



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“Estudio de la depresión de la pirita empleando Schinopsis Balansae (T5) en el proceso de selección selectiva Pb-Zn, a través de estudios de Potencial Zeta”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A

ROBERTO RAMÍREZ REYES



CIUDAD UNIVERSITARIA, Cd.Mx.

2017



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: Faustino Juárez Sánchez

SECRETARIO: Profesor: Juan Manuel de la Rosa Canales

1er. SUPLENTE: Profesor: Paola Roncagliolo Barrera

2do. SUPLENTE: Profesor: Blanca Paz Díaz

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

CIUDAD UNIVERSITARIA, FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO D,
LABORATORIO 212 DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
METALÚRGICA.

SUSTENTANTE

ASESOR DEL TEMA

Roberto Ramírez Reyes

M. en C. Antonio Huerta Cerdán



ÍNDICE

ÍNDICE.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABLAS	viii
RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
OBJETIVOS.....	5
HIPÓTESIS.....	5
CAPÍTULO I. Fundamentación teórica	6
1.1 Beneficio de minerales.....	6
1.2 Conminución	7
1.3 Separación por flotación en espuma	7
1.4 Espesamiento.....	8
1.5 Filtración	9
1.6 Principios de flotación en espuma.....	9
1.6.1 Minerales hidrofílicos	10
1.6.2 Minerales hidrofóbicos.....	10
1.6.3 Concentración Micelar Crítica.	11
1.6.4 Proceso de flotación por espumas	12
1.6.4.1 Fase solida.....	14
1.6.5 Factores que intervienen en la flotación	14
1.6.5.1 Pulpa	14



1.6.5.2 Reactivos de flotación.....	16
1.6.5.2.1 Colectores.....	17
1.6.5.2.2 Modificador.....	18
1.6.5.2.2.1 Modificador de pH.....	18
1.6.5.5 Espumantes.....	20
1.6.5.6 Depresores Quebrachos.....	21
1.6.6 Termodinámica de la flotación.....	22
1.7 Potencial Zeta	26
1.7.1 Fenómenos Electrocinéticos y Medición del Potencial Zeta ...	31
1.7.2 El Balance de Repulsión y Atracción	33
1.7.3 Energía de superficies en los líquidos	34
1.7.3.2 Fase líquida.....	36
1.7.3.3 Fase gaseosa.....	37
Capítulo 2.....	38
2.1 Desarrollo experimental.....	38
2.2 Pruebas de Potencial Zeta.....	40
2.3 Pulverización y cribado.....	40
2.4 Espectroscopía de Absorción Atómica.....	41
2.5 Estudio de Potencial Zeta.....	42
2.6 Preparación de mineral para flotación	45
2.6.1 Muestreo.....	45
2.6.2 Análisis granulométrico	46



2.6.3 Determinación del tamaño de liberación.	48
2.6.4 Molienda del mineral.....	49
2.7 Flotación Selectiva	50
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS:	53
Resultados de Potencial Zeta.....	53
Resultados de las pruebas de Flotación Selectivas.	68
Conclusiones:	74
BILIOGRAFÍA.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planta de benefició de minerales [20].....	7
Figura 2. Celda de flotación [22].....	8
Figura 3. Fenómeno hidrofóbico e hidrofílico [23].....	10
Figura 4. Gráfico de tensión superficial en función del logaritmo de la concentración [27].....	12
Figura 5. Celda de flotación [3].....	13
Figura 6. Simulación de colector [21].....	18
Figura 7. Hidrofobicidad e Hidrofilicidad de una gota con respecto al ángulo de superficie de contacto [12].....	25
Figura 8. Modelo de la doble capa [23].....	27
Figura 9. Relación de potencial Zeta y potencial superficial [3].....	30



Figura 10. Zeta-Meter Sistema 3.0+ [3].....	31
Figura 11. Regiones de estabilidad en un diagrama de Potencial Zeta contra pH. La zona inestable se encuentra entre la zona de +/- 20mV, lo que produce una aglomeración y depresión de las partículas. Después de la zona de +/- 20 mV, se llega a una zona de estabilidad [19].....	32
Figura 12. Energía total en las curvas de interacción, obtenida por la suma de la curva de atracción con dos curvas de repulsión [3].....	34
Figura 13. Atracciones moleculares en el agua [3].....	35
Figura 14. Diagrama de flujo de desarrollo experimental.....	39
Figura 15. Muestra de mano Pirita de alta pureza utilizada para las pruebas de Potencial Zeta.....	40
Figura 16. Pirita de alta pureza.....	41
Figura 17. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica, Pekín Elmer 3100.....	41
Figura 18. Zeta-Meter 3.0+.....	42
Figura 19. Cuarteador de minerales.....	45
Figura 20. Partidor Jones.....	46
Figura 21. Equipo Rop Tap. RX-29.....	47
Figura 22. Microscopio American Optical para determinar tamaño de liberación.....	48
Figura 23. Molino de bolas de laboratorio.....	49
Figura 24. Celda de Flotación Denver.....	50
Figura 25. Circuito primario de plomo.....	51
Figura 26. Circuito primario de zinc.....	52
Figura 27. Representación del Potencial Zeta para el mineral de pirita en función del pH, en ausencia y presencia de depresor 5mg/L.....	55



Figura 28. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en ausencia de reactivos y presencia de depresor [10mg/L].....	57
Figura 29. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en ausencia de reactivos y presencia de depresor [15mg/L].....	58
Figura 30. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en ausencia de reactivos y en presencia de depresor [5mg/L]..	59
Figura 31. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en ausencia de reactivos y presencia de depresor [10mg/L].....	60
Figura 32. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en ausencia de reactivos y presencia de colector [15mg/L].....	61
Figura 33. Representación de Potencial Zeta para pirita en función del pH, en presencia de colector, activador y depresor a una concentración de [10mg/L].....	62
Figura 34. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en presencia de colector, activador y depresor a una concentración de 10mg/L.....	63
Figura 35. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en presencia de depresor colector y activador a una concentración de 20mg/L.....	64
Figura 36. Análisis granulométrico del producto de molienda mineral de Charcas SLP.....	66
Figura 37. Determinación del tamaño de liberación del mineral de Charcas SLP.....	67
Figura 38. Efecto del pH en la ley y recuperación del Fe en el concentrado de Pb en presencia del depresor T5 [20 mg/L].....	69
Figura 39. Efecto del pH en la ley y recuperación de FeS ₂ en las colas de Pb, con depresor Quebracho T5 [20 mg/l].....	70



Figura 40. Efecto del pH en la ley y recuperación de FeS_2 en el concentrado de Zn, con depresores de Quebracho T5 [20 mg/l].....71

Figura 41. Efecto del pH en la ley y recuperación de FeS_2 en las colas de Zn, en presencia de Quebracho T5 [20 mg/L].....73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Pruebas de Potencial Zeta realizadas con pirita de alta pureza.....43

Tabla 2. Conductancia Específica Máxima Permisible de la Muestra[28].....44

Tabla 3. Selección de cribas con una progresión de raíz cuadrada de dos.....47

Tabla 4. Análisis Químico del mineral de pirita de alta pureza.....53

Tabla 5. Características de estabilidad de Potencial Zeta en mV [28].54

Tabla 6. Composición química del mineral obtenida por absorción atómica.....65



RESUMEN

La flotación por espuma es el principal proceso en la concentración de minerales, la cual presenta una alta selectividad y se utiliza para llevar a cabo separaciones selectivas de minerales complejos tales como plomo-zinc, cobre-zinc, etc.

En la flotación selectiva existe una etapa en donde se adiciona un reactivo llamado depresor el cual actúa en contra de uno o varios compuestos evitando que estos floten, a nivel industrial se utilizan como reactivos depresores la cal, sulfitos y cianuro, sin embargo en la actualidad se requiere de procesar a dichos minerales a través de reactivos limpios (de bajo impacto ambiental). El Quebracho presenta ventajas adicionales por ser no tóxico además de ser efectivo en niveles razonables de pH con satisfactoria selectividad en comparación a la cal y cianuro.

El siguiente trabajo presenta estudios del reactivo depresor, *Schinopsis Balansae* (T_5) a través de la técnica de Potencial Zeta y flotaciones selectivas para la recuperación de pirita en menas complejas de plomo-zinc. Como resultados relevantes de esta investigación se encontró un intervalo de Potencial Zeta entre -66.7 y con un pH 9 se mostró que a estos valores de potencial se puede flotar pirita aunado a esto se realizaron flotaciones de estas menas para obtener buenas recuperaciones de pirita en las flotaciones entre el 50 y 70 en las colas de zinc, a valores de pH entre 9 y 10.



INTRODUCCIÓN

México es un país minero-metalúrgico por excelencia, donde la actividad en este ramo representó en el 2015 el quinto lugar en el sector productivo del país sólo superado por los sectores automotriz, electrónico, remesas, petróleo y turismo, con una derrama económica de 17 mil 053 millones de dólares que representa el 8.8 del PIB nacional, del cual el 91% de la producción está integrado por el oro 34.1%, cobre 19.7%, plata 18.5%, zinc 6.5%, fierro 4.6%, plomo 2.8%, carbón 1.6% y otros 8.2%.

La Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey, 2015 y datos del INEGI 2015, colocaron a México en el 5° y 6° lugar a nivel mundial en la producción de plomo y zinc con 212 964 y 454 626 toneladas respectivamente. La obtención de estos metales forma parte de la actividad económica nacional, siendo de gran importancia buscar formas más rentables y ecológicas de recuperarlos de los suelos mexicanos [1].

En la actualidad ciertos yacimientos mineros en explotación cuentan con minerales diseminados, los cuales son procesados a partir del beneficio de minerales. De forma general las operaciones más importantes con que se cuenta en las plantas de beneficio son: trituración, clasificación por cribado, molienda, clasificación por ciclones, concentración, espesamiento y filtración [2].



Los procesos de concentración por flotación juegan un rol preponderante en la recuperación de especies valiosas desde sus respectivas menas. El número de variables que inciden sobre los resultados metalúrgicos obtenidos a través de la aplicación de este proceso a una mena en particular, es muy extenso; en muchas ocasiones se denomina como un proceso complejo. Por eso es indispensable tener pautas necesarias, para una buena preparación de los reactivos para flotación.

Los reactivos de flotación juegan un papel importante en este proceso, al ser añadidos al sistema cumplen determinadas funciones que hacen posible la separación de los minerales valiosos de la ganga. Sin embargo la aplicación adecuada de estos reactivos no siempre resulta una tarea fácil debido a una serie de dificultades técnicas que se presentan durante el proceso.

En flotación el rendimiento de los reactivos, sean colectores o espumantes, depende mucho de la composición y constitución mineralógica de la mena. La selección y combinación apropiada de los mismos para cada tipo de mineral particular, constituye precisamente el principal problema del metalurgista a cargo de la operación [3].

Los procesos de flotación selectiva de menas complejas requieren de controles más estrictos en cuanto al manejo de reactivos depresores para especies minerales que son comunes del tipo sulfuros de hierro, tales como: Pirita y Pirrotita. El uso de los quebrachos presenta ventajas adicionales por ser no tóxicos además de ser efectivos en



niveles razonables de pH para una satisfactoria selectividad, en comparación con cianuro y cal; también, cumplen con la necesidad de evitar impactos ambientales negativos. Es por esto que es importante estudiar el uso del quebracho T5 ya que la pirita es una impureza que

no se desea, para esto se utilizó una técnica electroquímica y pruebas de flotación, con el objeto de saber cómo se comporta el quebracho T5 y evitar daños al medio ambiente que puedan repercutir a la naturaleza.

En base a mi experiencia laboral, es importante el manejo de los reactivos ya que modifica la cinética del proceso, por lo cual influye en el producto final, así como el manejo de los residuos, los cuales pueden afectar al medio ambiente.



OBJETIVOS

Determinar los efectos de concentración del reactivo Schinopsis Balansae (T5) y pH sobre minerales de FeS_2 a través de mediciones de Potencial Zeta.

Determinar los efectos de la variación de la concentración de Schinopsis Balansae (T5), pH y presencia de CuSO_4 bajo los cuales la pirita es deprimida a través de pruebas de flotación.

HI PÓTESIS

La caracterización mediante el Potencial Zeta del reactivo Schinopsis Balansae (T5) aplicada al proceso de flotación como reactivo depresor, puede explicar la hidrofobicidad de la pirita que a su vez repercute en la obtención de un buen grado y recuperación para concentrados de Pb y Zn en un proceso selectivo.



CAPÍTULO I. Fundamentación teórica

1.1 Beneficio de minerales

En la actualidad ciertos yacimientos mineros en explotación cuentan con minerales diseminados, los cuales son procesados mediante un proceso de beneficio de minerales. Estos procesos constan de un conjunto de operaciones físicas que tiene como objetivo liberar los valores de los materiales estériles y obtener un concentrado de valores con alta ley y recuperación en forma rentable, con el uso adecuado de reactivos, medidas de seguridad adecuadas para el trabajador y cuidado del medio ambiente.

De forma general las operaciones más importantes con que se cuenta en las plantas de beneficio son: trituración, clasificación por cribado, molienda, clasificación por ciclones, concentración, espesamiento y filtración.

Todas estas operaciones presentan diferentes condiciones que, a través del conocimiento de las variables, propiedades del mineral, su procesamiento y comportamiento se pueden estudiar, analizar y controlar [5]. En la figura 1 se puede observar el diseño de una planta de benefició de minerales.



Figura 1. Planta de benefició de minerales [20]

1.2 Conminución

Debido a que la mayoría de los minerales se encuentran diseminados e íntimamente ligados con la ganga, ellos tienen que ser primeramente liberados antes de ser separados. Esto se consigue con la conminución, en la cual el mineral es paulatinamente reducido hasta que las partículas de mineral limpio puedan ser concentradas en etapas posteriores. En metalurgia se realiza fundamentalmente a través de la Trituración y Molienda [5].

