron beneficiadas por el proceso de amalgamación con mercurio. Entre 1560 y 1700 alrededor de 20000 toneladas de mercurio fueron importadas para las minas mexicanas, en Perú en el mismo período se alcanzaron 50000. Entre 1700 y 1820 existió un incremento de 100000 Ton en el consumo de mercurio para amalgamación en el Nuevo Mundo. En 1870, más del 70% de la plata mexicana fue producida por este proceso. La producción de mercurio de esas épocas era destinada a la amalgamación de plata en el Nuevo Mundo.



De 1850 a 1900 la minería de oro en Estados Unidos consumió 70000 Ton de Hg. La fiebre del oro en el Oeste de los Estados Unidos fue responsable de la exportación de esta tecnología a Australia, Canadá y otros países.

### ***II.3.1 El Patio***

El proceso de amalgamación denominado como "El Patio" desarrollado por Bartolomé de Medina en 1554 en la Nueva España consistió en esparcir polvo del mineral de oro y plata sobre una gran superficie plana adicionándole agua salada, piritas de cobre y fierro y mercurio elemental. Trabajadores o mulas revolvían la mezcla con palas y rastrillos y se dejaba por días o semanas dependiendo del clima. Después la amalgama se removía, se limpiaba y se quemaba para recuperar el oro, la plata y el mercurio.

El proceso de amalgamación dejó de utilizarse debido al agotamiento de reservas ricas de oro y plata y por el desarrollo del proceso de cianuración. En la actualidad, principalmente en países en desarrollo, la amalgamación ha retomado interés de empresarios ya que es un proceso económico y fácil de operar.

### ***II.4 Jales***

En el proceso de "El Patio" utilizado en México de 1554 a 1880 para extraer oro y plata, después de formar la amalgama se procedía con el lavado, durante el cual, se removían piedras, tierra y el exceso de mercurio. El lavado generalmente se realizaba en los ríos o arroyos cercanos a las minas.

La corriente además de limpiar, acarrea partículas de amalgama que se iban sedimentando en el fondo del río formando bancos en diferentes zonas. Con el paso del tiempo, la lluvia, la intensidad de la corriente y otros factores, estas partículas recorrieron grandes distancias hasta acumularse en grandes cantidades en diferentes zonas.

Ahora, siguiendo el cauce de antiguos ríos y arroyos podemos encontrar bastas extensiones de tierra que contienen mercurio, oro y plata, siendo esta la materia conocida como jales.

En el área cercana a las minas de oro y plata, el mercurio se encuentra depositado y acumulado en los jales y es importante saber como se transporta y distribuye en el ambiente en un periodo de tiempo. Se han realizado pocos estudios que demuestran las características de los jales, según información recopilada de jales antiguos y recientemente depositados, se ha obtenido que en la mayoría de estos, el mercurio se presenta en forma metálica ( $Hg^0$ ) y el mercurio soluble en agua generalmente es menor al 0.1% del total del mercurio contenido en el jale (Andrade et al. 1988; CETEM 1989; Lacerda 1990; Ramos y Costa 1990; Lechler y Miller 1993). La mayor parte de los compuestos de mercurio se encuentran asociados con residuos minerales o mercurio metálico (Ching y Hongxiao 1985). Una fracción del mercurio de los jales se encuentra amalgamado con oro y plata (Lane et al. 1988; Fuge et al. 1992).

La distribución del mercurio en los jales está en función de las técnicas mineras utilizadas y de la distribución de las actividades en el área; el contenido de mercurio total en los jales es similar a valores obtenidos con anterioridad (Prokopovich 1984; CETEM 1989).

El mercurio de los jales puede representar una importante fuente de contaminación aún siglos después del paro de operaciones mineras (Lane et al. 1988; Bycroft 1992; Fuge 1992; Lechler y Miller 1993).

### ***II.5 Emisiones a la Atmósfera***

Las emisiones de mercurio a la atmósfera pueden ocurrir por vaporización activa o degasificación pasiva. Un ejemplo de la vaporización activa es cuando en el proceso de amalgamación se quema la amalgama o se purifica el metal, despidiendo mercurio a la atmósfera como  $Hg^0$  o  $HgO$ . Actualmente en el proceso de beneficio de jales se destila el mercurio con las debidas precauciones para que la liberación a la atmósfera sea la mínima. La degasificación pasiva ocurre en el suelo o agua contaminados por mercurio al evaporarse como  $Hg^0$ . Los jales son por mucho la fuente de contaminación por degasificación más importante, aún los jales depositados hace más de 150 años pueden resultar en concentraciones de mercurio elevadas en la atmósfera local.

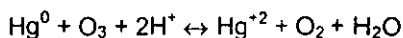
La degasificación de mercurio en los jales depende de la concentración de Hg, de la temperatura de la superficie y del viento.

En los jales, la presencia de compuestos orgánico-Hg es despreciable debido a la baja actividad biológica típica y a la alta concentración de Hg<sup>0</sup>.

Las cuatro especies más importantes en las que se encuentra el mercurio en la atmósfera son:

- Mercurio metálico (Hg<sup>0</sup>), caracterizado por una alta presión de vapor, una baja solubilidad en agua y un tiempo de residencia en la atmósfera dependiente de su oxidación.
- Mercurio inorgánico divalente (Hg<sup>+2</sup>), caracterizado por su alta afinidad a las ligaduras orgánicas e inorgánicas, particularmente con radicales que contienen azufre.
- Mercurio particulado
- Metil-mercurio (CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>), caracterizado por su gran resistencia a la degradación ambiental.

El mercurio elemental en forma de vapor liberado en la atmósfera es oxidado a Hg<sup>+2</sup> en reacciones en las que principalmente interviene el ozono. La energía solar y el vapor de agua también participa en el proceso de oxidación. La reacción en un pH de 4-7 es la siguiente (Brosset y Lord 1991):



Por lo tanto, la producción de Hg<sup>+2</sup> está en función de la concentración de ozono en la atmósfera.

Una vez formado el mercurio iónico (Hg<sup>+2</sup>) es removido de la atmósfera por la lluvia para ser depositado en medios terrestres y acuáticos donde participará en reacciones de organificación y asimilación por la biota (Kothny 1984; Lindqvist et al. 1984; Lindqvist y Rhode 1984; Petersen et al. 1989)

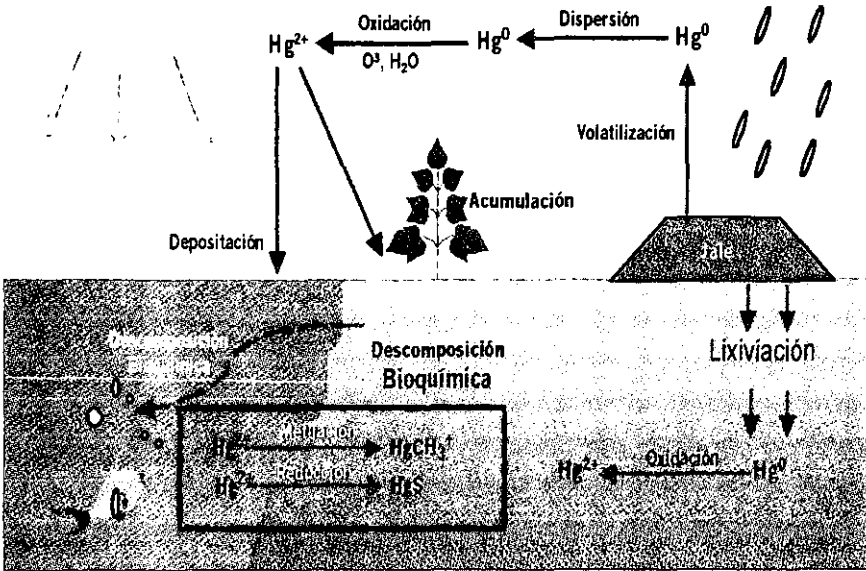
## ***II.6 Estimación de Pérdidas de Mercurio al Ambiente***

La liberación del mercurio al medio ambiente durante el uso del proceso de amalgamación en la Nueva España es de gran importancia ya que es sabido de su baja eficiencia y que fue utilizado en grandes cantidades. Sin embargo, es muy difícil calcular un estimado correcto de la cantidad de mercurio existente en el ambiente. Por otro lado, el oro y la plata extraídos siempre fueron cuantificados cuidadosamente y basándonos en la producción de estos, en la cantidad de mercurio importado y en la similitud existente con los procesos de amalgamación de la actualidad, se podría obtener una cifra estimada del mercurio liberado al ambiente, aunque es muy variable y depende del lugar, composición y concentración del mineral y otros parámetros del proceso.

Se han publicado factores de emisión de diferentes sitios mineros, Fisher (1977) estimó que en las minas de la Nueva España, por 1 Kg de oro o plata obtenido se liberaban 1.5 Kg de mercurio, pudiendo variar en un rango de 0.85 para el mineral pobre y hasta 4.1 en el rico. Estudios posteriores de varios investigadores han encontrado cifras similares en distintos sitios mineros. Además, todos los estudios determinaron que el factor de emisión a la atmósfera era mucho más elevado que el de ríos y suelos, conformando del 45 - 87% de la emisión total. A los ríos se liberaba entre el 15 y 20% en forma de jale y el resto como mercurio metálico.

Nriagu (1993) estimó que entre 1570 y 1900 se liberaron al ambiente 196,000 toneladas de mercurio en la Nueva España.

## 11.7 Ciclo de Vida del Mercurio



En el diagrama se muestra como el mercurio va cambiando de estado de oxidación en el medio ambiente, sin embargo, sabemos que el mercurio en los jales de Zacatecas se encuentra en grandes cantidades demostrando su gran estabilidad. Como se explicó anteriormente, el mercurio en los jales recientes queda principalmente en estado metálico ( $Hg^0$ ) o amalgamado; con el tiempo y las condiciones atmosféricas pueden sufrir cambios formando compuestos orgánicos e inorgánicos.

## 11.8 Importancia del Beneficio de Jales

La degasificación pasiva del mercurio en los jales puede ser la mayor fuente de contaminación atmosférica, conformando un peligro latente para toda la región. La extracción de jale del predio en el proceso de beneficio deja los terrenos aptos para el cultivo o para realizar cualquier actividad disminuyendo día a día la posibilidad de incrementar la cantidad de mercurio en el ambiente.

La única posible fuente de contaminación dentro del proceso es en el momento de destilar el mercurio; teniendo las instalaciones adecuadas y con las debidas precauciones no se presenta el riesgo de liberarlo a la atmósfera. Por lo tanto, el proceso de beneficio de jales en realidad es una forma de remediar los suelos y de disminuir el peligro de envenenamiento a todos los habitantes del estado.

Las empresas beneficiadoras de jales son una gran fuente de empleo debido a la variedad de trabajos relacionados con el proceso, además, se encuentran ligadas muchas otras actividades necesarias para mantener el desarrollo del mismo.

NOTA: Todas las referencias que se hacen en este capítulo se pueden encontrar en el libro "Mercury from Gold and Silver Mining: A Chemical Time Bomb? "

C A P I T U L O   I I I .  
P R O C E S O   D E  
B E N E F I C I O   D E  
J A L E S

## **Capítulo III. Proceso de Beneficio de Jales en las Empresas Beneficiadoras de Zacatecas**

### **III.1 Antecedentes**

Los jales en Zacatecas se han beneficiado desde los años 20's, el proceso de lixiviación utilizado en las empresas de Zacatecas casi no ha tenido cambios debido a que los conocimientos del mismo se han transmitido de generación en generación.

Para adquirir los jales cada empresa lleva a cabo una selección de terrenos basándose en cartas topográficas para localizar diferentes puntos que por sus características geográficas pudieran indicar el contenido de metales en la tierra. Posteriormente se lleva a cabo un muestreo y según el resultado de los análisis de concentración de plata (ley) se puede determinar si el terreno es económicamente rentable para su beneficio. Dicho terreno puede ser comprado o rentado según el acuerdo al que se llegue con el dueño; lo más común es la renta del terreno estableciendo la recolección del jale y al término de esta la empresa se compromete a entregar el terreno apto para su posterior uso (generalmente para el cultivo).

### **III.2 Descripción General del Proceso**

Para poder comprender el proceso de Beneficio de Jales se realizó una descripción general que incluye los esquemas de las dos empresas para su mejor entendimiento.

1. Excavación del jale para ser transportado a la planta beneficiadora donde se acomoda en piletas.
2. A las piletas se les suministra una solución de tiosulfato de calcio durante varios días para extraer los metales de la tierra.
3. Se da un lavado con agua para terminar la extracción.



4. La solución y el agua salen a una canaleta donde se juntan las salidas de todas las piletas, la canaleta desemboca en una cisterna formando la solución promedio (solución con metales disueltos).
5. El jale beneficiado se retira de las piletas. El proceso de llenado y vaciado es continuo.
6. La solución promedio se bombea de la cisterna a las baterías<sup>5</sup> con cobre donde se lleva a cabo una reducción química, esto es, la depositación de los metales precipitados en la superficie del cobre.
7. La solución de salida de las baterías se recircula nuevamente a las piletas.
8. El cobre con valores<sup>6</sup> en la superficie se lava con la misma solución y se regresa a las baterías.
9. Los valores se llevan a un tanque de decantación. El precipitado se guarda en costales y la solución se junta con la de salida de las baterías.
10. El precipitado en costales se lleva al horno para su secado y destilar el mercurio. El mercurio se condensa en una cámara sellada.

NOTA: El proceso es cerrado, por lo que no genera efluentes. Las pérdidas de líquido son por evaporación durante el recorrido por las canaletas y en las piletas, ya que se encuentran descubiertos y porque el jale beneficiado queda húmedo.

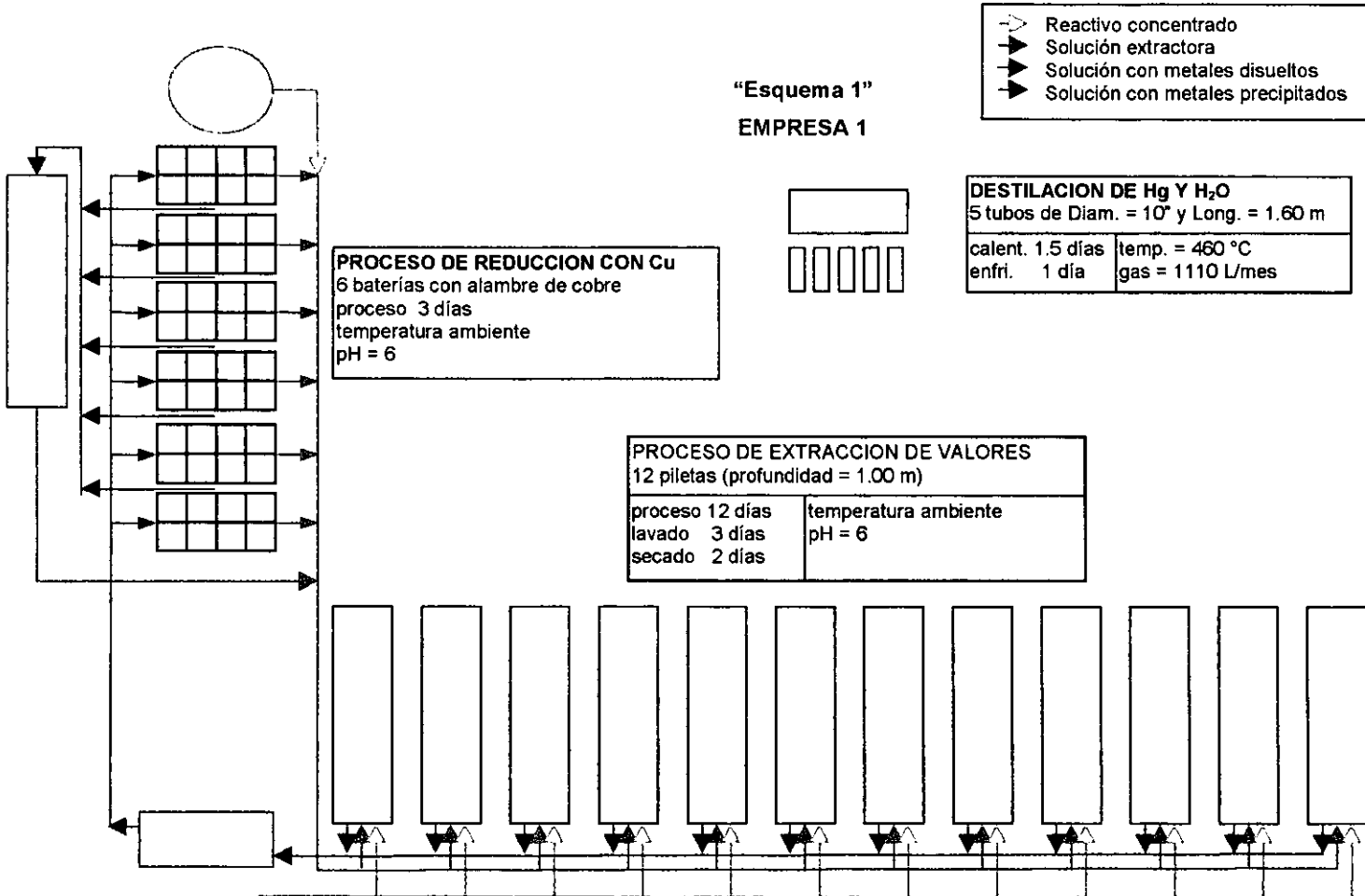
Para estudiar y entender el proceso de beneficio de jales utilizado en las empresas de Zacatecas se dividirá en tres subprocesos principales, los cuales son:

- Extracción
- Reducción Química con Cobre
- Destilación de Mercurio

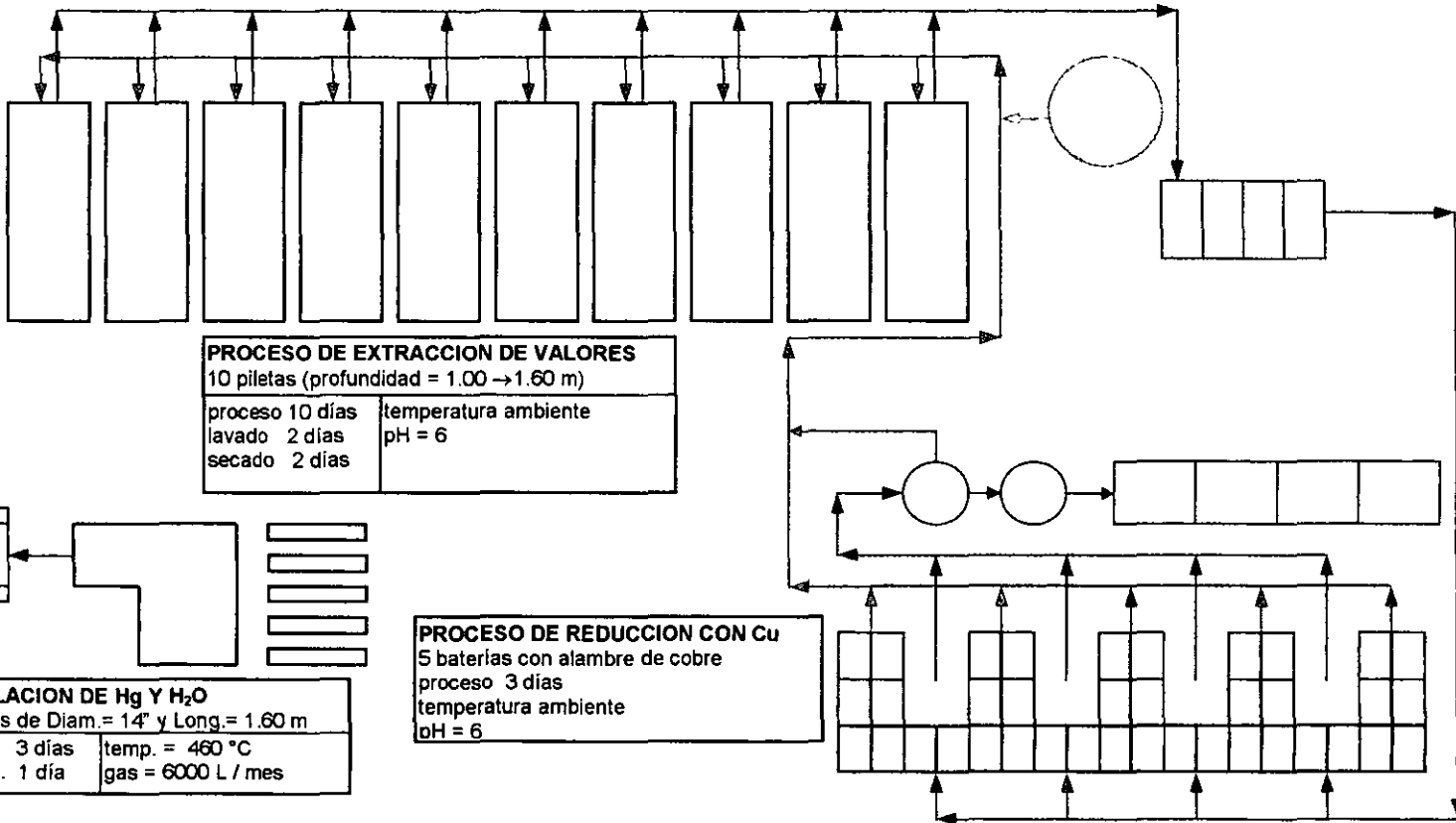
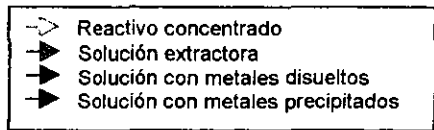
---

<sup>5</sup> Batería: contenedores de cemento en donde se coloca el cobre.

