



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE QUÍMICA**

**FLOTACIÓN DE MINERALES DEL TIPO SULFUROS A TRAVÉS DE  
REACTIVOS NATURALES (SCHINOPSIS BALANSAE)**

**TESIS**  
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**  
**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA**

**Azucena Silis Segura**



**MÉXICO, D.F.**

**2015**



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:**                    **Profesor: Antonio Huerta Cerdán**

**VOCAL:**                           **Profesor: Ciro Eliseo Márquez Herrera**

**SECRETARIO:**               **Profesor: Faustino Juárez Sánchez**

**1er. SUPLENTE:**           **Profesor: Juan Manuel de la Rosa Canales**

**2° SUPLENTE:**               **Profesor: Blanca Paz Díaz**

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA, FACULTAD DE QUÍMICA,  
UNAM**

### **ASESOR DEL TEMA:**

**M. en C. Antonio Huerta Cerdán**

### **SUPERVISOR TÉCNICO:**

**M. en M. Juan Manuel de la Rosa Canales**

### **SUSTENTANTE:**

**Azucena Silis Segura**

## Índice

---

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1	UTILIZACIÓN DE REACTIVOS ORGÁNICOS BIODEGRADABLES	2
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>HIPÓTESIS Y OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
2.1	HIPÓTESIS	3
2.2	OBJETIVOS	3
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b>	<b>4</b>
3.1	BENEFICIO DE MINERALES	4
3.2	FLOTACIÓN	4
3.2.1	REACTIVOS	5
3.2.2	ADSORCIÓN	6
3.3	DOBLE CAPA ELÉCTRICA	7
3.4	MEDICIÓN DEL POTENCIAL ZETA	10
3.5	EL CIANURO EN LA INDUSTRIA MINERA Y SU IMPACTO AMBIENTAL	11
3.6	QUEBRACHO	12
3.7	PROCESOS DE FLOTACIÓN SELECTIVA DE SULFUROS DE Pb Y Zn.	14
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	<b>16</b>
4.1	CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL	17
4.1.1	MUESTREO.	17
4.1.2	DIFRACCIÓN DE RAYOS X.	18
4.1.3	ESPECTROSCOPÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.	18
4.2	PRUEBAS DE POTENCIAL ZETA.	19
4.3	PREPARACIÓN DE MINERAL	22
4.3.1	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO:	22
4.3.2	DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LIBERACIÓN.	23
4.4	PRUEBAS DE FLOTACIÓN SELECTIVA	23
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>28</b>
5.1	CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL	28
5.1.1	DIFRACCIÓN DE RAYOS X.	28
5.1.2	ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.	29
5.2	PRUEBAS DE POTENCIAL ZETA.	30
5.2.1	EFFECTO DEL QUEBRACHO EN LOS MINERALES GALENA Y ESFALERITA	30
5.2.2	EFFECTO DEL COLECTOR EN LOS MINERALES GALENA Y ESFALERITA	32
5.3	PREPARACIÓN DE MINERAL	34

<b>5.4</b>	<b>PRUEBAS DE FLOTACIÓN SELECTIVA</b>	<b>36</b>
5.4.1	EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL COLECTOR EN FLOTACIÓN SELECTIVA DE PBS – ZNS	36
5.4.2	EFFECTO DEL PH EN FLOTACIÓN SELECTIVA DE PBS – ZNS	38
<b><u>CAPÍTULO 6</u></b>		<b><u>44</u></b>
<b><u>CONCLUSIONES</u></b>		
<b><u>CAPÍTULO 7</u></b>		<b><u>46</u></b>
<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b>		
<b><u>CAPÍTULO 8</u></b>		<b><u>49</u></b>
<b><u>ANEXOS</u></b>		
<b>8.1</b>	<b>QUEBRACHO</b>	<b>49</b>
<b>8.2</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL</b>	<b>53</b>
8.2.1	DIFRACCIÓN DE RAYOS X	53
8.2.2	ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA	56
<b>8.3</b>	<b>PRUEBAS DE POTENCIAL ZETA</b>	<b>59</b>
<b>8.4</b>	<b>PREPARACIÓN DEL MINERAL</b>	<b>60</b>
8.4.1	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	60
8.4.2	DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LIBERACIÓN	61
<b>8.5</b>	<b>PRUEBAS DE FLOTACIÓN SELECTIVA</b>	<b>61</b>

## Capítulo 1 Introducción

---

El sector minero - metalúrgico en México representa de manera sobresaliente el 2.9 % del Producto Interno Bruto Nacional<sup>[3,15]</sup>. Este sector creció a una tasa promedio anual de 4.2% en el periodo 2001-2013, consolidándose como una de las industrias de mayor dinamismo y una actividad generadora de empleo, derrama económica, divisas y desarrollo de infraestructura<sup>[16]</sup>.

La cantidad de metales de interés con los que México cuenta es vasta y su producción se ubica entre los 10 principales productores de 16 diferentes minerales<sup>[15]</sup>, entre los que se encuentran el plomo, en 5º lugar, y el zinc, en 6º lugar de la producción mundial. En la figura 1 se muestra la distribución de metales en la producción nacional del 2013.

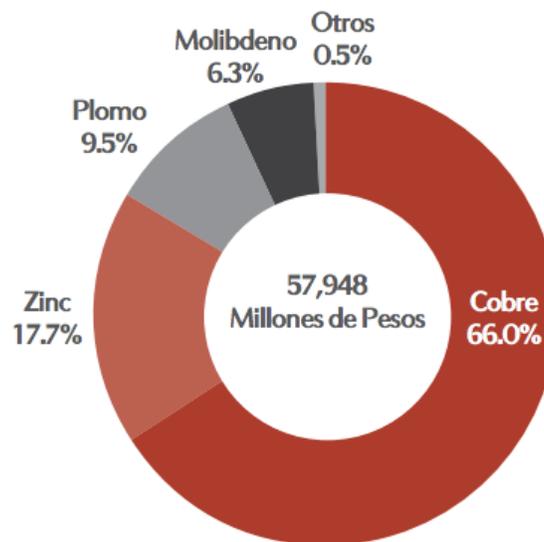


Figura 1. Participación del grupo de metales bases en el valor de la producción nacional 2013.<sup>[3]</sup>

Al realizar la explotación de un yacimiento minero se puede encontrar con minerales de baja ley por lo que su concentración requiere ser efectiva, siendo de gran importancia buscar formas rentables y ecológicas de recuperarlos de los suelos mexicanos.

Para el año 2013 México registró una producción de plomo de 253 mil 361 toneladas, quinto lugar de la producción mundial, y una producción de zinc de 642 mil 542 toneladas, sexta posición de la producción mundial.<sup>[3]</sup>

En la separación de los concentrados metálicos se requiere de procesos en los que se involucra el uso de reactivos de alto impacto ambiental, las cantidades que se emplean son elevadas debido a la producción del país.

### **1.1 Utilización de reactivos orgánicos biodegradables**

Los reactivos orgánicos biodegradables ofrecen una buena opción dado que se degradan fácilmente sin causar daños severos a la naturaleza.

El reactivo Schiniposis Balansae, “Quebracho”, se reporta como un modificador<sup>[14,18]</sup> (depresor, ver capítulo 3.2.1) que puede sustituir al cianuro en la flotación selectiva de menas sulfuradas. Según estudios anteriores los resultados obtenidos por este reactivo son aceptables<sup>[14]</sup> comparados con el CN<sup>-</sup> y ofrecen la ventaja de reducir impactos ambientales, buena selectividad y no ser tóxico.

El estudio de este tipo de reactivo en México es limitado, pues el desarrollo principal se ha dado en los países de Sudamérica dado que es extraído de un árbol que es característico de esa zona.

## Capítulo 2 Hipótesis y Objetivos

---

### 2.1 Hipótesis

- ❖ Es posible flotar selectivamente menas sulfuradas a través del uso de reactivos naturales que posean características de modificación superficial, que permitan separar menas a ciertos valores de pH, en sustitución de reactivos de alto impacto ambiental.

### 2.2 Objetivos

- ❖ Obtener los efectos del modificador quebracho y pH a través de mediciones de potencial zeta, así como de pruebas de flotación selectiva para que un mineral complejo de sulfuros de plomo y zinc pueda ser flotado o deprimido.
- ❖ Obtener las condiciones de máxima flotabilidad de la PbS y de ZnS a través de la modificación con quebracho asistiendo a un xantato.

## Capítulo 3 Fundamentación Teórica

---

### 3.1 Beneficio de Minerales

En la naturaleza la forma en que se encuentran los metales depende de la reactividad que éstos presenten con el ambiente, aquellos más reactivos se encuentran en forma de compuestos, entre los cuales se encuentran algunos óxidos, sulfuros y silicatos. Los minerales son sustancias inorgánicas naturales que poseen composición química y estructura atómica definida<sup>[19]</sup>, los cuales se forman naturalmente.

La adecuada recuperación de metales hace necesaria la aplicación de un conjunto de operaciones físicas para la liberación de minerales valiosos de las menas, así como la concentración de los mismos con características de alta calidad.

A este conjunto de operaciones físicas se le conoce como beneficio de minerales el cual tiene como objetivo la liberación de los valores metálicos de forma rentable, en éste se separa la mena de los estériles para obtener altas leyes y recuperación, sus métodos dependen del tipo de mena y de su composición química.

### 3.2 Flotación

La flotación es un proceso físico-químico de concentración de minerales finamente molidos, usualmente de tamaños menores a 100  $\mu\text{m}$ , basado en las propiedades superficiales de los minerales (hidrofilia e hidrofobicidad), a través de la adición de reactivos que permiten que un mineral o varios modifiquen su superficie y se adhieran a burbujas de gas mientras que el resto de los materiales se quedan en una fase (pulpa: fluido constituido por mineral y agua) en la celda de flotación como se observa en la figura 2.

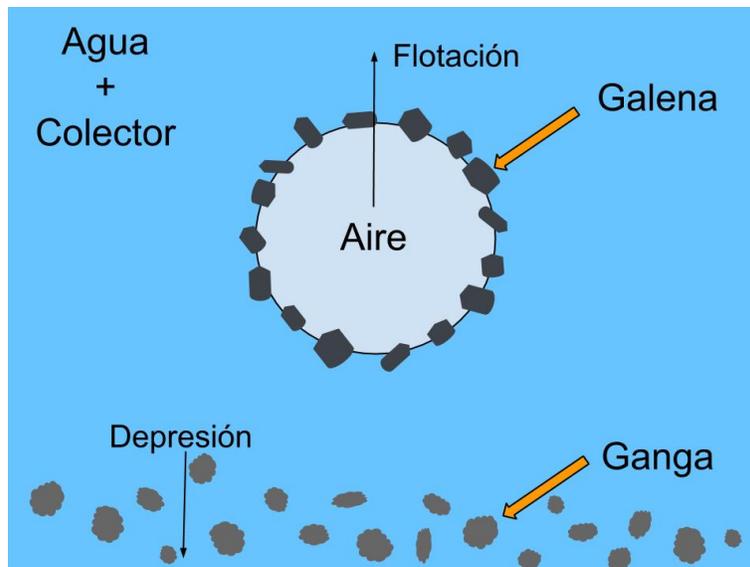


Figura 2. Principio de la separación por flotación

### 3.2.1 Reactivos

Las propiedades superficiales pueden ser modificadas con reactivos que se clasifican como:

- a. *Colector*. Es un reactivo usualmente orgánico cuya función es adsorberse en la superficie del mineral para transformarlo en hidrofóbico<sup>[8]</sup>. En la flotación de menas sulfuradas (Pb - Zn) la utilización de xantatos (sulfidrilos) es común.
- b. *Espumante*. Igualmente es un reactivo orgánico, la función de éste es estabilizar la espuma , provocando que la espuma resista mayor tiempo y tenga el tamaño adecuado, para transportar las partículas adheridas a la superficie de la pulpa y así permitir su recuperación. Entre los espumantes más comunes empleados en la flotación de sulfuros se encuentran los reactivos aerofroth (mezcla de poliglicoles soluble en agua<sup>[4]</sup>), y el metil isobutil carbinol ("MIBC", formula química  $\text{CH}_3 - \text{C}_5\text{H}_{10} - \text{OH}$ , No. CAS 108 - 11 - 2<sup>[10]</sup>).
- c. *Modificador*. La función de estos reactivos es provocar condiciones superficiales en los minerales para el funcionamiento selectivo de

colectores. Entre los que se encuentran los modificadores de pH, activadores y depresores.<sup>[12]</sup>

Modificador de pH. El objetivo de estos reactivos es controlar la concentración de iones  $H^+$  y  $OH^-$  en la pulpa. Comúnmente se utilizan el ácido sulfúrico o clorhídrico, la cal, sosa, y el carbonato de sodio entre otros.

- d. *Activador*. Reactivo orgánico o inorgánico que ayuda al colector a adsorberse en la superficie del mineral a flotar<sup>[6]</sup>. Igualmente este tipo de reactivos puede utilizarse para reactivar posteriormente a la depresión de algún mineral. Un ejemplo de activador es el sulfato de cobre empleado en la esfalerita, la cual no flota fácilmente al agregar únicamente colectores.
- e. *Depresor*. Reactivo que impide al colector adsorberse en la superficie del mineral a flotar<sup>[6]</sup>, provoca que el mineral sea hidrofílico. Un ejemplo de depresor empleado en la separación de galena - esfalerita es el cianuro de sodio, otro ejemplo es el reactivo orgánico quebracho utilizado como depresor de zinc en este trabajo.

Además de conocer y controlar los reactivos utilizados, la flotación involucra el estudio de las propiedades de las interfases sólido – líquido – gas. Una de las formas de caracterizar dicha interfase es a través de la medición de la adsorción.

### 3.2.2 Adsorción

La adsorción puede definirse como la adhesión (concentración) de un líquido o gas en la superficie de un sólido. Al sólido se le denomina adsorbente y las moléculas adsorbidas en la superficie del sólido se les conoce como adsorbato<sup>[11]</sup>.

Con base en la naturaleza de la interacción adsorbido/adsorbente la adsorción se clasifica en adsorción física (fisorción) y adsorción química (quimisorción).

- a) Fisorción. Provocada por fuerzas de Van der Waals<sup>[17]</sup>. El adsorbato conserva su identidad, la molécula adsorbida no está fija en un lugar en la superficie, se da la formación de multicapas y es reversible.

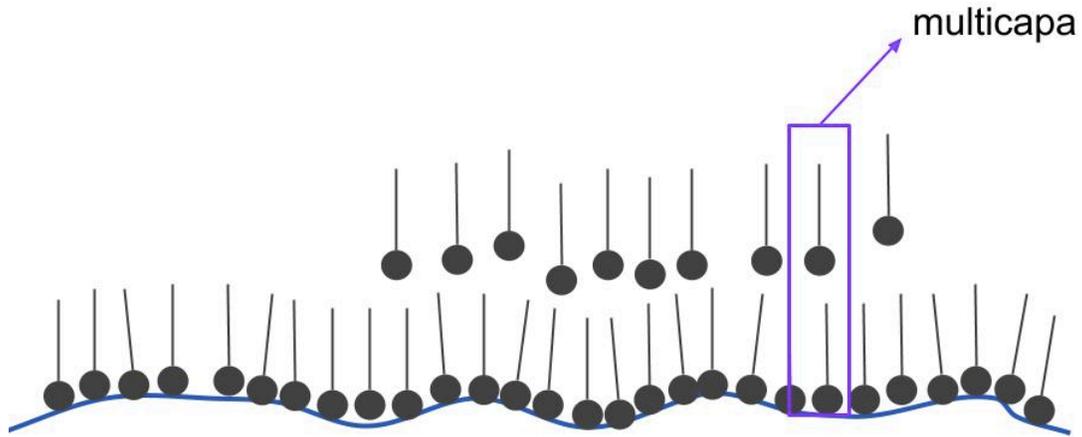


Figura 3. Fisisorción

b) Quimisorción. En la que el adsorbato interactúa químicamente con el adsorbente, existe la posibilidad de perder su identidad, se favorece la formación de enlaces químicos en centros activos del adsorbente, así como la formación de monocapas, es irreversible.

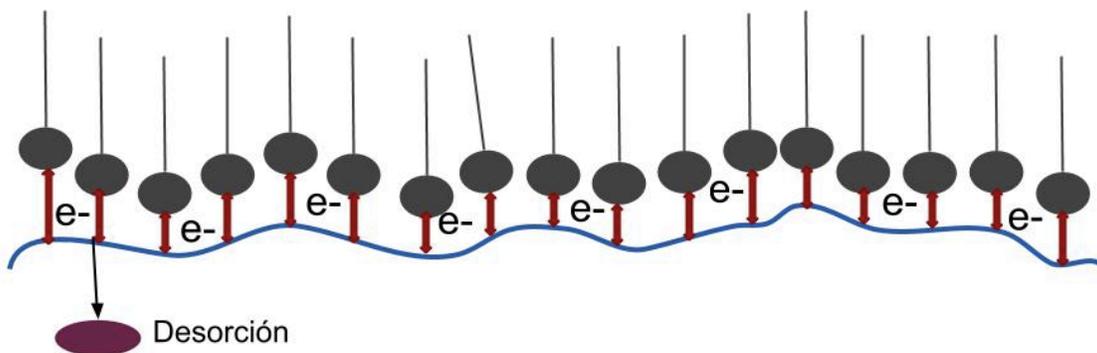


Figura 4. Quimisorción

### 3.3 Doble Capa Eléctrica

Los fenómenos de adsorción en la interfase mineral/agua son controlados en la mayoría de los casos por la doble capa eléctrica.

La carga eléctrica de los sólidos presentes en una pulpa acuosa atrae una “atmósfera” de iones de carga contraria. La carga de superficie, en conjunto con la capa difusa, constituye la doble capa eléctrica.