1.3 Separación por flotación en espuma

La flotación es uno de los procesos más selectivos para la separación y concentración de minerales finamente molidos, el proceso se produce mediante la diferencia de propiedades fisicoquímicas de la superficie de cada especie, por lo que recibe un tratamiento químico-superficial de una pulpa de mineral a fin de crear condiciones

favorables para la adhesión de ciertas partículas minerales a las burbujas de aire con la correspondiente flotación en una espuma aprovechando las propiedades de afinidad (hidrofílico) o repulsión (hidrofóbico) del agua. Las especies valiosas o útiles constituyen una fracción menor del mineral, mientras que las especies estériles constituyen la mayor parte del carácter hidrofílico o de afinidad al agua.

Este proceso se puede utilizar en minerales de baja ley, además es empleado en minerales complejos que contienen cobre, plomo, zinc y hierro [8].

En la figura 2 se puede observar el proceso de flotación en una celda.



Figura 2. Celda de flotación [22]

1.4 Espesamiento

Concluida la flotación, los productos obtenidos, que contienen un alto porcentaje de agua, pasan a la etapa de espesamiento, donde se produce la separación de sólidos (concentrado) y líquidos (agua de



proceso) en estanques circulares metálicos denominados espesadores.

El espesamiento es el proceso utilizado para producir una solución libre de sólidos. La adición de floculantes a los espesadores favorece el incremento de la velocidad de asentamiento de los sólidos obteniéndose concentraciones de pulpa cercana al 60% [5].

1.5 Filtración

Este proceso consiste en separar sólidos insolubles de un grano fino en un líquido, el cual con ayuda de filtros se hace retener las partículas no disueltas sobre el filtro, dejando pasar sobre el filtro el líquido o partículas muy pequeñas [4].

1.6 Principios de flotación en espuma

El carácter hidrofóbico o de repulsión evita el mojado de las partículas minerales que pueden adherirse a las burbujas y ascender; estas propiedades son propias de algunos minerales, pero aquellos que no cuentan con esta propiedad pueden separarse utilizando una serie de reactivos de flotación.

Entre las variables más importantes de la flotación se encuentran: la granulometría de la mena, tipo de reactivos, dosificación de los reactivos, densidad de la pulpa, aireación, acondicionamiento de la pulpa, regulación del pH, tiempo de residencia, etc. [11].

En la figura 3 se puede observar una burbuja con el fenómeno hidrofóbico e hidrofílico.

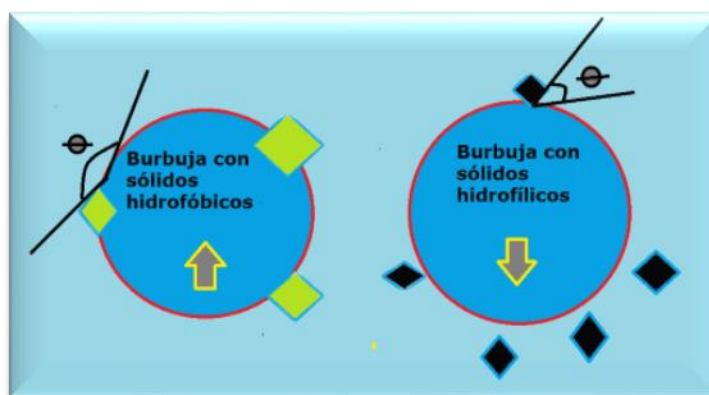


Figura 3. Fenómeno hidrofóbico e hidrofílico [23]

1.6.1 *Minerales hidrofílicos*

Son mojables por el agua, estos están constituidos por: óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos entre otros; los cuales en general representan la mayoría de los minerales estériles o de ganga. Esto se logra haciendo que se mojen, permanezcan en suspensión en la pulpa para finalmente hundirse [8].

1.6.2 *Minerales hidrofóbicos*

Son aquellos minerales que no son mojables o son poco mojables por el agua, dentro de ellos tenemos: los metales nativos, sulfuros o especies como el grafito, carbón, talco y otros; Esto se logra evitando el mojado de las partículas minerales, que pueden adherirse a las



burbujas de aire y ascender. Además se puede observar, que los minerales hidrofóbicos son aerofílicos, es decir, tienen afinidad con las burbujas de aire, mientras que los minerales hidrofílicos son aerofóbicos, es decir, no se adhieren normalmente a ellas [8].

1.6.3 Concentración Micelar Crítica.

La Concentración Micelar Crítica (CMC), es un punto para determinar la concentración en la cual se forman micelas, este fenómeno se da en una disolución, en la cual las moléculas se pueden comportar de dos diferentes formas: una de las partes de la molécula, tiene afinidad hacia los solutos polares tales como el agua y se dice que es una zona hidrofílica, la otra parte de la molécula, tiene afinidad hacia los solutos no polares y se dice que es la zona hidrofóbica.

Hay partículas que se comportan de ambos tipos y se les llama moléculas anfifílicas, estas moléculas pueden organizarse en la superficie del agua de tal manera que la parte polar interactúa con el agua y la parte no polar se sitúa por encima de la superficie ya sea en el aire o en el líquido polar, por lo cual disminuye la tensión superficial, determinando la superficie activa o surfactante.

Las moléculas pueden formar aglomerados en los que las partes hidrófobas están orientados dentro de la agrupación y las porciones hidrófilas están expuestas al disolvente, a tales agregados les nombramos micelas.

La concentración del compuesto anfifílico, mostrará la cantidad de micelas, a bajas concentraciones de agentes tensoactivos favorecen la disposición en la superficie, cuando esta se satura a adiciones

posteriores se arreglaran como micelas. A dicha concentración se le conoce como CMC. De esto se deduce que para la medición de la tensión superficial puede ser utilizada la CMC, figura 4. [27]

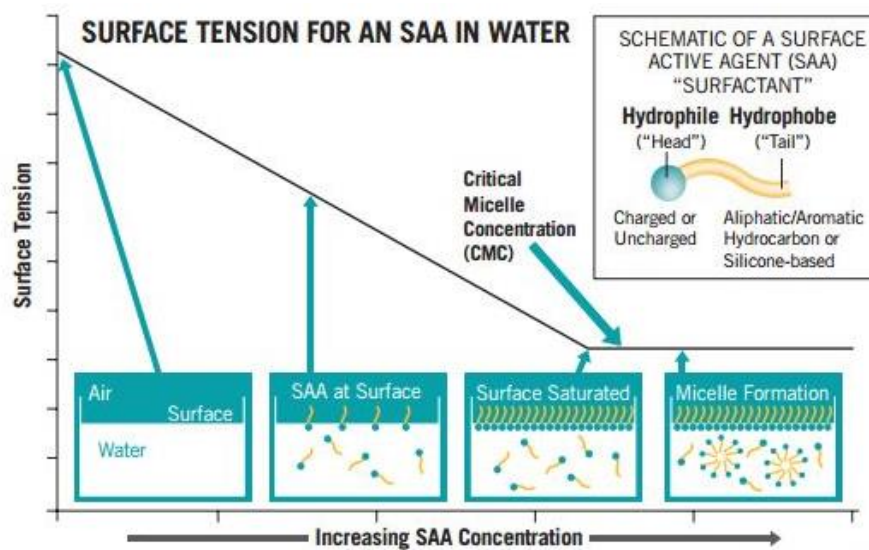


Figura 4. Gráfico de tensión superficial en función del logaritmo de la concentración [27]

1.6.4 Proceso de flotación por espumas

En la etapa previa (molienda), se obtiene el mineral a los tamaños de liberación y se incorporan en él los reactivos para la flotación. El propósito de incorporar dichos reactivos es darle el tiempo de residencia necesario a cada uno de ellos para conseguir una pulpa homogénea antes de ser utilizada en la flotación. La pulpa (o producto de la molienda) se alimenta en las celdas de flotación.

Al ingresar la pulpa, se hace burbujear aire desde el interior y se agita con un aspa rotatoria para mantenerla en constante movimiento, lo que facilita y mejora el contacto de las partículas de mineral dispersas en la pulpa con los reactivos, el agua y el aire, haciendo que este proceso se lleve a cabo en forma eficiente. [3]

Las partículas hidrofílicas se mojan y caen al fondo de la celda de flotación. De esta forma se puede separar un mineral que contiene en los casos más simples dos componentes, un valioso y otra estéril, en dos productos: un concentrado valioso y un relave que contiene la parte estéril. Dicho proceso se puede observar en la figura 1.

Cabe señalar que en una celda de flotación coexisten sistemas formados por una fase sólida, líquida y gaseosa, la cual es representada en la figura 5.

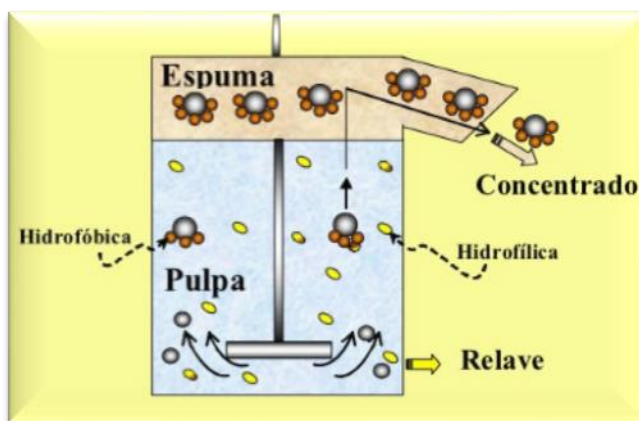


Figura 5. Celda de flotación [3]



1.6.4.1 Fase solida

Está representada por los sólidos a separar (minerales) que tienen generalmente una estructura cristalina. Esta estructura es una consecuencia de la comparación química de las moléculas, iones y átomos componentes que son cada uno, un cuerpo completo [10].

Los factores de importancia en el proceso de flotación, en lo que se refiere a los sólidos, son los siguientes:

- a. Carácter de la superficie aireada en la ruptura del sólido (Tipo de superficie, fuerzas residuales de enlaces)
- b. Imperfecciones en la red cristalina
- c. Contaminantes provenientes de los sólidos, líquidos y gases.

1.6.5 Factores que intervienen en la flotación

1.6.5.1 Pulpa

Es una mezcla del mineral molido con el agua, y viene a constituir el elemento básico de la flotación ya que contiene todos los elementos que forman el mineral. La pulpa debe reunir ciertas condiciones como son: el mineral debe estar debidamente molido al tamaño de liberación por lo regular entre la malla 48 y 270, dentro de este rango de tamaño de partículas, se podrá recuperar de una manera efectiva las partículas de los sulfuros valiosos.



Cuando la pulpa contiene partículas gruesas (mayores a malla 48), debido a una mala molienda, estas partículas tiende a asentarse en el fondo de las celdas de flotación y pueden llegar a plantar el impulsor de la celda, atorar la tubería y causar más trabajo que de costumbre (rebasarían los canales, se atorarían las bombas etc.). Si la pulpa contiene partículas muy finas (menores a malla 270), la recuperación de los sulfuros valiosos no va ser efectiva ya que se perderían en forma de lamas. Al estar la pulpa diluida, el flotador debe cuidar de que las espumas salgan normalmente de los bancos de limpieza y que no bote mucha espuma. Si la pulpa está muy fina, a la vez debe estar muy diluida, significa que estamos pasando menos tonelaje por lo tanto estamos perdiendo capacidad Pulpa: El circuito de molienda nos entrega, el salida de los ciclones, un producto al que se le ha molido y que contiene sulfuros valiosos, ganga y agua; a esto nosotros llamamos pulpa. La pulpa debe cumplir ciertas condiciones tales como: Densidad y pH correcto según se requiera pulpa espesa; Una pulpa espesa (densidad muy alta) nos indicará molienda gruesa. Si esta pulpa ingresa a los circuitos de flotación, veremos que no flota o flota muy poco, debido a que los reactivos y el aire no pueden levantar granos muy grandes aun cuando se agregan cantidades enormes de reactivos. Además, se perderían también los sulfuros valiosos en los relaves, por falta de liberación Una pulpa muy fina implica que tenemos una pulpa de densidad baja y significará que está pasando menos tonelaje. Si bien la cantidad de pulpa que llega a las celdas es igual, contiene menos sólidos, ya que es una pulpa diluida. Esto quiere decir entonces que hay fuertes pérdidas de tonelaje. Además, cuando la pulpa es muy fina hay exceso de lamas



que dificultan la flotación; ensuciando los concentrados, unas veces, y los relaves en otras [8].

1.6.5.2 Reactivos de flotación.

La mayoría de los minerales son naturalmente hidrofílicos, por lo cual las superficies de las partículas minerales se tratan de convertir en partículas hidrofóbicas, o sea repelentes al agua, es decir, proporcionan la condición idónea para que sean flotables, esto se puede lograr con una regulación química de la solución.

Los reactivos pueden haber sido agregados para humedecer o conservar humedecidas a las partículas de la ganga que pueden tener una tendencia a flotar. La operación consiste en preparar las superficies de los minerales al cual se le nombra acondicionamiento. Después de un periodo adecuado de acondicionamiento la pulpa se pasa a la celda de flotación, entonces se introduce el reactivo espumante, cuyo objetivo es hacer que la entrante corriente de aire se desbarate o se rompa formando burbujas pequeñas.

Las partículas minerales que son repelentes al agua se adhieren a las burbujas en cuanto establecen contacto con ellas. Las burbujas cargadas con partículas minerales de la pulpa en donde se colectan, forman una espuma que continuamente se derrama o bien es rastrillada descargándola sobre el ventor de la celda, los minerales de la ganga tienen poca o ninguna tendencia para pegarse a las burbujas por lo que salen de la máquina de flotación como colas.



Son ejemplo de reactivos de flotación los colectores, modificadores y espumantes, los cuales se describen a continuación:

1.6.5.2.1 Colectores

Compuesto orgánico heteropolar que se adsorbe selectivamente sobre la superficie de las partículas, haciendo que estas se vuelvan hidrófobas (aerófilas).

Los colectores usados con mayor frecuencia son los xantatos. Sin los colectores los sulfuros no podrían adherirse a las burbujas y éstas subirían a la superficie sin los minerales, por lo que los sulfuros valiosos se irían a las colas.