<sup>6</sup> Valores: precipitado de metales color grisáceo que se deposita en la superficie del cobre.



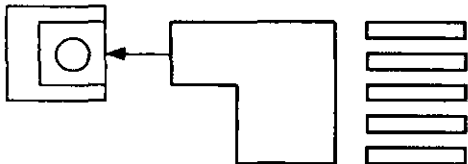
**"Esquema 2"**  
**EMPRESA 2**



|  |                      |
|--|----------------------|
| <b>PROCESO DE EXTRACCION DE VALORES</b>  |                      |
| 10 piletas (profundidad = 1.00 → 1.60 m) |                      |
| proceso 10 días                          | temperatura ambiente |
| lavado 2 días                            | pH = 6               |
| secado 2 días                            |                      |

|                                    |                      |
|------------------------------------|----------------------|
| <b>PROCESO DE REDUCCION CON Cu</b> |                      |
| 5 baterías con alambre de cobre    |                      |
| proceso 3 días                     | temperatura ambiente |
| pH = 6                             |                      |

|   |                    |
|---|--------------------|
| <b>DESTILACION DE Hg Y H<sub>2</sub>O</b> |                    |
| 10 tubos de Diam. = 14" y Long. = 1.60 m  |                    |
| calent. 3 días                            | temp. = 460 °C     |
| enfriam. 1 día                            | gas = 6000 L / mes |



La cantidad de jale a beneficiar en cada empresa es distinta según el número de piletas y sus dimensiones.

### Empresa 1

Esta empresa tiene 12 piletas en su proceso con las siguientes dimensiones:

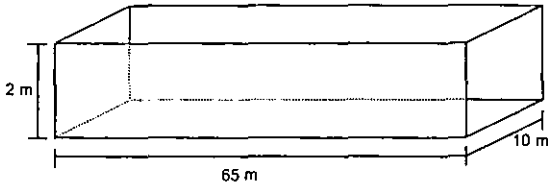


Fig. III.2.a Dimensiones de las piletas en la Empresa 1

El jale se extiende a lo largo y ancho de la piqueta hasta 1 m de altura. Por lo tanto tienen una capacidad de  $650 \text{ m}^3$  de jale por piqueta.

### Empresa 2

Esta empresa tiene 10 piletas en su proceso con las siguientes dimensiones:

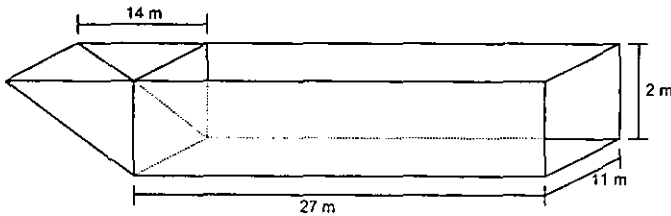
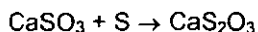
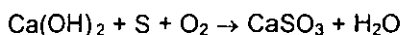
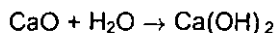


Fig. III.2.b Dimensiones de las piletas en la Empresa 2

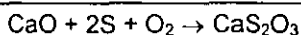
El jale se extiende a lo largo y ancho de la piqueta y hasta 1.5 m de altura. Por lo tanto tienen una capacidad de  $561 \text{ m}^3$  de jale por piqueta.

### III.3.3 Preparación del reactivo

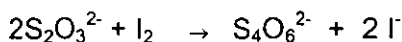
El agente lixivante que se utiliza en el proceso de beneficio de jales en las Empresas 1 y 2 de Zacatecas para llevar a cabo la extracción de los metales contenidos en el jale es el tiosulfato de calcio ( $\text{CaS}_2\text{O}_3$ ), el método de preparación y la cantidad de materia prima varía en cada empresa siguiendo la misma reacción:



Reacción Total



Para saber la concentración del reactivo y de la solución extractora, las empresas titulan con una solución yodo – yoduro 0.1 N de acuerdo a la siguiente reacción:



#### Empresa 1

Las cantidades de materia prima utilizadas cada vez que se prepara el reactivo son las siguientes:

- 9000 L de agua
- 4 Ton de cal
- 3.7 Ton de azufre

La concentración encontrada del reactivo concentrado es: 1.05 N

#### Empresa 2

Las cantidades de materia prima utilizadas cada vez que se prepara el reactivo son las siguientes:

- 5000 L de agua
- 4 Ton de cal
- 2.5 Ton de azufre
- 25 Kg de sal

La concentración encontrada del reactivo concentrado es: 1.50 N

NOTA: El método de preparación del reactivo se explicará en el capítulo de experimentación.

### III.3.4 Solución Extractora

La solución extractora se encuentra circulando a lo largo de todo el proceso, las empresas tratan de mantener una concentración constante de tiosulfato de calcio, por lo que diariamente se verifica titulando con yodo la solución de entrada a las piletas.

La concentración del tiosulfato de calcio en la solución extractora disminuye a causa de la reacción llevada a cabo con los metales y al lavado con agua que posteriormente se explicará. Para llevarla a la concentración de tiosulfato de calcio adecuada se diluye el reactivo en la solución de entrada a las piletas, manteniéndola en:

- **Empresa 1:** 0.047 N
- **Empresa 2:** 0.035 N

### III.3.5 Extracción de Metales

Al jale contenido en las piletas se le suministra la solución de tiosulfato de calcio para extraer los metales (Ag, Au y Hg) durante 12 días en la **Empresa 1** y 10 en la **Empresa 2**.

En la siguiente figura se muestran las entradas de solución y salidas de lixiviado en el sistema de piletas de las empresas beneficiadoras, demostrando como se forma la solución promedio.

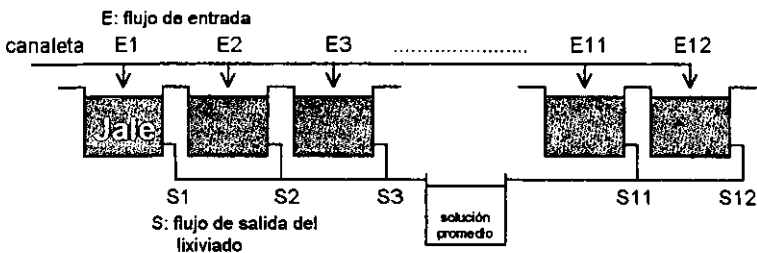


Fig. III.3 Entrada y salida de las piletas.

Como se puede observar en la figura III.3, el suministro de solución extractora ( $\text{CaS}_2\text{O}_3$ ), es a través de una canaleta que está conectada en serie a las piletas. El flujo de entrada a cada una ( $E_1, E_2, \dots, E_{12}$ ) varía dependiendo del orden y número de piletas alimentadas, así como del número de día de proceso que tiene cada pileta.

Las salidas de lixiviado ( $S_1, S_2, \dots, S_{12}$ ) de todas las piletas se juntan en una cisterna formando la *solución promedio*, cabe mencionar que la cantidad de metales que se extrae de cada pileta depende del número de día de proceso que tenga.

El estudio de las piletas comienza en el *día cero*, en el cual al tener la pileta llena con jale se le comienza a adicionar solución extractora hasta llegar a un nivel aproximadamente de 2 cm por arriba de la superficie del jale.

El *día 1* es cuando la salida de la pileta se abre y generalmente se mantendrá así hasta el final del proceso de extracción. De este día en adelante el nivel de solución en la pileta se tratará de mantener constante a 2 cm por arriba de la superficie, regulando el flujo de entrada de solución, dependiendo completamente del flujo de salida de lixiviado.

La velocidad de salida de lixiviado depende del número de días de proceso que tenga la pileta, generalmente cada día disminuye, debido principalmente a que la tierra se va compactando y dificulta el paso de la solución a través del jale. En algunas ocasiones el filtrado es muy lento y es necesario suspender el flujo de entrada momentáneamente. Por lo tanto, el flujo general del proceso depende de la filtración de todas las piletas.

### **III.3.6 Lavado y Secado**

Al finalizar los días establecidos en cada empresa para adicionar solución a las piletas, prosiguen los días de *lavado*, en los cuales se agrega agua para acarrear los metales disueltos que hayan quedado atrapados en el jale en los días anteriores.

La etapa final del proceso de extracción es el *secado*, durante el cual se suspende toda entrada a la pileta esperando a que se filtre todo el líquido remanente.

Después del *secado*, se vacían las piletas con excavadoras y el jale beneficiado se transporta con camiones de carga a las zonas de confinamiento de cada empresa.

Para ejemplificar lo antes mencionado, en las Tablas III.1 y III.2 se muestran los datos tomados en las empresas a lo largo del proceso de extracción de una pileta seleccionada.



Tabla III.2

Proceso Completo de las Piletas en la Empresa 2

| D<br>i<br>a | Pileta #                        |                  |                  |                  |          |        |        |                  |                  |                  |
|-------------|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|----------|--------|--------|------------------|------------------|------------------|
|             | 1                               | 2                | 3                | 4                | 5        | 6      | 7      | 8                | 9                | 10               |
| d<br>e      | secado                          | Secado           | 13               | 10               | 8        | 6      | 1      | Llenado con jale | secado           | lavado           |
|             | secado                          | Secado           | 14               | 11               | 9        | 7      | 2      | 0                | secado           | lavado           |
|             | secado                          | secado           | Lavado           | 12               | 10       | 8      | 3      | 1                | vaciando         | secado           |
|             | secado                          | secado           | Lavado           | 13               | 11       | 9      | 4      | 2                | vaciando         | secado           |
|             | secado                          | secado           | Secado           | lavado           | 12       | 10     | 5      | 3                | Llenado con jale | secado           |
|             | secado                          | secado           | Secado           | secado           | 13       | 11     | 6      | 4                | 0                | vaciando         |
|             | secado                          | secado           | Secado           | secado           | 14       | 12     | 7      | 5                | 1                | Llenado con jale |
|             | vaciando                        | secado           | Secado           | secado           | lavado   | 13     | 8      | 6                | 2                | 0                |
|             | Llenado con jale                | secado           | Secado           | secado           | lavado   | 14     | 9      | 7                | 3                | 1                |
|             | p<br>r<br>o<br>c<br>e<br>s<br>o | 0                | secado           | Secado           | secado   | secado | 15     | 10               | 8                | 4                |
| 1           |                                 | vaciando         | Vaciando         | secado           | secado   | 16     | 11     | 9                | 5                | 3                |
| 2           |                                 | Llenado con jale | Llenado con jale | secado           | secado   | lavado | 12     | 10               | 6                | 4                |
| 3           |                                 | 0                | 0                | secado           | secado   | lavado | 13     | 11               | 7                | 5                |
| 4           |                                 | 1                | 1                | vaciando         | secado   | secado | lavado | 12               | 8                | 6                |
| 5           |                                 | 2                | 2                | Llenado con jale | secado   | secado | lavado | 13               | 9                | 7                |
| 6           |                                 | 3                | 3                | 0                | vaciando | secado | secado | lavado           | 10               | 8                |
| 7           | 4                               | 4                | 1                | Llenado con jale | secado   | secado | lavado | 11               | 9                |                  |

**Tabla III.1**  
**Proceso Completo de las Piletas en la Empresa 1**

|  |          | Pileta #         |        |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |        |    |
|--|----------|------------------|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------|----|
|  |          | 1                | 2      | 3                | 4                | 5                | 6                | 7                | 8                | 9                | 10               | 11     | 12 |
| <b>D<br/>i<br/>a<br/><br/>d<br/>e<br/><br/>p<br/>r<br/>o<br/>c<br/>e<br/>s<br/>o</b> | 10       | 2                | 1      | Llenado con jale | vacía            | secado           | lavado           | 12               | 11               | 9                | 7                | 4      |    |
|  | 11       | 3                | 2      | 0                | Llenado con jale | vaciando         | lavado           | lavado           | 12               | 10               | 8                | 5      |    |
|  | 12       | 4                | 3      | 1                | 0                | vacía            | secado           | lavado           | lavado           | 11               | 9                | 6      |    |
|  | lavado   | 5                | 4      | 2                | 1                | Llenado con jale | secado           | secado           | lavado           | 12               | 10               | 7      |    |
|  | lavado   | 6                | 5      | 3                | 2                | 0                | vaciando         | secado           | secado           | lavado           | 11               | 8      |    |
|  | lavado   | 7                | 6      | 4                | 3                | 1                | Llenado con jale | vaciando         | secado           | lavado           | 12               | 9      |    |
|  | secado   | 8                | 7      | 5                | 4                | 2                | 0                | vacía            | secado           | secado           | lavado           | 10     |    |
|  | secado   | 9                | 8      | 6                | 5                | 3                | 1                | Llenado con jale | vaciando         | secado           | lavado           | 11     |    |
|  | vaciando | 10               | 9      | 7                | 6                | 4                | 2                | 0                | Llenado con jale | secado           | lavado           | 12     |    |
|  | vaciando | lavado           | 10     | 8                | 7                | 5                | 3                | 1                | 0                | vaciando         | secado           | 13     |    |
|  | 0        | lavado           | 11     | 9                | 8                | 6                | 4                | 2                | 1                | vacía            | secado           | lavado |    |
|  | 1        | secado           | 12     | 10               | 9                | 7                | 5                | 3                | 2                | vacía            | secado           | lavado |    |
|  | 2        | secado           | lavado | 11               | 10               | 8                | 6                | 4                | 3                | Llenado con jale | vaciando         | secado |    |
|  | 3        | vaciando         | lavado | 12               | 11               | 9                | 7                | 5                | 4                | 0                | vacía            | secado |    |
|  | 4        | vacía            | lavado | Lavado           | 12               | 10               | 8                | 6                | 5                | 1                | Llenado con jale | secado |    |
|  | 5        | llenado con jale | secado | Lavado           | 13               | 11               | 9                | 7                | 6                | 2                | Llenado con jale | secado |    |
|  | 6        | 0                | secado | Lavado           | lavado           | 12               | 10               | 8                | 7                | 3                | 0                | secado |    |

En el caso de la **Empresa 1** se seleccionó la piletta # 3 para llevar a cabo el análisis, como podemos observar en la Tabla III.1, la piletta tuvo 12 días de proceso con solución extractora, 3 de lavado y 2 de secado.

Podemos ver que el flujo de entrada a la piletta en el primer día es afectado por el flujo de suministro a las piletas anteriores a ella (1 y 2), las cuales se encuentran en el día 10 y 2 de proceso respectivamente.

En el caso de la **Empresa 2** se seleccionó la piletta # 7 para llevar a cabo el análisis, como podemos observar en la Tabla III.2, la piletta tuvo 13 días de proceso con solución extractora, 2 de lavado y 2 de secado.

Podemos ver que el flujo de entrada a la piletta en el primer día es afectado por el flujo de suministro a las piletas anteriores a ella (3, 4, 5 y 6), las cuales se encuentran en el día 13, 10, 8 y 6 de proceso respectivamente; las piletas 1 y 2 no afectan el flujo de entrada debido a que se encontraban en el secado.

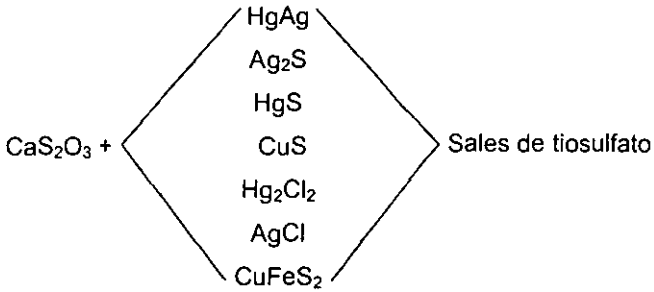
Cuando las piletas están en lavado, secado, vaciado o llenado no afectan el flujo de alimentación de la solución extractora.

Además, podemos observar que el llenado de las piletas es constante, por lo que nunca se detiene el proceso.

Es importante mencionar que las dos empresas tratan de mantener días de proceso establecidos, para el caso de la Empresa 2, los datos obtenidos no demuestran una constancia en los días de secado de las primeras 6 piletas y presentan más días de proceso y lavado en las piletas restantes, esto se debió a una serie de problemas que retrasaron el proceso.

### III.3.7 Reacciones en el Proceso de Extracción

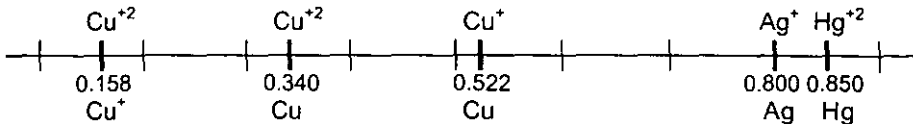
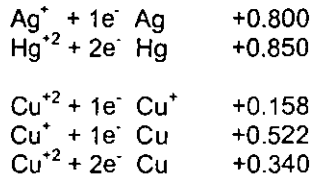
El tiosulfato de calcio reacciona con los compuestos que asumimos que sea más probable que se encuentran presentes en el jale formando tiosulfatos solubles que son transportados al proceso de reducción en cobre.



### III.4 Proceso de Reducción Química con Cobre

Este proceso comprende la recuperación de los metales obtenidos en el proceso de extracción por medio de reacciones de reducción llevadas a cabo entre la solución promedio y la superficie del cobre. La diferencia de potencial que existe entre el cobre y los metales hace que pasen de la solución a un precipitado en polvo color grisáceo que se deposita en la superficie del cobre.

#### III.4.1 Potenciales



### III.4.2 Baterías con Cobre

Las baterías son contenedores de cemento en donde se coloca el cobre, cada una esta formada por 8 cubos de  $1\text{m}^3$ . El flujo de entrada es la solución promedio y el de salida es la solución de entrada a las piletas.

La **Empresa 1** tiene 6 baterías mientras que la **Empresa 2** tiene 5, las cuales se encuentran conectadas en serie como se muestra en la figura III. 4.

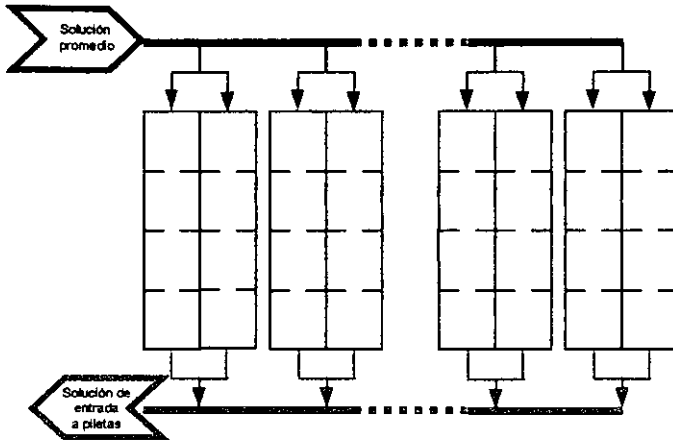


Fig. III.4 Entrada y salida de las baterías.