El modelo de la doble capa se usa para visualizar la atmósfera iónica en la proximidad del coloide cargado y para explicar cómo actúan las fuerzas eléctricas de repulsión, figura 5 (Coagulation & Flocculation, Zeta-Meter).<sup>[13]</sup>

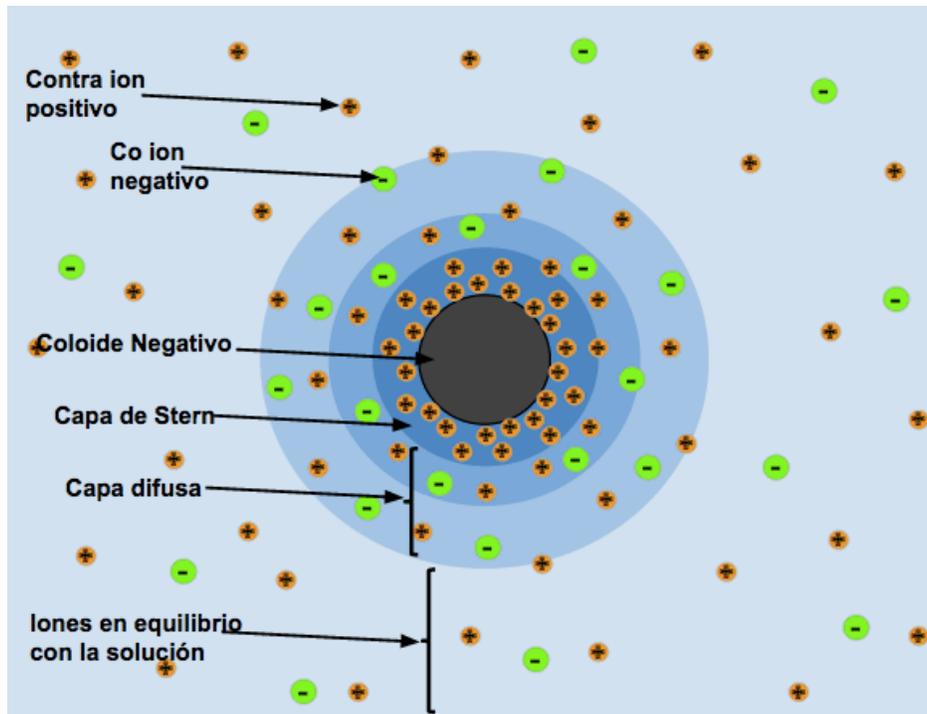


Figura 5. Capa difusa.

En la figura 5 se muestra el cambio en la densidad de carga así como la distribución de iones positivos y negativos alrededor del coloide cargado negativamente.

Inicialmente, el coloide negativo atrae a los iones positivos que se encuentran alrededor hasta formar una capa alrededor de su superficie, a ésta capa se le conoce como capa de Stern, la formación de esta capa provocará un rechazo hacia el resto de iones positivos que son aún atraídos por el coloide negativo.

La concentración de iones positivos cerca de la capa de Stern es alta y va disminuyendo gradualmente con la distancia hasta lograr un equilibrio con la concentración de iones en la solución, a esta distribución de iones se le llama capa difusa.

La doble capa eléctrica entonces está constituida por los iones en la capa de Stern y la capa difusa, el espesor de ambas capas dependerá de del tipo de iones y de la concentración en la solución.

La variación de la densidad de iones en la capa difusa se muestra en las figuras 6 y 7 <sup>[20]</sup>. La primera muestra la variación en la concentración de iones positivos y negativos con la distancia de un coloide negativo, la segunda el efecto neto, esto es, la diferencia en la densidad de carga positiva y negativa. <sup>[20]</sup>

Para el caso arriba mencionado, el coloide negativo y su atmósfera cargada positivamente producen un potencial eléctrico relativo a la solución. La caída del potencial y la distancia desde el coloide es un indicador de la fuerza repulsiva entre los coloides en función de la distancia a las cuales estas fuerzas entran en juego.

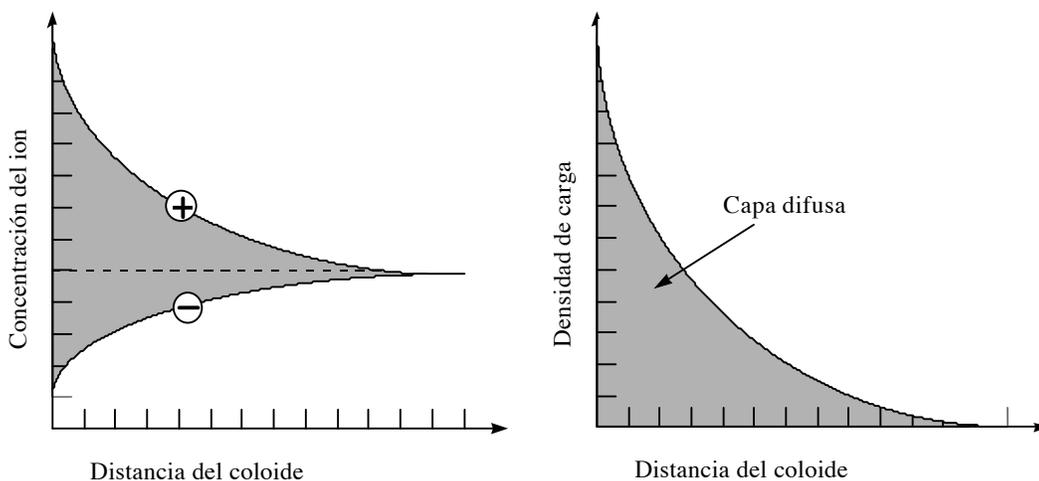


Figura 6. (Izquierda) Variación en la concentración de iones. <sup>[20]</sup>

Figura 7. (Derecha) Variación en densidad de carga. <sup>[20]</sup>

Según el modelo de la doble capa eléctrica, se pueden asumir la existencia de dos capas en la vecindad de la interfase sólido/solución; una capa en la cual se presenta un decaimiento lineal del potencial eléctrico y que permanece fijas aún cuando las partículas se muevan, y una capa difusa con decaimiento exponencial. Esto implica la existencia de un plano de referencia entre la capa fija y la capa difusa y justo el potencial se denomina potencial zeta, o potencial electrodinámico, figura 8.

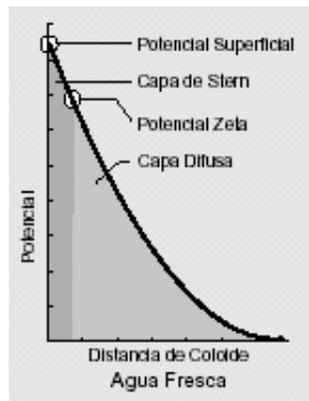


Figura 8. Potenciales a través de la doble capa eléctrica.<sup>[20]</sup>

### 3.4 Medición del Potencial Zeta

Una de las técnicas más comunes para medir el potencial zeta es usando la denominada técnica de microelectroforesis. Usualmente se utiliza un microscopio de alta calidad para observar las partículas coloidales que se encuentran dentro de una cámara llamada celda electroforética. Dos electrodos colocados en los extremos de la cámara se conectan a una fuente de potencial, creándose un campo eléctrico que cruza la celda. Las partículas cargadas migran en el campo y su movimiento y dirección están relacionados con su potencial zeta<sup>[9]</sup>.

Los instrumentos en realidad miden la movilidad electroforética de las partículas, la cual se expresa como micrones/segundo por voltios/centímetro. El primer término, micrones por segundo, representa simplemente la velocidad, mientras que el segundo, voltios/cm, es una expresión de la fuerza eléctrica del campo. Se

utilizan los valores de potencial zeta debido a que éste expresa el verdadero fenómeno involucrado y no el efecto físico del potencial, el cual es la movilidad.

### **3.5 El cianuro en la industria minera y su impacto ambiental**

Uno de los sectores con mayor regulación en materia ambiental es la industria minera, lo que convierte a la prevención, remediación ambiental y cumplimiento de leyes, normas y reglamentos de importancia para esta industria.

Desde hace años el cianuro de sodio es uno de los reactivos más empleados en la disolución de metales preciosos, como oro, plata, zinc, y molibdeno, entre otros. De la producción de cianuro en el mundo al menos el 6% se destina a actividades mineras.

Este reactivo es un reactivo tóxico que actúa con rapidez, capaz de causar la muerte en pocos minutos si no se recibe atención inmediata. Las formas de envenenamiento suceden por inhalación, adsorción, por ingestión o asfixia.

Para el adecuado tratamiento de residuos que contienen cianuro, existen mecanismos como son la oxidación química, formación de materiales de baja toxicidad, degradación natural por evaporación solar, o hidrólisis. Todos estos mecanismos se realizan para evitar la contaminación y el posterior contacto con el ser humano u otras especies.

Un problema latente que surge de la utilización de este reactivo es la transportación ya que gran parte de los accidentes ambientales mineros ocurren durante el transporte de materiales peligrosos, el acarreo de esta sustancia se realiza por medio de barco, ferrocarril y carretera.

Según Gidi “Actualmente el manejo de cianuro es seguro debido al desarrollo tecnológico y al control que se tiene del mismo”<sup>[5]</sup>. Algunas de las acciones que la industria realiza para el control de este reactivo son la capacitación de personal, codificación adecuada de sitios de cianuro o sus desechos, transporte regulado

por normatividad federal, información constante sobre las rutas, utilización de equipo de seguridad, planeación para prevención de accidentes, así como respuestas a emergencias, desecho a través de oxidación química, formación de materiales de baja toxicidad, o degradación natural, entre otras <sup>[5]</sup>. El esfuerzo y costo económico invertido por esta industria en el control de este reactivo es basto, sin embargo se hacen esfuerzos por investigar y desarrollar nuevas formas de disolver estos metales evitando la utilización de este reactivo.

Según el artículo “Mitos y realidades sobre el cianuro de sodio” en la publicación México País Minero por CAMIMEX, la emisión anual de ácido cianhídrico es de 280 Ton por parte de la industria minera, mientras que 20 000 Ton son emitidas por la industria de automotores y 600 000 por la quema de basura o bosques.<sup>[2]</sup>

“Existe un marcado interés en el reemplazo de algunos reactivos de flotación por otros que tengan un menor o nulo impacto ambiental” <sup>[14]</sup>, un ejemplo de gran importancia es el reemplazo de cianuro con el reactivo quebracho pues éste es un extracto natural biodegradable que posee las cualidades para ser utilizado como reactivo depresor en la flotación selectiva de minerales sulfurados. Algunas de las ventajas que se pueden obtener con la utilización de este reactivo es la generación de un menor impacto ambiental, así como menor costo de transportación (ya que no es considerado un material peligroso) e igualmente en cuanto al tratamiento de residuos.

### **3.6 Quebracho**

Obtenido de un árbol de la especie schinopsis nativa de Sudamérica el extracto quebracho es obtenido a través de tratamiento con agua caliente a los tejidos y posteriormente modificado por sulfitación para hacerlo soluble y estable.

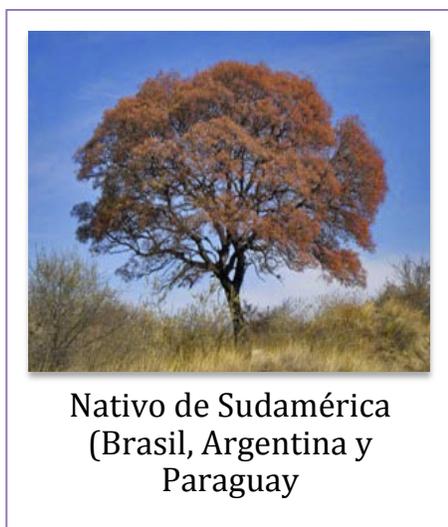


Figura 9. Quebracho: árbol y extracto<sup>[18]</sup>

La fórmula química de un extracto de quebracho es la siguiente:  $C_{14}H_{14}O_{11}$ <sup>[11]</sup>.

El quebracho se divide en tres tipos dependiendo de la especie de árbol de la que sea producida.

Tabla 1. Tipos de quebracho<sup>[13, 14, 18]</sup>

Nombre científico	Quebracho	Tipo	Características
<b>Schinopsis lorentzii</b>	Colorado	S	El más débil para la depresión de sulfuros, pero máximo efecto a pH elevado. Para minerales naturalmente flotables. De mayor costo y menor efectividad en flotación selectiva de sulfuros.
<b>Schinopsis haenkeana</b>	Blanco	A	Apropiado para minerales sulfurados. El Quebracho A es mas sensible en pH ácido.
<b>Schinopsis balansae</b>	Colorado chaqueño	O	Mayor actividad depresora a menores dosificaciones. De menor costo.

Algunas de las características de este reactivo son listadas a continuación:

- ❖ Reactivo modificador en flotación selectiva (depresor).
- ❖ Alta selectividad.
- ❖ Amigable con el medio ambiente.
- ❖ No presenta riesgos a la salud.
- ❖ Estables en medio ácido como alcalino.
- ❖ Gran capacidad de adsorción en la superficie de los minerales.

La gran capacidad de adsorción es lo que hace a este tipo de reactivos una buena opción para utilizarse como modificador y su posible empleo en vez del cianuro ( $\text{CN}^-$ ) comúnmente utilizado.

Esta capacidad de adsorción puede deberse a las siguientes razones:

- ❖ Unión puente de hidrógeno con oxígeno de la superficie
- ❖ Atracción electrostática entre micelas y la superficie de algunos minerales.
- ❖ El grupo hidroxilo reacciona con la superficie del mineral cambiando la carga superficial permitiendo actuar selectivamente con el colector.

El quebracho se distribuye por medio de algunas compañías en México, entre las que se encuentra Unitán SAICA, algunos de los productos que esta empresa propone son los depresores, entre los que se encuentran los reactivos T1 y T5, y el reactivo dispersante M3. Para la elaboración de esta tesis se selecciona el reactivo depresor T5.

### **3.7 Procesos de flotación selectiva de sulfuros de Pb y Zn.**

El objetivo de este proceso de flotación es la separación de los concentrados de mineral de sulfuros de plomo y de zinc de la ganga que compone la roca original.

Este proceso se inicia con la alimentación de la pulpa proveniente de la molienda para acondicionar la flotación del mineral de sulfuro de plomo ( $ZnS$ , también conocido como *galena*) con los reactivos: modificador de pH, comúnmente se utiliza la cal para ajustar a un pH en el rango de 8.0 a 9.0 <sup>[7]</sup>, colector, xantato etílico de potasio, espumante, MIBC (metil isobutil carbinol) y depresor, siendo el cianuro de sodio el de mayor uso.

En la celda de flotación se hace burbujear aire desde el fondo mientras la pulpa es agitada para provocar el contacto entre la pulpa, los reactivos y burbujas de aire, dando origen a la flotación del mineral de plomo (*galena*), en la superficie de la celda se recupera el concentrado de plomo.

El mineral de sulfuro de zinc ( $ZnS$ , también conocido como *esfalerita*) se encuentra deprimido en la pulpa, por lo tanto se procede a flotar este mineral. Para su acondicionamiento se regula el pH a un rango de 10.5 a 11.0 <sup>[7]</sup> y se agrega el reactivo activador,  $CuSO_4$ . Una vez acondicionada la pulpa se burbujea aire para flotar la esfalerita y así recuperarlo de la ganga.

“El proceso es reiterado en varios ciclos, de manera que cada ciclo va produciendo un producto cada vez más concentrado” <sup>[7]</sup>.

## Capítulo 4 Desarrollo Experimental

El desarrollo experimental realizado para este trabajo se muestra a continuación, primero en un diagrama de flujo (figura 10) y posteriormente en forma descriptiva para cada etapa del mismo.

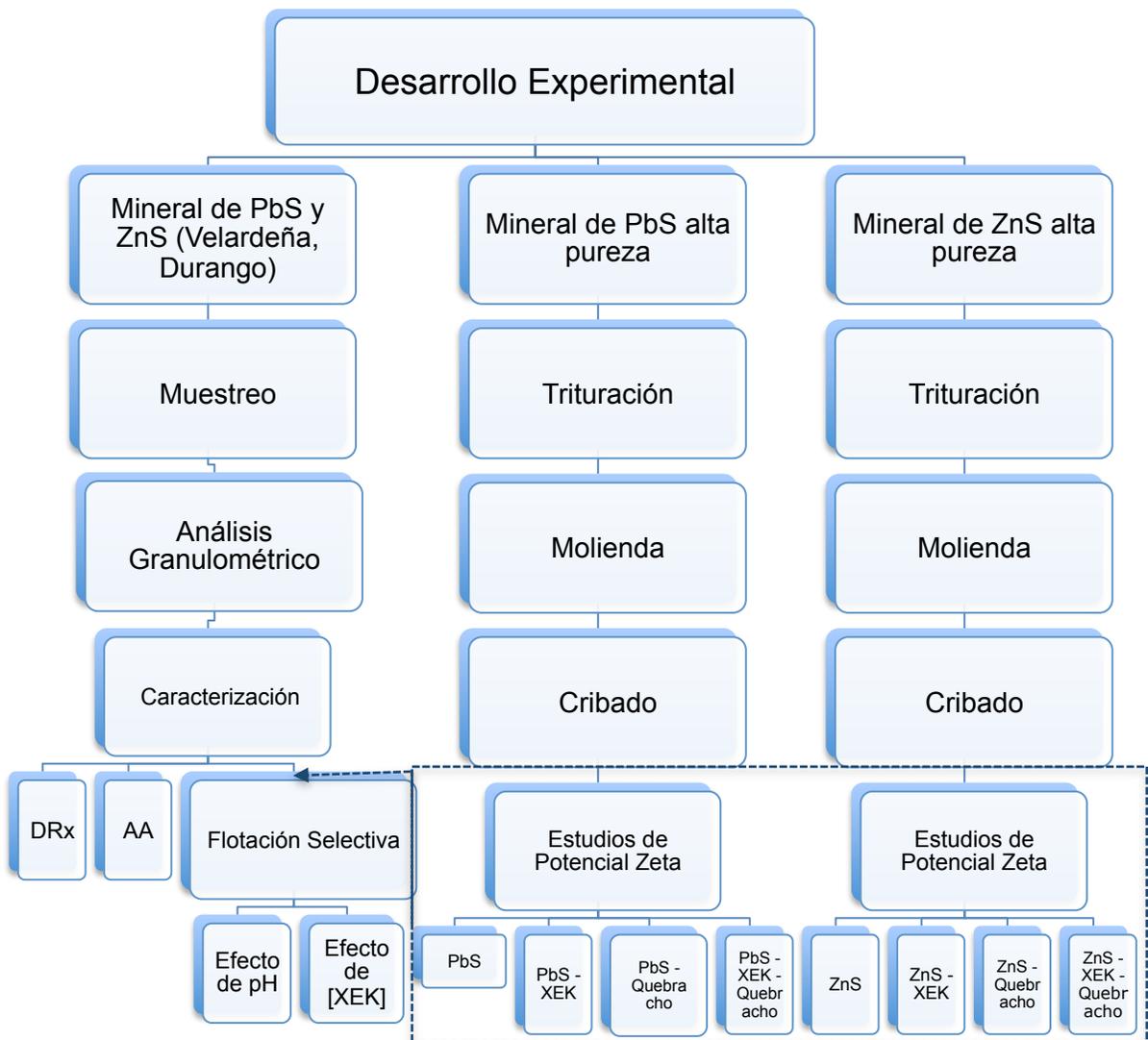


Figura 10. Diagrama del procedimiento experimental.