Una cantidad excesiva de colector haría que flotarían incluso los materiales no deseados (piritas y rocas) o los sulfuros que deberían flotar en circuitos subsecuentes. Así por ejemplo, en el caso de la flotación de minerales de plomo-zinc-pirita, en el circuito de plomo se mantiene deprimido el zinc, para flatarlo posteriormente en su respectivo circuito; pero un exceso de colector podría hacer flotar el zinc junto con el plomo. Algo similar sucedería en el circuito de zinc con un exceso de colector, haciendo flotar la pirita que se encuentra deprimida por el efecto de la cal adicionada [4].

Lo expuesto se puede representar en la figura 6.

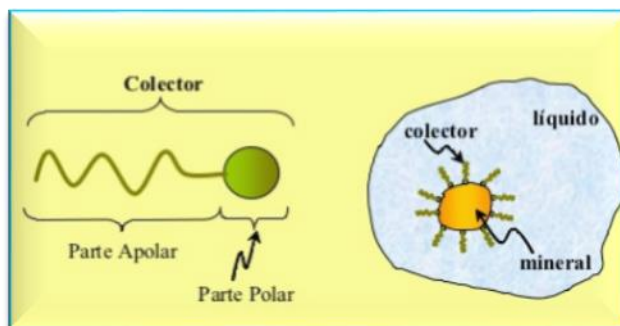


Figura 6. Simulación de colector [21]

1.6.5.2.2 Modificador

Estos reactivos pueden ser de tres tipos: modificadores de pH, activadores y depresores los cuales ayudan a flotar o deprimir las partículas de valor respectivamente.

1.6.5.2.2.1 Modificador de pH

Cada sulfuro tiene su propio pH de flotación, donde puede flotar mejor. Esta propiedad varía según el mineral y su procedencia.

Los reguladores de pH tienen la misión de dar a cada pulpa el pH más adecuado para una flotación óptima.

La cal es un reactivo apropiado para regular el pH, pues deprime las gangas y precipita las sales disueltas en el agua. La cal se puede alimentar a la entrada del molino de bolas. Es importante usar dosificadores automáticos para estar seguros de la cantidad de reactivo dosificado a las pulpas.



1.6.5.3 Activadores

Son reactivos químicos orgánicos que ayudan al colector a adsorberse en la superficie del mineral a flotar. Un ejemplo de activador es el sulfato de cobre, el cual es usado para activar la superficie de la esfalerita, pirita, calcopirita, pirrotita, arsenopirita y cuarzo.

1.6.5.4 Depresores

Son reactivos químicos orgánicos que impiden la acción del colector en la superficie del mineral, un ejemplo es el cianuro de sodio el cual se usan para el recubrimiento y depresión de minerales sulfurados de fierro, cobre y zinc. Otro depresor utilizado en la depresión de los sulfuros de zinc y fierro es el Bisulfito de Sodio, que es un depresor usado como reemplazo del cianuro de sodio particularmente en minerales con contenido de plata, la adición del agente reductor sulfito de sodio o bisulfito de sodio previene la oxidación y por consiguiente, la activación resultante de la esfalerita.

Los extractos del quebracho son mezclas complejas de polifenoles de origen natural, tejidos de árboles del tipo Schinopsis Balansae que crecen en el norte de Argentina. Estos extractos contienen altas concentraciones de Catecol/Pirogalol. El extracto obtenido de cada planta es típico de esa especie. Por esa razón, uno no puede

reemplazar un extracto con otro y esperar conseguir los resultados idénticos en la aplicación.

Por último el Sulfato de Zinc es uno de los reactivos reguladores principales de acción depresoras, utilizada para la flotación selectiva de minerales de cobre y plomo de la esfalerita.

1.6.5.5 Espumantes.

Son reactivos de carácter heteropolar ionicos en su estructura, su diferencia radica en el carácter del grupo polar que en los colectores es activo para reaccionar con la superficie de los minerales , mientras que en los espumantes es un grupo de gran afinidad con el agua (OH^-). La función principal es la formación de una espuma estable y burbujas de tamaño apropiado (pequeño) para llevar los minerales al concentrado. Esto se puede observar en la figura 8.

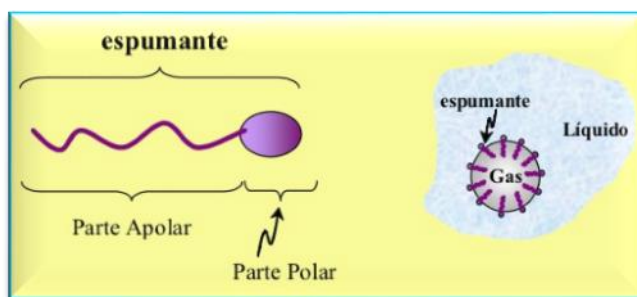


Figura 8. Representación gráfica de un espumante [23]

1.6.5.6 Depresores Quebrachos

El Quebracho ($[\text{C}_6\text{H}_2(\text{OH})_3\text{-COOC}_6\text{H}_2(\text{OH})_2\text{-COO}]_5\text{C}_6\text{H}_7\text{O}$) es una pentagaloilglucosa. Sustancia de carácter aromático con predominantes grupos fenólicos polihídricos, figura 9.

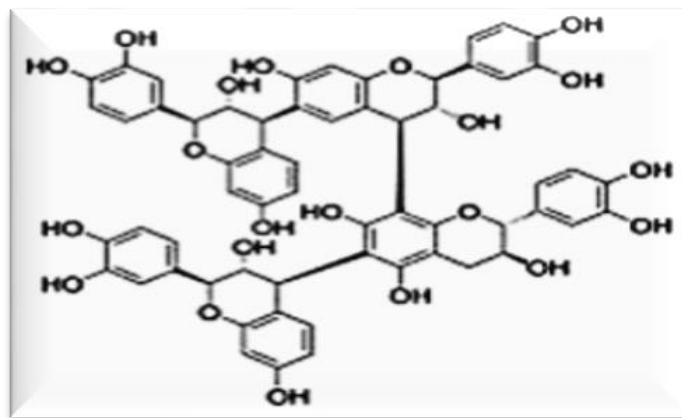


Figura 9. Estructura molecular del Schinopsis Balansae (T5)

Los extractos se modifican químicamente para hacerlos más solubles y estables, además para adecuarlos a aplicaciones específicas en la flotación de distintos minerales. Los extractos de quebracho son bastantes estables tanto en el medio ácido como alcalino, excepto en los valores extremos del pH y a temperaturas altas.

Las moléculas poli-funcionales de estos reactivos tienen una importante capacidad de adsorción en la superficie de los minerales. La adsorción puede ser el resultado de la unión tipo puente de hidrógeno con el oxígeno accesible de la superficie y posiblemente con otros átomos como el Azufre y Flúor; o por la formación de complejos entre los grupos OH^- y cationes di y tri-valentes como el Calcio, Bario,



Cobre, Zinc, Hierro, Aluminio, etc.; o por simple neutralización de la carga negativa a pH alcalino. También podría ser por atracción electrostática entre micelas de tanino y la superficie de algunos minerales.

En el proceso de flotación selectiva tiene como propiedades alta selectividad como depresor, estabilidad a pH ácidos y básicos, alta adsorción en la superficie mineral y al ser un reactivo natural no es dañino al medio ambiente [17].

1.6.6 Termodinámica de la flotación

La flotación ocurre cuando el balance de las tensiones superficiales en el sistema trifásico mineral/gas/líquido (generalmente agua) son favorables. Termodinámicamente, está dado por la expresión que define el cambio de energía libre superficial para la adhesión partícula/burbuja en medio acuoso ec.1.1:

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG} \quad \text{Ec. (1.1)}$$

Donde:

ΔG_{adh}^s = Variación de energía libre superficial durante la adhesión partícula mineral/burbuja (N/m).

γ_{SG} = Tensión interfacial para la interfases sólido/gas (N/m).

γ_{SL} = Tensión interfacial para la interfase sólido/líquido (N/m).

γ_{LG} = Tensión interfacial para la interfases liquido/gas (N/m).

Para el análisis de la espontaneidad de la adhesión y ante la falta de técnicas adecuadas para medir experimentalmente las tensiones interfaciales sólido/gas y sólido/líquido, se recurre a la ecuación de Young. Esto último define un parámetro medible vinculado a la



hidrofobicidad, que es el ángulo de contacto θ , en función de las tensiones interfaciales.

En el año 1805 Thomas Young propuso tratar el ángulo de contacto de una gota de líquido colocada sobre una superficie sólida plana, como un equilibrio mecánico de las tensiones interfaciales sólido/líquido, sólido/gas y líquido/gas. De ahí que se propone la Ec. 1.2

$$\gamma_{LG} \cdot \cos\theta = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} \quad \text{Ec. 1.2}$$

De ahí que se obtiene la ec. 1.3:

$$\Delta G_{adh}^s = \gamma_{LG}(\cos\theta - 1) \quad \text{Ec. 1.3}$$

Así, para $\theta = 0^\circ$, $\Delta G_{adh}^s = 0$, y en consecuencia, para valores de $\theta > 0^\circ$, $\Delta G_{adh}^s \leq 0$

De acuerdo a lo anterior, minerales cuyo ángulo de contacto sea cero han sido definidos como hidrofílicos y termodinámicamente no flotables. Lo contrario es aplicable a minerales que presentan un **ángulo de contacto $\theta > 0^\circ$** .

Se puede señalar que, cuando un líquido moja completamente a un sólido, el ángulo de contacto será igual a cero, mientras que, un valor del ángulo de contacto mayor que cero indica mojabilidad y por lo tanto, cierto grado de hidrofobicidad. La mayoría de los minerales presentan características hidrofílicas, por lo cual, para flotar requieren de un reactivo colector que previamente le confiera hidrofobicidad.



Finalmente, debe dejarse claro, que el ángulo de contacto es una condición termodinámica o de equilibrio del sistema. Para que en flotación se establezca un ángulo de contacto entre el mineral y la burbuja de gas, se deben producir los siguientes fenómenos:

- Aproximación de la burbuja de gas al sólido. Proceso que está gobernado por la hidrodinámica de la celda de flotación (agitación, geometría de la celda, tamaño de partícula, etc.).
- Adelgazamiento del film de agua que rodea la partícula.
- Ruptura del film y desplazamiento del agua.
- Establecimiento del ángulo de contacto.

Así, el análisis termodinámico sólo es válido si se cumplen las etapas anteriores y, por lo tanto, muestra sólo una tendencia o probabilidad de que ocurra el proceso. [12]

La probabilidad de flotación, P , se puede expresar como en la ecuación 1.4.

$$P = P_c \cdot P_a \cdot P_p \cdot P_f \quad \text{Ec.1.4}$$

Donde:

P = Probabilidad de flotación.

P_c = Probabilidad de colisión partícula/burbuja.

P_a = Probabilidad de adhesión partícula/burbuja.

P_p = Probabilidad de que la partícula permanezca unida a la burbuja y sea llevada a la superficie de la pulpa.

P_f = Probabilidad de que el agregado partícula/burbuja se mantenga a pesar de la acción limpiadora de la espuma, y aparezca en el concentrado.

De ahí que de acuerdo a las ecuaciones obtenidas se puede representar en la siguiente figura 7.

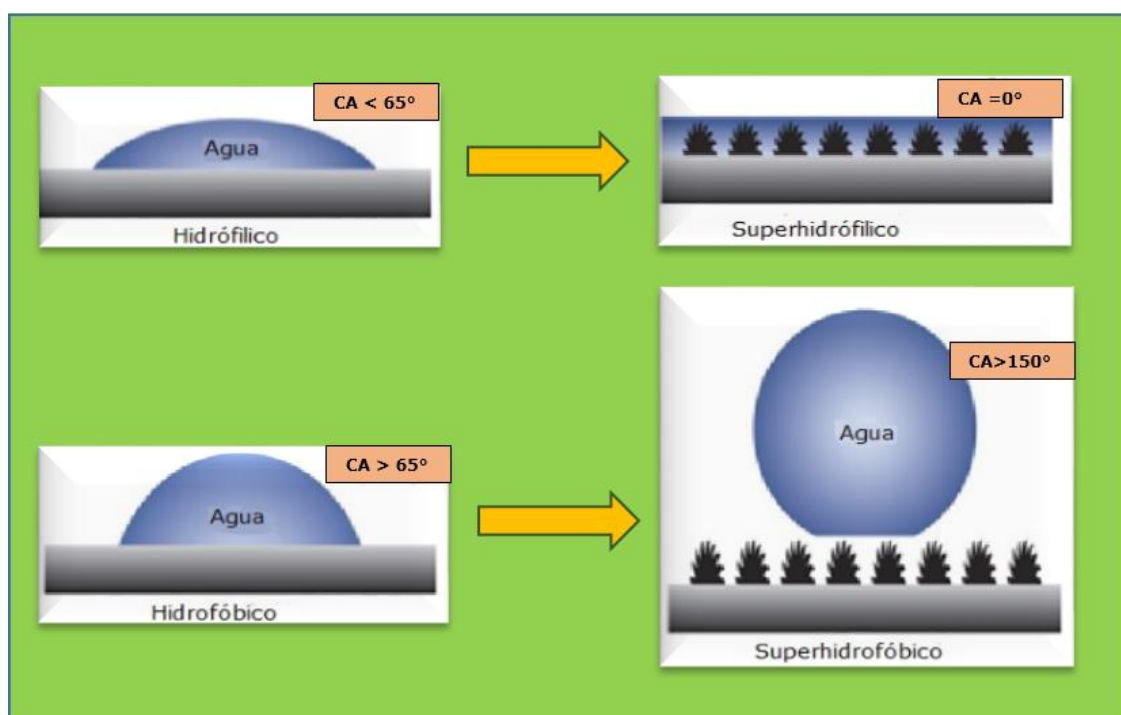


Figura 7. Hidrofóbicidad e Hidrofílicidad de una gota con respecto al ángulo de superficie de contacto [12]



1.7 Potencial Zeta

La medición del Potencial Zeta es una técnica que proporciona la información suficiente de la distribución de carga superficial en la interface sólido/agua. Es en este sentido que el estudio del potencial superficial puede ser utilizado para la evaluación y conocimiento de los procesos de separación por flotación en espuma.

Según el modelo de la doble capa eléctrica, los potenciales de repulsión están ligados a las fuerzas eléctricas de repulsión, mientras que los potenciales de atracción están sujetos a las fuerzas de interacción de London [19].