Las empresas utilizan diferente cantidad de cobre debido a la diferencia en el número de baterías, a la cantidad de cobre en cada batería y a la concentración de reactivo, ya que el cobre se disuelve con el reactivo.

El cobre es comprado como desperdicio, es decir, chatarra de cobre que consiste principalmente en alambre, tubo y lámina. Parte del alambre está cubierto por plástico, el cual es removido antes de utilizarlo en el proceso.

El consumo mensual de cobre para cada empresa es:

**Empresa 1:** 1600 Kg

**Empresa 2:** 860 Kg

Los cubos de las piletas están conectadas de la siguiente forma:

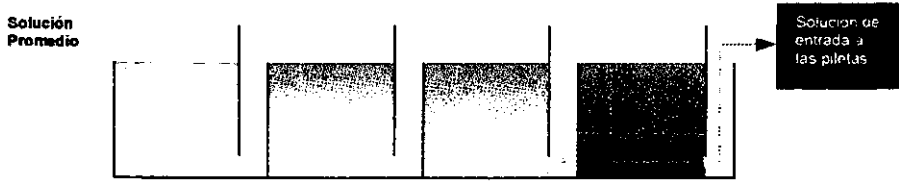


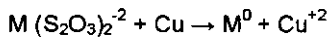
Fig. III.5 Recorrido de la solución dentro de las baterías.

El espacio entre los cubos permite que la solución promedio tenga un mayor contacto con la superficie del cobre, obligándola a subir y bajar durante su recorrido.

El proceso de depositación dura tres días, esto no indica que el cobre sea desechado al terminar el proceso, sino que es lavado con solución promedio a presión, para que todos los metales depositados en el cobre sean despegados de su superficie y éste ya "limpio" sea re-utilizado.

El precipitado de color gris, es arrastrado con la solución a cisternas en donde se va acumulando en el fondo, dando la apariencia de un lodo. Posteriormente, este será recogido y envuelto en sacos para llevarlo al horno de destilación.

### III.4.3 Reacciones en el Proceso de Reducción Química con Cobre



Donde M = Ag, Hg, Pb, ...

### III.5 Destilación de Mercurio

La destilación es la parte final del proceso de beneficio de jales, en esta etapa se separa el mercurio del precipitado, obteniendo los valores que son un polvo fino con metales preciosos.

#### III.5.1 Horno

El horno en la **Empresa 1** esta conformado por 5 tubos de 25.4 cm de diámetro y 1.60 m de longitud colocados 2 arriba y 3 abajo con un quemador central como se muestra en la figura III.6. En estos tubos se introducen los sacos rellenos con precipitado, se colocan las tapas, se sellan con barro y el quemador se enciende durante 36 horas. El mercurio y el agua destilados pasan a la cámara de condensación mediante un tubo que sale de la tapa de cada uno de ellos, la cámara se encuentra completamente sellada para evitar que escapen los vapores, ver figura III.7. Después de 24 horas de enfriamiento se abren los tubos para extraer los valores, los cuales, son almacenados en tambos para su venta. El mercurio es extraído del fondo de la cámara abriendo una llave de paso envasándolo en contenedores especiales para su transporte.

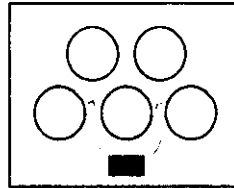


Fig. III.6 Corte transversal del horno en la Empresa 1

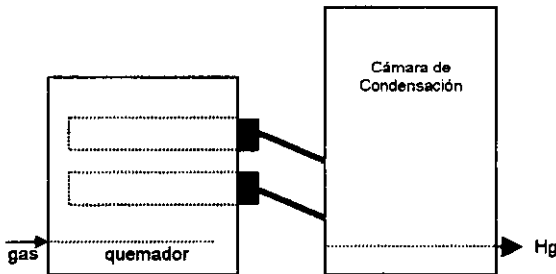


Fig. III.7 Horno y cámara de condensación en la Empresa 1

El horno en la **Empresa 2** esta conformado por 5 tubos de 35.56 cm de diámetro y 1.60 m de longitud colocados horizontalmente con un quemador transversal como se muestra en la figura III.8. En estos tubos se introducen los sacos rellenos con precipitado, se colocan las tapas, se sellan con barro y el quemador se enciende durante 72 horas. El mercurio y el agua destilados pasan a la cámara de condensación mediante un tubo que sale de la tapa de cada uno de ellos, la cámara se encuentra completamente sellada para evitar que escapen los vapores, ver figura III.9. Después de 24 horas de enfriamiento se abren los tubos para extraer los valores, los cuales, son almacenados en tambos para su venta. El método de recolección del mercurio de esta empresa difiere al anterior debido a que el mercurio condensado pasa directamente a un recipiente sumergido en agua. El envasado del mercurio para su transporte se realiza en los mismos contenedores que en la empresa anterior.



Fig. III.8 Corte transversal del horno en la Empresa 2

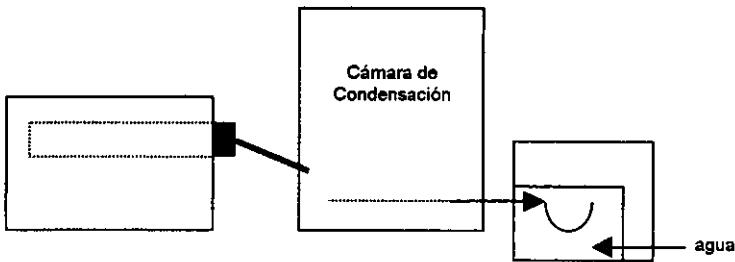


Fig. III.9 Horno y cámara de condensación en la Empresa 2

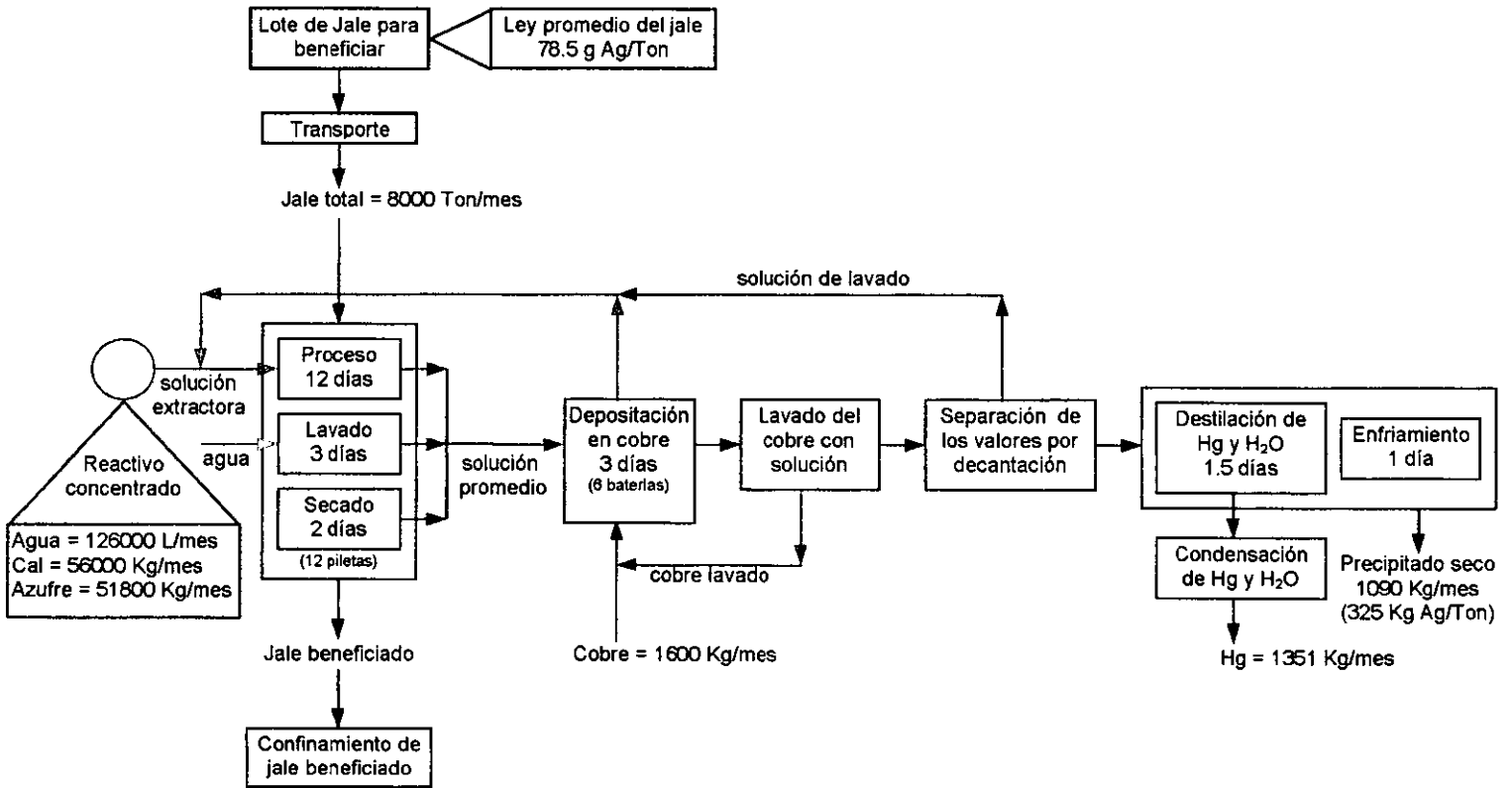


### **III.5.2 Producción**

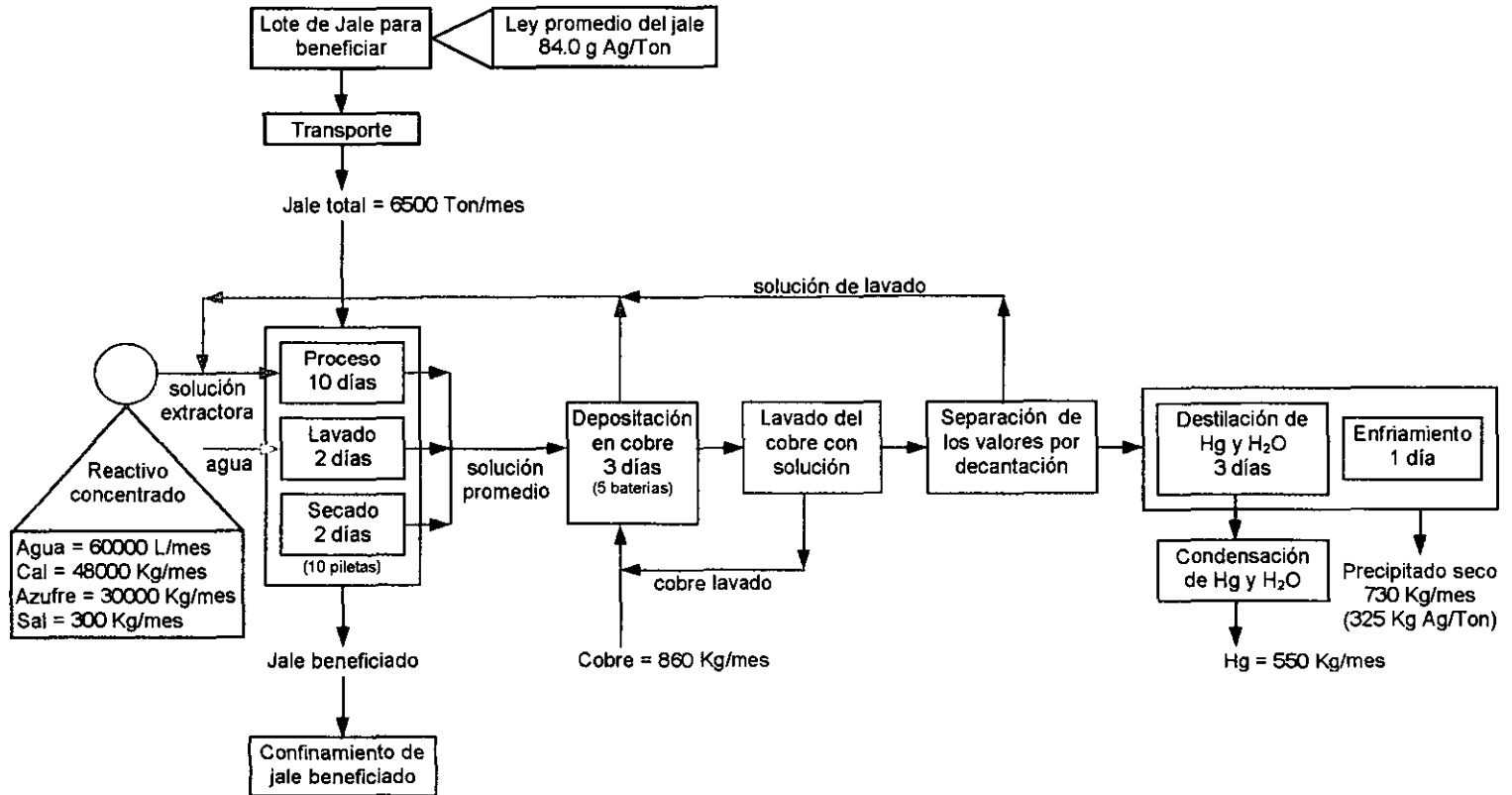
En la **Empresa 1** se producen en promedio 1090 Kg de precipitado seco al mes, el cual, generalmente contiene 325 Kg Ag/Ton, lo que nos indicaría que se recuperan 354,250 Kg de Ag al mes. Como producto secundario el Hg juega un papel importante ya que se obtienen en promedio 1351 Kg al mes.

En la **Empresa 2** se producen en promedio 730 Kg de precipitado seco al mes, el cual, presenta en promedio la misma ley que la Empresa 1, lo que nos indicaría que se recuperan 237,250 Kg de Ag al mes. El promedio mensual de Hg es de 550 Kg.

**"EMPRESA 1"**  
**Balance de materia mensual promedio**



**"EMPRESA 2"**  
**Balace de materia mensual promedio**



C A P I T U L O   I V .  
A N Á L I S I S   D E L  
P R O C E S O

## Capítulo IV. Análisis del Proceso

### IV.1 Análisis de Jales

Las muestras se mandaron a analizar al Laboratorio de Ensayes y Análisis Químicos en Minerales en la ciudad de Zacatecas por copelación y con el fin de comparar el método de análisis se seleccionaron algunas muestras que también fueron analizadas en un Laboratorio privado en la Ciudad de México y en el Laboratorio de Absorción Atómica del Departamento de Edafología del Instituto de Geología en la UNAM por absorción atómica. Los resultados fueron muy variados, por lo que solo se tomaron en cuenta los resultados del laboratorio de Zacatecas ya que cuentan con más experiencia en la manipulación de este tipo de muestras.

#### IV.1.1 Análisis de Jale para Beneficio

Para el caso de la Empresa 1 se tomaron cinco muestras y en el caso de la Empresa 2 se tomaron tres.

Estos análisis determinaron concentraciones de Ag y Hg las cuales se muestran a continuación en las Tabla IV.1 (ver Gráfica IV.1).

**Tabla IV.1**  
*Jales para Beneficio*

| <b>Empresa 1</b> | <b>Lab. Zacatecas</b> |          |
|------------------|-----------------------|----------|
| Muestra          | Ag (ppm)              | Hg (ppm) |
| M1               | 89                    | 200      |
| M2               | 74                    | 180      |
| M3               | 88                    | 140      |
| M4               | 63                    | 160      |
| M5               | 13                    | 160      |

| <b>Empresa 2</b> | <b>Lab. Zacatecas</b> |          |
|------------------|-----------------------|----------|
| Muestra          | Ag (ppm)              | Hg (ppm) |
| M1'              | 71                    | 140      |
| M2'              | 91                    | 260      |
| M3'              | 90                    | 200      |

Como se puede observar en la Tabla IV.1, en los resultados para el contenido de Ag únicamente difiere la muestra M5, por lo que no será tomada en cuenta para el promedio.

Para la Empresa 1 el promedio de Ag es de 78.5 ppm y el de Hg 168 ppm.

Para la Empresa 2 el promedio de Ag es de 84 ppm y el de Hg 200 ppm.

#### IV.1.2 Análisis de Jale Beneficiado

Se colectaron ocho muestras de jale beneficiado en la Empresa 1 y cinco en la Empresa 2, algunas muestras se extrajeron del depósito de confinamiento y otras directamente de las piletas recién beneficiadas (ver Gráfica IV.2).

**Tabla IV.2**  
*Jales Beneficiados*

| <b>Empresa 1 Lab Zacatecas</b> |          |          |
|--------------------------------|----------|----------|
| Muestra                        | Ag (ppm) | Hg (ppm) |
| M1                             | 31       | 40       |
| M2                             | 34       | 60       |
| M3                             | 44       | 80       |
| M4                             | 23       | 60       |
| M5                             | 24       | 80       |
| M6                             | 29       | 40       |
| M7                             | 19       | 40       |
| M8                             | 67       | 60       |

| <b>Empresa 2 Lab Zacatecas</b> |          |          |
|--------------------------------|----------|----------|
| Muestra                        | Ag (ppm) | Hg (ppm) |
| M1'                            | 26       | 40       |
| M2'                            | 29       | 40       |
| M3'                            | 25       | 40       |
| M4'                            | 58       | 100      |
| M5'                            | 26       | 60       |

Como se puede observar en la Tabla IV.2, en los resultados para el contenido de Ag difieren la muestra M8 para la Empresa 1 y la M4' para la Empresa 2, por lo que no serán tomadas en cuenta para el promedio. En el caso del Hg la muestra M4' difiere de igual manera, por lo que tampoco se tomará en cuenta.

Para la Empresa 1 el promedio de Ag es de 29.1 ppm y el de Hg 57.5 ppm.

Para la Empresa 2 el promedio de Ag es de 26.5 ppm y el de Hg 45.0 ppm.

### **IV.1.3 Comparación de Jale Original Vs. Beneficiado**

#### **Empresa 1**

El promedio de Ag para el jale original fue de 78.5 ppm y el de jale beneficiado fue de 29.1 ppm, por lo que se extraen 49.4 ppm de Ag.

**Esto nos da una eficiencia de extracción de Ag de 62.9%.**

El promedio de Hg para el jale original fue de 168.0 ppm y el de jale beneficiado fue de 57.5 ppm, por lo que se extraen 110.5 ppm de Hg.

**Esto nos da una eficiencia de extracción de Hg de 65.8%. (ver Gráfica IV.3)**

#### **Empresa 2**

El promedio de Ag para el jale original fue de 84.0 ppm y el de jale beneficiado fue de 26.5 ppm, por lo que se extraen 57.5 ppm de Ag.

**Esto nos da una eficiencia de extracción de Ag de 68.5%.**

El promedio de Hg para el jale original fue de 200.0 ppm y el de jale beneficiado fue de 45.0 ppm, por lo que se extraen 155.0 ppm de Hg.

**Esto nos da una eficiencia de extracción de Hg de 77.5%. (ver Gráfica IV.3)**

### **IV.1.4 Análisis de Jale Profundo**

Se tomaron muestras de la tierra que queda en los terrenos donde se recolecta el jale de las dos empresas con el fin de asegurarnos que la remoción del jale se realiza hasta una profundidad adecuada. Se analizaron 5 muestras de la Empresa 1 y 5 de la Empresa 2 mediante rayos X en el Laboratorio de Rayos X del Instituto de Geología en la UNAM, los resultados obtenidos no nos mostraron en que forma se encuentran presentes la plata y el mercurio debido a que el contenido de estos metales en la tierra analizada se encuentra por debajo del 5% que es el límite de detección. Al analizar estas muestras mediante copelación se obtuvo en promedio:

**Tabla IV.3**  
*Jales Profundos*

| <b>Laboratorio de Zacatecas</b> |                 |                 |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Promedio de 5 muestras</b>   | <b>Ag (ppm)</b> | <b>Hg (ppm)</b> |
| Empresa 1                       | 9               | 30              |
| Empresa 2                       | 9               | 40              |

## IV.2 Análisis de la Solución Extractora

El análisis de la solución extractora se realizó en el Laboratorio de Absorción Atómica del Departamento de Edafología del Instituto de Geología en la UNAM mediante absorción atómica, los metales cuantificados fueron  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Hg}^{++}$ ,  $\text{Cu}^{++}$  y  $\text{Pb}^{++}$  en cada muestra.