La materia prima empleada en el desarrollo experimental constó de minerales de sulfuro de plomo y zinc de alta pureza para los estudios de potencial zeta y de

menas sulfuradas de Pb y Zn provenientes de la planta Velardeña, municipio de Cuencamé, Durango, del Grupo Peñoles para los estudios de flotación selectiva.

#### **4.1 Caracterización del mineral**

Esta primera etapa consistió en determinar la composición química del mineral Velardeña a partir de una muestra representativa realizando la caracterización por Difracción de Rayos X y espectroscopia de absorción atómica. El estudio de caracterización constó de los siguientes pasos:

##### **4.1.1 Muestreo.**

La planta Velardeña (Grupo Peñoles) proporcionó 7 kg de mineral, el cual cumple con los requerimientos granulométricos para llevar a cabo la flotación dado que se obtuvo de los productos del proceso de molienda.

Para realizar el muestreo el mineral fue extendido en una superficie de concreto y apilado en forma cónica, esta operación fue repetida 3 veces con el fin de distribuir las partículas homogéneamente; posteriormente el material se distribuyó utilizando un cucharón para formar un cono truncado y posteriormente un pastel circular plano, el cual fue dividido en 4 partes por medio de dos líneas perpendiculares entre sí (cuarteo); dos cuartos opuestos fueron separados para la caracterización del mineral, éstos fueron divididos nuevamente para la reducción de la muestra, 5 veces, utilizando el procedimiento anterior, hasta obtener una muestra de aproximadamente 0.437 kg de los cuales se tomaron dos muestras, una para espectroscopia de absorción atómica y otra para Difracción de Rayos X.

Para preparar las muestras destinadas a análisis granulométrico se dividieron 200 g de mineral utilizando un cuarteador/separador, tomando nuevamente dos cuartos opuestos y separando los restantes, hasta obtener una muestra de 50.7 g de mineral.



Figura 11. Cuarteo del mineral

#### 4.1.2 Difracción de Rayos X.

El análisis se realizó por cristalografía de Rayos X, mediante el uso del equipo Bruker modelo D8 Advanced con una radiación monocromática de  $\text{Cu}(k\alpha)$  ( $\lambda=0.154$  nm). Los espectros de difracción fueron escaneados con un tamaño de paso de  $2\theta$  y un tiempo de 25 segundos por paso utilizando la geometría de Bragg-Brentano. Este paso permitió identificar de manera precisa varias sustancias que componen la muestra representativa.

#### 4.1.3 Espectroscopía de absorción atómica.

El análisis por espectroscopía de absorción atómica se realizó para determinar la concentración de los metales en solución por medio del equipo Perkin Elmer modelo 3100. Para esta muestra se analizaron Pb, Zn y Fe, utilizando una longitud de onda de  $\lambda \text{ Pb}= 283.3$  nm,  $\lambda \text{ Zn}=213.9$  nm y  $\lambda \text{ Fe}= 248.3$  nm respectivamente.

La preparación de las muestras para este análisis consistió en pesar  $0.1 \text{ g} \pm 0.004$  de cada producto de flotación (concentrado de plomo, concentrado de zinc, colas de zinc), al que se adicionaron unas gotas de acetona con el fin de eliminar algunos productos de flotación, posteriormente se agregaron 20 mL de una

solución de HCl 1:1 y se elevó la temperatura de la muestra hasta 70°C, para terminar de liberar el mineral se cubrieron las muestras con un vidrio de reloj y se agregaron unas gotas de HNO<sub>3</sub>, posteriormente se aforo a 100mL, finalmente se tomó 1 mL de esta solución y se aforó a 100 mL para sus correspondientes lecturas en el equipo de absorción atómica.



Figura 12. Espectrómetro Perkin Elmer 3100

#### 4.2 Pruebas de potencial zeta.

La segunda etapa permitió determinar el efecto del reactivo orgánico (quebracho, Floatán T5), colector y pH por medio de la comparación de valores de potencial zeta realizadas en un Zeta – metro 3.0 + y una celda electroforética con un ánodo de platino y otro de molibdeno.



Figura 13. Zeta – metro

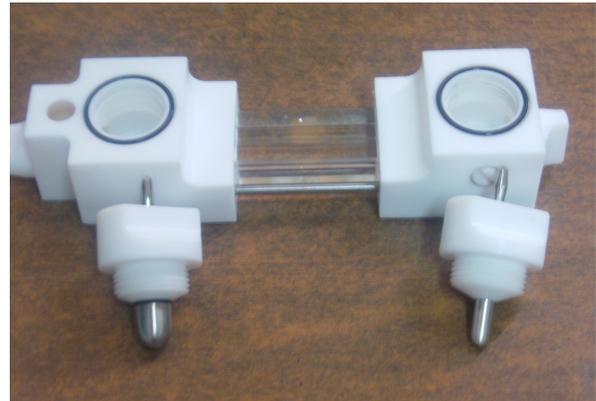


Figura 14. Celda electroforética

El quebracho Floatán T5 es un reactivo distribuido por Unitán SAICA, desarrollado por esta industria para aplicaciones en minería, este reactivo es una extracto natural obtenido del árbol *Schinopsis Balansae*, conocido como quebracho colorado chaqueño (tipo O) y modificado para complementar sus características naturales como depresor con solubilidad en agua fría y bajo consumo específico de modificador. Algunas características del quebracho tipo O, como se menciona en la tabla 2, son el bajo costo y mayor actividad depresora. El reactivo Floatán T5, según Unitán, es adecuado para la flotación de sulfuros<sup>[18]</sup>.

Para el llenado de la celda de cuarzo (figura 14) se utilizaron 25 mL de solución buffer ( a partir de los electrolitos  $H_3BO_3$ , KCl y NaOH [0.2 M]) y un mineral al 1% wt (0.025g).

Las mediciones de potencial zeta fueron realizadas a minerales de alta pureza de galena y esfalerita, los cuales fueron triturados, molidos y finalmente cribados hasta alcanzar una granulometría de -200 a +150  $\mu m$ , quebracho (Floatán T5) en una concentración de 70 g/ton de mineral y colector XEK en una concentración de  $1.5 \times 10^{-3}$  M.

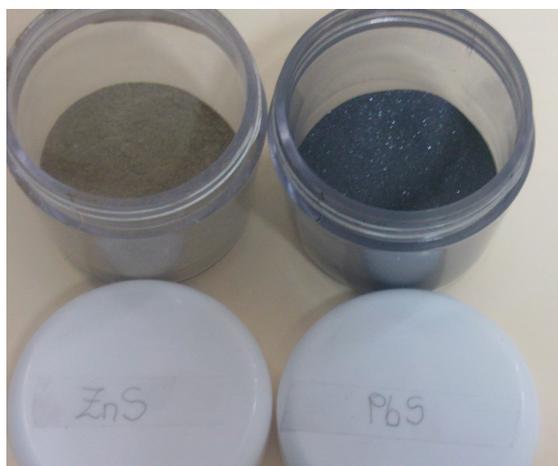


Figura 15. Mineral esfalerita (izquierda) y galena (derecha)

Las condiciones establecidas para este estudio fueron las siguientes:

Tabla 2. Condiciones para pruebas de potencial zeta realizadas a minerales de galena y esfalerita

Mineral	pH	Reactivos		
		Quebracho (Floatán T5)	Colector XEK	Agua destilada
<b>Galena</b>	6 - 11			✓
<b>Galena</b>	6 - 11	✓		✓
<b>Galena</b>	6 - 11		✓	✓
<b>Galena</b>	6 - 11	✓	✓	✓
<b>Esfalerita</b>	6 - 11			✓
<b>Esfalerita</b>	6 - 11	✓		✓
<b>Esfalerita</b>	6 - 11		✓	✓
<b>Esfalerita</b>	6 - 11	✓	✓	✓

Con los resultados obtenidos de esta segunda etapa se determinaron las condiciones de pH para realizar flotación selectiva de galena y esfalerita en

presencia de quebracho, Floatán T5, y colector (XEK) correspondientes a la cuarta etapa.

### 4.3 Preparación de mineral

Como se mencionó en la etapa correspondiente al muestreo, la materia prima empleada en esta tesis fueron 7 kg de mineral de plomo y zinc, los cuales fueron muestreados como se describe en el muestreo (cuarteo del material); obteniéndose una muestra de aproximadamente 0.45 kg de mineral la cual se redujo en cantidad de muestra por cuarteo, para obtener una muestra para espectroscopia de absorción atómica y Difracción de Rayos X, los 225 g restantes fueron cuarteados para obtener una muestra de 50.7 g utilizada para análisis granulométrico y determinación del tamaño de liberación. Los pasos seguidos se describen a continuación:

#### 4.3.1 Análisis granulométrico:

Para realizar el análisis granulométrico de la muestra de alimentación del mineral de Pb y Zn se consideró que la primera criba no retuviera más del 10% de la muestra, seleccionando las cribas subsecuentes con una progresiones geométricas de raíz cuadrada de dos, como se muestra en la tabla 3 y colocando finalmente las cribas en un rop tap, modelo RX-29, con un tiempo de residencia de 15 minutos.

Tabla 3. Selección de cribas para análisis granulométrico

Número de Malla	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )
40	422
50	300
70	212
100	150
140	106
200	74
325	44

#### 4.3.2 Determinación del tamaño de liberación.

Para la determinación del tamaño de liberación del mineral de Pb-Zn se utilizó un microscopio estereoscópico American Optical AO 570 (figura 16), en el cual se colocó una cuadrícula de un centímetro cuadrado y se realizó el conteo de partículas valiosas con respecto a las de ganga para determinar a que tamaño se ha obtenido el 100% de liberación.



Figura 16. Microscopio estereoscópico American Optical

Finalmente los 6.55 Kg de mineral restantes fueron divididos en muestras de 220 g para realizar flotaciones selectivas de acuerdo al siguiente procedimiento:

#### 4.4 Pruebas de flotación selectiva

Con base a los resultados obtenidos en las mediciones de potencial zeta de la tercera etapa, se efectuaron 12 pruebas de flotación selectiva, con el objeto de corroborar el efecto depresor del quebracho y su capacidad para realizar separaciones de los minerales de interés.

El circuito de flotación se representa en la figura 17, formado por un circuito primario de plomo, y posteriormente el circuito primario de zinc.

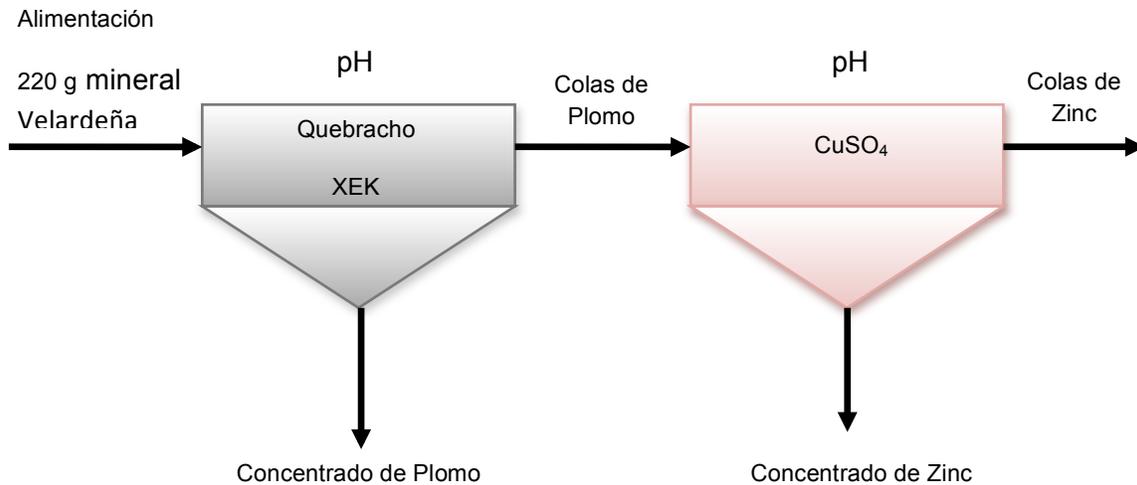


Figura 17. Circuito de flotación selectiva galena – esfalerita.

Ambos circuitos primarios se realizaron en una celda de laboratorio (Denver) a la cual se agregó un volumen de 1100 mL de agua y 20% de sólidos en peso (220 g de mineral Velardeña), para controlar el pH se utilizó un pH-metro de la marca Oakton de la serie 2100, el tiempo de acondicionamiento y de flotación fue de 5 minutos para ambas celdas.



Figura 18. Celda de flotación y pH - metro



Figura 19. Reactivos de flotación y mineral

El acondicionamiento del circuito de plomo inició con el ajuste de la velocidad de agitación a 1300 RPM, posteriormente se agregó el reactivo depresor, quebracho

Floatán T5, el pH se ajustó a partir de este momento, después de haber transcurrido 2 minutos se agregó el reactivo colector, xantato etílico de potasio (XEK) con 2 minutos de acondicionamiento, nuevamente se ajustó el pH, al minuto 4 se agregó el espumante, Metil Isobutil Carbinol (MIBC) y después de 1 minuto de acondicionamiento se inició la flotación. Los productos obtenidos de este circuito primario fueron un concentrado de plomo y colas de plomo (que contienen material estéril y zinc).



Figura 20. Recolección de plomo en celda primaria de plomo

El acondicionamiento del circuito primario de zinc igualmente inició con el ajuste de la velocidad de agitación a 1300 RPM, posteriormente al minuto 1 se agregó el reactivo activador sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ), y se procedió al ajuste de pH, al minuto 4 se adicionó el reactivo espumante (MIBC) para dar inicio a la flotación en el minuto cinco. Los productos obtenidos de este circuito primario fueron un concentrado de zinc y colas de zinc (que principalmente contienen material estéril).



Figura 21. Recolección de zinc en celda primaria de zinc

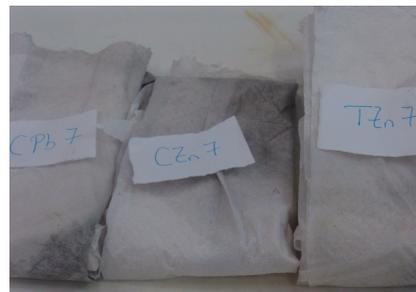


Figura 22. Productos de circuito de flotación

Las condiciones para las 12 flotaciones selectivas se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Condiciones para 12 pruebas de flotación selectiva de galena – esfalerita utilizando colector XEK

Prueba	Celda	Condiciones				
		Mineral al 20 %wt 1300 RPM Tiempo de acondicionamiento y flotación de 5 minutos para cada celda				
		Reactivos				pH
[Quebracho]	[XEK]	[CuSO <sub>4</sub> ]	[MIBC]			
1	Primaria de Pb	70 g/ ton mineral	$1.5 \times 10^{-3}$ M		0.25 ml/ 1000ml	9
	Primaria de Zn			$1.5 \times 10^{-4}$ M	0.125 ml/1000ml	9
2	Primaria de Pb	70 g/ ton mineral	$1.5 \times 10^{-3}$ M		0.25 ml/ 1000ml	10
	Primaria de Zn			$1.5 \times 10^{-4}$ M	0.125 ml/1000ml	10
3	Primaria de Pb	70 g/ ton mineral	$1.5 \times 10^{-3}$ M		0.25 ml/ 1000ml	11
	Primaria de Zn			$1.5 \times 10^{-4}$ M	0.125 ml/1000ml	11
4	Primaria de Pb	70 g/ ton mineral	$1.5 \times 10^{-3}$ M		0.25 ml/ 1000ml	9
	Primaria de Zn			$1.5 \times 10^{-4}$ M	0.125 ml/1000ml	10
5	Primaria de Pb	70 g/ ton mineral	$1.5 \times 10^{-3}$ M		0.25 ml/ 1000ml	9
	Primaria de Zn			$1.5 \times 10^{-4}$ M	0.125 ml/1000ml	11
6	Primaria de Pb	70 g/ ton mineral	$1.5 \times 10^{-3}$ M		0.25 ml/ 1000ml	10
	Primaria de Zn			$1.5 \times 10^{-4}$ M	0.125 ml/1000ml	11
7	Primaria de Pb	70 g/ ton mineral	$1.5 \times 10^{-4}$ M		0.25 ml/ 1000ml	9
	Primaria de Zn			$1.5 \times 10^{-4}$ M	0.125 ml/1000ml	9
8	Primaria de Pb	70 g/ ton mineral	$1.5 \times 10^{-4}$ M		0.25 ml/ 1000ml	10
	Primaria de Zn			$1.5 \times 10^{-4}$ M	0.125 ml/1000ml	10
9	Primaria de Pb	70 g/ ton mineral	$1.5 \times 10^{-4}$ M		0.25 ml/ 1000ml	11
	Primaria de Zn			$1.5 \times 10^{-4}$ M	0.125 ml/1000ml	11
10	Primaria de Pb	70 g/ ton mineral	$1.5 \times 10^{-4}$ M		0.25 ml/ 1000ml	9
	Primaria de Zn			$1.5 \times 10^{-4}$ M	0.125 ml/1000ml	10
11	Primaria de Pb	70 g/ ton mineral	$1.5 \times 10^{-4}$ M		0.25 ml/ 1000ml	9
	Primaria de Zn			$1.5 \times 10^{-4}$ M	0.125 ml/1000ml	11
12	Primaria de Pb	70 g/ ton mineral	$1.5 \times 10^{-4}$ M		0.25 ml/ 1000ml	10
	Primaria de Zn			$1.5 \times 10^{-4}$ M	0.125 ml/1000ml	11

Para comparar la efectividad de las diferentes pruebas se efectuó un balance metalúrgico, empleando los pesos de los productos del circuito de flotación y los análisis químicos obtenidos por espectroscopia de absorción atómica.