Una representación gráfica de dicho modelo se puede observar en la Figura 8.

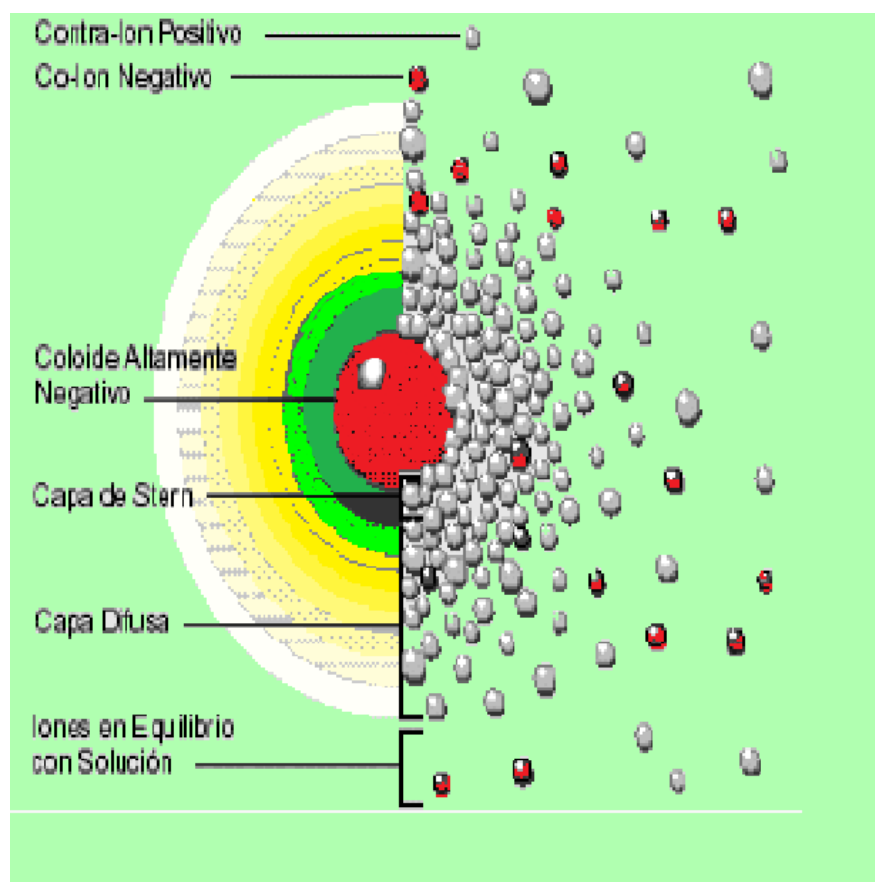


Figura 8. Modelo de la doble capa [23]

Se usa el modelo de la doble capa para visualizar la atmósfera iónica en la proximidad del coloide cargado y para explicar cómo actúan las fuerzas eléctricas de repulsión. Es posible entender este modelo como una secuencia de etapas que ocurren alrededor de un solo coloide negativo, si los iones que neutralizan sus cargas son repentinamente sacados.

Veamos primero el efecto del coloide sobre el ion positivo (llamado contra-ion) en la solución.



Inicialmente, la atracción del coloide negativo hace que algunos iones positivos formen una rígida capa adyacente alrededor de la superficie del coloide; esta capa de contra-iones es conocida como la capa de Stern. Otros iones positivos adicionales son todavía atraídos por el coloide negativo, pero estos son ahora rechazados por la capa de Stern, así como por otros iones positivos que intentan acercarse al coloide. Este equilibrio dinámico resulta en la formación de una capa difusa de contra-iones. Los contra-iones tienen una alta concentración cerca de la superficie, la cual disminuye gradualmente con la distancia hasta que se logra un equilibrio con la concentración de los contra-iones en el seno de la disolución. En forma similar, aunque opuesta, en la capa difusa hay un déficit de iones negativos, llamados co-iones pues tienen la misma carga que el coloide. Su concentración se incrementa gradualmente al alejarse del coloide, mientras que las fuerzas repulsivas del coloide son compensadas por los iones positivos, hasta alcanzar nuevamente el equilibrio. La capa difusa puede ser visualizada como una atmósfera cargada rodeando al coloide. A cualquier distancia de la superficie, la densidad de carga es igual a la diferencia de concentración entre iones positivos y negativos.

La densidad de carga es mucho mayor cerca del coloide y gradualmente disminuye a cero cuando las concentraciones de iones positivos y negativos se asemejan.

Los contra-iones de la capa de Stern y de la capa difusa son los que juntos llamaremos la doble capa. El espesor de esta doble capa depende del tipo y concentración de los iones de la solución.



El coloide negativo y su atmósfera cargada positivamente producen un potencial eléctrico relativo a la solución. Este tiene un valor máximo en la superficie y disminuye gradualmente con la distancia, aproximándose a cero fuera de la capa difusa. 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.

Un punto de particular interés es el potencial donde se unen la capa difusa y la de Stern. Este potencial es conocido como el potencial zeta (Fig.9), el cual es importante porque puede ser medido de una manera muy simple, mientras que la carga de la superficie y su potencial no pueden medirse. El Potencial Zeta puede ser una manera efectiva de controlar el comportamiento del coloide puesto que indica cambios en el potencial de la superficie y en las fuerzas de repulsión entre los coloides [3].

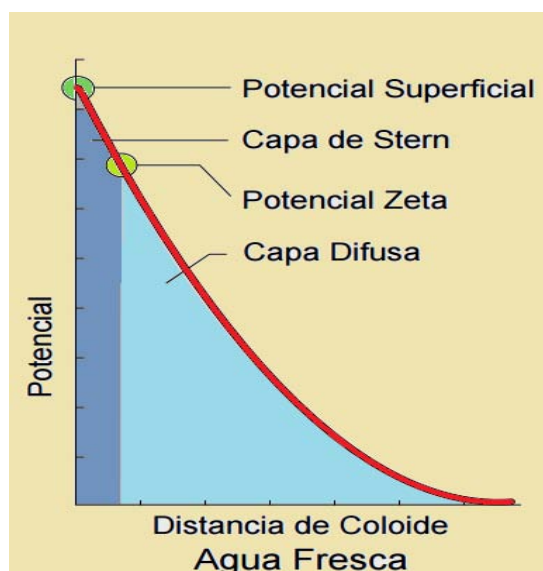


Figura 9. Relación de potencial Zeta y potencial superficial [3]

La relación entre potencial zeta y potencial superficial depende del nivel de iones en la solución. En agua fresca, la gran doble capa hace que el Potencial Zeta sea una buena aproximación del potencial superficial. Las medidas de potencial zeta son hechas usando la técnica llamada microelectroforésis. Un microscopio de alta calidad es usado para observar cómodamente las partículas coloidales que se encuentran dentro de una cámara llamada celda (o célula) electroforética.

Dos electrodos colocados en los extremos de la cámara son conectados a una fuente de poder, creándose un campo eléctrico que cruza la celda.

Los coloides cargados migran en el campo y su movimiento y dirección están relacionados con su potencial zeta (Fig.10). [3]



Figura 10. Zeta-Meter Sistema 3.0+ [3]

1.7.1 Fenómenos Electrocinéticos y Medición del Potencial Zeta

La electroforesis se utiliza para estimar el Potencial Zeta de las partículas, mientras que la transmisión de potencial / corriente se utiliza para cuerpos porosos y superficies planas. En la práctica, el potencial zeta de las suspensiones se mide mediante la aplicación de un campo eléctrico en el sistema. Las partículas dentro de la suspensión migrarán hacia el electrodo de carga opuesta con una velocidad proporcional a la magnitud del Potencial Zeta.

Una de las técnicas más comunes para medir el potencial zeta es la técnica de micro electroforesis. Usualmente se utiliza un microscopio de alta calidad para observar cómodamente las partículas 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 potencia, 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.

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 por centímetro, 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. [19]

La estabilidad de estas partículas se puede representar por la figura 11 el cual involucra el Potencial Zeta y el pH.

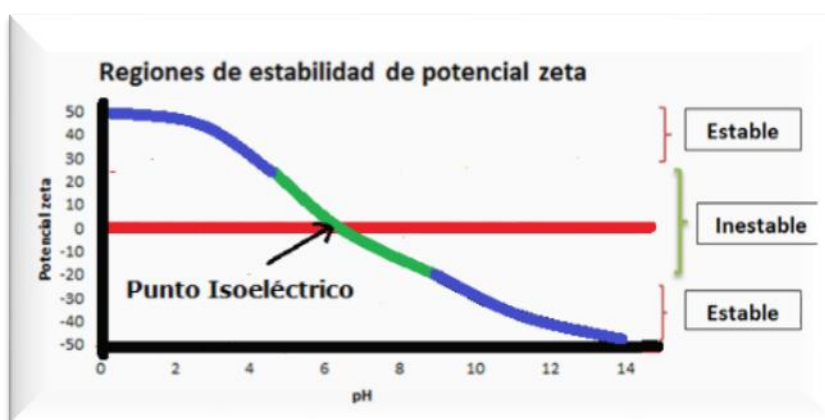


Figura 11. Regiones de estabilidad en un diagrama de Potencial Zeta contra pH. La zona inestable se encuentra entre la zona de +/- 20mV, lo que produce una aglomeración y depresión de las partículas.

Después de la zona de +/- 20 mV, se llega a una zona de estabilidad [19]



1.7.2 El Balance de Repulsión y Atracción

La teoría DLVO es la clásica explicación de los coloides en suspensión. Ésta se basa en el equilibrio entre las fuerzas opuestas de repulsión electrostática y atracción tipo Vander Waals y explica por qué algunos coloides se aglomeran mientras que otros no lo hacen.

La repulsión electrostática llega a ser importante cuando los coloides se aproximan y la doble capa comienza a interferir. Se requiere energía para sobrepasar esta repulsión y forzar la unión entre las partículas. Esta energía aumenta fuertemente cuando las partículas se acercan. Se usa una curva de repulsión electrostática para indicar la cantidad de energía que hay que vencer para que las partículas puedan ser forzadas a juntarse. Esta energía llega a un valor máximo cuando las partículas están casi juntas y disminuye a cero fuera de la doble capa. Su valor máximo está relacionado con el potencial de la superficie.

La atracción de Van Der Waals entre los coloides es ciertamente el resultado de las fuerzas entre las moléculas individuales de cada coloide. El efecto es aditivo; o sea, una molécula del primer coloide experimenta la atracción de Van Der Waals de cada molécula del segundo coloide. Esto se repite para cada molécula del primer coloide y la fuerza total corresponde a la suma de todas ellas. Se usa una curva de energía de atracción para indicar la variación en las fuerzas de Van Der Waals con la distribución entre las partículas. Dependiendo de nuestros propósitos es posible alterar el entorno del coloide para aumentar o disminuir la barrera energética. Varios

métodos pueden ser usados para este propósito, tales como cambios en la atmósfera iónica, el pH o agregando compuestos activos para afectar directamente la carga del coloide. En cada caso la medida del potencial zeta indicará el efecto de la alteración, principalmente en su estabilidad, dicho fenómeno se puede observar en la figura 12. [19]

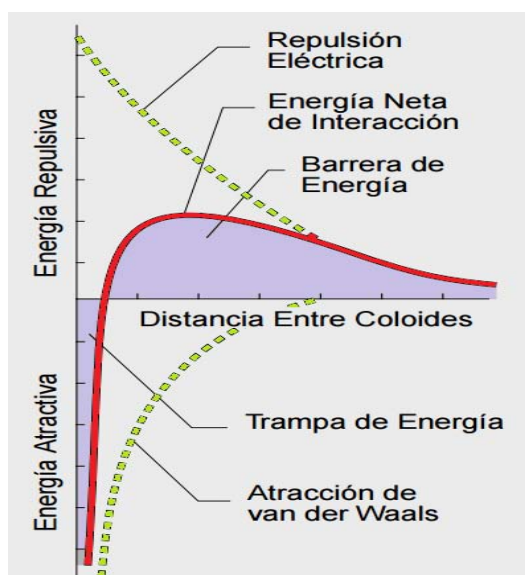


Figura 12. Energía total en las curvas de interacción, obtenida por la suma de la curva de atracción con dos curvas de repulsión [3]

1.7.3 Energía de superficies en los líquidos

Todos los líquidos poseen una energía de superficie libre (energía potencial) en la capa de moléculas colada más al exterior y la cual representa su superficie. Esta energía es el resultado de la atracción que existe entre las moléculas que componen el líquido y cuya

naturaleza componen sus propiedades físicas. El único líquido que necesita ser considerado en conexión con la flotación es el agua. En una masa de agua o de cualquier otro líquido, las moléculas que lo componen ejercen una fuerza de atracción unas con respecto a otras, la cual disminuye rápidamente al aumentar la distancia una de otra. La atracción llega a ser despreciable con respecto al espaciamiento que es del orden de 5 millonésimos de un milímetro. Las moléculas de por si se encuentran sometidas a un movimiento rápido e incesante y en un proceso de ionización continua. Para entender las condiciones que dan origen a la energía libre, es necesario considerar lo que acontece en un instante de tiempo tan corto de modo que pueda asumirse que las moléculas no poseen movimiento. Esto se ha puesto para el caso que se presente en la masa de agua que se presenta en la Figura 13.

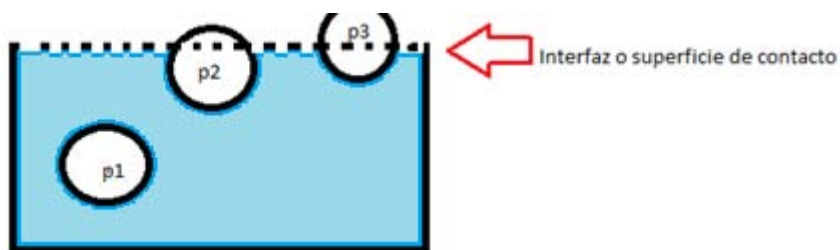


Figura 13. Atracciones moleculares en el agua [3]

Los círculos en la Figura 13, representan las esferas de atracción de las moléculas de P1, P2 y P3. La molécula P1, que está en el interior, es atraída igualmente en todas direcciones por las moléculas colocadas dentro de su esfera de atracción. En el caso de P3 colocada



en la superficie, las moléculas en la mitad inferior de la esfera no están contrabalanceadas o equilibradas por cualesquiera moléculas similares colocadas en la mitad superior, la que está situada justamente arriba de la interfaz aire/agua.