El muestreo se llevó a cabo en cada parte del proceso donde esta involucrada la solución extractora. Es decir, en la extracción y en la reducción química con cobre.

### IV.2.1 Proceso de Extracción

En el caso de la extracción se obtuvieron diariamente muestras de entrada a la pileta y de salida de la pileta seleccionada en cada empresa. Cabe mencionar que en la Empresa 1 hubo 12 días con solución y 3 días de lavado con agua y en la Empresa 2 hubo 13 días con solución y 2 días de lavado. Los resultados de la Empresa 1 se muestran en la Tabla IV.4 y los de la Empresa 2 en la Tabla IV.5.

**Tabla IV.4**  
Solución Extractora

| Empresa 1 |       |        |      |      |        |        |      |      |
|-----------|-------|--------|------|------|--------|--------|------|------|
|           | Ag    | Hg     | Pb   | Cu   | Ag     | Hg     | Pb   | Cu   |
| 1         | 50.80 | 141.00 | 0.42 | 1.30 | 24.40  | 105.00 | 0.23 | 0.90 |
| 2         | 49.20 | 138.00 | 0.31 | 1.60 | 35.70  | 302.00 | 0.23 | 0.80 |
| 3         | 52.50 | 101.00 | 0.25 | 1.00 | 76.00  | 343.00 | 0.22 | 0.80 |
| 4         | 55.60 | 101.00 | 0.31 | 1.30 | 90.00  | 220.00 | 0.24 | 0.80 |
| 5         | 50.40 | 80.00  | 0.32 | 1.35 | 108.00 | 162.50 | 0.25 | 0.75 |
| 6         | 45.10 | 59.00  | 0.32 | 1.40 | 126.00 | 105.00 | 0.26 | 0.70 |
| 7         | 44.40 | 45.00  | 0.33 | 1.35 | 114.00 | 81.50  | 0.28 | 0.85 |
| 8         | 43.70 | 31.00  | 0.33 | 1.30 | 102.00 | 58.00  | 0.29 | 1.00 |
| 9         | 42.10 | 44.00  | 0.28 | 1.15 | 88.00  | 61.50  | 0.30 | 1.00 |
| 10        | 40.60 | 57.00  | 0.22 | 1.00 | 74.00  | 65.00  | 0.30 | 1.00 |
| 11        | 39.30 | 47.00  | 0.26 | 1.10 | 67.30  | 77.60  | 0.31 | 1.03 |
| 12        | 37.90 | 37.00  | 0.29 | 1.20 | 60.60  | 90.20  | 0.31 | 1.07 |
| 13        | 36.60 | 27.00  | 0.33 | 1.30 | 53.90  | 102.80 | 0.32 | 1.10 |
| 14        | 35.70 | 28.00  | 0.29 | 1.11 | 42.50  | 78.70  | 0.26 | 0.80 |
| 15        | 43.80 | 29.00  | 0.28 | 0.80 | 34.00  | 51.10  | 0.21 | 1.20 |
| Promedio  | 44.51 | 64.33  | 0.30 | 1.22 | 73.09  | 126.93 | 0.27 | 0.92 |



En la Empresa 1 encontramos que la cantidad de Ag en la entrada de las piletas es constante a lo largo del proceso con un promedio de 44.51 mg/L, la cantidad de Hg varía de 27.00 a 141.00 mg/L, lo cual no es común, se debe a que unos días antes del muestreo se realizó la limpieza de la zona del horno y la cámara de condensación mandando todo el Hg residual a la canaleta de salida de las baterías, sin embargo, podemos determinar sin tomar en cuenta los primeros datos un promedio en el rango de 40.00 mg/L siendo un valor más aceptable.

En la salida vemos que la Ag alcanza su máximo en 126.00 mg/L el sexto día y el Hg en 343.00 mg/L el tercer día.

**Tabla IV.5**  
*Solución Extractora*

| Empresa 2 |       |       |      |      |       |       |      |      |
|-----------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|
|           | Ag    | Hg    | Pb   | Cu   | Ag    | Hg    | Pb   | Cu   |
| 1         | 15.70 | 25.00 | 0.53 | 1.80 | 16.10 | 9.20  | 0.29 | 1.60 |
| 2         | 33.60 | 35.20 | 0.47 | 0.90 | 35.00 | 44.00 | 0.22 | 1.30 |
| 3         | 31.60 | 35.60 | 0.44 | 1.40 | 44.10 | 47.60 | 1.12 | 2.05 |
| 4         | 29.60 | 36.10 | 0.41 | 1.90 | 53.20 | 51.30 | 2.02 | 2.80 |
| 5         | 25.80 | 29.40 | 0.42 | 2.00 | 49.60 | 46.60 | 1.50 | 2.40 |
| 6         | 22.00 | 22.60 | 0.42 | 2.10 | 46.00 | 41.80 | 0.97 | 2.00 |
| 7         | 22.10 | 21.60 | 0.42 | 1.80 | 44.90 | 42.80 | 1.25 | 2.00 |
| 8         | 22.20 | 20.70 | 0.42 | 1.50 | 43.90 | 43.70 | 1.53 | 2.00 |
| 9         | 27.10 | 22.10 | 0.42 | 1.43 | 46.00 | 41.00 | 1.20 | 2.00 |
| 10        | 32.00 | 23.60 | 0.43 | 1.37 | 47.90 | 38.40 | 0.87 | 2.00 |
| 11        | 36.90 | 25.00 | 0.43 | 1.30 | 50.00 | 35.70 | 0.54 | 2.00 |
| 12        | 33.00 | 28.70 | 0.45 | 1.65 | 45.00 | 40.10 | 1.46 | 2.25 |
| 13        | 29.10 | 32.40 | 0.46 | 2.00 | 39.90 | 44.50 | 2.37 | 2.50 |
| 14        | 28.10 | 33.50 | 0.45 | 1.60 | 37.70 | 47.30 | 1.25 | 2.10 |
| 15        | 27.50 | 35.00 | 0.43 | 1.66 | 36.20 | 48.90 | 1.10 | 2.05 |
| Promedio  | 27.75 | 28.43 | 0.44 | 1.63 | 42.37 | 41.53 | 1.18 | 2.07 |

En la Empresa 2 encontramos que las cantidades de Ag y Hg en la entrada de las piletas son constantes y además parecidas, los valores promedio son 27.75 mg/L para Ag y 28.43 mg/L para Hg.

En la salida vemos que la Ag alcanza su máximo en 53.20 mg/L el cuarto día y el Hg en 51.30 mg/L también el cuarto día.

Como podemos observar en las Tablas IV.4 y IV.5, **tenemos presentes los cuatro metales en la solución extractora** en la entrada de las piletas, esto significa que en las baterías con cobre no se depositan completamente la Ag y el Hg y el Pb y el Cu se encuentran en una cantidad constante a lo largo de todo el proceso.

Para analizar más detalladamente el proceso de extracción en las Tablas IV.6 y IV.7 se muestra la diferencia entre la solución de salida y la de entrada obteniendo la cantidad de Ag y Hg extraída diariamente.

**Tabla IV.6**  
*Extracción de Ag y Hg*

| Empresa 1 |       |        |        |        |        |        |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1         | 50.80 | 24.40  | -26.40 | 141.00 | 105.00 | -36.00 |
| 2         | 49.20 | 35.70  | -13.50 | 138.00 | 302.00 | 164.00 |
| 3         | 52.50 | 76.00  | 23.50  | 101.00 | 343.00 | 242.00 |
| 4         | 55.60 | 90.00  | 34.40  | 101.00 | 220.00 | 119.00 |
| 5         | 50.40 | 108.00 | 57.60  | 80.00  | 162.50 | 82.50  |
| 6         | 45.10 | 126.00 | 80.90  | 59.00  | 105.00 | 46.00  |
| 7         | 44.40 | 114.00 | 69.60  | 45.00  | 81.50  | 36.50  |
| 8         | 43.70 | 102.00 | 58.30  | 31.00  | 58.00  | 27.00  |
| 9         | 42.10 | 88.00  | 45.90  | 44.00  | 61.50  | 17.50  |
| 10        | 40.60 | 74.00  | 33.40  | 57.00  | 65.00  | 8.00   |
| 11        | 39.30 | 67.30  | 28.00  | 47.00  | 77.60  | 30.60  |
| 12        | 37.90 | 60.60  | 22.70  | 37.00  | 90.20  | 53.20  |
| Promedio  | 45.97 | 80.50  | 34.53  | 73.42  | 139.28 | 65.86  |

Como podemos ver, en la Empresa 1 el promedio de plata extraído diariamente es 34.53 mg/L, teniendo la máxima extracción el sexto día con un valor de 80.90 mg/L. El promedio de mercurio extraído diariamente es de 65.86 mg/L, teniendo la máxima extracción el tercer día con un valor de 242.00 mg/L. Para entender mejor el comportamiento de estos metales durante la extracción en las piletas en las Gráficas IV.4 y IV.6 se muestran claramente las tendencias que presentan.

**Tabla IV.7**  
Extracción de Ag y Hg

| Empresa 2 |       |       |       |       |       |        |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1         | 15.70 | 16.10 | 0.40  | 25.00 | 9.20  | -15.80 |
| 2         | 33.60 | 35.00 | 1.40  | 35.20 | 44.00 | 8.80   |
| 3         | 31.60 | 44.10 | 12.50 | 35.60 | 47.60 | 12.00  |
| 4         | 29.60 | 53.20 | 23.60 | 36.10 | 51.30 | 15.20  |
| 5         | 25.80 | 49.60 | 23.80 | 29.40 | 46.60 | 17.20  |
| 6         | 22.00 | 46.00 | 24.00 | 22.60 | 41.80 | 19.20  |
| 7         | 22.10 | 44.90 | 22.80 | 21.60 | 42.80 | 21.20  |
| 8         | 22.20 | 43.90 | 21.70 | 20.70 | 43.70 | 23.00  |
| 9         | 27.10 | 46.00 | 18.90 | 22.10 | 41.00 | 18.90  |
| 10        | 32.00 | 47.90 | 15.90 | 23.60 | 38.40 | 14.80  |
| 11        | 36.90 | 50.00 | 13.10 | 25.00 | 35.70 | 10.70  |
| 12        | 33.00 | 50.00 | 17.00 | 28.70 | 40.10 | 11.40  |
| 13        | 29.10 | 39.90 | 10.80 | 32.40 | 44.50 | 12.10  |
| Promedio  | 27.75 | 43.58 | 15.84 | 27.54 | 40.52 | 12.98  |

Como podemos ver, en la Empresa 2 el promedio de plata extraído diariamente es 15.84 mg/L, teniendo la máxima extracción el sexto día con un valor de 24.00 mg/L. El promedio de mercurio extraído diariamente es de 12.98 mg/L, teniendo la máxima extracción el octavo día con un valor de 23.00 mg/L. Para entender mejor el comportamiento de estos metales durante la extracción en las piletas en las Gráficas IV.5 y IV.7 se muestran claramente las tendencias que presentan.

Podemos observar que los valores de concentración en la extracción de Ag y Hg esta muy relacionada, en la Empresa 1 no se ve tan claro (Gráfica IV.6) debido a la elevada concentración de Hg los primeros días, esto nos indicaría que el  $\text{CaS}_2\text{O}_3$  reacciona primero con el Hg y no con la Ag. En la Empresa 2 claramente vemos la estrecha relación que tiene la extracción de los dos metales (Gráfica IV.7).

Los últimos días del proceso de extracción son de lavado, en el cual, se reemplaza el suministro de solución extractora en la entrada de las piletas con agua. Durante estos días encontramos que la concentración de los metales en la salida es similar a la de los días anteriores, dándonos cuenta de la importancia de esta parte del proceso.

**Tabla IV.8**  
*Solución de Salida durante el Lavado*

| <b>Empresa 1</b> |        |        |      |      |
|------------------|--------|--------|------|------|
|                  | Ag     | Hg     | Pb   | Cu   |
| 13               | 53.90  | 102.80 | 0.32 | 1.10 |
| 14               | 42.50  | 78.70  | 0.26 | 0.80 |
| 15               | 34.00  | 51.10  | 0.21 | 1.20 |
| total            | 130.40 | 232.60 | 0.79 | 3.10 |

En la Empresa 1 vemos que cada día disminuye la concentración de los metales, sin embargo, la cantidad total recuperada de Ag y Hg es elevada.

**Tabla IV.9**  
*Solución de Salida durante el Lavado*

| <b>Empresa 2</b> |       |       |      |      |
|------------------|-------|-------|------|------|
|                  | Ag    | Hg    | Pb   | Cu   |
| 14               | 37.70 | 47.30 | 1.25 | 2.10 |
| 15               | 36.20 | 48.90 | 1.10 | 2.05 |
| total            | 73.90 | 96.20 | 2.35 | 4.15 |

En la Empresa 2 todos los metales se mantienen constantes en concentraciones más bajas, sin embargo, la cantidad recuperada también es significativa.

Aunque se tienen variaciones en el número de piletas, la concentración del  $\text{CaS}_2\text{O}_3$  en la solución extractora es relativamente diferente (0.047 y 0.035) y no tienen el mismo número de días en el proceso, vemos que la concentración de los metales en la Empresa 1 es mucho mayor que la de los metales en la Empresa 2, sin embargo en el análisis de los jales se demuestra que la Empresa 2 extrae mayor cantidad de metales que la Empresa 1; la respuesta que encontramos a esta diferencia radica en el problema que se presentó en la Empresa 2. En la Tabla III.2 podemos ver que las piletas tuvieron muchos días de secado, por lo tanto, la solución extractora recorrió el proceso completo sin recibir metales,

mientras que los que se encontraban presentes se depositaban en el cobre reduciendo aún más su concentración, esto nos llevaría a suponer que mientras menor sea la concentración de metales disueltos en la solución extractora mayor será la eficiencia en el proceso de extracción.

#### **IV.2.2 Proceso de Reducción Química con Cobre**

La solución extractora de la salida de cada pileta se junta en una canaleta que se dirige a una cisterna formando la solución promedio, la cual, es bombeada a las baterías para que se lleve a cabo la deposición en cobre.

**Tabla IV.10**  
*Deposición Química en Cobre*

|    | Empresa 1 |       |        | Empresa 2 |       |      |
|----|-----------|-------|--------|-----------|-------|------|
| Ag | 51.13     | 44.51 | 6.62   | 35.21     | 27.75 | 7.46 |
| Hg | 51.50     | 64.33 | -12.83 | 34.97     | 28.43 | 6.54 |
| Pb | 0.32      | 0.30  | 0.02   | 0.85      | 0.44  | 0.41 |
| Cu | 1.30      | 1.22  | 0.08   | 1.70      | 1.63  | 0.07 |

En la Tabla IV.10 podemos ver el promedio de las concentraciones de los metales de 15 días que se llevó a cabo el muestreo de la solución de entrada y salida de las baterías. En la Empresa 1 la solución pierde el 13% del contenido de Ag y por el contrario, el Hg que se encuentra depositado en el cobre pasa a la solución. En la Empresa 2 encontramos que el porcentaje de deposición para Ag es de 21% y para Hg de 19%.

#### **IV.3 Proceso de Destilación de Mercurio**

Para analizar este proceso se introdujo un termopar en el centro de una tapa de los tubos del horno de la Empresa 1, el orificio fue cuidadosamente sellado para evitar cualquier fuga de vapores.

El horno siempre se prende a la hora de salida de la planta por lo que solo se pudieron tomar lecturas de temperatura a partir de las 16 horas de encendido el horno (9:00 a.m.).

**Tabla IV.11**  
*Temperatura del Horno en la Empresa 1*

| <b>Tiempo (h)</b> | <b>Temperatura (°C)</b> |
|-------------------|-------------------------|
| 16                | 402.5                   |
| 18                | 410.0                   |
| 20                | 422.5                   |
| 22                | 441.0                   |
| 24                | 458.0                   |

Estas lecturas nos demuestran que el horno esta sobrecalentado ya que la temperatura de ebullición del Hg es de 356.72°C. Esto nos indica que se esta desperdiciando gas durante este proceso.

C A P I T U L O V .  
E X P E R I M E N T A C I Ó N

## **Capítulo V. Experimentación**

Para estudiar con más detalle el proceso de Beneficio de Jales y con el fin de entender y encontrar los puntos débiles presentes en el proceso de cada empresa se desarrollaron experimentos sobre la preparación del reactivo y la extracción de los metales.

### **V.1 Preparación de Reactivos**

Para llevar a cabo la experimentación en el laboratorio fue necesario producir nuestros propios reactivos, el tiosulfato de calcio ( $\text{CaS}_2\text{O}_3$ ) por ser el reactivo principal del proceso y el tiosulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) debido a que los empresarios nos comunicaron que esta sal es más eficiente para la extracción de los metales. Se llevó a cabo una revisión bibliográfica para encontrar las diferentes maneras en las que se pueden obtener estos compuestos encontrando las siguientes opciones.

La formación del tiosulfato de calcio no se encontró descrita en la literatura por lo que se decidió prepararlo utilizando el método que utilizan las empresas:

- Reacción de hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) con dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y azufre

Para el tiosulfato de sodio:

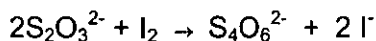
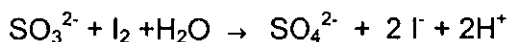
- a) Reacción de sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) con azufre
- b) Reacción de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) con dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y azufre
- c) Reacción de carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) con dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y azufre

La opción a) es la más sencilla y forma parte de las opciones b) y c) por lo que solo nos sirvió para estudiar el paso final de la reacción de formación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .

La reacción de titulación con yodo descrita en el capítulo del proceso para obtener la concentración del  $\text{CaS}_2\text{O}_3$  y  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  también se lleva a cabo con el  $\text{CaSO}_3$  y con el  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  siendo el pH el factor que indica que compuesto está presente.

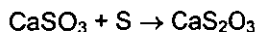
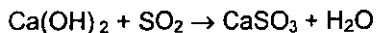
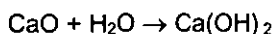
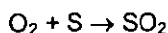


Reacciones con yodo:

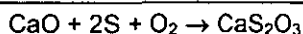


Como podemos observar, en la primer reacción se producen  $\text{H}^+$  por lo que en presencia de tiosulfatos mientras existan sulfitos después de la titulación, el pH será ácido indicándonos que la reacción no ha finalizado. Esta determinación nos sirvió en la preparación de los diferentes reactivos que se hicieron siguiendo las reacciones que a continuación se muestran:

### V.1.1 Preparación del Tiosulfato de Calcio ( $\text{CaS}_2\text{O}_3$ ) a partir de $\text{CaO}$



Reacción Total



Para la estandarización de la preparación del  $\text{CaS}_2\text{O}_3$  a partir de  $\text{CaO}$  se realizaron 5 experimentos, en los cuales, se agregó la cantidad de  $\text{CaO}$  al volumen de agua, se burbujeó el  $\text{SO}_2$  hasta llegar a un pH de 6 y se adicionó la cantidad de S poco a poco calentando a ebullición hasta que el pH en la titulación no cambiara; generalmente obtuvimos un pH final entre 5 y 6.

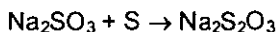
**Tabla V.1**

*Preparación de  $\text{CaS}_2\text{O}_3$  a partir de  $\text{CaO}$*

| Cantidad de<br>$\text{CaO}$<br>(g) | Cantidad de<br>S<br>(g) | Volumen de<br>$\text{H}_2\text{O}$<br>(mL) |
|------------------------------------|-------------------------|--|
| 30                                 | 20                      | 250  |
| 30                                 | 30                      | 250  |
| 150                                | 90                      | 1500                                       |
| 150                                | 90                      | 1500                                       |
| 150                                | 90                      | 1500                                       |

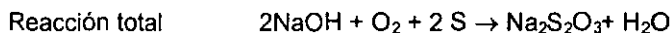
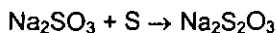
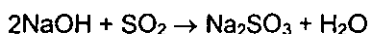
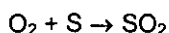
### V.1.2 Preparación de Tiosulfato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )

#### V.1.2.a Preparación del $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ a partir de $\text{Na}_2\text{SO}_3$



Como ya se mencionó, esta reacción únicamente nos sirvió para estudiar el paso final de la reacción de formación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , para llevarla a cabo, se agregó el  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  al volumen de agua y se adicionó la cantidad de S poco a poco calentando a ebullición hasta que el pH en la titulación no cambiara; generalmente obtuvimos un pH final entre 5 y 6.