Como resultado de la cuarta etapa, se obtuvo el % ley de concentrado y % recuperación con los que se comparó la calidad y cantidad de recuperados de flotación selectiva y a su vez se analizó el uso de quebracho (reactivo orgánico biodegradable) en la flotación selectiva de las menas sulfuradas.

## Capítulo 5 Resultados y Análisis de Resultados

### 5.1 Caracterización del mineral

El mineral utilizado en el presente trabajo fue donado por el Grupo Peñoles, Mina Velardeña ubicada en el municipio de Cuencamé, Durango, dicho mineral fue caracterizado vía difracción de rayos X y absorción atómica; obteniéndose los siguientes resultados:

#### 5.1.1 Difracción de Rayos X.

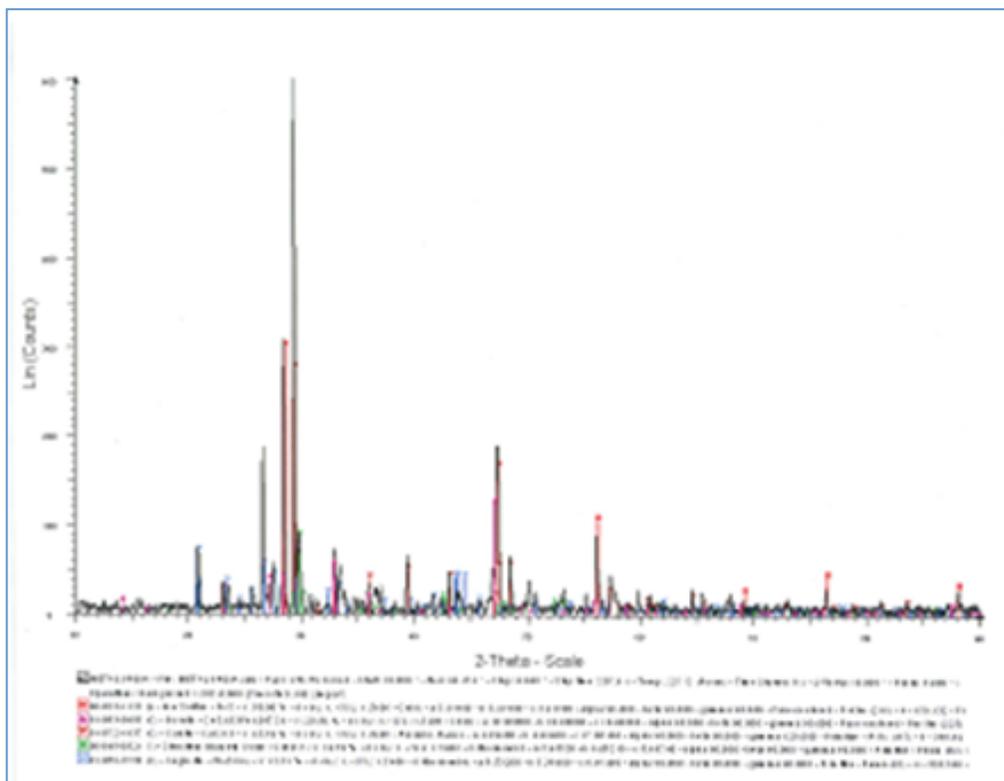


Figura 23. Difractograma del mineral de Velardeña, Durango.

De acuerdo a la difracción de rayos X, mostrada en la figura 23, el mineral está compuesto por esfalerita ( $ZnS$ ), galena ( $PbS$ ) y pirita ( $FeS_2$ ), los cuales presentan sus picos en la escala de  $2\theta$  ( $^\circ$ ) de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 5. Escala 2-teta (°) para la galena, esfalerita y pirita.

<b>PbS</b>	<b>ZnS</b>	<b>FeS</b>
<b>2θ(°)</b>	<b>2θ(°)</b>	<b>2θ(°)</b>
25.956 ± 0.5	28.587 ± 0.5	28.587 ± 0.5
30.064 ± 0.5	33.153 ± 0.5	33.280 ± 0.5
43.254 ± 0.5	37.121 ± 0.5	47.569 ± 0.5
50.978 ± 0.5	40.797 ± 0.5	56.403 ± 0.5
53.547 ± 0.5	47.569 ± 0.5	69.583 ± 0.5
62.728 ± 0.5	56.403 ± 0.5	76.809 ± 0.5

Cabe señalar que el equipo de difracción de rayos X fue calibrado utilizando una pastilla de Corundum, los análisis se realizaron por duplicado con una desviación estándar de 0.5.

Posteriormente se llevó a cabo un análisis por espectroscopia de absorción atómica para conocer la concentración dichos elementos (Pb, Zn y Fe).

### 5.1.2 Espectroscopia de absorción atómica.

Tabla 6. Composición química obtenida por absorción atómica

<b>Muestra</b>	<b>Pb (%W)</b>	<b>Fe (%W)</b>	<b>Zn (%W)</b>
<b>Mineral Velardeña</b>	0.045 ± 0.01	39.048 ± 0.04	5.386 ± 0.03

El mineral contiene principalmente pirita y esfalerita, la cantidad de galena que presenta es baja, aún así es posible realizar flotación selectiva de galena – esfalerita. Para la calibración del equipo de espectroscopia de absorción atómica

se utilizaron estándares de Pb, Zn y Fe con una concentración de 1, 2 y 4 ppm, con su respectivo blanco, realizándose los análisis por triplicado.

## 5.2 Pruebas de potencial zeta.

Las mediciones de potencial zeta fueron realizadas a minerales de alta pureza de galena y esfalerita de granulometría de -200 a +150  $\mu\text{m}$ , pH de 6 a 11, y con quebracho (Floatán T5) en una concentración de 70 g/ton de mineral y con colector XEK en una concentración de  $1.5 \times 10^{-3}$  M.

Los valores de potencial zeta obtenidos para galena y esfalerita se muestran en la tabla 12 (ver anexo), al comparar los valores de potencial zeta presentados se determinó el efecto del reactivo quebracho y colector a diferentes pH.

### 5.2.1 Efecto del quebracho en los minerales galena y esfalerita

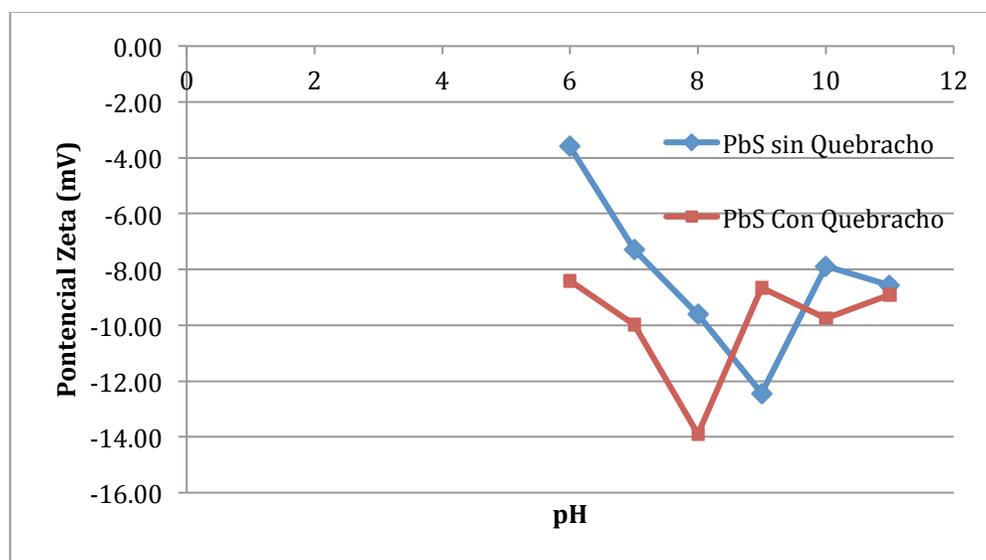


Figura 24. pH vs. potencial zeta para los sistemas de galena y galena – quebracho.

En la figura 24 se muestran los resultados obtenidos de pH contra potencial zeta para los sistemas de galena y galena – quebracho; ambos sistemas presentan una tendencia similar, sin embargo, el sistema galena – quebracho presentó valores más negativos. Estos valores favorecen ligeramente el carácter hidrofóbico de la galena proporcionando a ésta propiedades de aun baja flotabilidad. Los valores de

pH a los que se presentaron estas propiedades son de 7 a valores cercanos al 9. Al ajustar el pH más cercano al 9 la galena mostró menos estabilidad del coloide y por tanto depresión en presencia del quebracho.

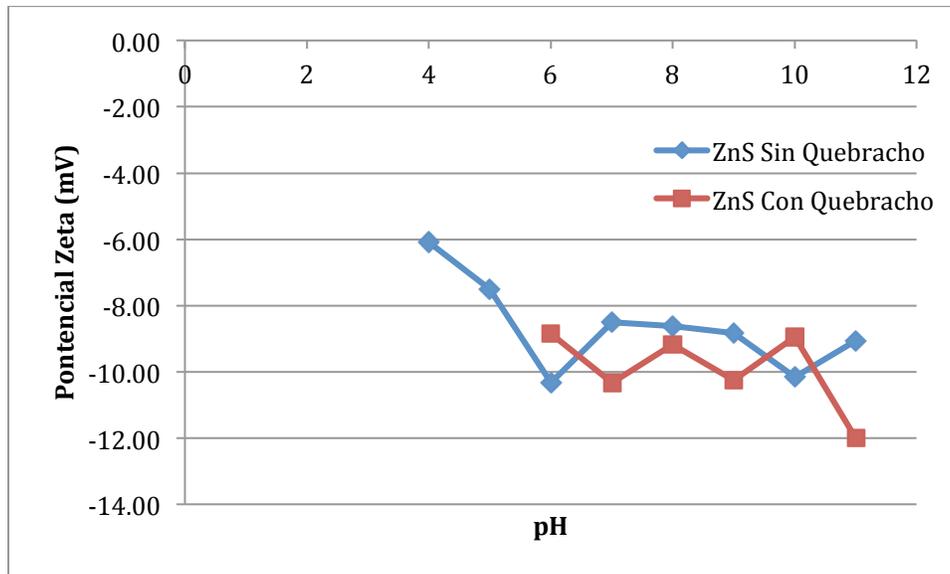


Figura 25. pH vs. potencial zeta para los sistemas de esfalerita y esfalerita – quebracho.

En la figura 25 se muestran los resultados obtenidos de pH contra potencial zeta para los sistemas de esfalerita y esfalerita – quebracho; en este caso la tendencia de la esfalerita en presencia del quebracho varía de el sistema con esfalerita, según esta figura las propiedades hidrofóbicas se presentaron a pH 7 - 9 y 11, mientras que las propiedades hidrofílicas se presentaron a pH 6 y 10.

### 5.2.2 Efecto del colector en los minerales galena y esfalerita

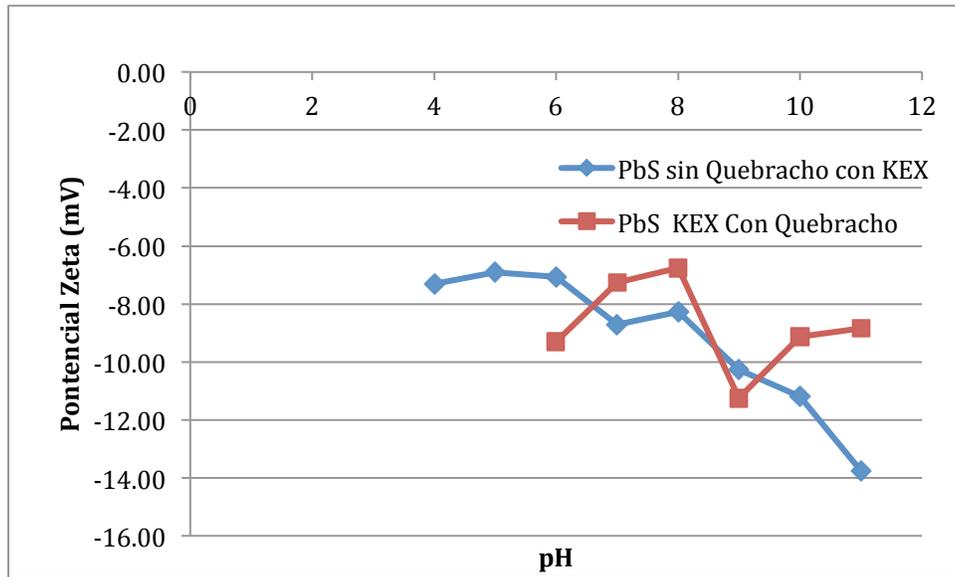


Figura 26. pH vs. potencial zeta para los sistemas de galena – xantato etílico de potasio (XEK) y galena – xantato etílico de potasio (XEK) – quebracho.

De acuerdo a los potenciales zeta medidos durante la experimentación se obtiene que al agregar el colector xantato etílico de potasio se alteró el comportamiento del mineral PbS, como se muestra en la figura 26 el potencial zeta decayó al aumentar el pH. En el caso en que se agregó colector y depresor a valores de pH 6 a 8 y 10 a 11 el efecto del quebracho se hizo presente incrementando el valor del potencial zeta provocando así la depresión de la galena. Se puede mencionar que al valor de pH 9 la galena es flotable ya que no se favorece la adsorción del quebracho.

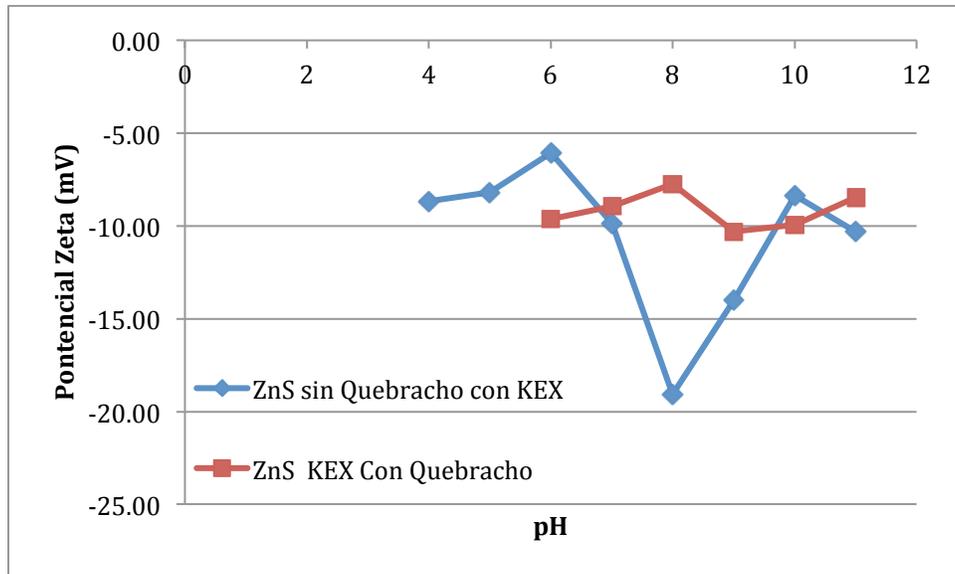


Figura 27. pH vs. potencial zeta para los sistemas de esfalerita – xantato etílico de potasio (XEK) y esfalerita – XEK – quebracho.

En la figura 27 se puede observar que el colector actuó en la esfalerita en el intervalo de pH de 7 a 10, el mayor efecto fue obtenido en pH 8. Al agregar el quebracho con el colector, el efecto del modificador fue ligeramente más fuerte que el del colector, aún así los potenciales obtenidos son muy similares para todo el intervalo de pH, se puede decir que a pH 10 se favorece la flotación de esfalerita en presencia del colector XEK y modificador quebracho.

Finalmente con los resultados obtenidos de esta segunda etapa se determinaron las condiciones de pH para realizar la flotación selectiva de galena y esfalerita en presencia de quebracho y colector (XEK).

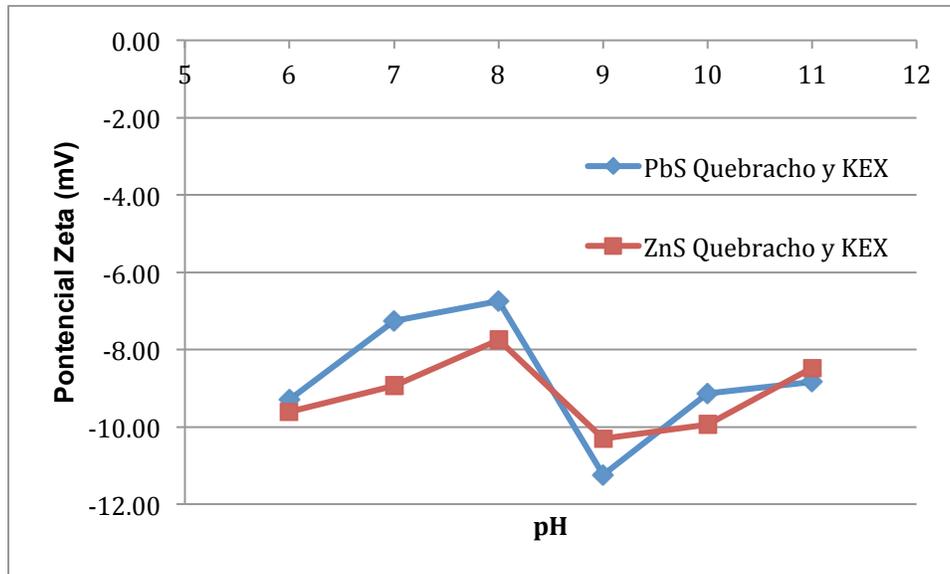


Figura 28. pH vs. potencial zeta para los sistemas de galena – xantato etílico de potasio – quebracho y esfalerita – xantato etílico de potasio – quebracho.