Existen algunas moléculas gaseosas en la mitad superior, pero se encuentran sumamente espaciadas comparadas con las que se encuentran en la mitad inferior por lo que ejercen una atracción despreciable. Es así como P3 queda sujeta a una fuerza de atracción que tiende a jalarla hacia el interior. P2, situada justamente debajo de la interfaz, queda sujeta a una fuerza de atracción similar pero más débil. Consecuentemente la capa de agua de la superficie está sujeta hasta una profundidad que equivale a unos cuantos diámetros moleculares, produciéndose como resultado la contracción de la superficie a un área mínima resistiéndose a que esta pueda ampliarse. Es así como la superficie líquida posee energía superficial libre (energía potencial), cuyo valor se determina por el trabajo que debe efectuarse para mover las partículas del interior a la superficie en contra de las atracciones con otras moléculas [4].

1.7.3.2 Fase Líquida

El agua debido a su abundancia y bajo precio; y también debido a sus propiedades específicas, constituye un medio ideal para dichas separaciones. La estructura de una molécula de agua investigada por espectroscopia es bastante compleja; aparece que aproximadamente el 46% de los enlaces es covalente y 54% es iónico. Finalmente hay que subrayar la importancia de las impurezas y contaminaciones que tiene toda agua natural o industrial. En primer lugar hay que



mencionar la dureza del agua ósea la contaminación natural causada por sales de calcio, magnesio y sodio. Estas sales y otro tipo de contaminaciones no solo pueden cambiar la naturaleza de la flotabilidad de ciertos minerales sino también son casi siempre causa de un considerable consumo de reactivos de flotación con los cuáles a menudo forman sales solubles y parte de la contaminación inorgánica también la contaminación orgánica que puede ser mucho más importante y peligrosa, particularmente si se trata de aguas tratadas[10].

1.7.3.3 Fase gaseosa

Es el aire que se inyecta en la pulpa neumática o mecánicamente para poder formar las burbujas que son los centros sobre los cuales se adhieren las partículas sólidas. La función del aire en la flotación tiene distintos aspectos de los cuales los principales son:

- a. El aire influye químicamente en el proceso de flotación
- b. Es el medio de transporte de las partículas de mineral hasta la superficie de la pulpa. El aire es una mezcla de nitrógeno (78.10%) y oxígeno (20.96%) con pequeñas cantidades de dióxido de carbono (0,04%) y gases inertes como argón y otros [10].



Capítulo 2

2.1 Desarrollo experimental

En este capítulo se detalla el procedimiento de trabajo que se realizó en la experimentación presentándose en forma de diagrama de flujo teniendo los siguientes pasos como los más resaltantes de la Fig. 14:

- Caracterización del mineral (FeS_2).
- Preparación de mena de alta pureza para pruebas de Potencial Zeta.
- Mineral empleado para flotaciones selectivas.

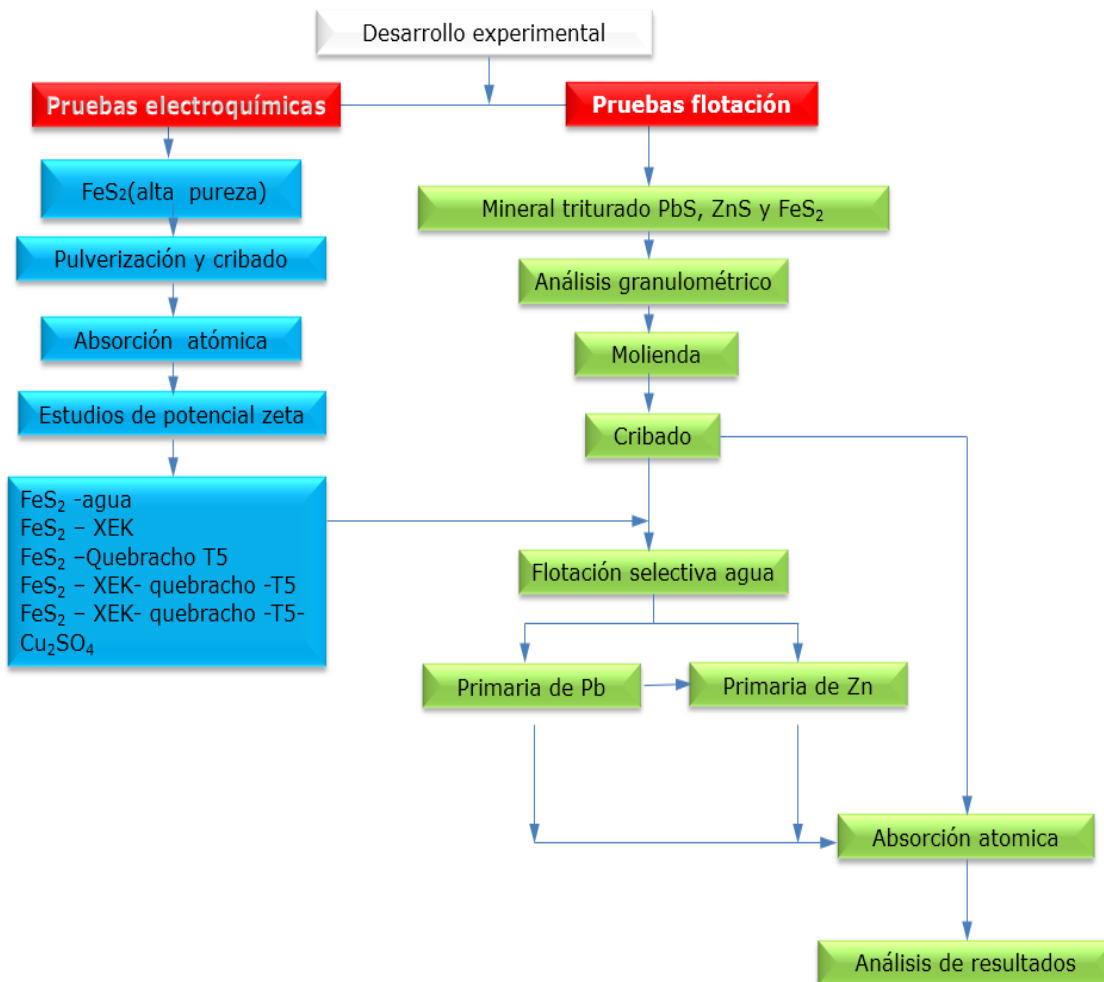


Figura 14. Diagrama de flujo de desarrollo experimental

2.2 Pruebas de Potencial Zeta.

Las pruebas de Potencial Zeta fueron realizadas con mineral de alta pureza de pirita para lo cual se compraron muestras de manos de dichos minerales, en mercados especializados (Figura 15).



Figura 15. Muestra de mano Pirita de alta pureza utilizada para las pruebas de Potencial Zeta

2.3 Pulverización y cribado.

La muestra de mano de pirita fue separada físicamente del material de ganga y triturada manualmente, posteriormente el mineral puro fue pulverizada en un mortero de porcelana, realizándose un cribado en las mallas 300, 350 y 400 para obtener 100g de mineral en la malla 350 (75 μm), almacenándose en un contenedor de plástico. (Figura 16)



Figura 16. Pirita de alta pureza

2.4 Espectroscopía de Absorción Atómica

Con el objeto de caracterizar las menas se tomó una muestra de 5g del mineral cribado y se analizó por Espectroscopía de Absorción Atómica en el equipo modelo Perkin Elmer 3100, utilizado para determinar la concentración del mineral.

Para la preparación de la muestra se pesaron 0.1 g aproximadamente de cada muestra en un vaso de precipitados de 100ml, y se le agregó agua regia 1:1 de HCl concentrado y agua, calentándose la muestra a una temperatura de 70°C durante 15 min y cubriendo las muestras con un vidrio de reloj, por último se agregaron tres gotas de HNO₃ para terminar de liberar el mineral dejándose alrededor de dos días para su disolución total. Teniendo la muestra totalmente disuelta se aforo en un volumen de 100ml y finalmente se aforó a 1ml de esta

solución a un volumen de 100ml para sus correspondientes lecturas en el equipo de Espectroscopía Absorción Atómica, figura 17.



Figura 17. Equipo de Espectroscopía de Absorción Atómica,
Pekín Elmer 3100

2.5 Estudio de Potencial Zeta.

Para las pruebas de Potencial Zeta se utilizó el equipo Zeta-Meter 3.0+ con una celda electroforética con ánodo de molibdeno y cátodo de platino figura 18.



Figura 18. Zeta-Meter 3.0+



Para realizar los estudios de Potencial Zeta sobre la pirita de alta pureza, se establecieron las condiciones de trabajo mostradas en la tabla 1:

Tabla 1. Pruebas de Potencial Zeta realizadas con pirita de alta pureza

Sistema	pH
Pirita	7-11
Pirita-Xantato Etílico de Potasio (1.5×10^{-4} M)	7-11
Pirita-Quebracho T5 (10, 15 y 20 mg/L)	7-11
Pirita-Quebracho T5 (10mg/L)- Xantato Etílico de Potasio (1.5×10^{-4} M)	7-11
Pirita-Quebracho T5 (15 mg/L)- Xantato Etílico de Potasio (1.5×10^{-4} M)	7-11
Pirita-Quebracho T5 (20 mg/L)- Xantato Etílico de Potasio (1.5×10^{-4} M)	7-11

Finalmente en los estudios de Potencial Zeta se utilizó una muestra de 0.025g de mineral en 25 ml de solución con las siguientes concentraciones de reactivos, Xantato Etílico de Potasio [1.5×10^{-4} M]; a lo largo de esta tesis se abreviará como XEK y/o quebracho colorado T5 [10, 15 y 20 mg/L], HNO_3 y NaOH con concentración 0.2 M. Los tiempos de acondicionamiento para todas las soluciones fueron de 5 minutos y las soluciones fueron agregadas a la celda electroforética y posteriormente fue leída la conductancia específica



de la solución, de ahí se fijó el voltaje aplicado a la solución de acuerdo a la siguiente tabla 2.

Tabla 2. Conductancia Específica Máxima Permisible de la Muestra[28]

Voltaje	Conductancia Específica Máxima Permisible de la Muestra ($\mu\Omega/\text{cm}$)
300	300
200	700
150	1,200
100	3,000
75	5,000
50	10,000
40	20,000
30	30,000
20	60,000

Con el voltaje obtenido se obtuvieron las pruebas de Potencial Zeta realizándose 15 mediciones por cada prueba.

2.6 Preparación de mineral para flotación

La materia prima empleada en esta tesis fueron 20 kg de mineral de Plomo y Zinc provenientes de Grupo México, Unidad de Charcas, San Luis Potosí, esta fue dividida para realizar un análisis granulométrico y obtener una muestra para análisis químico vía Espectroscopía de Absorción Atómica (descrito en el apartado 2.4), el resto del material fue homogenizada para ser utilizada en pruebas de flotación selectiva de acuerdo a los siguientes pasos:

2.6.1 Muestreo

El material de Charcas, San Luis Potosí fue muestreado utilizando un cuarteador como se muestra en la figura 19, tomando dos cuartos opuestos, desechando los restantes; y repitiendo los pasos anteriores hasta obtener aproximadamente 2.5 kg de material, esto se logró después de cuatro etapas de preparación.



Posteriormente los 2.5 kg de material fueron divididos utilizando un partidor Jones hasta obtener una muestra de aproximadamente 100 g para realizar un análisis granulométrico, esto se logró después de cinco etapas de división de material (Figura 20).



Figura 20. Partidor Jones

2.6.2 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 (Figura 21).



Figura 21. Equipo Rop Tap. RX-29

Tabla 3. Selección de cribas con una progresión de raíz cuadrada de dos

No. de Malla	Tamaño (μm)
35	500
45	355
60	250
80	180
120	125
170	90
250	63
325	45

2.6.3 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, 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 qué tamaño se ha obtenido el 100% de liberación, figura 22.



Figura 22. Microscopio American Optical para determinar tamaño de liberación

2.6.4 Molienda del mineral

La molienda fue realizada en un molino de bolas de laboratorio con dimensiones de 20.7 cm de diámetro x 15.7 cm de longitud, utilizando como medio molurante 8.2 kg de bolas de molino y realizando moliendas de 300g de mineral por espacio de 10 minutos como se observa en la figura 23.

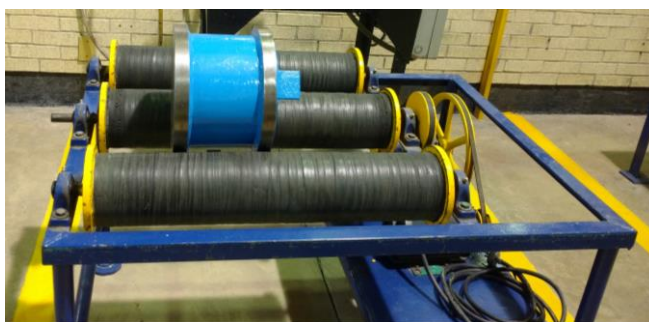


Figura 23. Molino de bolas de laboratorio

El producto de molienda fue cribando al tamaño de liberación y retornando al molino 300g del mineral que se retuvo en la criba, hasta obtener como producto final 35 kg de mineral molido al tamaño de liberación.

2.7 Flotación Selectiva

Para realizar pruebas de flotación selectiva se utilizó una celda de laboratorio marca Denver y un pH-metro marca Oakton pH 2100 Series, en la cual se determinó que se requiere colocar un volumen de agua de 1100 ml y 18 % de sólidos en peso (218g de mineral de Pb y Zn) como se muestra en la figura 24.