#### V.1.2.b Preparación del $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ a partir de NaOH



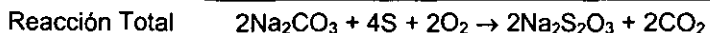
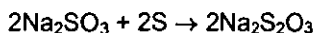
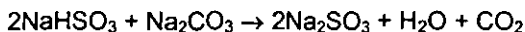
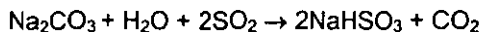
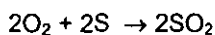
Para la estandarización de la preparación del  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir de NaOH se realizaron 5 experimentos, en los cuales, se agregó el volumen de NaOH al volumen de agua, se burbujeó el  $\text{SO}_2$  hasta llegar a un pH de 6 y se adicionó la cantidad de S poco a poco calentando a ebullición hasta que el pH en la titulación no cambiara; generalmente obtuvimos un pH final entre 5 y 6.

**Tabla V.2**

*Preparación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir de NaOH al 50%*

| Volumen de NaOH al 50% (mL) | Cantidad de NaOH (g) | Cantidad de S (g) | Volumen de $\text{H}_2\text{O}$ (mL) |
|-----------------------------|----------------------|-------------------|--------------------------------------|
| 15                          | 22.95                | 20                | 1500                                 |
| 15                          | 22.95                | 30                | 1500                                 |
| 150                         | 229.5                | 90                | 1500                                 |
| 150                         | 229.5                | 90                | 1500                                 |
| 150                         | 229.5                | 90                | 1500                                 |

### V.1.2.c Preparación de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ a partir de $\text{Na}_2\text{CO}_3$



Para la estandarización de la preparación del  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se realizaron 5 experimentos, en los cuales, se disolvió la mitad de la cantidad de carbonato en el volumen de agua, se burbujeó el  $\text{SO}_2$  hasta llegar a un pH de 6, se agregó la cantidad restante de carbonato y se adicionó la cantidad de S poco a poco calentando a ebullición hasta que el pH en la titulación no cambiara; generalmente obtuvimos un pH final de 10.

**Tabla V.3**

*Preparación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  a partir de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$*

| Cantidad de $\text{Na}_2\text{CO}_3$<br>(g) | Cantidad de S<br>(g) | Volumen de $\text{H}_2\text{O}$<br>(mL) |
|---|----------------------|---|
| 40  | 30                   | 1500                                    |
| 40  | 25                   | 1500                                    |
| 150   | 60                   | 1500                                    |
| 150   | 60                   | 1500                                    |
| 150   | 60                   | 1500                                    |

Es importante recalcar que la preparación de todos los reactivos en el laboratorio se llevó a cabo burbujeando  $\text{SO}_2$  hasta llegar a un pH de 6 y que la cantidad de S que se muestra en las tablas es la cantidad que reacciona con el sulfito de calcio o de sodio formado con el  $\text{SO}_2$  para formar el tiosulfato de calcio o de sodio.

## V.2 Piletas de Laboratorio

Se mandaron a hacer piletas de acrílico transparente con una llave en la cara frontal. Se utilizaron como filtro las mismas piedras y una tela de franela.

Se compraron pequeñas bombas que fueron utilizadas para recircular la solución en las piletas.

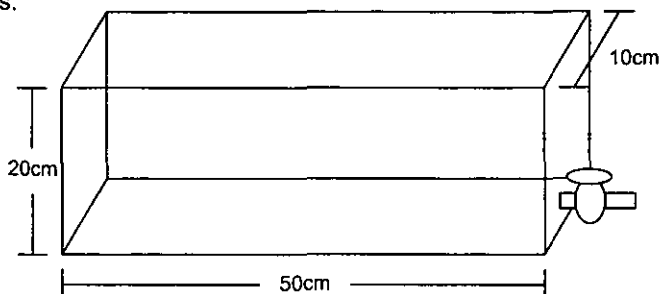


Fig. V.1 Dimensiones de la piqueta utilizada en el laboratorio

Los experimentos que se realizaron durante el desarrollo de la tesis fueron para determinar la influencia que tienen algunas variables que pueden ser involucradas dentro del proceso, esto con el fin de establecer puntos de comparación y encontrar las posibles mejoras en el mismo para su posterior aplicación en Zacatecas.

## V.3 Influencia de la Concentración de Tiosulfato

Este experimento se realizó con la finalidad de encontrar un comportamiento patrón en la extracción de metales al variar la concentración.

**Tabla V.4.a**

*Concentraciones de la Solución Extractora*

| <b>Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> comercial:</b> |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|
| 0.04 N*  | 0.1 N | 0.3 N | 0.5 N |

\* Concentración aproximada que se utiliza en Zacatecas

**Tabla V.4.b**

*Características de la Piqueta*

| <b>Piqueta con:</b> |                     |                         |
|---------------------|---------------------|-------------------------|
| Cantidad de jale    | Volumen de solución | Tiempo de recirculación |
| 2 kg                | 3.5 L               | 6 h                     |

#### V.4 Influencia del Cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ )

Este experimento se planteó debido a que los empresarios nos comentaron que el cobre disuelto en la solución extractora hace más eficiente la extracción de metales en las piletas según su experiencia y en la patente 4,269,622 de Estados Unidos se recomienda que para la extracción de minerales con tiosulfato de amonio se utilice una concentración de 1 a 4 g/L de Cu en la solución. En los análisis de la solución extractora nos pudimos dar cuenta que el cobre se encuentra presente a lo largo de todo el proceso debido al intercambio que se realiza en la depositación química y al cobre que pasa del jale a la solución, sin embargo, la concentración es muy baja.

Para saber si realmente influye el cobre se decidió trabajar primero con amalgama dental y sulfuro de plata, ya que en el jale, la plata se encuentra muy probablemente en cualquiera de estas formas.

**Tabla V.5.a**

*Soluciones Extractoras*

| <b>Solución Extractora utilizada:</b>                       |                    |   |                    |  |                    |
|---|--------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.3 N<br>a partir de NaOH |                    | $\text{CaS}_2\text{O}_3$ 0.3 N<br>a partir de CaO |                    | Combinación 0.3 N<br>(50% Na – 50% Ca) |                    |
| Sin Cu  | Con 4 g/L<br>de Cu | Sin Cu  | Con 4 g/L<br>de Cu | Sin Cu                                 | Con 4 g/L<br>de Cu |

**Tabla V.5.b**

*Características de los Vasos de Precipitados*

| <b>Vasos de Precipitado con:</b> |                                 |                        |                        |
|----------------------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| Cantidad de<br>amalgama          | Cantidad de sulfuro<br>de plata | Volumen de<br>solución | Tiempo de<br>agitación |
| 100 mg                           | 100 mg                          | 200 mL                 | 96 h                   |

### V.5 Influencia de cloruros (Cl<sup>-</sup>)

Con el fin de resolver dudas que surgieron a partir de los análisis del proceso en cuanto al posible factor que hiciera la extracción de la Empresa 2 más eficiente que la de la Empresa 1 se decidió estudiar la influencia de los cloruros, ya que en la Empresa 2 se utiliza cloruro de sodio en la producción del reactivo.

Además, se comparó la extracción entre el tiosulfato de sodio que nosotros producimos y el tiosulfato de sodio comercial.

**Tabla V.6.a**

*Soluciones Extractoras*

| <b>Solución Extractora utilizada:</b>   |                       |  |                       |   |                       |
|---|-----------------------|--|-----------------------|---|-----------------------|
| Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.3 N<br>comercial<br>+ 0.1 g/L CuSO <sub>4</sub> |                       | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.3 N<br>a partir de NaOH al 50 %<br>+ 0.1 g/L CuSO <sub>4</sub> |                       | CaS <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.3 N<br>a partir de CaO<br>+ 0.1 g/L CuSO <sub>4</sub> |                       |
| Sin NaCl  | Con 50 g/L<br>de NaCl | Sin NaCl   | Con 50 g/L<br>de NaCl | Sin NaCl  | Con 50 g/L<br>de NaCl |

**Tabla V.6.b**

*Características de los Vasos de Precipitados*

| <b>Vasos de Precipitado con:</b> |                                  |                        |                        |
|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|
| Cantidad de<br>amalgama          | Cantidad de<br>limadura de plata | Volumen de<br>solución | Tiempo de<br>agitación |
| 100 mg                           | 100 mg                           | 200 mL                 | 72 h                   |

### V.6 Influencia del pH

Para estudiar la influencia del pH se realizó un experimento utilizando tiosulfato de sodio a pH 5 y 10.

**Tabla V.7.a**

*Soluciones Extractoras*

| <b>Solución Extractora utilizada:</b>  |  |
|--|--|
| Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.3 N a partir de NaOH<br>a un pH final de 5 + 1 g/L de Cu | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.3 N a partir de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub><br>a un pH final de 10 + 1 g/L de Cu |

**Tabla V.7.b***Características de la Pileta*

| <b>Pileta con:</b> |                     |                         |
|--------------------|---------------------|-------------------------|
| Cantidad de jale   | Volumen de solución | Tiempo de recirculación |
| 2 kg               | 3.5 L               | 72 h                    |

**V.7 Determinación del Reactivo Óptimo para la Extracción**

Este experimento se realizó con la finalidad de determinar el mejor reactivo para la extracción directamente con jale.

**Tabla V.8.a***Soluciones Extractoras*

| <b>Solución Extractora utilizada:</b>  |   |   |
|--|---|---|
| Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.3 N<br>a partir de NaOH al 50 %<br>+ 1 g/L CuSO <sub>4</sub> | CaS <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.3 N<br>a partir de CaO<br>+ 1 g/L CuSO <sub>4</sub> | Combinación 0.3 N<br>(50% Na – 50% Ca)<br>+ 1 g/L CuSO <sub>4</sub> |

**Tabla V.8.b***Características de la Pileta*

| <b>Pileta con:</b> |                     |                         |
|--------------------|---------------------|-------------------------|
| Cantidad de jale   | Volumen de solución | Tiempo de recirculación |
| 2 kg               | 3.5 L               | 72 h                    |

C A P I T U L O   V I .  
R E S U L T A D O S   Y  
A N A L I S I S



## Capítulo VI. Resultados y Análisis

### VI.1 Preparación de Reactivos

#### VI.1.1 Preparación de $\text{CaS}_2\text{O}_3$ a partir de $\text{CaO}$

Tabla VI.1

| Relación en Peso<br>CaO – S | Relación Molar<br>CaO – S | Concentración<br>(N) | Eficiencia de<br>Producción % |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------|
| 1 – 0.66                    | 1 – 1.20                  | 0.096                | 17.9                          |
| 1 – 1.00                    | 1 – 1.87                  | 0.123                | 22.9                          |
| 1 – 0.625                   | 1 – 1.05                  | 0.542                | 20.2                          |
| 1 – 0.625                   | 1 – 1.05                  | 0.513                | 19.1                          |
| 1 – 0.625                   | 1 – 1.05                  | 0.595                | 22.2                          |

La Tabla VI.1 nos indica que la eficiencia de producción de  $\text{CaS}_2\text{O}_3$  promedio con respecto al  $\text{CaO}$  es 20.46 %, encontrando una relación óptima de 1.0 mol de  $\text{CaO}$  por 1.05 moles de S; en los dos primeros experimentos podemos ver que el exceso de S no aumenta la eficiencia.

La variación existente en las eficiencias puede deberse a la cantidad de  $\text{SO}_2$  burbujeada, ya que el pH es un indicador cualitativo y no cuantitativo.

#### VI.1.2 Preparación de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ a partir de $\text{NaOH}$ al 50%

Tabla VI.2

| Relación en Peso<br>NaOH – S | Relación Molar<br>NaOH – S | Concentración<br>(N) | Eficiencia de<br>Producción % |
|------------------------------|----------------------------|----------------------|-------------------------------|
| 1 – 0.87                     | 1 – 1.0                    | 0.089                | 31.0                          |
| 1 – 1.30                     | 1 – 1.6                    | 0.093                | 32.4                          |
| 1 – 0.40                     | 1 – 0.5                    | 0.945                | 33.0                          |
| 1 – 0.40                     | 1 – 0.5                    | 0.870                | 30.2                          |
| 1 – 0.40                     | 1 – 0.5                    | 0.924                | 32.2                          |

La Tabla VI.2 nos indica que la eficiencia de producción de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  promedio con respecto al  $\text{NaOH}$  es 31.8 %, encontrando una relación óptima de 1 mol de  $\text{NaOH}$  por 0.5 moles de S; en los dos primeros experimentos podemos ver que el exceso de S no aumenta la eficiencia.

La variación existente en las eficiencias puede deberse a la cantidad de SO<sub>2</sub> burbujeada, ya que el pH es un indicador cualitativo y no cuantitativo.

La producción de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a partir de NaOH es más eficiente y la preparación requiere menor tiempo, por lo tanto, menor energía de calentamiento que la producción de CaS<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a partir de CaO.

### VI.1.3 Preparación de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a partir de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

Tabla VI.3

| Relación<br>g Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> – g S | Relación Molar<br>Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> – S | Concentración<br>(N) | Eficiencia de<br>Producción % |
|---|---|----------------------|-------------------------------|
| 1 - 0.750   | 1 - 2.48  | 0.108                | 28.6                          |
| 1 - 0.625   | 1 - 2.07  | 0.104                | 27.8                          |
| 1 - 0.4   | 1 - 1.32  | 0.416                | 29.4                          |
| 1 - 0.4   | 1 - 1.32  | 0.363                | 25.7                          |
| 1 - 0.4   | 1 - 1.32  | 0.355                | 25.1                          |

La Tabla VI.3 nos indica que la eficiencia de producción de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> promedio con respecto al Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> es 27.3 %, encontrando una relación óptima de 1 mol de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> por 1.32 moles de S; en los dos primeros experimentos podemos ver que el exceso de S no aumenta la eficiencia. La variación existente en las eficiencias puede deberse a la cantidad de SO<sub>2</sub> burbujeada, ya que el pH es un indicador cualitativo y no cuantitativo.

La producción de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a partir de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> es menos eficiente, aunque la preparación requiere menor tiempo que la producción de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a partir de NaOH.

## VI.2 Influencia de la Concentración de Tiosulfato

Tabla VI.4

| Extracción en Pileta |  |   |   |   |
|----------------------|--|---|---|---|
| Tiempo (h)           | Concentración de Ag (ppm)                            |   |   |   |
|                      | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.04 N | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.1 N | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.3 N | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.5 N |
| 6                    | 0.094  | 0.387   | 0.635   | 1.536   |

Con este experimento se pudo establecer que a mayor concentración de tiosulfato mayor es la extracción de metales, en el caso de la concentración 0.04 N de tiosulfato de sodio que es un aproximado a la concentración utilizada en el proceso de beneficio en Zacatecas, podemos ver que el resultado de la extracción de Ag es muy bajo, esto se debe a que a que la cantidad de jale utilizada en las piletas es muy pequeña y el tiempo de recirculación fue muy corto.

Este experimento también nos ayudó a establecer la concentración de tiosulfato 0.3 N como la concentración de trabajo, ya que arroja valores de concentración confiables.

## VI.3 Influencia de Cobre

Tabla VI.5

| Sulfuro de Plata |   |                                 |         |   |                                 |         |
|------------------|---|---------------------------------|---------|---|---------------------------------|---------|
|                  | Reactivo sin Cu                               |                                 |         | Reactivo con Cu                               |                                 |         |
|                  | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaS <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na - Ca | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaS <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na - Ca |
| 24               | 0.757   | 3.592                           | 3.828   | 40.398  | 31.174                          | 38.308  |
| 48               | 0.792   | 4.331                           | 4.025   | 41.233  | 40.517                          | 39.470  |
| 72               | 1.699   | 4.983                           | 4.666   | 42.905  | 42.308                          | 40.368  |
| 96               | 2.165   | 5.589                           | 5.564   | 43.502  | 43.800                          | 40.767  |

Tabla VI.6

| Amalgama |   |                                 |         |   |                                 |         |
|----------|---|---------------------------------|---------|---|---------------------------------|---------|
|          | Reactivo sin Cu                               |                                 |         | Reactivo con Cu                               |                                 |         |
|          | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaS <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na - Ca | Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaS <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na - Ca |
| 24       | 0.521   | 1.690                           | 0.523   | 1.189   | 2.958                           | 1.004   |
| 48       | 1.972   | 1.831                           | 0.556   | 10.097  | 3.064                           | 1.057   |
| 72       | 2.201   | 2.042                           | 0.581   | 12.993  | 3.345                           | 1.206   |
| 96       | 2.536   | 2.289                           | 0.599   | 13.487  | 9.860                           | 1.409   |

Estas tablas comparativas nos demuestran que el cobre tiene una influencia positiva en la extracción de Ag para el sulfuro y amalgama, siendo el  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  el reactivo que mayor cantidad extrae.

Para el sulfuro de plata vemos un incremento en la extracción con cobre hasta de 1909 % y para la amalgama de 431%.

Con estos resultados comprobamos que lo establecido en las patentes es aplicable a las condiciones de trabajo del estudio ya que el cobre es un elemento fundamental en la extracción de los metales. (ver Gráficas VI.1 y VI.2)

#### VI.4 Influencia de Cloruros

**Tabla VI.7**

| Limadura de Plata |   |                                   |                          |   |                                   |                          |
|-------------------|---|-----------------------------------|--------------------------|---|-----------------------------------|--------------------------|
|                   | Reactivo sin NaCl                         |                                   |                          | Reactivo con NaCl                         |                                   |                          |
|                   | $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$<br>com. | $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ | $\text{CaS}_2\text{O}_3$ | $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$<br>com. | $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ | $\text{CaS}_2\text{O}_3$ |
| 24                | 6.40                                      | 4.02                              | 10.25                    | 6.40                                      | 6.17                              | 4.93                     |
| 48                | 12.38                                     | 12.47                             | 18.13                    | 12.32                                     | 12.05                             | 15.55                    |
| 72                | 14.82                                     | 17.51                             | 20.40                    | 13.54                                     | 13.03                             | 19.19                    |

**Tabla VI.8**

| Amalgama |   |                                   |                          |   |                                   |                          |
|----------|---|-----------------------------------|--------------------------|---|-----------------------------------|--------------------------|
|          | Reactivo sin NaCl                         |                                   |                          | Reactivo con NaCl                         |                                   |                          |
|          | $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$<br>com. | $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ | $\text{CaS}_2\text{O}_3$ | $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$<br>com. | $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ | $\text{CaS}_2\text{O}_3$ |
| 24       | 0.354                                     | 0.984                             | 0.100                    | 0.243                                     | 0.141                             | 0.261                    |
| 48       | 0.946                                     | 2.430                             | 0.557                    | 0.409                                     | 0.993                             | 0.650                    |
| 72       | 1.382                                     | 3.511                             | 1.095                    | 0.835                                     | 2.560                             | 0.668                    |

Para la limadura de plata el reactivo que extrae mayor cantidad de Ag es el tiosulfato de calcio y con la amalgama el tiosulfato de sodio es más eficiente.