En la figura 28 los valores de potencial zeta obtenidos indican que es posible realizar una adecuada flotación selectiva, por ejemplo a pH 9 se favorecerá la flotación de galena, mientras que a pH 10 se favorecerá la flotación de esfalerita.

De acuerdo con los estudios de potencial zeta realizados se seleccionaron valores de pH para realizar las pruebas de flotación selectiva galena – esfalerita.

### 5.3 Preparación de mineral

Las muestras de mineral provenientes de la mina Velardeña fueron obtenidas de productos de molienda, el análisis granulométrico (figura 29) muestra que el mineral presenta una distribución de tamaños de partículas de -425 a +45  $\mu\text{m}$  principalmente (tabla 13 y anexo).

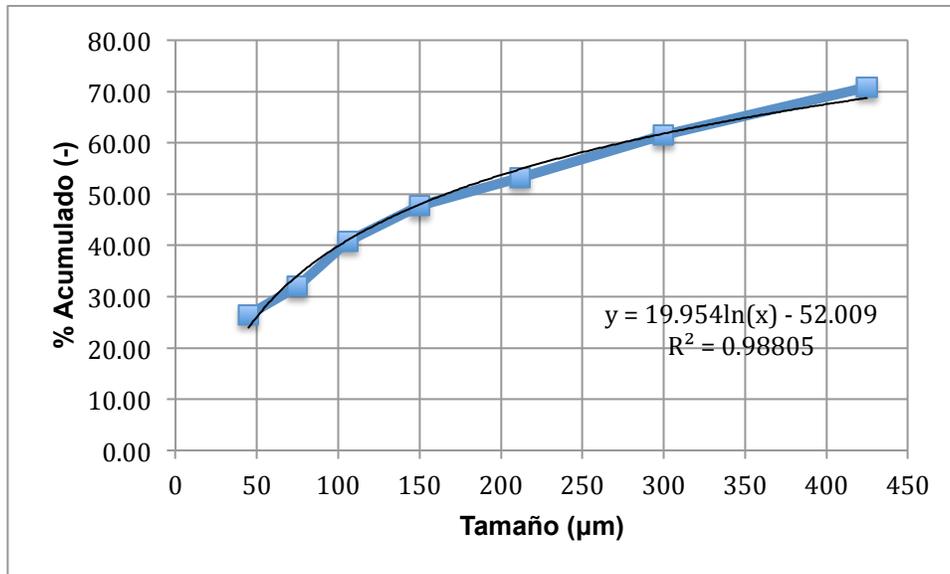


Figura 29. Análisis granulométrico del mineral de Velardeña.

A estos tamaños de partículas se analizó el tamaño de liberación de los minerales, el gráfico correspondiente se muestra a continuación en la figura 30, el tamaño de liberación de estos minerales fue de 75 µm.

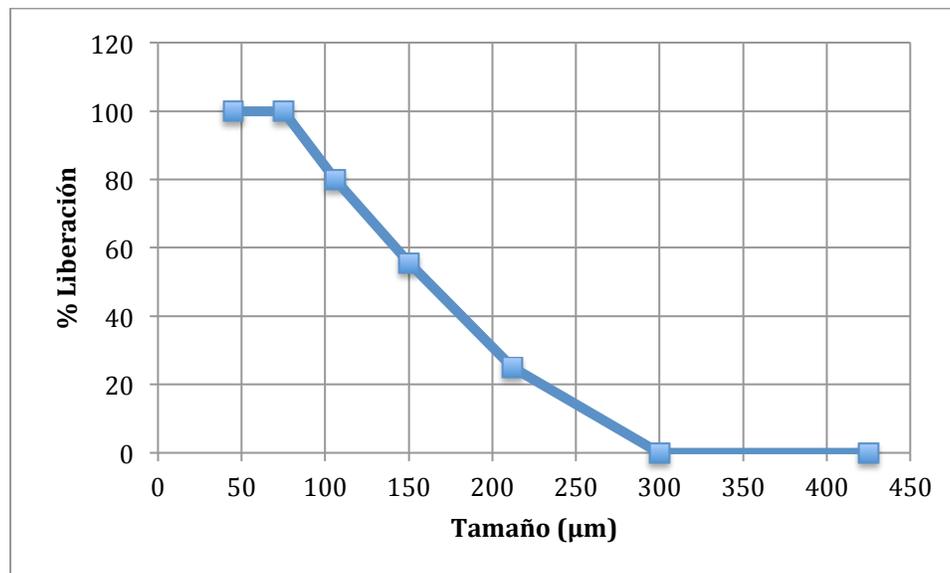


Figura 30. Determinación del tamaño de liberación del mineral Velardeña

## 5.4 Pruebas de flotación selectiva

Para esta etapa se efectuaron 12 pruebas de flotación selectiva, las condiciones se muestran en la tabla 4. El circuito de flotación se representa en la figura 17, conformado por un circuito primario de plomo, y posteriormente el circuito primario de zinc, ambos circuitos realizados en una celda con volumen de 1100 mL de agua y 20% de sólidos en peso, con el objeto de corroborar el efecto depresor del quebracho y su capacidad para separar los minerales de interés.

Para comparar la efectividad de las diferentes pruebas se efectuaron balances metalúrgicos, los cuales se muestran en los anexos (ver tablas 15 - 26). En estas tablas se resalta en un tono rojizo el porcentaje ley de ambos sulfuros (esfalerita y galena) y el porcentaje de recuperación de los mismos en los concentrados correspondientes. Las pruebas que mostraron mayores porcentajes tanto de ley como de recuperación en los concentrados fueron aquellas en las que la flotación selectiva fue exitosa. De estas 12 pruebas realizadas las mejores condiciones se encontraron en las pruebas 7 y 10.

### 5.4.1 Efecto de la concentración del colector en flotación selectiva de PbS – ZnS

El efecto del colector (XEK) se determinó mediante pruebas en la celda primaria de plomo, las condiciones son las correspondientes a las pruebas 1 y 7 (mostradas en la tabla 4) a las que se agregaron dos concentraciones de este xantato,  $1.5 \times 10^{-3}$  M y  $1.5 \times 10^{-4}$  M.

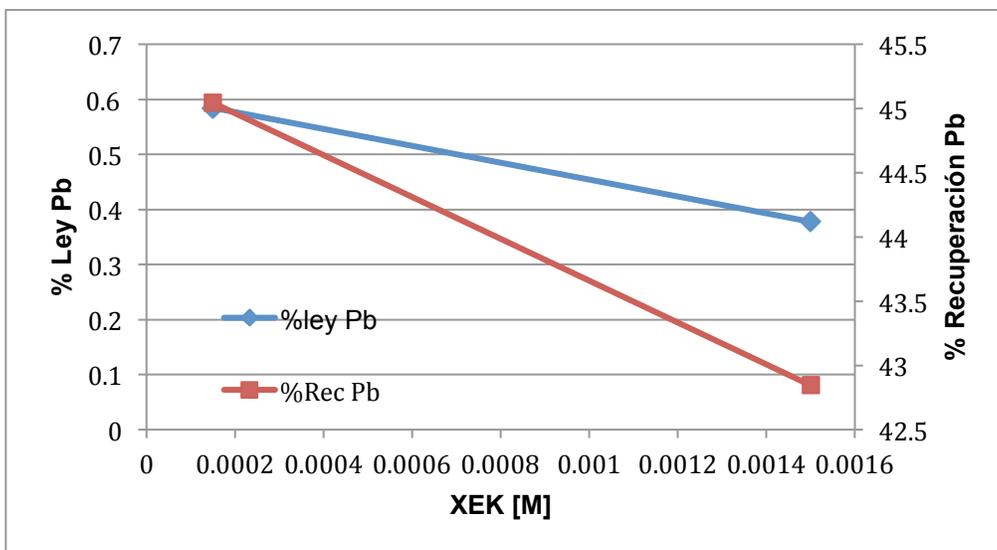


Figura 31. Efecto de la concentración del xantato etílico de potasio en el concentrado de plomo en la celda primaria de plomo a pH 9

En la figura 31 se muestra que el concentrado de plomo se ve afectado por la concentración del colector, de tal forma que al aumentar la concentración del xantato etílico de potasio tanto la ley como la recuperación se verán disminuidas. Por lo tanto la concentración de  $1.5 \times 10^{-4}$  M de colector xantato etílico de potasio fue en la que se obtuvo una mejor calidad y cantidad de concentrado.

La concentración de  $1.5 \times 10^{-3}$  M es elevada considerando la concentración micelar crítica utilizada para sulfuros, una concentración a la que normalmente se obtienen buenos resultados es  $1.5 \times 10^{-4}$  M. El colector tiene un efecto muy importante en la flotación de partículas valiosas puesto que provee de hidrofobicidad a la superficie de las partículas, el xantato se agrega hasta la concentración micelar crítica (CMC) a partir de la cual mayor cantidad puede provocar que el efecto del colector y del modificador queden en competencia disminuyendo el efecto de alguno de los reactivos, teniendo como resultado menores recuperaciones o leyes.

#### 5.4.2 Efecto del pH en flotación selectiva de PbS – ZnS

Los estudios realizados en la flotación de galena y esfalerita para determinar el efecto de pH se efectuaron en ambos circuitos primarios, en los que se evalúan valores de pH 9 a 11.

Para el circuito primario de plomo las condiciones fueron las siguientes: 70 g/ton de quebracho, 2 gotas de espumante MIBC,  $1.5 \times 10^{-4}$  M de xantato etílico de potasio y los pH mencionados anteriormente.

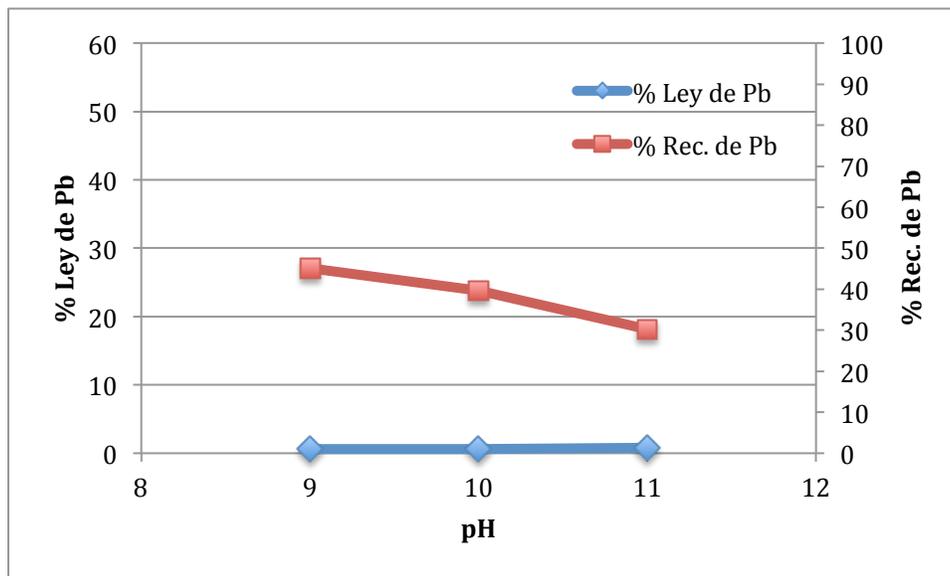


Figura 32. Efecto del pH en el plomo del concentrado primario de plomo.

Los resultados obtenidos muestran, en la figura 32, que al aumentar el pH la ley aumenta apenas de manera notoria (desde 0.58 hasta 0.79), mientras que la recuperación se ve disminuida hacia los valores de pH básicos (disminuyendo desde 45.04% hasta 30.25%). Cabe resaltar que las leyes de PbS en la alimentación a los procesos es realmente baja.

Si se observan las tablas 19, 21, 24 y 25 (ver anexo) correspondientes a las pruebas 7, 5, 10 y 11 las recuperaciones y leyes son más elevadas que en el resto de las pruebas, en todas estas pruebas la celda primaria se ajustó a pH 9, dato que coincide con el obtenido mediante mediciones de potencial zeta.

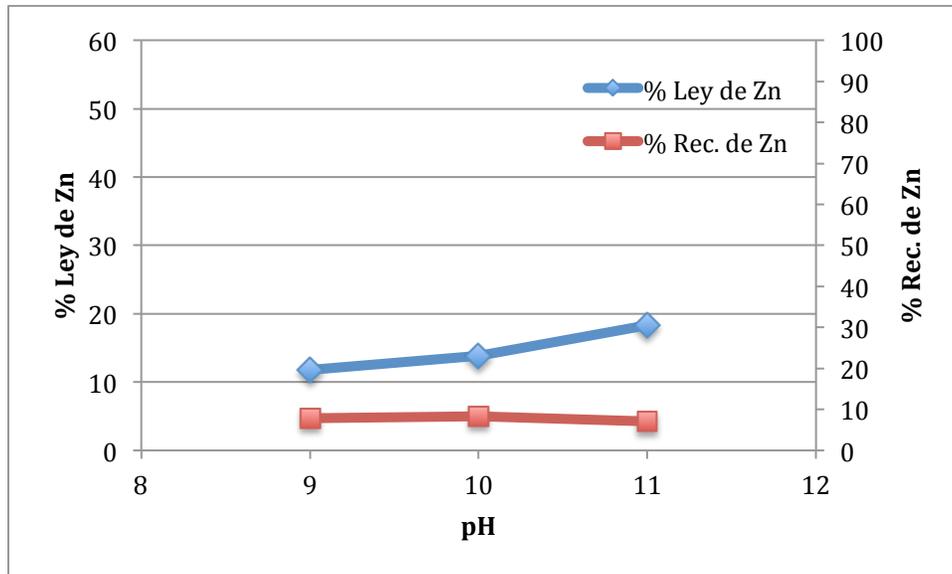


Figura 33. Efecto del pH en el zinc del concentrado primario de plomo.

En la figura 33 se presenta el efecto del pH en el zinc obtenido en el concentrado de Pb del circuito de plomo. En este caso al aumentar el pH la ley de Zn se incrementó, lo mismo sucedió en la recuperación donde aumentó hacia pH 10, haciendo a este pH poco favorable para el circuito primario de plomo en la flotación selectiva galena - esfalerita. Por tanto las mejores condiciones para el circuito primario de plomo se encontraron a pH 9.

Para el circuito primario de zinc las condiciones son  $1.5 \times 10^{-4}$  M de  $\text{CuSO}_4$ , 0.125 mL/ 1000mL de espumante y los pH de 9 a 11, de acuerdo a la experimentación descrita (tabla 4).

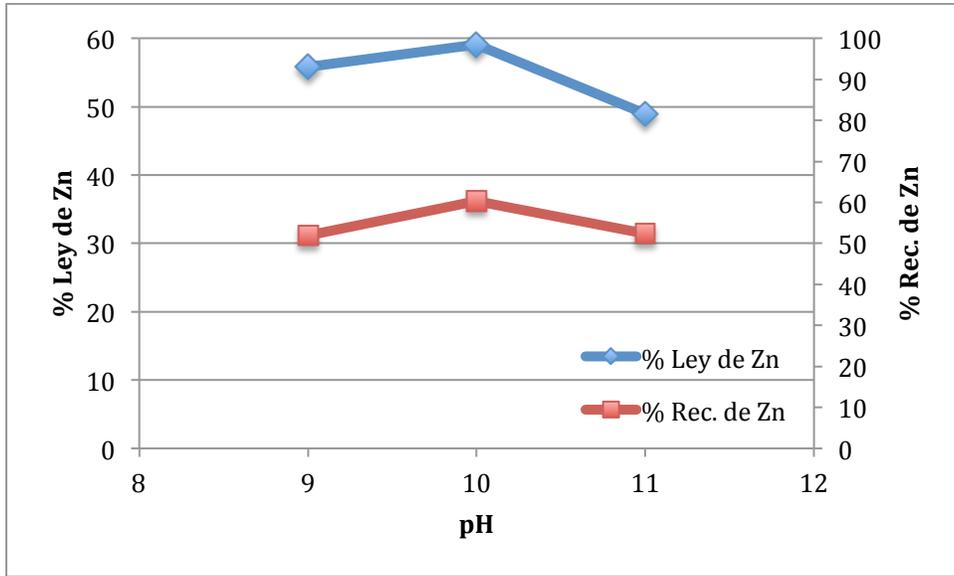


Figura 34. Efecto del pH en el zinc del concentrado primario de zinc (Etapa previa circuito primario de Pb, pH 9).

De acuerdo a los resultados presentados en la figura 34, se observó que a pH 10 se encontrarán tanto mejor ley como recuperación de Zn, 59.12 %ley de Zn y recuperación de 60.23%, mientras que a pH más ácidos o básicos tanto ley como recuperación presentan valores más reducidos.

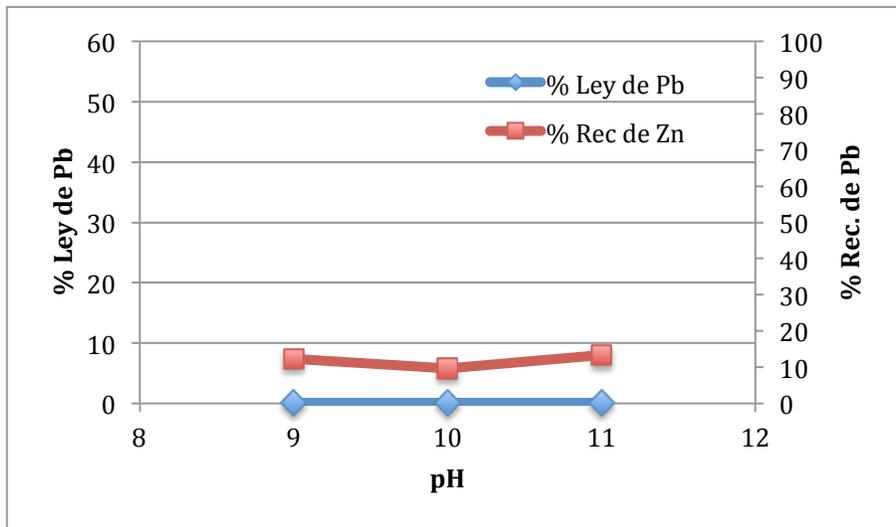


Figura 35. Efecto del pH en el plomo del concentrado primario de zinc (Etapa previa circuito primario de Pb, pH 9).