Figura 24. Celda de Flotación Denver

Se trabajó en la celda Denver con un circuito de flotación primaria de plomo para lo cual se utilizó como colector para la galena al Xantato Etilico de Potasio y el quebracho colorado como reactivo depresor del zinc para obtener como productos de esta flotación el concentrado primario de plomo (con altas leyes y recuperaciones) y las colas de

plomo (corriente de material estéril y zinc). El diagrama circuito primario de plomo se presenta a continuación en la figura 25:

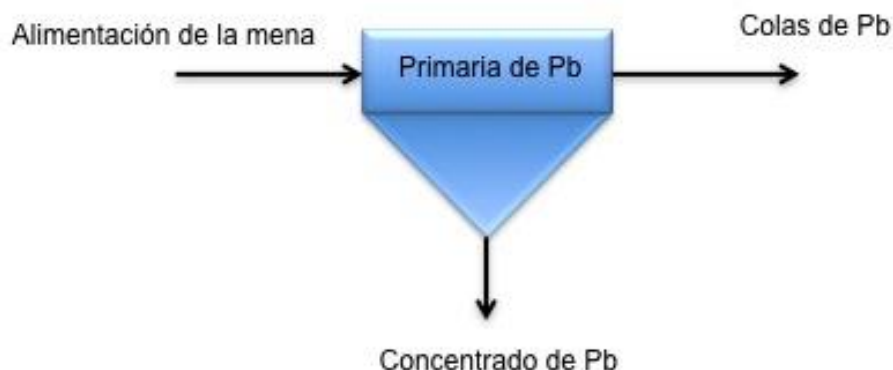


Figura 25. Circuito primario de plomo

Para el circuito primario de Pb se armó la celda de flotación, se agregó en el interior de la celda 18% de sólidos en peso de mineral de Pb y Zn (218 gramos), después agregaron 1,100 mL de agua. Se insertó el electrodo a la celda y se ajustó a 1,200 rpm. La preparación del circuito de Pb necesitó 5 min, en el primer minuto se adicionó el T₅, se ajustó el pH, al minuto 3 se adicionó el XEK, se ajustó el pH, al minuto 4 se 3adicionaron dos gotas de Metil Isobutil Carbinol y se ajustó el pH, a minuto 4 con 45 segundos se inició el flujo de aire y a los 5 minutos se inició el arrastre de espuma.

Para obtener un concentrado primario de zinc se trabajó un segundo circuito llamado primario de zinc, en el cual se utilizó como activador de la esfalerita al sulfato de cobre, para obtener como productos de esta flotación el concentrado primario de zinc (con altas leyes y recuperaciones) y los estériles de zinc (corriente de estériles finales o

colas finales). El diagrama circuito de flotación primaria de zinc se presenta a continuación en la figura 26:

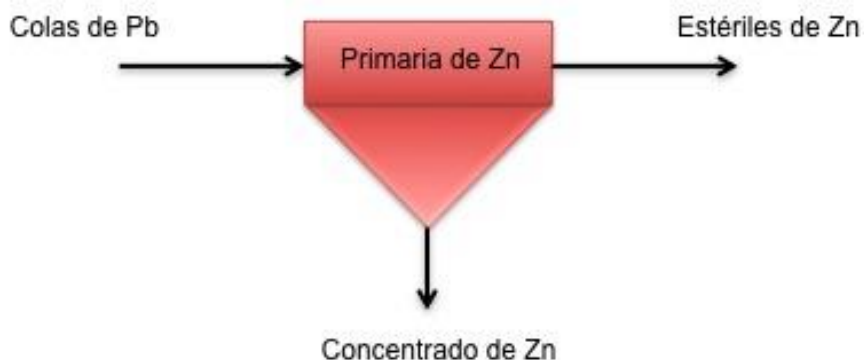


Figura 26. Circuito primario de zinc

Para el circuito primario de Zn, figura 26, después de terminar la recolección de espumas de concentrado de Pb, se ajustó el volumen de la celda, se insertó el electrodo de pH y al primer minuto se adicionó CuSO_4 [1.5×10^{-4} M], después se ajustó el pH, al minuto 4 se adicionó 0.015 mL de metil isobutil carbinol, al minuto 4 con 45 segundos se retiró el electrodo y se inició el flujo de aire, al minuto 5 comenzó el arrastre de espuma de Zn durante 5 minutos.

Las muestras obtenidas fueron identificadas y secadas en el horno a 70 °C. Posteriormente se pesaron y se tomaron muestras representativas de 1 g. para ser enviadas a su análisis químico vía Espectroscopía de Absorción Atómica.



RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Resultados de análisis químico para el mineral de pirita puro.

Como primer punto del desarrollo experimental se realizó un **análisis químico vía espectroscopia de absorción atómica** a una muestra pulverizada de mineral de pirita, mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 4. Análisis Químico del mineral de pirita de alta pureza

Muestra	Fe (% en peso)
Pirita	43.52 \pm 0.04

Este resultado nos permitió afirmar que la muestra que se utilizó en las pruebas de potencial zeta se trató de un mineral de pirita de alta pureza a un tamaño de partícula de 75 μm .

Resultados de Potencial Zeta.

Se realizaron pruebas de Potencial Zeta con minerales de alta pureza de pirita a un tamaño de partícula de 75 μm , para los valores de pH de 6 a 11 y con las concentraciones de Xantato Etilico de Potasio [1.5×10^{-4} M] y Quebracho T5 variando las concentraciones, obteniéndose los siguientes resultados:



De acuerdo a la tabla 5 se analizaron las gráficas de Potencial Zeta

Tabla 5. Características de estabilidad de Potencial Zeta en mV [28]

Características de Estabilidad	Promedio de PZ (mV)
Máxima aglomeración y precipitación	+3 a 0
Excelente aglomeración y precipitación	-1 a -4
Aglomeración y precipitación razonable	-5 a -10
Umbral de aglomeración (de 2 a 10 coloides aglomerados)	-11 a -20
Escasa estabilidad (poca aglomeración)	-21 a -30
Moderada estabilidad (sin aglomerados)	-31 a -40
Buena estabilidad	-41 a -50
Muy buena estabilidad	-51 a -60
Excelente estabilidad	-61 a -80
Máxima estabilidad y flotabilidad	-81 a -125

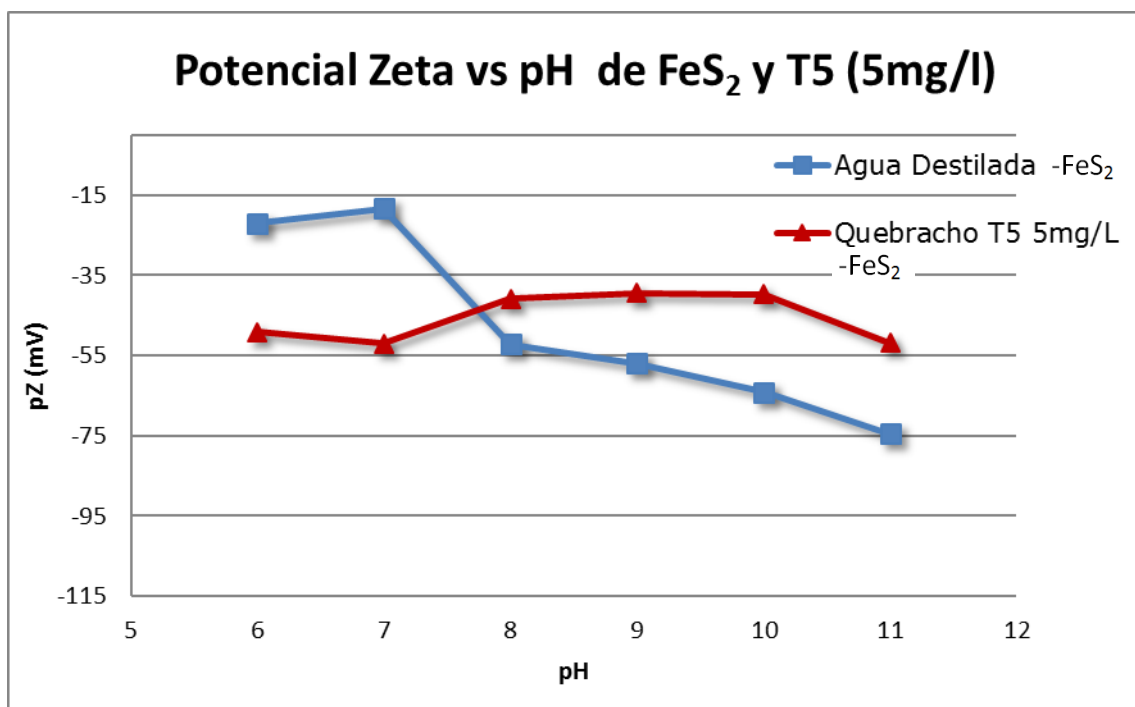


Figura 27. Representación del Potencial Zeta para el mineral de pirita en función del pH, en ausencia y presencia de depresor 5mg/L

En la figura 27 se muestra el comportamiento de la pirita en agua destilada y en presencia de depresor T₅ a una concentración de 5ppm. El mineral de pirita en agua destilada muestra una escasa estabilidad o poca aglomeración con un Potencial Zeta promedio de (-20mV) en el intervalo de pH 6-7, a valores de pH por arriba de 8, la pirita presenta un comportamiento de no flotabilidad, es decir, si se estuviese realizando la flotación del circuito primario de Pb (figura 29), esta pirita la obtendríamos en los relaves del plomo (alimentación al circuito de zinc).



El comportamiento del mineral FeS_2 en presencia del depresor a una concentración de 5mg/L, muestra un comportamiento de buena estabilidad con un potencial de (-49.2mV) a un pH de 6, cambiando a moderada estabilidad a pH de 7 con un potencial de (- 52mV), cuando el mineral se somete a un pH más básico a partir de pH 8, su flotabilidad va disminuyendo cambiando su comportamiento a escasa estabilidad, lo cual indica que a esta concentración el depresor no es bueno ya que el mineral de forma natural tiende a tener mayor flotabilidad en agua.

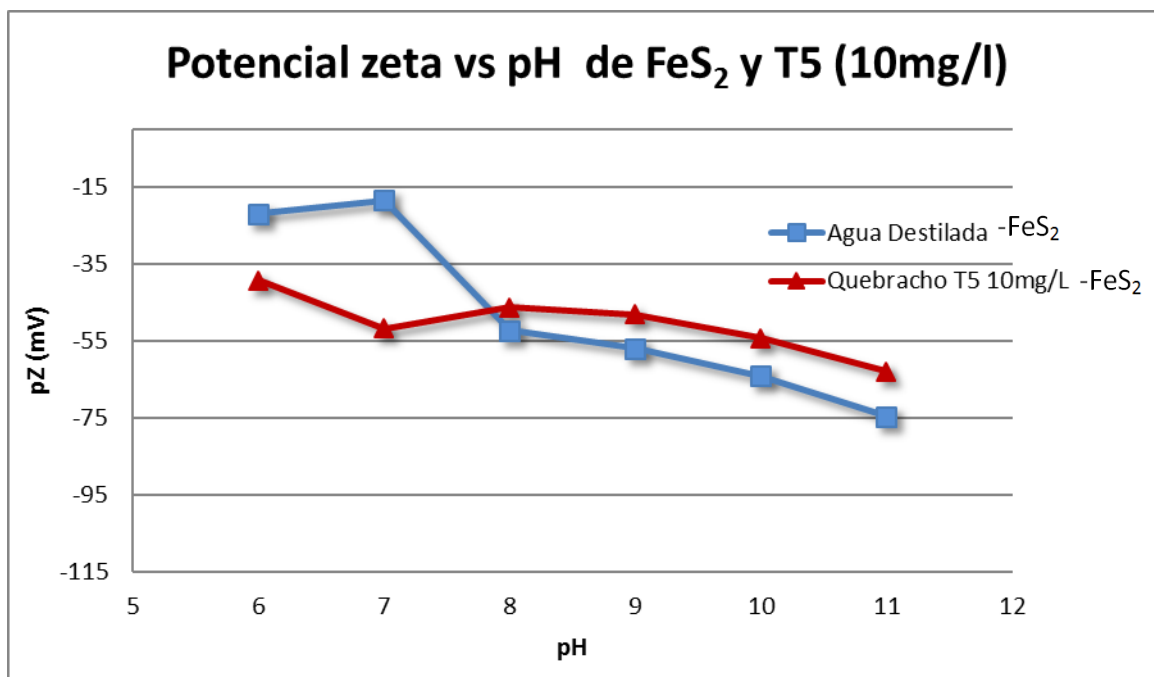


Figura 28. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en ausencia de reactivos y presencia de depresor [10mg/L]

En la figura 28 se presenta el estudio de la pirita con el depresor a concentración de 10 mg/L, en la cual se observa un comportamiento de moderada estabilidad con un potencial de (- 39.3mV) a un pH de 6, teniendo una tendencia a mejor flotabilidad cuando aumenta la basicidad, registrando una excelente estabilidad con un Potencial Zeta de (-62.9mV) a pH 11. Dicha figura es análoga en su comportamiento a la discutida en la figura 27 , indicándonos que la basicidad y la flotabilidad son directamente proporcionales. Sin

embargo se demuestra gráficamente que aun así las condiciones son mejores con el blanco, es decir, solo con agua destilada.