Como se puede observar en las Tablas VI.7 y VI.8, los cloruros en el reactivo no influyen considerablemente en la extracción de Ag y en general pueden disminuirla. (ver Gráficas VI.3 y VI.4)

## VI.5 Influencia del pH

Tabla VI.9

| Extracción en Pileta |               |   |
|----------------------|---------------|---|
|                      | NaOH (pH = 5) | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (pH = 10) |
| 24                   | 2.412         | 2.380                                     |
| 48                   | 2.746         | 3.118                                     |
| 72                   | 3.274         | 3.334                                     |

En este experimento observamos que el pH no influye considerablemente en la extracción de Ag. (ver Gráfica VI.5)

## VI.6 Determinación del Reactivo Óptimo para la Extracción

Tabla VI.10

| Extracción en Pileta |                     |                      |                               |
|----------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------|
| Tiempo (h)           | Tiosulfato de Sodio | Tiosulfato de Calcio | Combinación (50% Na – 50% Ca) |
| 24                   | 2.412               | 1.231                | 1.221                         |
| 48                   | 2.746               | 1.512                | 1.543                         |
| 72                   | 3.274               | 2.248                | 2.523                         |

Con estos resultados podemos establecer que el reactivo más eficiente para la extracción de Ag en este proceso es el tiosulfato de sodio, confirmando lo dicho por los empresarios de las plantas en Zacatecas. (ver Gráfica VI.6)

Cabe mencionar que todos los resultados que se obtuvieron en la experimentación se realizaron muestreando por duplicado o triplicado y analizando en absorción atómica en el Laboratorio de Tratamiento de Residuos de la Facultad de Química.

C A P I T U L O   V I I .  
P R O P U E S T A S   Y  
R E C O M E N D A C I O N E S

## Capítulo VII. Propuestas y Recomendaciones

En este capítulo se analizará el proceso de Beneficio de Jales desde un punto de vista económico, se propondrán cambios al proceso basándonos en los resultados de los experimentos y análisis realizados y se harán recomendaciones con el fin de reducir gastos, mejorar las etapas del proceso y disminuir los peligros de contaminación por mercurio.

### VII.1 Extracción

De esta etapa del proceso se estudiarán el reactivo y la solución extractora.

#### VII.1.1 Reactivo

Se analizarán los costos implicados en la preparación del reactivo de cada empresa y de cada uno de los reactivos preparados en el laboratorio.

##### VII.1.1.a Preparación de Tiosulfato de Calcio en la Empresa 1

**Tabla VII.1.a**  
Costo de la Preparación de Reactivo (por reactor)

| Empresa 1                         |         |              |            |
|-----------------------------------|---------|--------------|------------|
| Tiosulfato de Calcio 1.05 N       |         |              |            |
| Materia Prima                     | Consumo | Precio / Ton | Costo      |
| H <sub>2</sub> O                  | 9000 L  | ---          | ---        |
| CaO                               | 4 Ton   | \$860.00     | \$3,440.00 |
| S - SO <sub>2</sub>               | 2.5 Ton | \$1,438.00   | \$3,595.00 |
| S - S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.2 Ton | \$1,438.00   | \$1,725.60 |
| Total                             |         |              | \$8,760.60 |

##### VII.1.2.a Preparación de Reactivos en el Laboratorio para la Empresa 1

Se analizarán los costos implicados con la preparación de los reactivos de acuerdo al requerimiento de concentración y volumen de la Empresa 1 calculando el número de moles necesarios de acuerdo a los valores de eficiencia y relación molar obtenidos en la experimentación. La cantidad de S para producir SO<sub>2</sub> es tomando en cuenta un exceso del 100%.

**VII.1.2.a.1 Preparación Tiosulfato de Calcio**

**Tabla VII.2.a**

*Costo de la Preparación de Reactivo (por reactor)*

| <b>Empresa 1</b>                   |          |           |              |                   |
|------------------------------------|----------|-----------|--------------|-------------------|
| <b>Tiosulfato de Calcio 1.05 N</b> |          |           |              |                   |
| Materia Prima                      | Moles    | Consumo   | Precio / Ton | Costo             |
| CaO                                | 46187.68 | 2.587 Ton | \$860.00     | \$2,224.40        |
| S - SO <sub>2</sub>                | 92375.37 | 2.956 Ton | \$1,438.00   | \$4,250.74        |
| S - S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 48497.07 | 1.552 Ton | \$1,438.00   | \$2,231.64        |
| <b>Total</b>                       |          |           |              | <b>\$8,706.78</b> |

**VII.1.2.a.2 Preparación de Tiosulfato de Sodio a partir de NaOH al 50%**

**Tabla VII.3.a**

*Costo de la Preparación de Reactivo (por reactor)*

| <b>Empresa 1</b>                  |          |           |              |                   |
|-----------------------------------|----------|-----------|--------------|-------------------|
| <b>Tiosulfato de Sodio 1.05 N</b> |          |           |              |                   |
| Materia Prima                     | Moles    | Consumo   | Precio / Ton | Costo             |
| NaOH al 50%                       | 29716.98 | 2.377 Ton | \$2,500.00   | \$5,943.40        |
| S - SO <sub>2</sub>               | 29716.98 | 0.951 Ton | \$1,438.00   | \$1,367.46        |
| S - S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14858.49 | 0.475 Ton | \$1,438.00   | \$683.73          |
| <b>Total</b>                      |          |           |              | <b>\$7,994.58</b> |

**VII.1.2.a.3 Preparación de Tiosulfato de Sodio a partir Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>**

**Tabla VII.4.a**

*Costo de la Preparación de Reactivo (por reactor)*

| <b>Empresa 1</b>                  |          |           |              |                    |
|-----------------------------------|----------|-----------|--------------|--------------------|
| <b>Tiosulfato de Sodio 1.05 N</b> |          |           |              |                    |
| Materia Prima                     | Moles    | Consumo   | Precio / Ton | Costo              |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>   | 34615.38 | 3.669 Ton | \$2,790.00   | \$10,237.15        |
| S - SO <sub>2</sub>               | 69230.77 | 2.215 Ton | \$1,438.00   | \$3,185.72         |
| S - S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 45692.31 | 1.462 Ton | \$1,438.00   | \$2,102.58         |
| <b>Total</b>                      |          |           |              | <b>\$15,525.45</b> |



### VII.1.1.b Preparación de Tiosulfato de Calcio en la Empresa 2

**Tabla VII.1.b**  
Costo de la Preparación de Reactivo (por reactor)

| <b>Empresa 2</b>                   |         |              |            |
|------------------------------------|---------|--------------|------------|
| <b>Tiosulfato de Calcio 1.50 N</b> |         |              |            |
| Materia Prima                      | Consumo | Precio / Ton | Costo      |
| H <sub>2</sub> O                   | 5000 L  | ---          | ---        |
| CaO                                | 4 Ton   | \$860.00     | \$3,440.00 |
| S - SO <sub>2</sub>                | 1.2 Ton | \$1,438.00   | \$1,725.60 |
| S - S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 1.4 Ton | \$1,438.00   | \$2,013.20 |
| Total                              |         |              | \$7,178.80 |

### VII.1.2.b Preparación de Reactivos en el Laboratorio para la Empresa 2

Se analizarán los costos implicados con la preparación de los reactivos de acuerdo al requerimiento de concentración y volumen de la Empresa 2 calculando el número de moles necesarios de acuerdo a los valores de eficiencia y relación molar obtenidos en la experimentación. La cantidad de S para producir SO<sub>2</sub> es tomando en cuenta un exceso del 100%.

#### VII.1.2.b.1 Preparación Tiosulfato de Calcio

**Tabla VII.2.b**  
Costo de la Preparación de Reactivo (por reactor)

| <b>Empresa 2</b>                   |          |           |              |            |
|------------------------------------|----------|-----------|--------------|------------|
| <b>Tiosulfato de Calcio 1.50 N</b> |          |           |              |            |
| Materia Prima                      | Moles    | Consumo   | Precio / Ton | Costo      |
| CaO                                | 36656.89 | 2.053 Ton | \$860.00     | \$1,765.40 |
| S - SO <sub>2</sub>                | 73313.78 | 2.346 Ton | \$1,438.00   | \$3,373.61 |
| S - S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 38489.74 | 1.232 Ton | \$1,438.00   | \$1,771.14 |
| Total                              |          |           |              | \$6,910.15 |

VII.1.2.b.2 Preparación de Tiosulfato de Sodio a partir de NaOH al 50%

**Tabla VII.3.b**

Costo de la Preparación de Reactivo (por reactor)

| Empresa 2                         |          |           |              |            |
|-----------------------------------|----------|-----------|--------------|------------|
| Tiosulfato de Sodio 1.50 N        |          |           |              |            |
| Materia Prima                     | Moles    | Consumo   | Precio / Ton | Costo      |
| NaOH al 50%                       | 23584.91 | 1.887 Ton | \$2,500.00   | \$4,716.98 |
| S - SO <sub>2</sub>               | 23584.91 | 0.755 Ton | \$1,438.00   | \$1,085.28 |
| S - S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11792.45 | 0.377 Ton | \$1,438.00   | \$542.64   |
| Total                             |          |           |              | \$6,344.91 |

VII.1.2.b.3 Preparación de Tiosulfato de Sodio a partir Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

**Tabla VII.4.b**

Costo de la Preparación de Reactivo (por reactor)

| Empresa 2                         |          |           |              |             |
|-----------------------------------|----------|-----------|--------------|-------------|
| Tiosulfato de Sodio 1.50 N        |          |           |              |             |
| Materia Prima                     | Moles    | Consumo   | Precio / Ton | Costo       |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>   | 27472.53 | 2.912 Ton | \$2,790.00   | \$8,124.73  |
| S - SO <sub>2</sub>               | 54945.05 | 1.758 Ton | \$1,438.00   | \$2,528.35  |
| S - S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 36263.74 | 1.160 Ton | \$1,438.00   | \$1,668.71  |
| Total                             |          |           |              | \$12,321.79 |

**VII.1.3 Solución Extractora**

En la experimentación encontramos que utilizando una concentración de 1.0 g/L de cobre en la solución extractora se puede aumentar considerablemente la extracción; la concentración promedio de cobre en la solución extractora en la entrada de las piletas en la Empresa 1 es de 1.22 mg/L y en la Empresa 2 de 1.63 mg/L, para poder aumentarla se puede agregar sulfato de cobre (CuSO<sub>4</sub>) en el reactivo o directamente en la solución, el sulfato de cobre tiene un valor de \$10.08/kg.

Para encontrar la relación entre las cantidades de cobre y plata disueltos en la solución de entrada a las piletas se pueden hacer lecturas con los medidores electrónicos Hanna Instruments, los cuales tienen un valor de:

| <b>Medidores Hanna Instruments</b> |                |                         |                        |
|------------------------------------|----------------|-------------------------|------------------------|
|                                    | <b>Aparato</b> | <b>Kit de reactivos</b> | <b>Total (con iva)</b> |
| Ag                                 | \$1,540        | \$1,050                 | \$2,978.50             |
| Cu                                 | \$1,600        | \$235                   | \$2,110.25             |

### **VII.2 Depositación en Cobre**

Como pudimos ver en los análisis, la etapa de depositación es ineficiente, por lo tanto, es necesario aumentar al máximo la cantidad de cobre en el proceso y realizar el lavado de precipitado a intervalos de tiempo más cortos. El cobre que se compra como chatarra para realizar la depositación tiene un valor de \$14.50/kg. Al aumentar la cantidad de cobre, en las baterías se va a depositar mayor cantidad de metales, por consiguiente, la concentración de Ag y Hg en la solución extractora va a disminuir y por otro lado, la concentración de cobre va a aumentar, incrementando la eficiencia de extracción, además, se va a juntar más rápido la cantidad de precipitado necesaria para encender el horno.

Si el aumento de la cantidad de cobre no es suficiente para disminuir la concentración de Ag y Hg en la solución extractora, podría tomarse como una alternativa detener algunos días la extracción de una pileta nueva cada determinado tiempo, es decir, dejar de suministrar metales a la solución para que los que se encuentren presentes se depositen. Para determinar el número de días necesarios para operar correctamente, se tendrían que realizar lecturas con el medidor de Ag, cabe mencionar que no se tendrían pérdidas ya que la depositación sería continua y al reiniciar el proceso, la extracción de los metales sería mayor.

Para optimizar la etapa de depositación se tendría que realizar un estudio detallado sobre el tiempo de contacto de la solución con la superficie del cobre y de la vida útil de este en el proceso. Además, se pueden probar alternativas de electrodeposición, sin embargo, esta debe ser específica para Ag y Hg para no disminuir la concentración de cobre en la solución extractora, ya que como se demostró, es necesario para una buena extracción.

### ***VII.3 Destilación de Mercurio***

En esta etapa encontramos que el contenido del horno es sobrecalentado, por lo tanto, se recomienda utilizar un termopar durante todo el tiempo que se encuentre prendido, y así, poder estudiar cuidadosamente el perfil de temperaturas y regular la flama del quemador.

Mensualmente en la Empresa 1, el horno tiene un consumo de 1110 kg de gas, esto representa un gasto de \$3,407.70, si se optimiza esta etapa del proceso se pueden reducir gastos recuperando rápidamente la inversión del termopar.

El termopar FLUKE junto con las puntas para medición tiene un valor de \$6,000.

### ***VII.4 Recomendaciones para Reducir los Riesgos y Peligros por Contaminación de Mercurio***

Las recomendaciones que se pueden dar son muy sencillas, en la recolección del jale en el terreno los operadores de las excavadoras deben utilizar máscaras y se debe disminuir la producción de polvos humedeciendo la tierra, con el mismo fin, el jal beneficiado se debe mantener en zonas de confinamiento. Dentro del proceso no existe ningún tipo de riesgo o peligro de contaminación hasta la etapa de destilación, por lo que es necesario dar un mantenimiento constante al horno, tubos y cámara de condensación para que no existan fugas de vapores. En la recolección y envasamiento de mercurio los trabajadores deben manipular el mercurio con guantes y utilizar máscaras para evitar la inhalación de los vapores.

**ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA**

C A P I T U L O   V I I I .  
C O N C L U S I O N E S

## **Capítulo VIII. Conclusiones**

El proyecto del Estudio del Proceso de Beneficio de Jales nació por la preocupación de la Comisión para la Cooperación Ambiental Trilateral compuesta por Canadá, Estados Unidos y México en cuanto a la posible contaminación por mercurio en ciertas regiones del país, específicamente en la región de Zacatecas por el proceso de Beneficio de Jales. Posteriormente, con el interés de los empresarios, se integró el estudio del proceso en general y el comportamiento de la plata además del de mercurio.

Ahora, podemos establecer que el proceso de Beneficio de Jales de Zacatecas es un proceso empírico de lixiviación que consiste en la recuperación de plata como producto principal y mercurio como subproducto, los cuales, son extraídos del jale. Para su estudio el proceso fue dividido en tres etapas, las cuales son:

- Extracción química de los metales
- Depositación de los metales por reducción química
- Separación de metales por destilación

Las etapas de extracción y depositación están estrechamente relacionadas debido a que la solución extractora recorre un circuito sin salidas, es decir, conforman un proceso cerrado y continuo, mientras tanto, la etapa de destilación se lleva a cabo aparte en un horno sellado con cámara de condensación, eliminando las posibles emisiones de vapor de mercurio. En cuanto a la preocupación por los riesgos de contaminación por mercurio, podemos asegurar que por las características del proceso mencionadas el impacto ecológico a suelos, mantos acuíferos y atmósfera se puede considerar casi nulo. El proceso de beneficio de jales en general es un proceso no contaminante y puede ser considerado como un proceso de remediación de suelos contaminados por mercurio, haciendo un favor a la sociedad al dejar las tierras libres de metales y preparadas para el cultivo de chile, maíz y frijol principalmente.

La experimentación de este proyecto se enfocó principalmente en la etapa de extracción, abarcando la preparación de los reactivos, la influencia en la extracción de las diferentes soluciones extractoras y la influencia de ciertos compuestos para elevar la eficiencia en dicha etapa.

En la preparación de los reactivos en el laboratorio se tuvieron complicaciones para encontrar el tiempo necesario para la formación de sulfito con el  $\text{SO}_2$  burbujeado, la forma de aprovecharlo al máximo y con el tiempo de formación de tiosulfato encontrando la cantidad de S necesaria en cada experimento. Finalmente, se logró establecer un método de preparación que nos aseguraba la presencia del tiosulfato.

Primero, se preparó el tiosulfato de calcio a partir de  $\text{CaO}$ , que es el reactivo utilizado en las empresas de Zacatecas, posteriormente se preparó el tiosulfato de sodio utilizando  $\text{NaOH}$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Se compararon las eficiencias de producción de todos los reactivos formados, encontrando que la mayor eficiencia la presenta el tiosulfato de sodio producido a partir de  $\text{NaOH}$ , además de ser el reactivo que económicamente resulto ser el más conveniente.

Para continuar la investigación de esta etapa se estudió la eficiencia de extracción de los reactivos, en un principio se realizó la extracción directamente del jale utilizando las piletas a escala y aunque se tuvieron una serie de dificultades debido a la baja cantidad de metales contenida en el jale, a que no se sabía el tiempo de contacto mínimo entre la solución extractora y los metales y con la filtración de la solución a través del jale, se logró un avance que sirvió como base para los experimentos consecuentes, además, se pudo establecer que a mayor concentración de tiosulfato mayor sería la extracción de metales.

Se decidió tomar otra ruta en la investigación y se experimentó con sulfuro de plata, amalgama y plata metálica, revelándonos que el tiosulfato de sodio es más eficiente en la extracción de amalgama y sulfuros, mientras que el de calcio extrae de una mejor manera la plata metálica.

Teniendo como base los resultados obtenidos hasta ese momento se prosiguió a realizar el estudio de extracción nuevamente en los jales de Zacatecas utilizando una mayor cantidad de jale y recirculando varios días la solución, los resultados obtenidos indicaron que el reactivo que tiene una mejor eficiencia de extracción es el tiosulfato de sodio, indicándonos necesariamente el cambio a este reactivo.

El estudio de la influencia del ion cobre ( $\text{Cu}^{+2}$ ) en la extracción fue de gran importancia, ya que en la experimentación realizada para plata, la eficiencia aumentó 1909% para el caso del sulfuro de plata y 431% para la amalgama, estableciendo la gran influencia que tiene este ion en el reactivo para la extracción; para aumentar la concentración a 1 g de  $\text{Cu}^{+2}$  /L se puede agregar sulfato de cobre a la solución extractora y aumentar la cantidad de cobre en las baterías. Es importante recalcar que mientras no se aumente la cantidad de cobre o se modifiquen los tiempos de limpieza del cobre si es que no se optimiza esta etapa, no se obtendrán resultados positivos en la cantidad de metales depositados ya que se saturaría la superficie del alambre.

El efecto del ion cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) en la extracción se estudió con las sales de plata y limadura obteniendo resultados que indicaron que este ion no afecta la eficiencia de extracción de plata.

El efecto del pH sobre la eficiencia de extracción no demostró ser muy importante en la extracción de plata a pesar de haber tenido una variación de 6 a 10 en el pH de la solución extractora.

Durante la investigación se realizaron los mismos experimentos para el mercurio utilizando sulfuro de mercurio, amalgama, mercurio metálico y jale, sin embargo, se presentaron problemas en el método de medición por absorción atómica y no se pudieron obtener lecturas correctas. A esta parte de la investigación se le esta



dando seguimiento y se han obtenido resultados que indican que el ion cloruro si influye en la eficiencia de extracción del mercurio.

El estudio de la primer etapa fue cubierto satisfactoriamente obteniendo diversas propuestas para su optimización, sin embargo, para el caso de la etapa de depositación de Ag y Hg por reducción química con cobre queda pendiente el estudio ya que al experimentar a escala no se pudo obtener la cantidad de metales suficiente para lograr una depositación en cobre detectable con los métodos de análisis. Con los análisis del proceso realizados se pudo establecer la necesidad de aumentar la cantidad de alambre de cobre.

La etapa de separación de metales por destilación se estudió en forma preliminar, logrando establecer el uso excesivo de calor en el horno durante la destilación del mercurio, lo cual constituye un desperdicio en el combustible (gas LP), el cual es muy costoso y su precio aumenta mes con mes.

El ambiente que se vive en las microempresas beneficiadoras de jales es de preocupación debido a que el valor de la plata ha disminuido considerablemente, los jales cada vez contienen menor cantidad de plata y pueden localizarse a grandes distancias de las plantas, la operación de éstas puede resultar en muchos desperfectos mecánicos, principalmente en los camiones de transporte y en las excavadoras, por lo que es necesario dar un mantenimiento constante. Los gastos involucrados con el proceso son fuertes y cada vez puede que sean menores las utilidades, sin embargo, estas plantas siguen operando. Es necesario que se consiga un apoyo económico a estas microempresas para poder implementar nueva tecnología y así, poder aumentar sus utilidades para que sigan operando por el bien del medio ambiente y la salud de los pobladores de Zacatecas.