El efecto que el pH tiene con respecto al plomo en el circuito primario de zinc es inverso al de zinc, a pH 10 se obtiene una baja ley de plomo así como recuperación, esta condición cumple con el objetivo de obtener un concentrado primario de zinc con altas leyes y recuperaciones, así como baja ley y recuperación de plomo (0.08 % ley y 9.59% de recuperación de Pb).

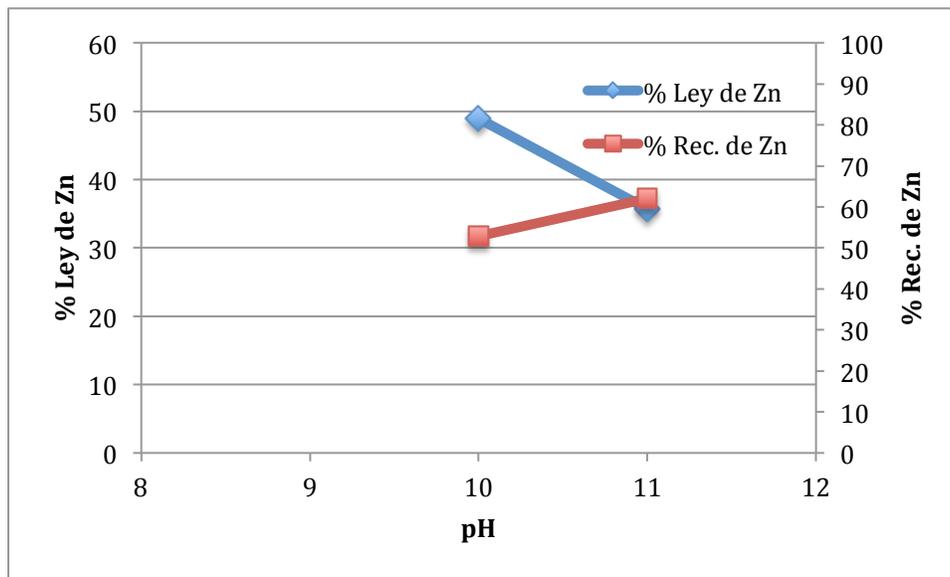


Figura 36. Efecto del pH en el zinc del concentrado primario de zinc (Etapa previa circuito primario de Pb, pH 10).

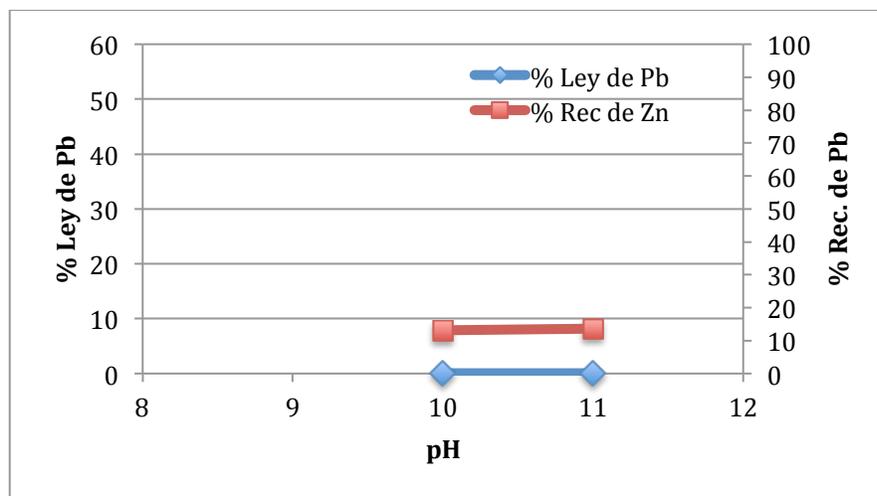


Figura 37. Efecto del pH en el plomo del concentrado primario de zinc (Etapa previa circuito primario de Pb, pH 10).

De la figura 36 se observa que al aumentar el pH en el concentrado primario de zinc, la ley de zinc disminuyó de 48.94 % a 35.67 %, mientras que la recuperación aumentó de 52.78% a 62.04%. Al comparar estos resultados con los obtenidos en las pruebas de potencial zeta, se puede justificar la disminución en el porcentaje de ley al obtenerse un concentrado con mayor cantidad de plomo dado que tanto la galena como la esfalerita presentan un potencial zeta similar a pH 11, por el contrario el porcentaje de recuperación podría aparentar ser mayor dado que se recolecta mayor cantidad de mineral de menor calidad.

Como se puede observar de la figura 37 el plomo aparece con bajas leyes y recuperaciones para este circuito de Zn. Hay que considerar que para la prueba realizada a pH 11 se obtuvo mayor recuperación a la encontrada en otras pruebas, pero la ley correspondiente no supera otros valores, por tanto esta prueba no es considerada como una de las mejores.

Igualmente en este circuito a pH 10, posterior a la flotación de circuito primario de plomo a pH 10, la calidad y cantidad del concentrado es menor que la obtenida en un circuito posterior a un circuito primario de plomo a pH 9.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo las condiciones favorables para la flotación selectiva de galena – esfalerita se encontraron en las pruebas 7 y 10, prueba 7 con ambos circuitos primarios a pH 9, y prueba 10 con circuito primario de Pb a pH 9 y circuito primario de Zn a pH 10. Cabe mencionar que para un circuito primario la recuperación es importante aunque esto represente una menor ley; al utilizar un pH de 9 en el circuito de Zn la recuperación de éste se ve disminuida en comparación a la obtenida a un pH 10, de 60.23% a 51.94% recuperación de Zn. Comparando la recuperación de plomo en las pruebas 7 y 10, ambas a pH 9, se observó que la prueba 7 presentó mayor recuperación y menor ley, mientras que se obtuvo mayor ley en la prueba 10 y ligeramente menor recuperación. Referente a los relaves se observó que tanto para plomo como para zinc las leyes son bajas.

Siendo entonces las mejores condiciones las obtenidas en la prueba 10 coincidiendo así con los resultados obtenidos a través de la técnica de potencial zeta.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la prueba 10 (tabla 4), cuando se trabaja una celda primaria de plomo con los reactivos quebracho (modificador, 70 g/ton) y xantato etílico de potasio (colector,  $1.5 \times 10^{-4}$  M) a pH 9 se obtiene un concentrado de plomo con un recuperación de 31.31 % y una ley de 0.78%, y una celda primaria de zinc a pH 10 de la que se obtiene un concentrado de zinc con una recuperación de 59.12% con una ley de 60.23%; los estériles presentan una ley de 0.05% para plomo y 2.48 para zinc.

## Capítulo 6 Conclusiones

---

A partir del estudio de potencial zeta se muestra que el quebracho es un reactivo modificador, proporcionando propiedades hidrofílicas a la esfalerita.

Con base en las pruebas efectuadas por potencial zeta se ha encontrado que al combinarse el reactivo quebracho (Floatán T5) con el colector (xantato etílico de potasio) se puede flotar galena a pH 9; para esta mezcla de colector – modificador se hace posible la flotación de esfalerita a pH 10.

La mejor concentración de colector (xantato etílico de potasio) para trabajar un circuito de flotación primario de plomo es de  $1.5 \times 10^{-4}$  M dado que se obtienen mejores leyes y recuperaciones que a concentraciones mayores.

De acuerdo a las pruebas de flotación realizadas en el circuito primario de plomo durante este estudio las mejores condiciones se encontraron a pH 9, con una recuperación de 31.31% y una ley de 0.78 % de plomo, cabe recordar que la cantidad de galena en la alimentación es baja.

La tendencia al aumentar el pH en el circuito primario de zinc es aumentar tanto ley como recuperación hasta pH 10, a pH más básicos ambas disminuyen, por tanto las mejores condiciones para la flotación primaria de zinc son a pH 10 con una recuperación del 60.23% y una ley de 59.12%.

Para llevar a cabo la flotación selectiva Pb –Zn se estableció un circuito primario de flotación de plomo utilizando como reactivo depresor de zinc al quebracho (Floatán T5) en una concentración de 70 g/ton, como reactivo colector de plomo xantato etílico de potasio (XEK)  $1.5 \times 10^{-4}$ M, 0.25 mL/ 1000mL de espumante MIBC, pH 9, 5 minutos de acondicionamiento de reactivos, 1300 RPM y 5 minutos de flotación, con los que se obtuvo una recuperación del 31.31% y una ley de 0.78% Pb.

El circuito primario para la flotación selectiva de zinc se estableció utilizando  $1.5 \times 10^{-4}$  M de sulfato de cobre como reactivo activador de Zn, 0.125 mL/ 1000mL de espumante MIBC, pH 10, 5 minutos de acondicionamiento de reactivos, 1300 RPM

y 5 minutos de flotación, con los que se obtuvo una recuperación de 60.23% y una ley de 59.12%.

Es factible flotar selectivamente un mineral complejo de sulfuros de plomo y zinc a través del uso del reactivo natural biodegradable, quebracho (Floatán T5) que actúa como reactivo depresor de zinc, asistido por el colector XEK.

El quebracho representa una opción en la sustitución de  $CN^-$  como reactivo depresor para la flotación selectiva, este reactivo ofrece la ventaja de disminuir el impacto ambiental dado que no es tóxico, es biodegradable, y no causa daños severos en la naturaleza.

## Capítulo 7 Bibliografía

---

1. Albesa, A. G. 2011. *Adsorción de gases en nanoestructuras de carbón* (Tesis Doctoral) [ONLINE] Universidad de Plata, Facultad de Ciencias Exactas, Departamento de Química. Disponible en: [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/21908/Documento\\_completo.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/21908/Documento_completo.pdf?sequence=1) [Obtenido el 01 de diciembre de 14].
2. Cámara Minera de México. 2013, febrero. *Mitos y realidades sobre el cianuro de sodio*. [ONLINE] En México País Minero. Minería Responsable. Disponible en: <https://www.camimex.org.mx/files/1813/6387/8519/Suplemento.pdf>. [Obtenido el 05 de agosto de 14]
3. Cámara Minera de México. 2014. *Situación de la minería mexicana en 2013*. [ONLINE] Disponible en: [https://www.camimex.org.mx/files/9714/0544/1072/situacion\\_de\\_la\\_mineria.pdf](https://www.camimex.org.mx/files/9714/0544/1072/situacion_de_la_mineria.pdf) . [Obtenido el 05 de agosto de 14]
4. Distribuidora de Químicos Industriales S. A. 2011. *Ficha técnica. Espumante Aerofroth*. [ONLINE] Disponible en: <http://69.167.133.98/~dqisaco/pdf/ESPUMANTE%20AEROFROTH%2065.pdf> . [obtenido el 01 de diciembre de 14]
5. Gidi, A. D. 2010, junio. *Mitos y realidades: todo lo que usted desea saber sobre el cianuro*. [ONLINE] En México Minero: Minería Industria Verde por Cámara Minera de México. p. 10 -12. Disponible en: <https://www.camimex.org.mx/files/4313/5412/9678/suplemento5.pdf> . [Obtenido el 05 de agosto de 14]
6. Glass, N. n. d. *Flotación, conceptos básicos*. [ONLINE] Disponible en: [http://www.academia.edu/4845215/02\\_Flotacion.-Conceptos\\_Basicos](http://www.academia.edu/4845215/02_Flotacion.-Conceptos_Basicos) . [Obtenido el 05 de agosto de 14].
7. *Manual general de minería y metalurgia*. 2006. 1ª ed. Chile: Sociedad Nacional de Minería Chile.
8. *Manual de minería*. n. d. 1ª ed. [ebook] Lima, Perú: Estudios Mineros del Perú S. A. C., p. 135 – 182. Disponible en: [http://ingenierosdeminas.org/biblioteca\\_digital/libros/Manual\\_Mineria.pdf](http://ingenierosdeminas.org/biblioteca_digital/libros/Manual_Mineria.pdf) . [obtenido el 7 de enero de 14].

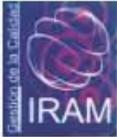
9. Mantilla, C., Pedraza, J., La Verde, D. 2007. *Utilización de estudios de potencial zeta en el desarrollo de un proceso alternativo de flotación de mineral feldespático*. En Dyna Estudio Experimental [ONLINE] Año 75, No. 154, p. 65 – 71. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/13988/1/1715-7651-1-PB.pdf> . [Obtenido el 03 de febrero de 14].
10. Oxiquim S. A. 2007. *Hoja de datos de seguridad de productos: Metil Isobutil Carbinol (MIBC)*. [ONLINE] Disponible en: [http://www.asiquim.com/ConductaResponsable/documentos/Metil\\_Isobutil\\_Carbinol.PDF](http://www.asiquim.com/ConductaResponsable/documentos/Metil_Isobutil_Carbinol.PDF) . [Obtenido el 08 de diciembre de 14].
11. Proaño, M. A. 2013. *Aplicación de la cascarilla de palma africana como aditivo para lodos de perforación en el control de filtrado y viscosidad en un pozo petrolero* (Tesis de Grado). Escuela Superior Politécnica del Litoral [ONLINE]. p. 6. Disponible en: [http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D\\_Tesis\\_PDF/D-95596.pdf](http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D_Tesis_PDF/D-95596.pdf) . [Obtenido el 08 de diciembre de 14].
12. Rabone, P. 1975. 4ª ed. *Concentración de minerales por flotación*. México: Comisión de Fomento Minero.
13. Sandoval, L., Montellano, L., Piña, M., Sánchez, L. O. n. d. *Potencial zeta como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen del lodo a disponer*. [ONLINE]. p. 1 – 8. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicona/R-0150.pdf>. [Obtenido el 06 de enero de 14].
14. Sarquís, P. E., Ciribeni, V., González, M. 2006. *Efecto depresor de reactivos orgánicos sobre los componentes de un mineral de fluorita*. En CONAMET/SAM – 2006 Sexto Congreso de Metalurgia. Santiago de Chile, 1 de diciembre de 2006 p. 6. Argentina: Instituto de Investigaciones Mineras – UNSJ.
15. Secretaría de Economía. n. d. *Minería*. [ONLINE] Disponible en: <http://www.economia.gob.mx/comunidad-negocios/mineria>. [Obtenida el 15 de enero de 14].
16. Secretaría de Economía, Coordinación General de Minería. 2013. *Anuario estadístico de la minería mexicana 2012*. [ONLINE] Disponible en: [http://www.economia.gob.mx/files/comunidad\\_negocios/industria\\_comercio/i](http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/i)

nformacionSectorial/minero/anuario\_mineria\_mexicana\_2012\_ed2013.pdf  
[Obtenido el 05 de agosto de 14].

17. Trejo, J. V. n. d. *Fenómenos de superficie. Adsorción*. [ONLINE] Disponible en Administración de manuales y documentos de la Facultad de Química UNAM:  
[http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion\\_19664.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf)  
[obtenido el 05 de agosto de 14].
  
18. Unitán Saica. n. d. *Flotación de Minerales*. [ONLINE] Disponible en:  
<http://www.unitan.net/esp/productos/minerales.html> [Obtenido el 15 de septiembre de 14].
  
19. Wills, B. 2005. *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Amsterdam: Elsevier Science & Technology.
  
20. Zeta – Meter, Inc. n. d. *Potencial Zeta: Un curso completo en 5 minutos*. [ONLINE] Disponible en:  
[http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/PotencialZeta\\_1246.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/PotencialZeta_1246.pdf)  
[Obtenido el 05 de agosto de 14].

### 8.1 Quebracho

Tabla 7. Hoja de seguridad para el uso de quebracho Floatán T5

 RI - 9000 - 560 Sistema de Gestión de la Calidad IRAM - ISO 900: 2000		<b>UNITAN S.A.I.C.A</b>
<b>INFORMACION SOBRE SEGURIDAD DEL PRODUCTO</b>		
<b>FLOATAN T5</b>		
		<b>MSDS7.2-125</b> <b>Rev: C</b> <b>Fecha: 04/08/10</b>

**1 IDENTIFICACION DE PRODUCTO Y DEL FABRICANTE**

Nombre Comercial: **FLOATAN T5**  
Tipo y uso del Producto: Extracto vegetal de Quebracho.  
Fabricante: Unitan SAICA- Av. Paseo Colón 221 P 10° C1063ACC- Buenos Aires - República Argentina  
TEL. (54-11) 4331-5540/47 - FAX: (54-11) 4331-5548/49  
E-mail: alm@unitan.net / Website: www.unitan.net

**2 COMPOSICION / INFORMACION SOBRE INGREDIENTES:**

Mezcla compleja de Polifenoles.  
Atomizado seco de extracto de madera de Quebracho Colorado (*Schinopsis balansae* / *lorentzii*),

**3 IDENTIFICACION DE PELIGROSIDAD:**

**Inhalación:** Polvo con acción astringente. Puede causar tos y estornudo con dificultades respiratorias a altas concentraciones.  
**Ingestión:** Dependiendo de la dosis, puede causar molestias gastrointestinales de acuerdo a su acción astringente.  
**Contacto con Piel:** Si el contacto es prolongado puede causar leve irritación.  
**Contacto con ojos:** Puede causar enrojecimiento y lagrimeo.

**4 MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS:**

**Inhalación:**  
Tomar aire fresco. Solicitar atención médica si existiese dificultad respiratoria.  
**Ingestión:**  
Conveniencia de requerir la asistencia médica.  
**Contacto con piel:**  
Lave la piel con abundante agua.  
**Contacto con ojos:**  
Enjuagar los ojos con abundante agua, realizando movimientos de párpados. Realizar una consulta médica.