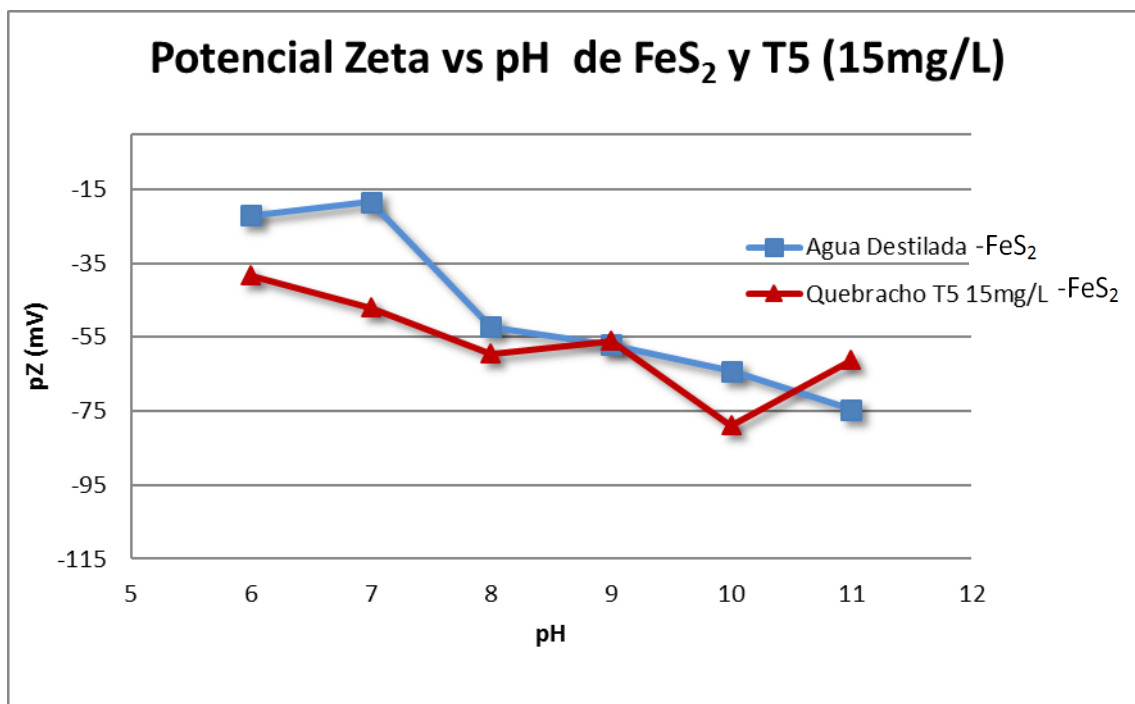


Figura 29. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en ausencia de reactivos y presencia de depresor [15mg/L]

En la figura 29 se observa el análisis de la pirita con el depresor a una a concentración de 15 mg/L, presentando un comportamiento de moderada a buena estabilidad con un Potencial Zeta de (- 38.4 a -56 mV), desde pH 6 hasta 9 respectivamente; favoreciendo las propiedades de no flotabilidad en la primera etapa de flotación.

El quebracho T5 tiene mejores propiedades de flotabilidad que el blanco solamente a pH 10, obteniendo una excelente estabilidad con

un Potencial Zeta de (-78.9 mV). Bajo estas condiciones es probable que el sulfuro de hierro flote en la primera etapa del proceso.

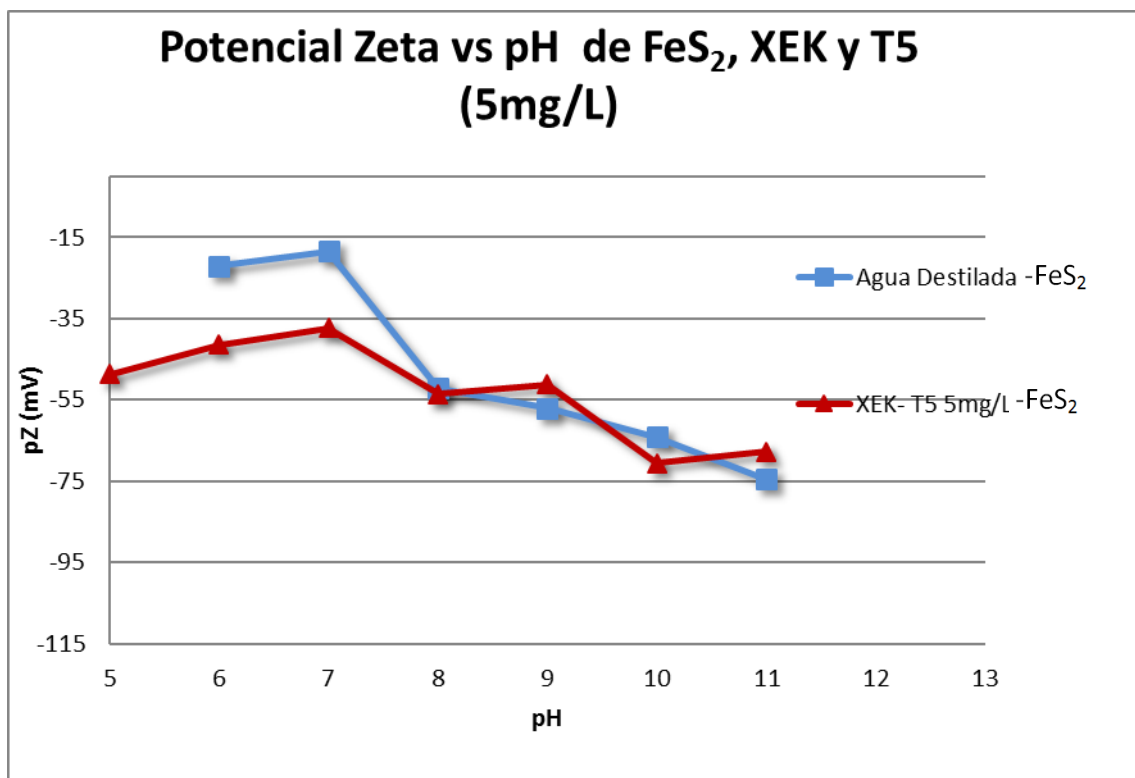


Figura 30. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en ausencia de reactivos y en presencia de depresor [5mg/L]

En la figura 30 se presenta el estudio de la mezcla de pirita, colector y depresor a una concentración de 5 mg/L, el cual muestra un comportamiento de moderada a buena estabilidad con un Potencial Zeta de (-48.6 hasta -67.5 mV) a un pH de 5 hasta 11.

Dadas las propiedades del XEK y del T5 se observa que en esta concentración varía la función del mineral FeS₂, ya que en cierto rango lo mejora pero en algunos casos invierte las propiedades lo

cual no es de gran ayuda para poder flotar con ésta concentración [5ppm].

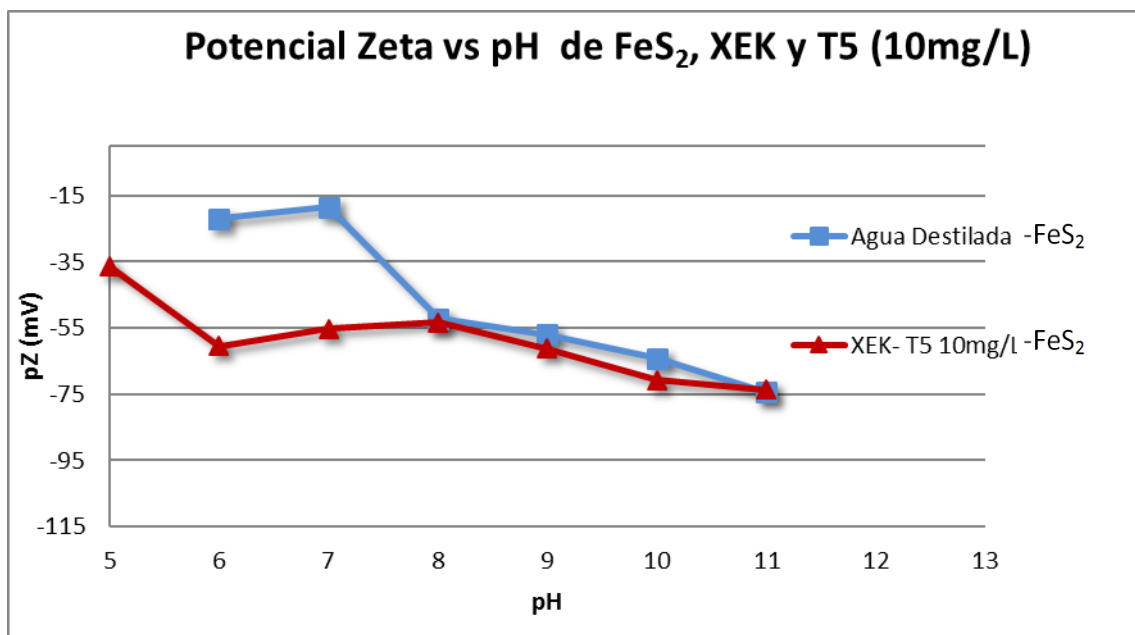


Figura 31. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en ausencia de reactivos y presencia de depresor [10mg/L].

En la figura 31 se puede ver el comportamiento de la pirita, colector y depresor T5 a una concentración de 10 mg/L, el cual muestra un comportamiento de moderada estabilidad con un potencial de (-36.4mV) a un pH de 5, cambiando a buena estabilidad a los pH 6, 7 y 8 con un Potencial Zeta de (-60.4, -55.3 y -53.4 mV), manteniendo una excelente estabilidad a pH de 9, 10 y 11 con unos potenciales de (-61.2 hasta -73.8 mV). Se puede agregar que el comportamiento de la pirita en esta concentración es aceptable, ya que en todo el rango de estudio se comporta con buena estabilidad pudiéndose

mencionar que el XEK tiene una buena función, trabajando así el depresor T5 que interactúa con las partículas de Fe mejorando un poco la flotación de este mineral.

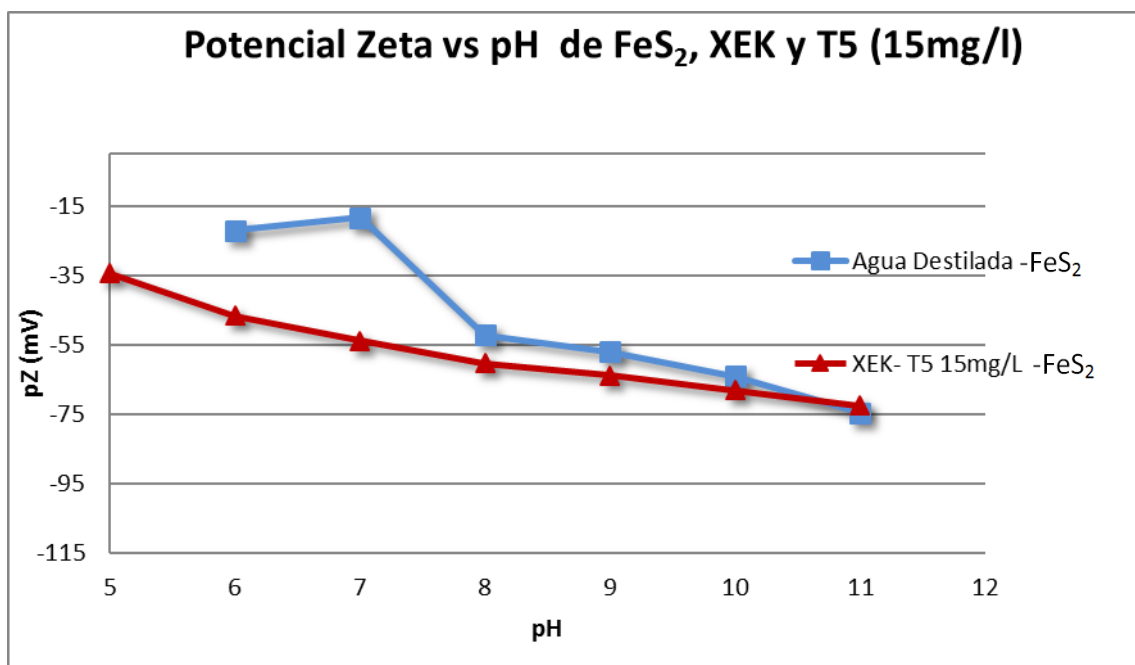


Figura 32. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en ausencia de reactivos y presencia de colector [15mg/L].

En la figura 32 se puede contemplar el comportamiento de la pirita con el colector y depresor T5 a una concentración de [15 mg/L], el cual muestra un comportamiento de moderada estabilidad con un potencial de (-34.5 mV) a un pH de 5, manteniendo una actividad de flotabilidad proporcional al pH; llegando a tener una máxima flotabilidad hasta pH 11 con un Potencial Zeta de (-72.6mV). Cabe señalar que se observa, que el mineral de FeS₂, siempre es flotable

con la presencia del colector XEK y en compañía del depresor T5, a cualquier condición de pH, esto es debido a que el XEK interactúa con la Pirita y le confiere condiciones de flotación, es importante enfatizar que si nuevamente estuviésemos trabajando el circuito primario de Pb, en éste la pirita quedaría en el concentrado de plomo.

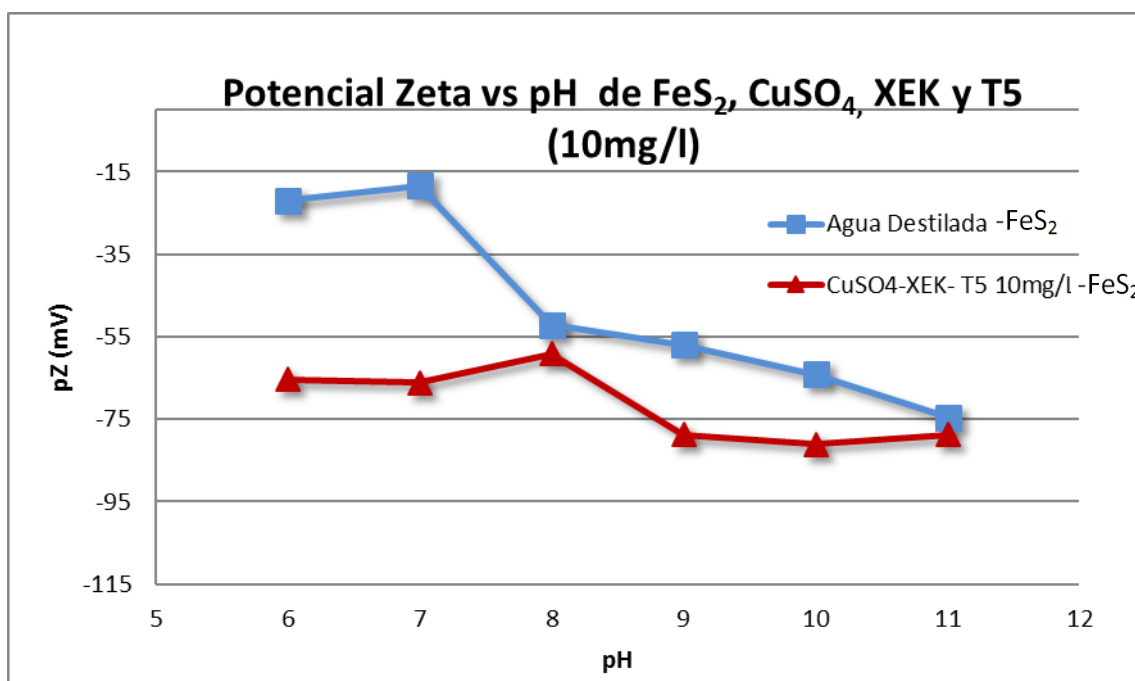


Figura 33. Representación de Potencial Zeta para pirita en función del pH, en presencia de colector, activador y depresor a una concentración de [10mg/L].