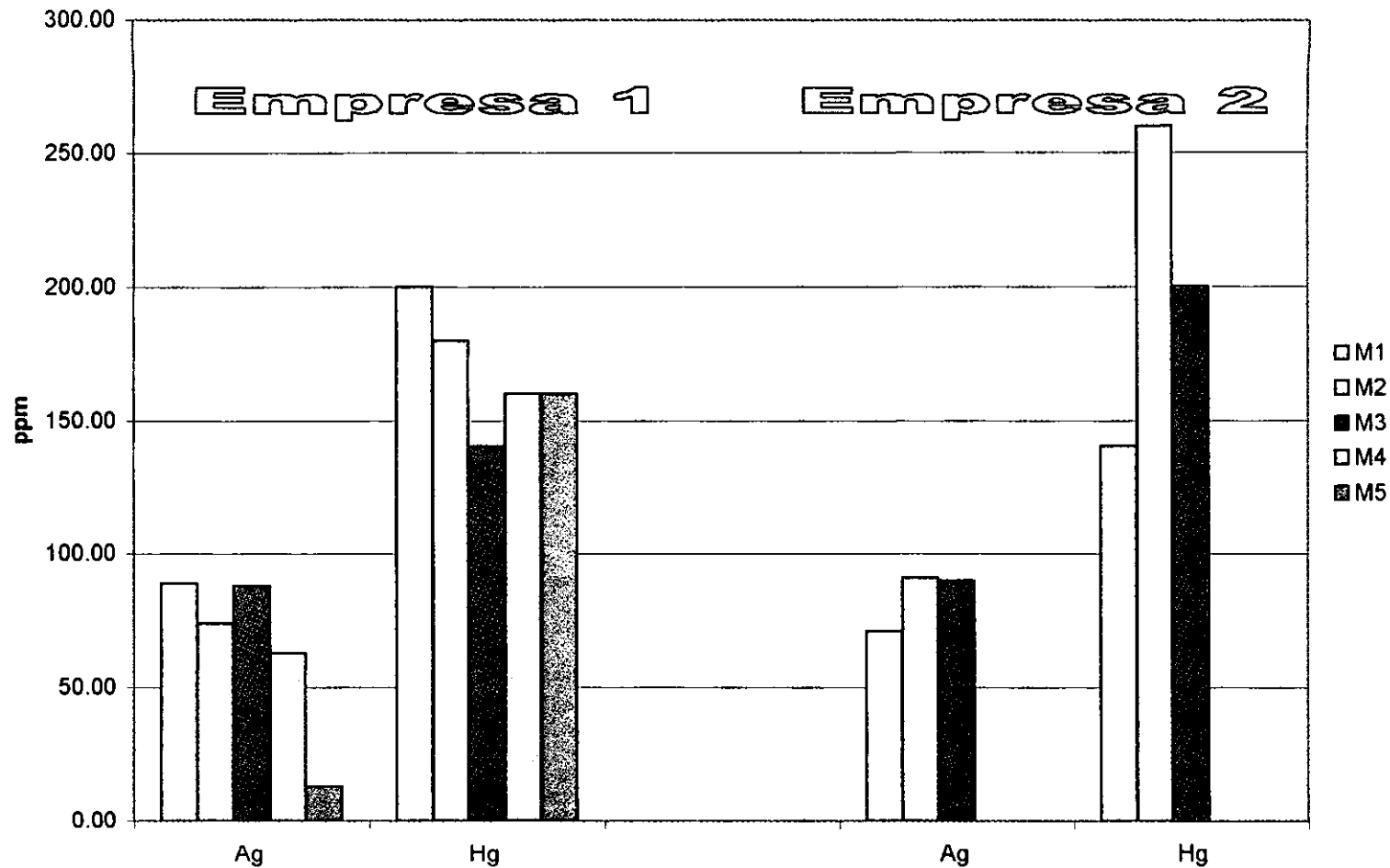
# B I B L I O G R A F Í A

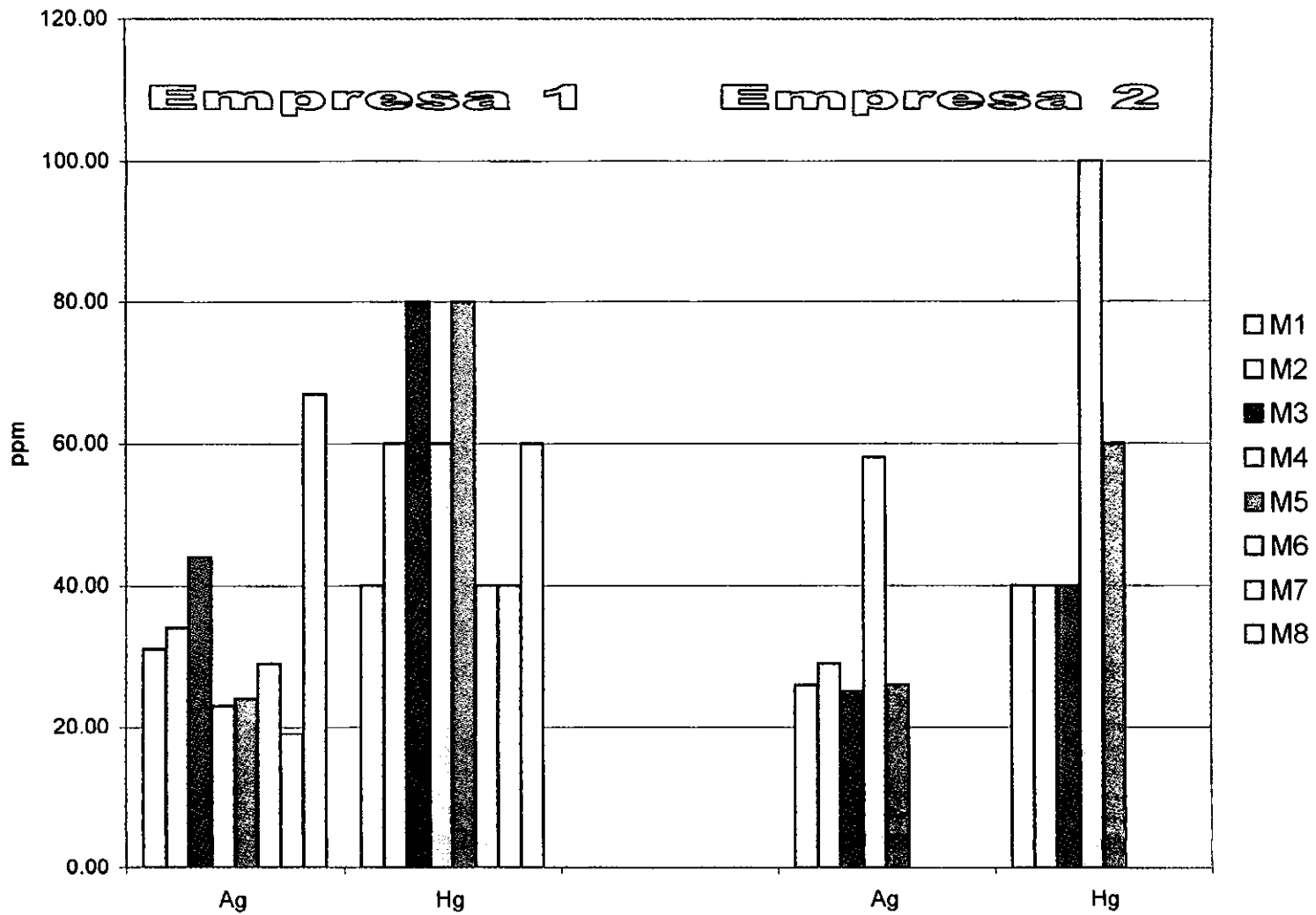
## ***Bibliografía***

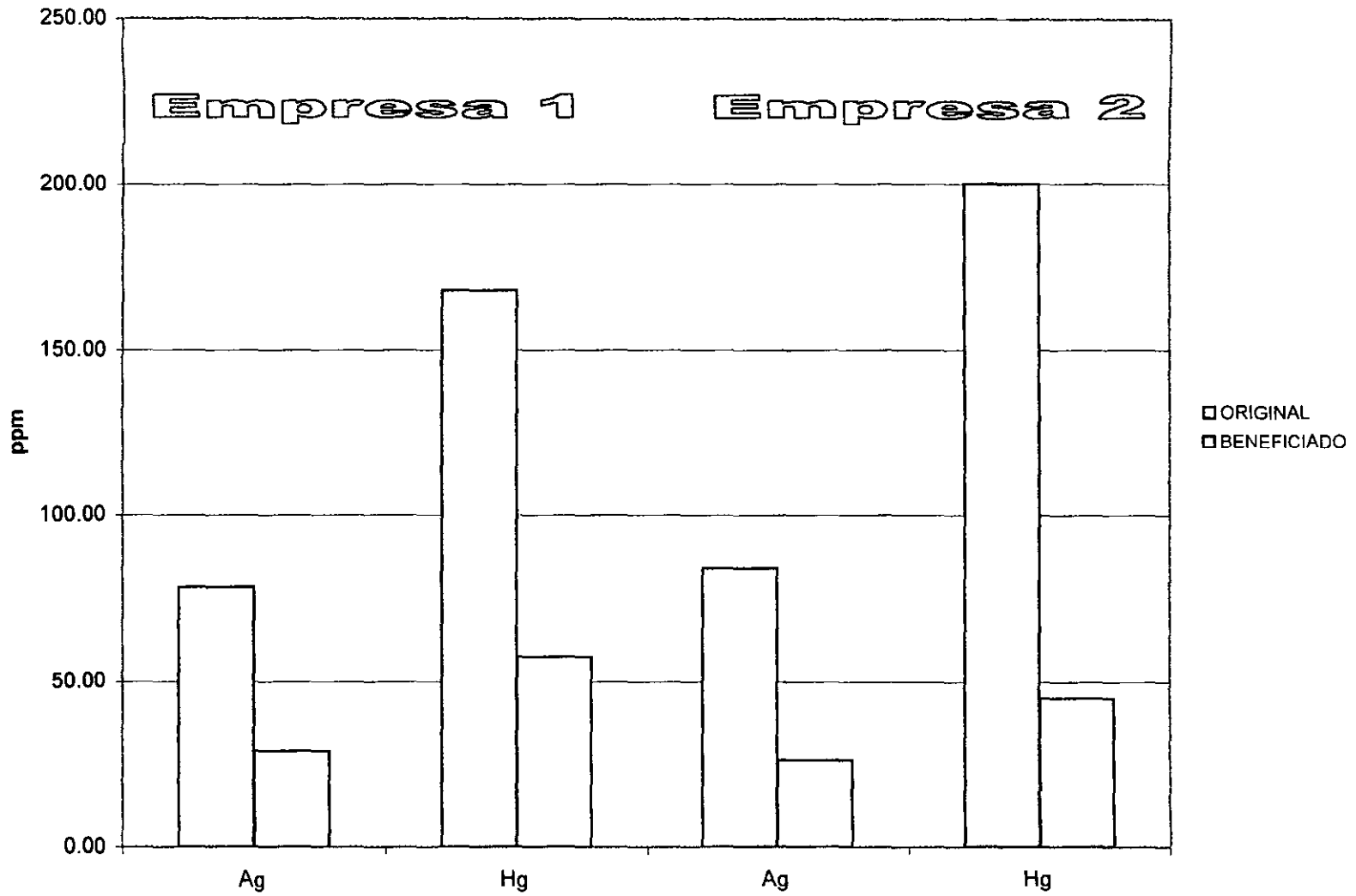
- J. R. Southworth; The Mines of Mexico. History, Geology, Ancient Mining and General Description of the Mining States of the Republic of Mexico. Volumen IX, editorial Blake & Mackenzie, Inglaterra, 1905
- Trinidad García; Los Mineros Mexicanos, 3ª edición, editorial Porrúa S.A., México, 1970
- M. León - Portilla, J. Gurría Lacroix, R. Moreno, E. Madero Bracho; La Minería en México, estudios sobre su desarrollo histórico, UNAM, México, 1978
- Alejandro de Humboldt; Ensayo Político sobre el Reino de la Nueva España, edición de Juan A. Ortega y Medina, editorial Porrúa, México, 1966.
- Consejo de Recursos Minerales; Monografía Geológico – Minera del Estado de Zacatecas, 1ª edición, Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaría de Minas e Industria Básica, México, 1991.
- Luiz D. De Lacerda, Wim Salomons; Mercury from Gold and Silver Mining: A Chemical Time Bomb?, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, Alemania, 1998.
- J. T. Baker; Material Safety Data Sheet, Mercurio, Estados Unidos.
- Fritz Feig L, Vinzenz Anger; Spot Tests in Inorganic Analysis, 6ª edición, Elsevier Publishing Company, Holanda, 1972.
- Brun Serrano Antonio; Tesis: "Proyecto para una Planta de Sulfito, Bisulfito y Tiosulfato", Fac. de Química, UNAM, México, 1973.
- Kerley, Jr., Bernard J.; United State Patent No. 4,269,622. Estados Unidos, 1981.
- F. R. Morral, E. Jimeno, P. Molera; Metalurgia General, Tomo 1, Editorial Reverté, S.A., México.