# UNITAN S.A.I.C.A.

## INFORMACION SOBRE SEGURIDAD DEL PRODUCTO

### FLOATAN T5

MSDS7.2-125

Rev: C

Fecha: 04/08/10

#### 5 MEDIDAS CONTRA INCENDIOS:

Normalmente no es inflamable, pero en condiciones extremas de calor (>170° C), puede descomponerse.

**Explosión:**

Polvo fino dispersado en el aire en concentraciones suficientes, y la presencia de una fuente de ignición son condiciones suficientes para un peligro potencial de explosión por polvo.

**Medios de extinción:**

Agua, dióxido de Carbono, espuma y polvo químico.

**Información especial:**

En el evento de un incendio, usar equipos de protección adecuados y respiradores con protección facial completa, de acuerdo a normas NIOSH.

#### 6 MEDIDAS EN CASO DE ACCIDENTE:

**Medidas de protección personal:** Usar los elementos de protección personal especificados en el punto 8.

**Métodos de limpieza:**

Limpiar el derrame de manera tal de no dispersar polvo en el aire. No usar herramientas generadoras de chispas. Reducir el polvo dispersado en el aire humedeciendo con agua.

Recoja el derrame para recuperación o disponga del mismo en un contenedor cerrado.

#### 7 MANIPULACION y ALMACENAMIENTO:

Almacenar en un recinto cerrado, en lugar fresco, seco y ventilado. Proteger de daño físico del packaging empleando prácticas de manipuleo adecuadas. Evitar formación de polvo.

#### 8 PROTECCION PERSONAL:

**Limite de exposición en el aire:** No establecido

**Sistema de ventilación:** Se recomienda un sistema general o local para mantener la exposición de operadores tan baja como sea posible. Se prefiere ventilación local porque se puede controlar la emisión de contaminantes como sus fuentes, previniendo la dispersión en las áreas fabriles.

**Respirador Personal (Aprobado por NIOSH):** Para condiciones de uso en las cuales la exposición al polvo es evidente y no se aplican controles factibles de ingeniería, un respirador NIOSH, tipo N 95 puede usarse.

**Protección De piel:** Usar guantes y ropa adecuada.

**Protección de ojos:** Usar anteojos de seguridad. Equipar los sectores de trabajo con lava ojos.

# UNITAN S.A.I.C.A.

## INFORMACION SOBRE SEGURIDAD DEL PRODUCTO

### FLOATAN T5

MSDS7.2-125

Rev: C

Fecha: 04/08/10

#### 9 PROPIEDADES FISICAS y QUIMICAS:

Estado Físico:	Polvo
Color:	Marrón Rojizo
Olor:	Olor agradable característico
Punto de Ebullición:	Descompone a 170 °C
pH:	En solución al 0,6 % es de 6.5- 6.8

#### 10 ESTABILIDAD y REACTIVIDAD:

Estabilidad: Estable en condiciones normales de uso y almacenamiento.

Productos peligrosos de descomposición: Cuando se calienta para descomposición puede liberarse dióxido de carbono y monóxido de carbono.

Incompatibilidades: Evitar el contacto con agentes oxidantes fuertes y Formaldehído.

#### 11 INFORMACION TOXICOLOGICA:

No se reporta que el material produzca efectos crónicos sobre la salud.

#### 12 INFORMACION ECOLOGICA:

El material en su forma de abastecimiento, es un producto vegetal natural, que consiste principalmente en un tanino condensado soluble en agua.

Monitorear los parámetros de vuelco antes de realizar cualquier operación de disposición al medio.

#### 13 CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA DISPOSICION:

Los residuos deben recuperarse o reciclarse y almacenarse en depósitos autorizados de acuerdo a la legislación local vigente.

Cualquier disposición final deberá realizarse de acuerdo a las disposiciones legales vigentes.

#### 14 INFORMACION DE TRANSPORTE:

No está listada como una sustancia o solución peligrosa para el transporte y no figura dentro de ninguna clasificación pertinente de esa lista.

#### 15 INFORMACION REGLAMENTARIA:

Para países europeos, la Legislación Nacional será armonizada en pos de adecuarse a las directivas de la Comunidad Europea.

# UNITAN S.A.I.C.A.

## INFORMACION SOBRE SEGURIDAD DEL PRODUCTO

### FLOATAN T5

MSDS7.2-125

Rev: C

Fecha: 04/08/10

#### 16 OTRA INFORMACIÓN:

La información facilitada se considera correcta y confiable, pero se presenta sin garantía o responsabilidad por parte de Unitán S.A.I.C.A de su aplicación y consecuencias de la misma, por parte del usuario.

#### 17 REGISTRO DE REVISIONES:

Rev.	Fecha	Modificaciones
A	17/02/01	Primera edición.
B	16/08/07	Revisión General del documento.
C	04/08/10	Revisión General del Documento

MSDS72.125. DOC

## 8.2 Caracterización del mineral

### 8.2.1 Difracción de Rayos X

Tabla 8. Tarjeta patrón para la identificación de galena por su espectro de difracción

Pattern : 00-001-0880		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
PbS		<b>2<math>\theta</math></b>	<b>i</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
Lead Sulfide Galena		25.956	80	1	1	1
		30.064	100	2	0	0
		43.254	60	2	2	0
		50.978	32	3	1	1
		53.547	16	2	2	2
		62.728	8	4	0	0
		68.999	8	3	3	1
		70.785	16	4	2	0
		79.079	8	4	2	2
		85.017	8	5	1	1
		94.381	4	4	4	0
		100.761	4	5	3	1
<b>Latice</b> : Face-centered cubic		<b>Mol. weight</b> = 239.26				
<b>S.G.</b> : Fm-3m (225)		<b>Volume [CD]</b> = 208.53				
<b>a</b> = 5.93000		<b>Dx</b> = 7.621				
	<b>Z</b> = 4	<b>Dm</b> = 7.580				
Color: Lead gray. Deleted Or Rejected By: Deleted by NBS. Melting Point: 1383 K. Data collection flag: Ambient.						
Hanawalt et al., Anal. Chem., volume 10, page 475 (1938) Dana's System of Mineralogy, 7th Ed.						
<b>Radiation</b> : MoK $\alpha$ 1		<b>Filter</b> : Beta				
<b>Lambda</b> : 0.70930		<b>d-sp</b> : Not given				
<b>SS/FOM</b> : F12= 23(0.0453,12)						

Tabla 9. Tarjeta patrón para la identificación de esfalerita por su espectro de difracción

Pattern : 00-001-0792		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
<p>ZnS</p> <p>Zinc Sulfide</p> <p><i>Also called:</i> β-Zn S, Sphalerite</p>		<p><b>2th</b></p> <p>28.587</p> <p>33.280</p> <p>47.569</p> <p>56.403</p> <p>69.583</p> <p>76.809</p> <p>79.079</p> <p>88.898</p> <p>95.577</p> <p>106.719</p> <p>115.662</p>	<p><b>i</b></p> <p>100</p> <p>5</p> <p>75</p> <p>50</p> <p>5</p> <p>18</p> <p>3</p> <p>15</p> <p>5</p> <p>3</p> <p>4</p>	<p><b>h</b></p> <p>1</p> <p>2</p> <p>2</p> <p>3</p> <p>4</p> <p>3</p> <p>4</p> <p>2</p> <p>5</p> <p>4</p> <p>5</p>	<p><b>k</b></p> <p>1</p> <p>0</p> <p>2</p> <p>1</p> <p>0</p> <p>3</p> <p>2</p> <p>2</p> <p>1</p> <p>4</p> <p>3</p>	<p><b>l</b></p> <p>1</p> <p>0</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>0</p> <p>2</p> <p>1</p> <p>0</p> <p>1</p>
<p><b>Lattice :</b> Face-centered cubic</p> <p><b>S.G. :</b> F-43m (216)</p> <p><b>a =</b> 5.40000</p> <p><b>Z =</b> 4</p>		<p><b>Mol. weight =</b> 97.44</p> <p><b>Volume [CD] =</b> 157.46</p> <p><b>Dx =</b> 4.110</p> <p><b>Dm =</b> 4.000</p>				
<p>Color: Colorless to black. Deleted Or Rejected By: Deleted by NBS. Data collection flag: Ambient.</p>						
<p>Hanawalt. et al., Anal. Chem., volume 10, page 475 (1938) Dana's System of Mineralogy, 7th Ed.</p>						
<p><b>Radiation :</b> MoKα1</p> <p><b>Lambda :</b> 0.70930</p> <p><b>SS/FOM :</b> F11= 14(0.0666,12)</p>		<p><b>Filter :</b> Beta</p> <p><b>d-sp :</b> Not given</p>				

Tabla 10. Tarjeta patrón para la identificación de piritita por su espectro de difracción

Pattern : 00-001-1295		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
<p>FeS<sub>2</sub></p> <p>Iron Sulfide Pyrite</p>		<p><b>2th</b></p> <p>28.587 33.153 37.121 40.797 47.569 56.403 59.179 61.799 64.179 76.809 79.079 81.505 84.107 87.889 95.577 99.401 102.170 106.719 117.716 122.170 127.196</p>	<p><b>i</b></p> <p>27 75 45 35 45 100 15 17 25 10 15 10 5 12 25 3 2 10 3 2 2</p>	<p><b>h</b></p> <p>1 2 2 2 2 3 2 2 3 4 4 4 3 4 5 4 5 4 3 6 6 6</p>	<p><b>k</b></p> <p>1 0 1 1 2 1 2 3 2 3 2 3 3 2 1 4 3 2 4 6 1 2</p>	<p><b>l</b></p> <p>1 0 0 1 0 1 2 0 1 0 0 1 2 2 1 2 1 1 0 0 1 0</p>
<p><b>Lattice</b> : Cubic</p> <p><b>S.G.</b> : Pa-3 (205)</p> <p><b>a</b> = 5.40500</p> <p><b>Z</b> = 4</p>		<p><b>Mol. weight</b> = 119.97</p> <p><b>Volume [CD]</b> = 157.90</p> <p><b>Dx</b> = 5.046</p> <p><b>Dm</b> = 5.018</p>				
<p>Color: Pale brass yellow. Deleted Or Rejected By: Deleted by NBS card. Melting Point: 1444 K. Data collection flag: Ambient.</p>						
<p>Hanawalt, et al., Anal. Chem., volume 10, page 475 (1938) Dana's System of Mineralogy, 7th Ed.</p>						
<p><b>Radiation</b> : MoK<math>\alpha</math>1</p> <p><b>Lambda</b> : 0.70930</p> <p><b>SS/FOM</b> : F21= 8(0.0850,31)</p>		<p><b>Filter</b> : Beta</p> <p><b>d-sp</b> : Not given</p>				

## 8.2.2 Espectroscopia de absorción atómica

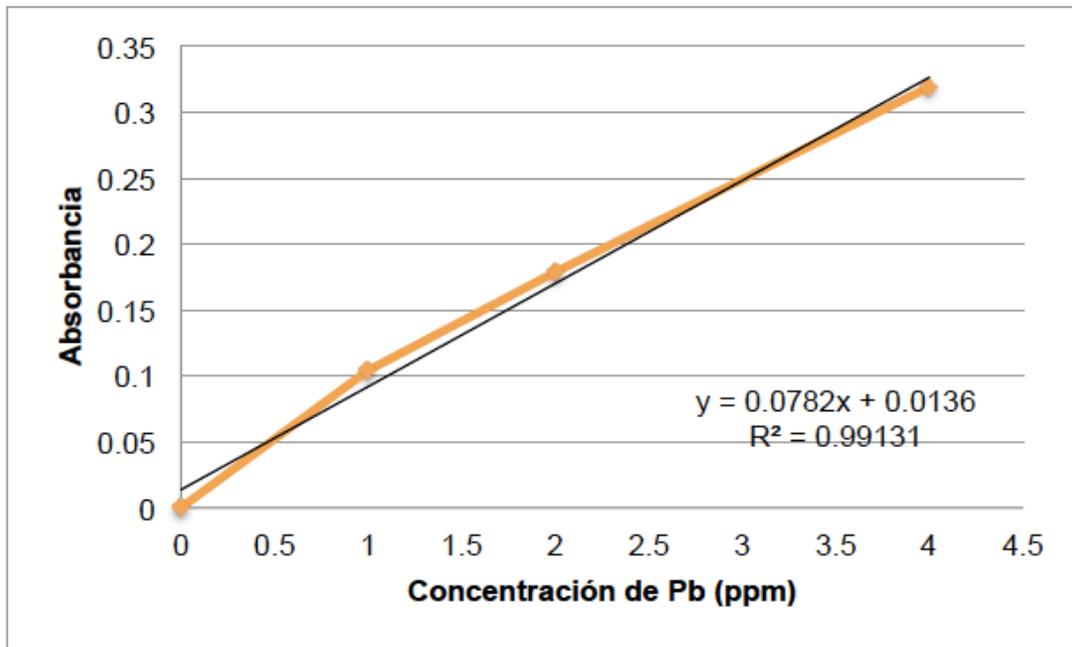


Figura 38. Curva de calibración para la determinación de plomo en los productos de flotación por espectroscopia de absorción atómica

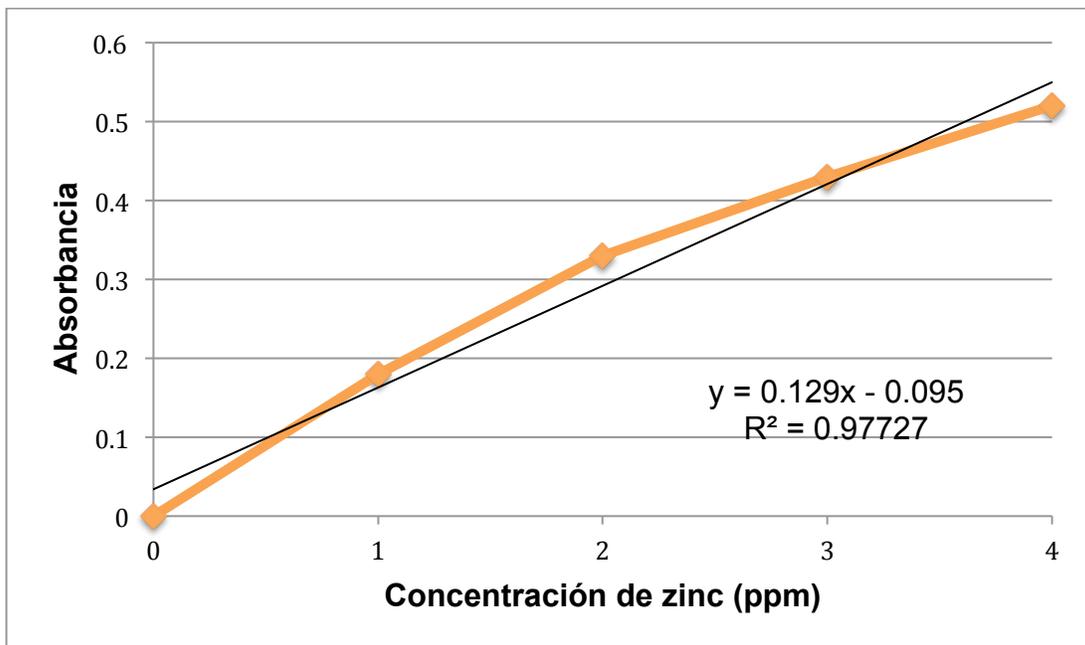


Figura 39. Curva de calibración para la determinación de zinc en los productos de flotación por espectroscopia de absorción atómica

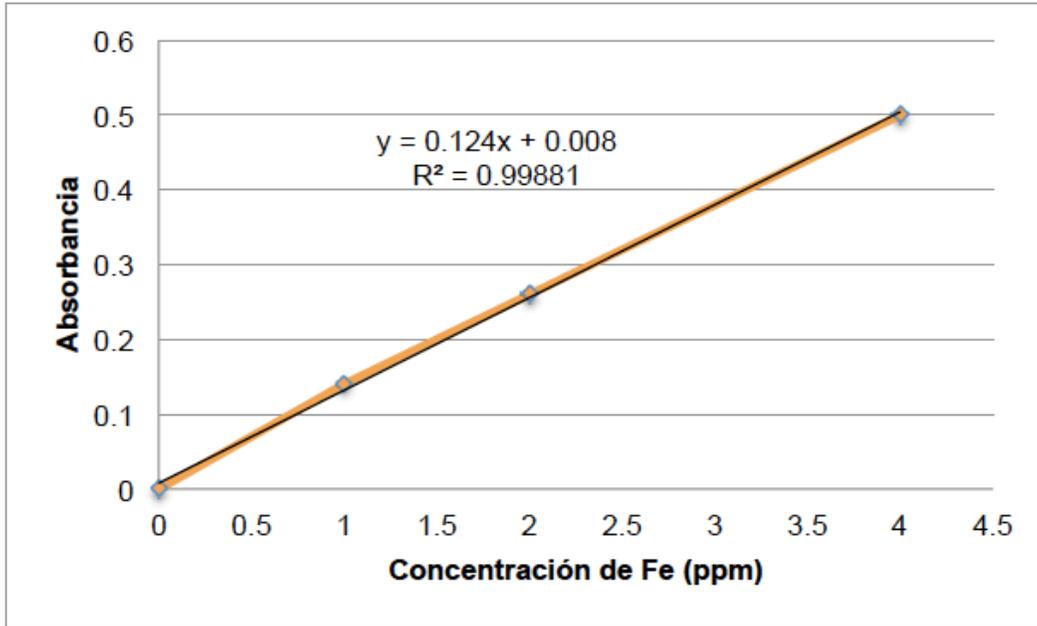


Figura 40. Curva de calibración para la determinación de pirita en los productos de flotación por espectroscopia de absorción atómica

Por medio de espectroscopia de absorción atómica se obtienen las concentraciones de las diferentes corrientes adquiridas en las pruebas de flotación selectiva. Para calcular el % ley del mineral se utiliza la siguiente fórmula:

$$\%Ley X = \frac{[X] \times 100 \times 1}{masa \times 10\ 000}$$

Dónde:

*%Ley X* → es la ley del mineral

*[X]* → es la concentración del mineral en ppm

La concentración obtenida, así como el % ley de cada corriente se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 11. Concentración y %ley de minerales PbS, ZnS y FeS<sub>2</sub> correspondientes a las corrientes obtenidas por flotación selectiva

Prueba	Corriente	Pb (ppm)	Fe (ppm)	Zn (ppm)	masa (g)	Pb (%ley)	Fe (%ley)	Zn (%ley)
1	Conc. Pb	4.2	10	10.9	0.1113	0.38	8.98	9.79
	Conc. Zn	4.3	17.9	16.6	0.1162	0.37	15.40	14.29
	Colas de Zn	0.3	10	4.3	0.1114	0.03	8.98	3.86
2	Conc. Pb	4.2	6.3	9.7	0.0969	0.43	6.50	10.01
	Conc. Zn	1.7	11.1	15.9	0.1005	0.17	11.04	15.82
	Colas de Zn	0.6	11.7	5.1	0.1180	0.05	9.92	4.32
3	Conc. Pb	6.1	6.3	9.6	0.1010	0.60	6.24	9.50
	Conc. Zn	1.3	13	22.4	0.1252	0.10	10.38	17.89
	Colas de Zn	0.4	9.2	3	0.1072	0.04	8.58	2.80
4	Conc. Pb	3.9	7.1	8.8	0.1010	0.39	7.03	8.71
	Conc. Zn	1.1	12.3	15.1	0.0989	0.11	12.44	15.27
	Colas de Zn	0.4	12	4.7	0.1192	0.03	10.07	3.94
5	Conc. Pb	4	8.4	10.8	0.1001	0.40	8.39	10.79
	Conc. Zn	0.8	5.9	13.1	0.1005	0.08	5.87	13.03
	Colas de Zn	0.4	8.8	3.2	0.1074	0.04	8.19	2.98
6	Conc. Pb	4.5	8.2	12.2	0.1005	0.45	8.16	12.14
	Conc. Zn	1.3	13.8	46.4	0.1162	0.11	11.88	39.93
	Colas de Zn	0.5	9.8	3.2	0.1026	0.05	9.55	3.12
7	Conc. Pb	6	7.9	12.1	0.1027	0.58	7.69	11.78
	Conc. Zn	0.7	9.1	57.2	0.1024	0.07	8.89	55.86
	Colas de Zn	0.3	9.9	3.2	0.1078	0.03	9.18	2.97
8	Conc. Pb	6.5	7.8	14.8	0.1070	0.61	7.29	13.83
	Conc. Zn	0.8	10.2	53.2	0.1087	0.07	9.38	48.94
	Colas de Zn	0.3	7.7	2.7	0.1014	0.03	7.59	2.66
9	Conc. Pb	8.2	7.6	18.9	0.1032	0.79	7.36	18.31
	Conc. Zn	1.5	7.8	37.8	0.1003	0.15	7.78	37.69
	Colas de Zn	0.3	7.1	2.3	0.1047	0.03	6.78	2.20
10	Conc. Pb	8.6	6.6	9.8	0.1109	0.78	5.95	8.84
	Conc. Zn	0.9	12.8	66.8	0.1130	0.08	11.33	59.12
	Colas de Zn	0.5	8.8	2.6	0.1047	0.05	8.40	2.48
11	Conc. Pb	6.8	5.9	9	0.1021	0.67	5.78	8.81
	Conc. Zn	0.6	11.2	52.5	0.1072	0.06	10.45	48.97
	Colas de Zn	0.3	10.4	3.7	0.1191	0.03	8.73	3.11
12	Conc. Pb	6.9	8.6	16.1	0.1186	0.58	7.25	13.58
	Conc. Zn	0.7	17.7	41.7	0.1169	0.06	15.14	35.67
	Colas de Zn	0.4	7.5	2.3	0.1025	0.04	7.32	2.24

### 8.3 Pruebas de Potencial Zeta

Tabla 12. Potencial zeta para minerales puros de galena y esfalerita en presencia de diferentes reactivos.

PbS	pH	Potencial (mV) sin quebracho	Potencial (mV) con quebracho	ZnS	pH	Potencial (mV) sin quebracho	Potencial (mV) con quebracho
	6	-3.61	-8.40		6	-10.32	-8.86
7	-7.29	-9.98	7	-8.50	-10.32		
8	-9.61	-13.90	8	-8.61	-9.17		
9	-12.44	-8.66	9	-8.84	-10.26		
10	-7.89	-9.75	10	-10.15	-8.95		
11	-8.57	-8.91	11	-9.06	-12.00		

PbS	pH	Potencial (mV) sin quebracho con XEK	Potencial (mV) quebracho con XEK	ZnS	pH	Potencial (mV) sin quebracho con XEK	Potencial (mV) quebracho con XEK
	6	-7.07	-9.29		6	-6.06	-9.61
7	-8.72	-7.26	7	-9.87	-8.93		
8	-8.27	-6.75	8	-19.08	-7.75		
9	-10.28	-11.24	9	-14.03	-10.30		
10	-11.19	-9.13	10	-8.36	-9.93		
11	-13.76	-8.84	11	-10.33	-8.47		

## 8.4 Preparación del mineral

### 8.4.1 Análisis Granulométrico

Tabla 13. Análisis granulométrico del mineral Velardeña.

# Malla	Tamaño (μm)	Peso (g)	% Retenido	% Ac. (+)	% Ac. (-)
40	425	14.8	29.19	29.19	70.81
50	300	4.7	9.27	38.46	61.54
70	212	4.2	8.28	46.75	53.25
100	150	2.8	5.52	52.27	47.73
140	106	3.5	6.90	59.17	40.83
200	75	4.5	8.88	68.05	31.95
325	45	2.8	5.52	73.57	26.43
pan	-45	13.4	26.43	100.00	0.00
	<b>Total</b>	50.7	100.00		

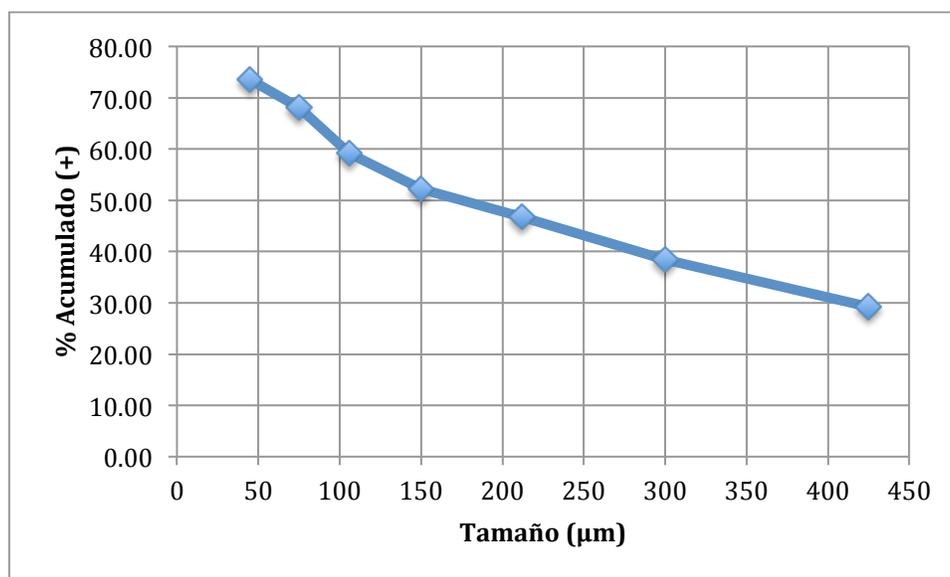


Figura 41. Análisis granulométrico del mineral Velardeña

### 8.4.2 Determinación del tamaño de liberación

Tabla 14. Porcentaje de liberación del mineral Velardeña

Tamaño (μm)	% liberación
425	0
300	0
212	25
150	56
106	80
75	100
45	100

### 8.5 Pruebas de flotación selectiva

Tabla 15. Balance metalúrgico para flotación selectiva prueba 1.

	Corriente	Peso (g.)	% Peso	% Pb	% Zn	% Fe	CM Pb	CM Zn	CM Fe	% REC Pb	% REC Zn	% REC Fe
1	Conc. Pb	13.6	6.46	0.38	9.79	8.98	0.05	1.33	1.22	42.84	14.17	6.37
	Conc. Zn	4.5	2.14	0.37	14.29	15.40	0.02	0.64	0.69	24.32	7.97	3.86
	Colas Zn	192.4	91.40	0.03	3.86	8.98	0.05	7.43	17.27	75.68	92.03	96.14
	Colas Pb	196.9	93.54	0.03	4.10	9.12	0.07	8.07	17.96	57.16	85.83	93.63
	Aliment.	210.5	100.00	0.06	4.47	9.11	0.12	9.40	19.19			

Tabla 16. Balance metalúrgico para flotación selectiva prueba 2.

	Corriente	Peso (g.)	% Peso	% Pb	% Zn	% Fe	CM Pb	CM Zn	CM Fe	% REC Pb	% REC Zn	% REC Fe
2	Conc. Pb	9.8	4.66	0.43	10.01	6.50	0.04	0.98	0.64	28.11	9.53	3.09
	Conc. Zn	5.6	2.66	0.17	15.82	11.04	0.01	0.89	0.62	8.72	9.51	3.10
	Colas Zn	195	92.68	0.05	4.32	9.92	0.10	8.43	19.33	91.28	90.49	96.90
	Colas Pb	200.6	95.34	0.05	4.64	9.95	0.11	9.31	19.95	71.89	90.47	96.91
	Aliment.	210.4	100.00	0.07	4.89	9.79	0.15	10.29	20.59			

Tabla 17. Balance metalúrgico para flotación selectiva prueba 3.

	Corriente	Peso (g.)	% Peso	% Pb	% Zn	% Fe	CM Pb	CM Zn	CM Fe	% REC Pb	% REC Zn	% REC Fe
3	Conc. Pb	5.8	2.78	0.60	9.50	6.24	0.04	0.55	0.36	29.58	6.91	2.01
	Conc. Zn	11.6	5.56	0.10	17.89	10.38	0.01	2.08	1.20	14.44	27.95	6.84
	Colas Zn	191.2	91.66	0.04	2.80	8.58	0.07	5.35	16.41	85.56	72.05	93.16
	Colas Pb	197	94.44	0.04	3.77	8.94	0.08	7.43	17.61	70.42	93.09	97.99
	Aliment.	208.6	100.00	0.06	3.82	8.62	0.12	7.98	17.98			

Tabla 18. Balance metalúrgico para flotación selectiva prueba 4.

	Corriente	Peso (g.)	% Peso	% Pb	% Zn	% Fe	CM Pb	CM Zn	CM Fe	% REC Pb	% REC Zn	% REC Fe
4	Conc. Pb	11.4	5.54	0.39	8.71	7.03	0.04	0.99	0.80	38.27	10.46	3.90
	Conc. Zn	7.5	3.65	0.11	15.27	12.44	0.01	1.15	0.93	11.75	13.46	4.73
	Colas Zn	186.7	90.81	0.03	3.94	10.07	0.06	7.36	18.80	88.25	86.54	95.27
	Colas Pb	198.1	96.35	0.04	4.29	9.96	0.07	8.51	19.73	61.73	89.54	96.10
	Aliment.	205.6	100.00	0.06	4.62	9.99	0.12	9.50	20.53			

Tabla 19. Balance metalúrgico para flotación selectiva prueba 5.

	Corriente	Peso (g.)	% Peso	% Pb	% Zn	% Fe	CM Pb	CM Zn	CM Fe	% REC Pb	% REC Zn	% REC Fe
5	Conc. Pb	15.1	7.00	0.40	10.79	8.39	0.06	1.63	1.27	43.57	19.33	7.24
	Conc. Zn	8.2	3.80	0.08	13.03	5.87	0.01	1.07	0.48	8.35	15.72	2.96
	Colas Zn	192.3	89.19	0.04	2.98	8.19	0.07	5.73	15.76	91.65	84.28	97.04
	Colas Pb	207.4	96.20	0.04	3.28	7.83	0.08	6.80	16.24	56.43	80.67	92.76
	Aliment.	215.6	100.00	0.06	3.91	8.12	0.14	8.43	17.50			

Tabla 20. Balance metalúrgico para flotación selectiva prueba 6.

	Corriente	Peso (g.)	% Peso	% Pb	% Zn	% Fe	CM Pb	CM Zn	CM Fe	% REC Pb	% REC Zn	% REC Fe
6	Conc. Pb	11.1	5.27	0.45	12.14	8.16	0.05	1.35	0.91	31.98	10.77	4.47
	Conc. Zn	13.4	6.36	0.11	39.93	11.88	0.01	5.35	1.59	14.18	47.95	8.21
	Colas Zn	186.2	88.37	0.05	3.12	9.55	0.09	5.81	17.79	85.82	52.05	91.79
	Colas Pb	197.3	93.64	0.05	5.66	9.82	0.11	11.16	19.38	68.02	89.23	95.53
	Aliment.	210.7	100.00	0.07	5.94	9.63	0.16	12.51	20.28			

Tabla 21. Balance metalúrgico para flotación selectiva prueba 7.

	Corriente	Peso (g.)	% Peso	% Pb	% Zn	% Fe	CM Pb	CM Zn	CM Fe	% REC Pb	% REC Zn	% REC Fe
7	Conc. Pb	8.3	4.04	0.58	11.78	7.69	0.05	0.98	0.64	45.04	7.83	3.41
	Conc. Zn	10.7	5.21	0.07	55.86	8.89	0.01	5.98	0.95	12.36	51.94	5.27
	Colas Zn	186.3	90.75	0.03	2.97	9.18	0.05	5.53	17.11	87.64	48.06	94.73
	Colas Pb	194.6	94.79	0.03	5.91	9.28	0.06	11.51	18.06	54.96	92.17	96.59
	Aliment.	205.3	100.00	0.05	6.08	9.11	0.11	12.49	18.70			

Tabla 22. Balance metalúrgico para flotación selectiva prueba 8.

	Corriente	Peso (g.)	% Peso	% Pb	% Zn	% Fe	CM Pb	CM Zn	CM Fe	% REC Pb	% REC Zn	% REC Fe
8	Conc. Pb	7.1	3.36	0.61	13.83	7.29	0.04	0.98	0.52	39.69	8.30	3.19
	Conc. Zn	11.7	5.54	0.07	48.94	9.38	0.01	5.73	1.10	13.14	52.78	6.99
	Colas Zn	192.4	91.10	0.03	2.66	7.59	0.06	5.12	14.61	86.86	47.22	93.01
	Colas Pb	199.5	94.46	0.03	5.44	7.87	0.07	10.85	15.71	60.31	91.70	96.81
	Aliment.	211.2	100.00	0.05	5.60	7.68	0.11	11.83	16.23			

Tabla 23. Balance metalúrgico para flotación selectiva prueba 9.

	Corriente	Peso (g.)	% Peso	% Pb	% Zn	% Fe	CM Pb	CM Zn	CM Fe	% REC Pb	% REC Zn	% REC Fe
9	Conc. Pb	4.3	2.05	0.79	18.31	7.36	0.03	0.79	0.32	30.25	7.08	2.19
	Conc. Zn	16.4	7.81	0.15	37.69	7.78	0.02	6.18	1.28	31.14	59.78	9.04
	Colas Zn	189.3	90.14	0.03	2.20	6.78	0.05	4.16	12.84	68.86	40.22	90.96
	Colas Pb	193.6	92.19	0.04	5.34	7.29	0.08	10.34	14.11	69.75	92.92	97.81
	Aliment.	210	100.00	0.05	5.30	6.87	0.11	11.13	14.43			

Tabla 24. Balance metalúrgico para flotación selectiva prueba 10.

	Corriente	Peso (g.)	% Peso	% Pb	% Zn	% Fe	CM Pb	CM Zn	CM Fe	% REC Pb	% REC Zn	% REC Fe
10	Conc. Pb	6.1	2.84	0.78	8.84	5.95	0.05	0.54	0.36	31.31	4.21	1.98
	Conc. Zn	12.5	5.81	0.08	59.12	11.33	0.01	7.39	1.42	9.59	60.23	7.90
	Colas Zn	196.5	91.35	0.05	2.48	8.40	0.09	4.88	16.52	90.41	39.77	92.10
	Colas Pb	202.6	94.19	0.05	6.06	8.85	0.10	12.27	17.93	68.69	95.79	98.02
	Aliment.	215.1	100.00	0.07	5.95	8.51	0.15	12.81	18.29			

Tabla 25. Balance metalúrgico para flotación selectiva prueba 11.

11	Corriente	Peso (g.)	% Peso	% Pb	% Zn	% Fe	CM Pb	CM Zn	CM Fe	% REC Pb	% REC Zn	% REC Fe
	Conc. Pb	7.3	3.45	0.67	8.81	5.78	0.05	0.64	0.42	46.69	4.92	2.28
Conc. Zn	13.3	6.29	0.06	48.97	10.45	0.01	6.51	1.39	13.41	52.36	7.70	
Colas Zn	190.8	90.26	0.03	3.11	8.73	0.05	5.93	16.66	86.59	47.64	92.30	
Colas Pb	204.1	96.55	0.03	6.10	8.84	0.06	12.44	18.05	53.31	95.08	97.72	
Aliment.	211.4	100.00	0.05	6.19	8.74	0.10	13.08	18.47				

Tabla 26. Balance metalúrgico para flotación selectiva prueba 12.

12	Corriente	Peso (g.)	% Peso	% Pb	% Zn	% Fe	CM Pb	CM Zn	CM Fe	% REC Pb	% REC Zn	% REC Fe
	Conc. Pb	7.7	3.64	0.58	13.58	7.25	0.04	1.05	0.56	34.92	8.73	3.29
Conc. Zn	19	8.98	0.06	35.67	15.14	0.01	6.78	2.88	13.63	62.04	17.54	
Colas Zn	184.8	87.38	0.04	2.24	7.32	0.07	4.15	13.52	86.37	37.96	82.46	
Colas Pb	203.8	96.36	0.04	5.36	8.05	0.08	10.92	16.40	65.08	91.27	96.71	
Aliment.	211.5	100.00	0.06	5.66	8.02	0.13	11.97	16.96				