# G R Á F I C A S

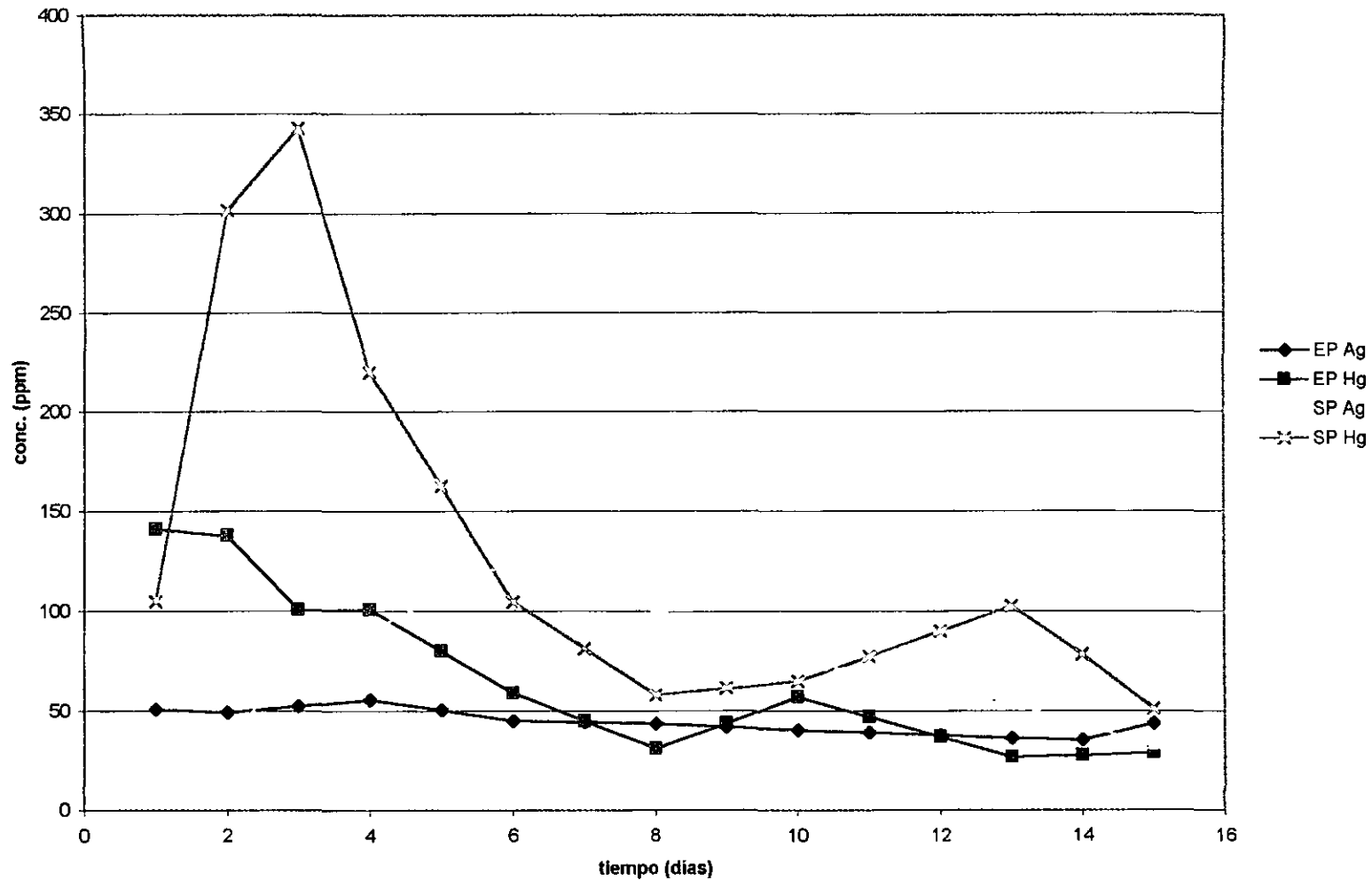
Gráfica IV.1 Jales para Beneficio





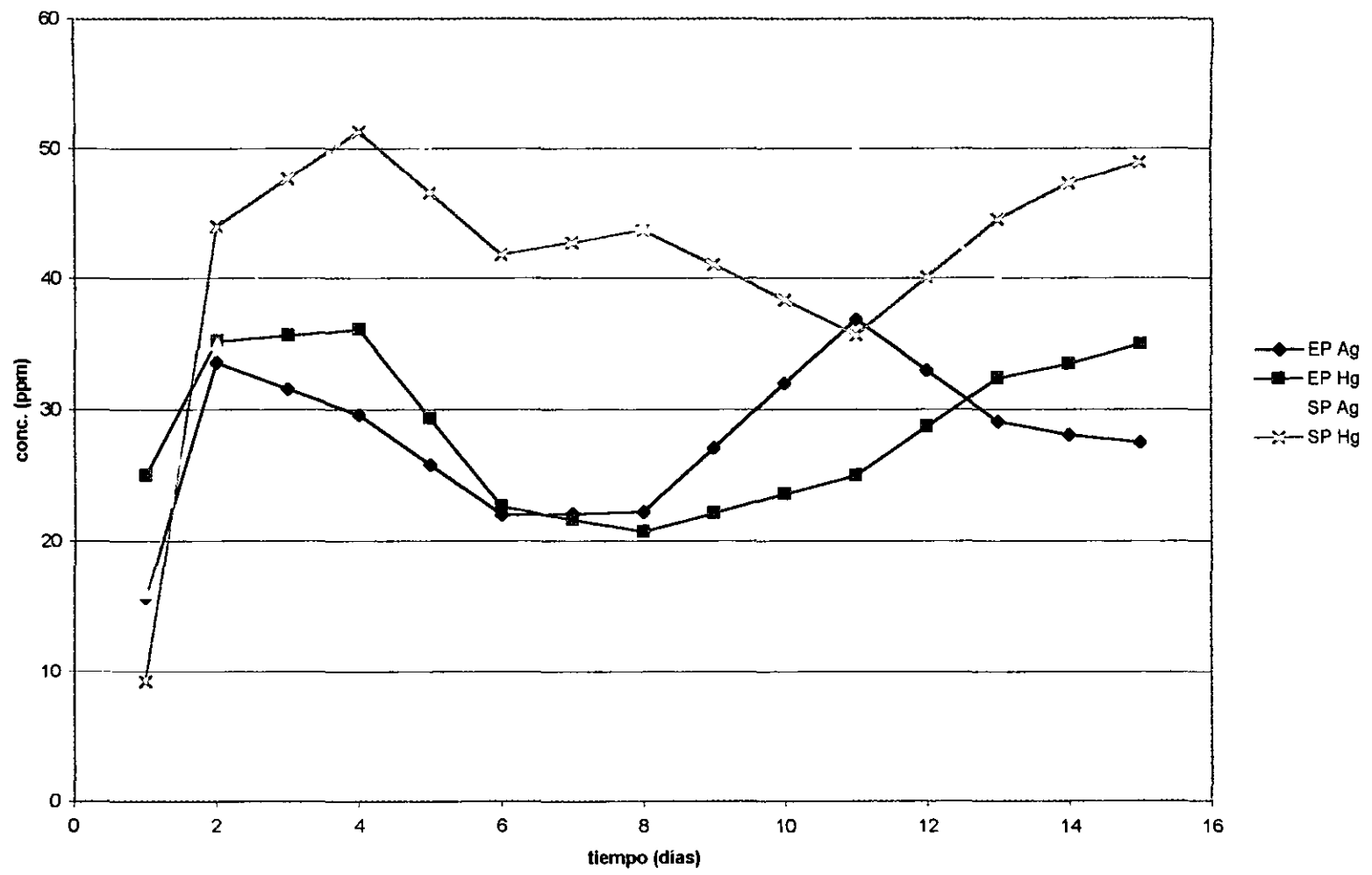


Gráfica IV.4 Entrada y Salida de Plaguicidas  
Empresa 1

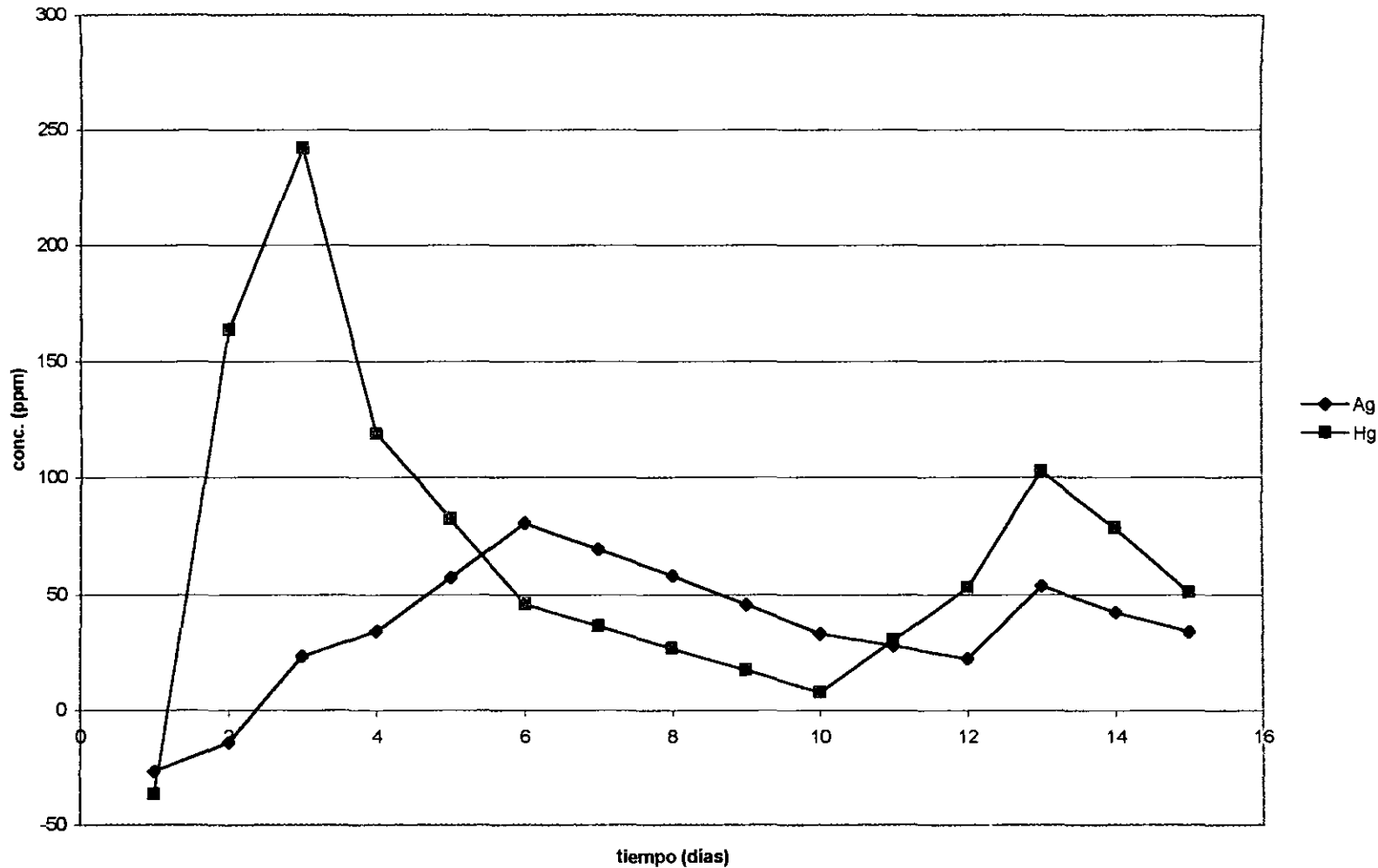




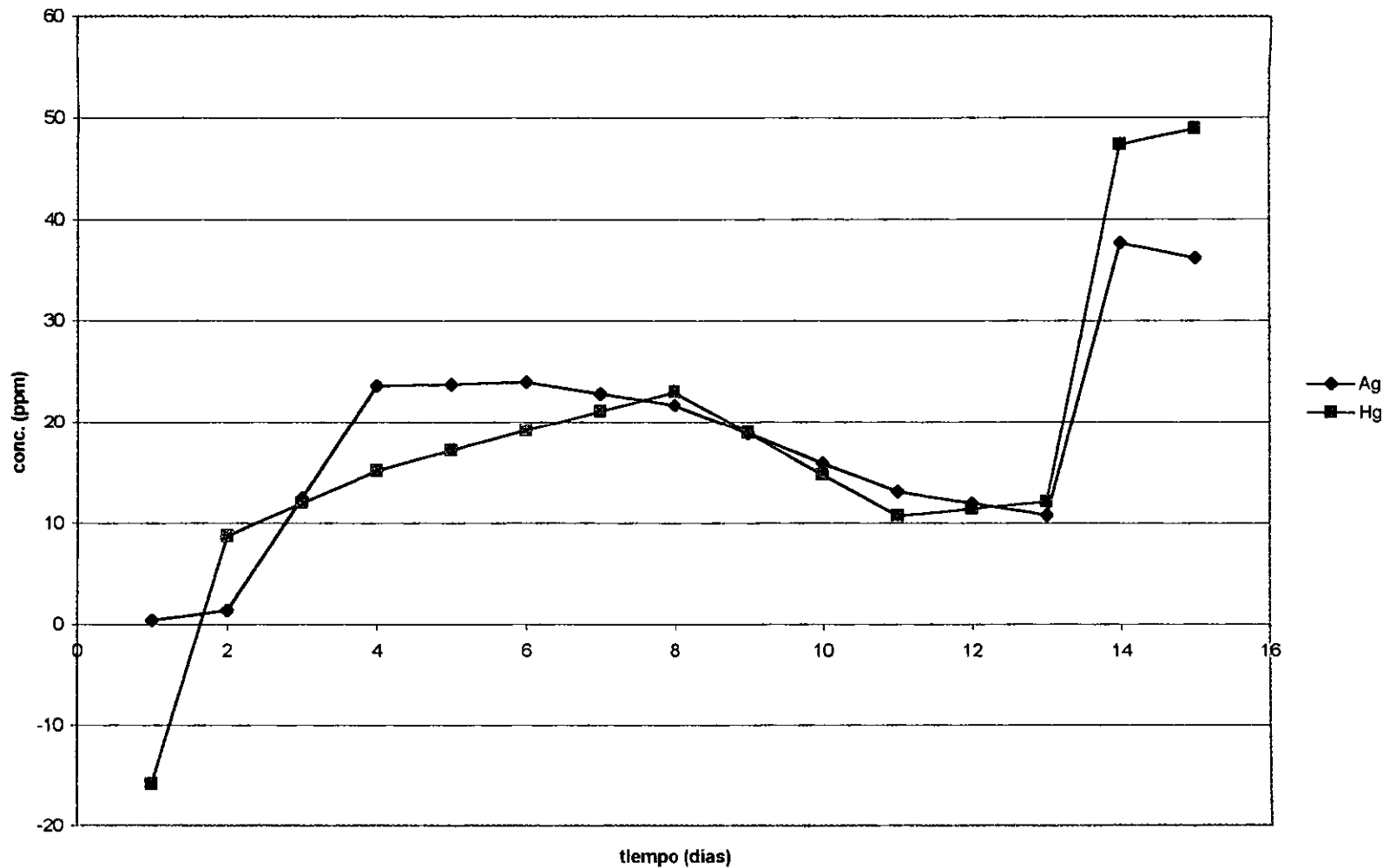
Gráfica IV.3 Entrada y Salida de Plomo  
Empresa 2

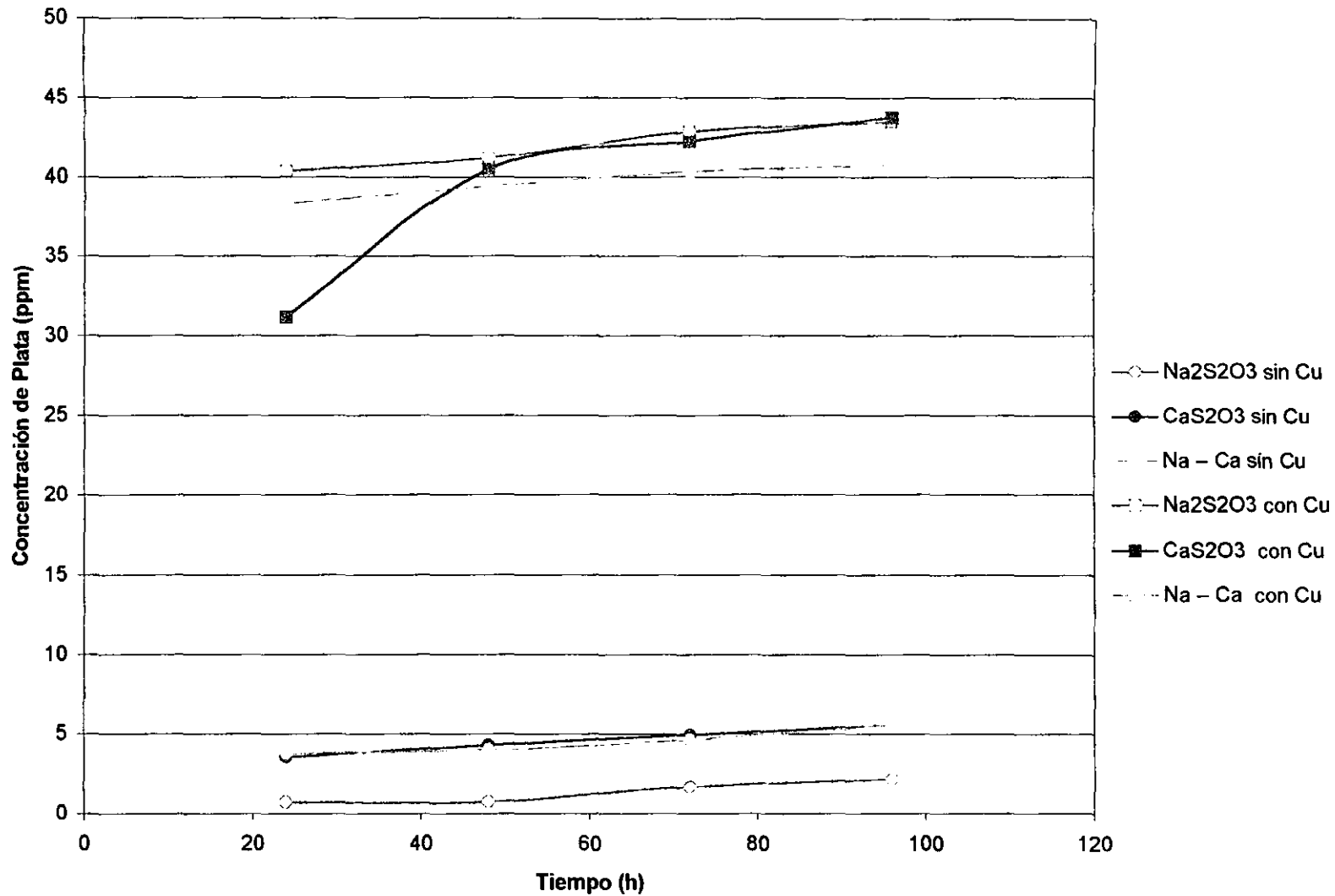


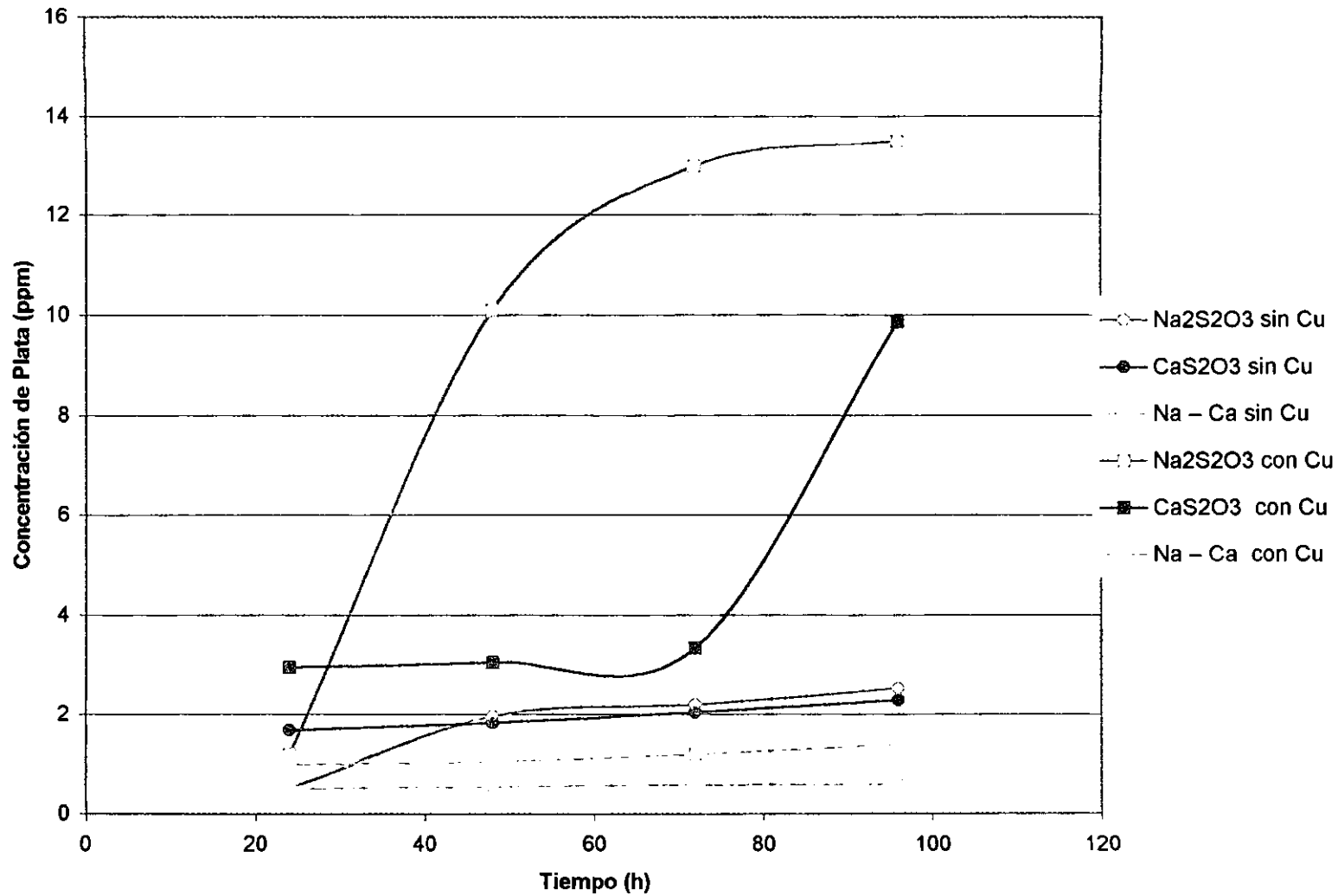
Gráfica N.º 6 Extracción de Ag y Hg  
Empresa 1

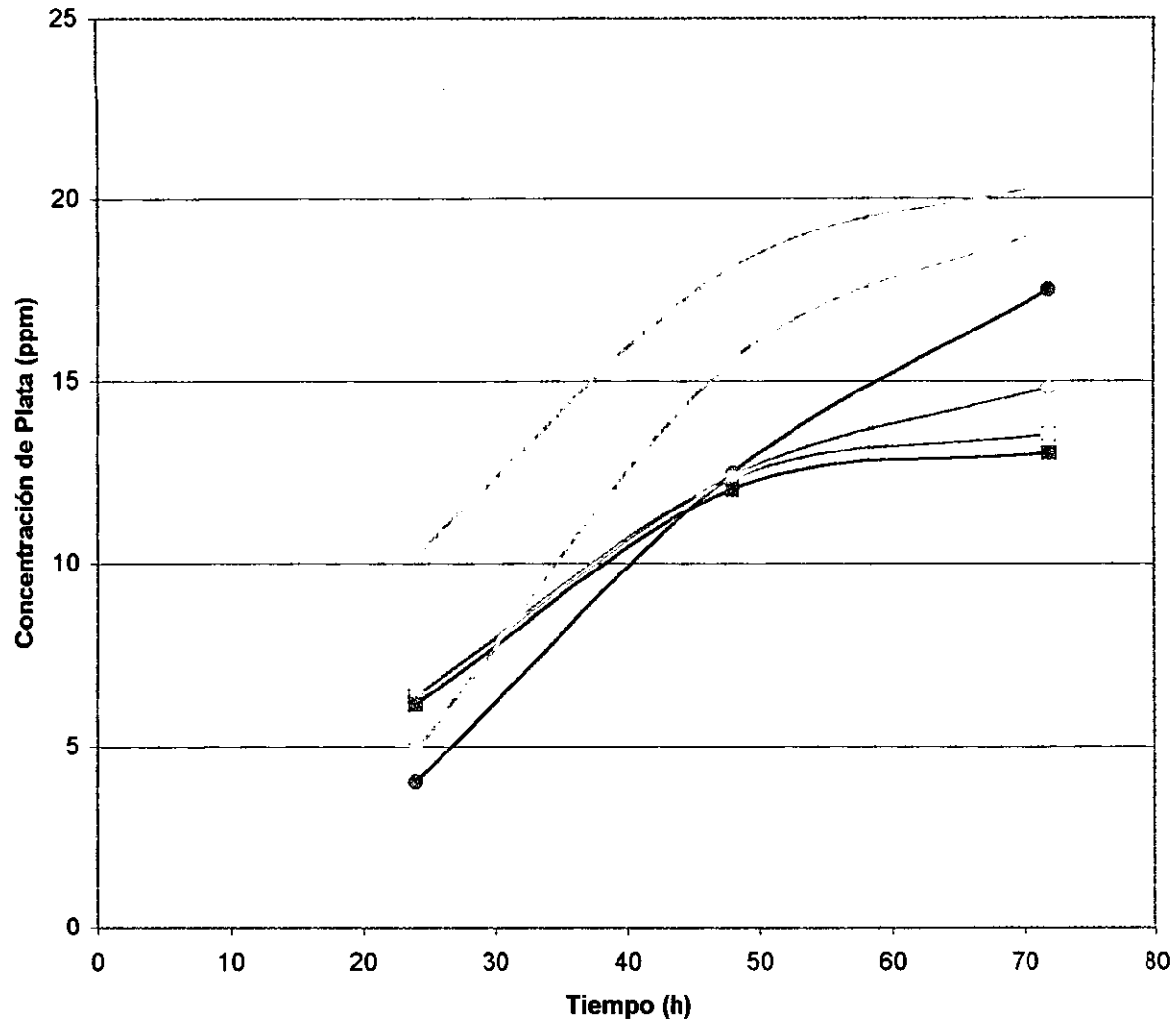


# Empresa 2









- ◇ Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com. sin sal
- Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sin sal
- CaS<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sin sal
- △ Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com. con sal
- Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con sal
- CaS<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con sal