En la figura 33 se puede observar el comportamiento de la pirita con el uso de colector, activador y depresor a una concentración de 10 mg/L, el cual muestra un comportamiento de excelente estabilidad en

toda la gráfica desde pH 6 hasta 11 con potenciales que varía desde (-65.3 hasta -78mV), excepto a pH 8 mantiene una muy buena estabilidad con un potencial de (-59.1mV). Cabe mencionar que la partícula de pirita tiene mejores propiedades con la ayuda del XEK, T5 y el sulfato de cobre, en la cual se puede observar, que beneficia la flotabilidad en todo el rango, excepto en algunos casos como el pH 6 y el 11 los cuales se acercan a los valores de nuestro blanco.

Prediciendo que la pirita flotaría en su mayoría en la primera etapa del proceso junto con el plomo.

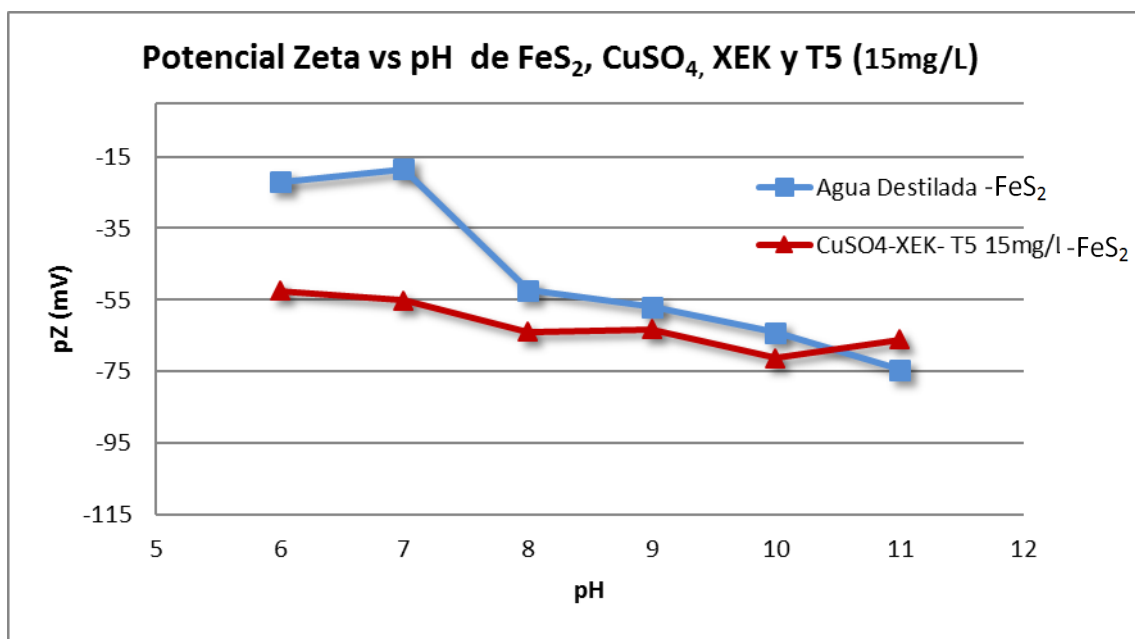


Figura 34. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en presencia de colector, activador y depresor a una concentración de 10mg/L.

En la figura 34 se examina el comportamiento de la pirita con el uso de colector activador y depresor a una concentración de 15 mg/L,

el cual se observa un comportamiento de muy buena estabilidad a pH 6 y 7 con un potencial de (-52.5 y -55.1mV), comportándose con una excelente estabilidad al volverse más básico desde pH 8 hasta 11 con un potencial de (-63.9 hasta -66mV). Se puede decir que el uso de estos reactivos es favorable ya que en todo el rango la pirita flota más que en el blanco excepto en pH 10 a 11 lo cual es más favorable en el blanco, pero en general mejoran las condiciones de flotabilidad.

En este caso nos indica que la Pirita flota en todo el rango de pH con la ayuda de los reactivos

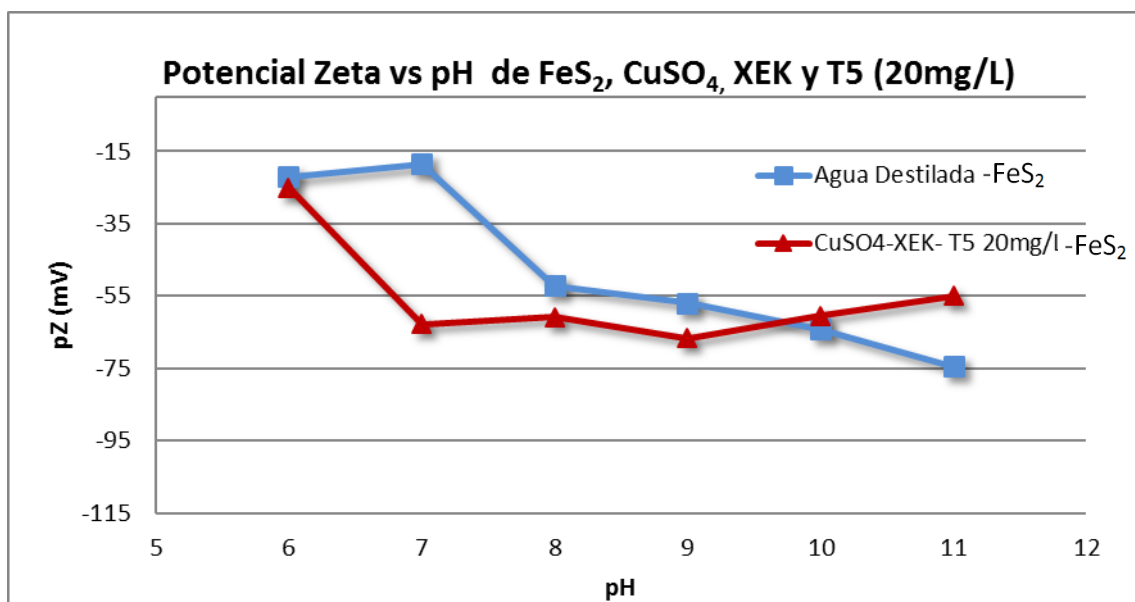


Figura 35. Representación del Potencial Zeta para pirita en función del pH, en presencia de depresor colector y activador a una concentración de 20mg/L.

En la figura 35 se observa el comportamiento de la pirita con el uso de depresor, colector y activador a una concentración de 20 mg/L, el cual indica un comportamiento de escasa aglomeración a un pH de



6 con un potencial de (-25mV), manteniendo una excelente estabilidad desde pH 7 hasta 10 con unos potenciales (-62.8 hasta -60,4mV), cambiando a muy buena estabilidad a un pH de 11 con un potencial de (-55mV).

Las condiciones a las que interactuó el mineral se vieron favorables con los reactivos pero de pH 9 en adelante se ven afectadas por la inversión en el blanco, en el cual el blanco tiene mejores propiedades de flotabilidad, pudiendo predecir que la pirita puede quedar en la primera etapa del proceso.

Resultados de flotación selectiva del mineral de Charcas SLP

El mineral utilizado para realizar las pruebas de flotación selectiva fue proporcionado por la mina de Charcas SLP, perteneciente a Grupo México. A una muestra de este mineral se le realizó un análisis químico vía espectroscopia de absorción atómica, para los elementos de Pb, Zn y Fe; teniéndose los siguientes resultados, tabla 5:

Tabla 6. Composición química del mineral obtenida por absorción atómica

Muestra	Pb (% en peso)	Zn (% en peso)	Fe (% en peso)
Charcas	0.92 ± 0.02	3.08 ± 0.03	4.42 ± 0.04

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.

Otra muestra fue utilizada para realizarle un análisis granulométrico, los resultados se muestran en la gráfica 36 donde se observa el tamaño de partícula vs. porcentaje acumulado negativo correspondiente a este análisis para la materia prima, en la que se observa que el mineral presenta una granulometría abierta, es decir, se tiene una amplia distribución de tamaños de partículas principalmente en los tamaños finos (-500+45 μm), esto se debe a que el material proviene seguramente de un proceso de trituración terciaria (trituración de finos), teniéndose 67.75 % del material retenido a un tamaño de partícula de 500 μm que fue la alimentación al molino de bolas del laboratorio.

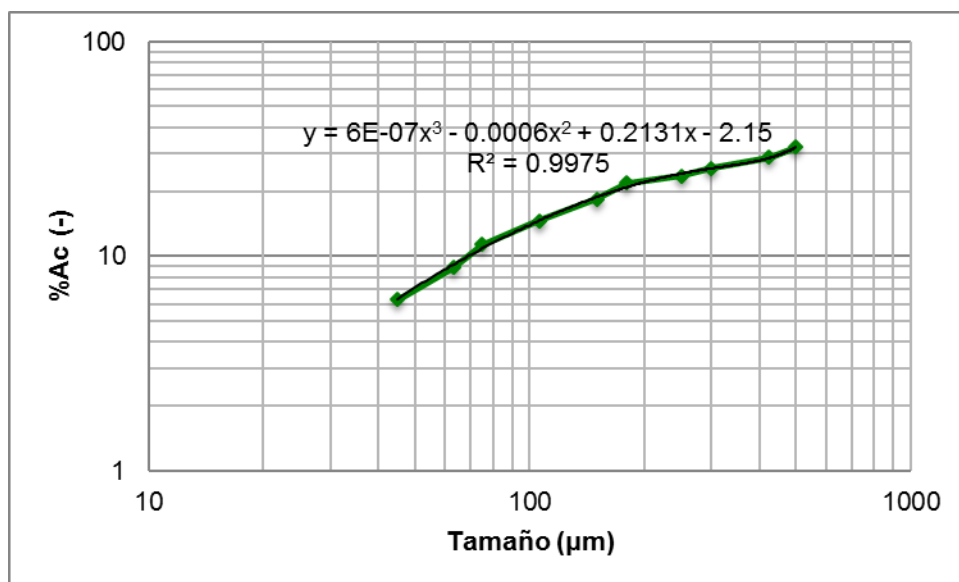


Figura 36. Análisis granulométrico del producto de molienda mineral de Charcas SLP

Paralelamente al análisis granulométrico se determinó el tamaño de liberación de los minerales sulfurados, obteniéndose el gráfico de tamaño de partícula vs. Porcentaje de liberación (Figura 37); en el cual se observa que el tamaño en el cual todas las partículas de los minerales de interés (galena, esfalerita y pirita) tienen un tamaño de liberación de 106 μm , por lo que la relación de reducción realizada en el molino de bolas del laboratorio fue de 4.71 veces con respecto a la alimentación (500 μm).

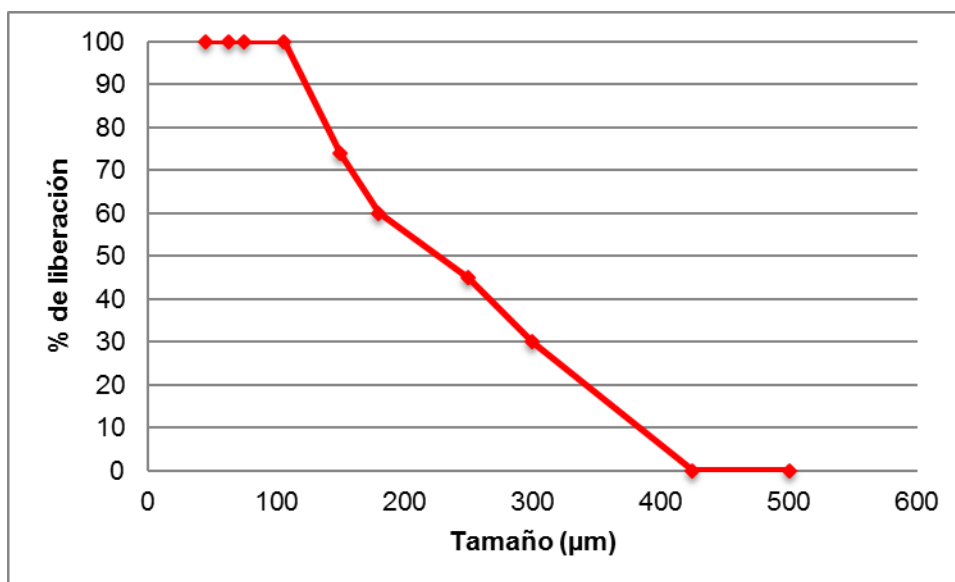


Figura 37. Determinación del tamaño de liberación del mineral de Charcas SLP

La molienda fue realizada en un molino de bolas de laboratorio con dimensiones de 20.7 cm de diámetro x 15.7 cm de longitud, utilizando como medio molurante 8.2 kg de bolas de molino y realizando moliendas de 300 g de mineral por espacio de 10 minutos,

67



cribando el producto a un tamaño de $106 \mu\text{m}$ y colocando en el molino 300 g del mineral (nuevo y el retenido en la etapa de molienda previa), hasta obtener como producto final 20 kg de mineral molido al tamaño de liberación. Posterior a la molienda se empaquetaron bolsas con 218 gramos de mineral los cuales corresponden a tener 20 por ciento de sólidos en peso para ser utilizados en una celda de flotación de laboratorio con un volumen de 1.1 litros.

Resultados de las pruebas de Flotación Selectivas.

Para conocer el comportamiento que tuvo la pirita en las pruebas de potencial zeta, se realizaron estudios de flotación selectiva de acuerdo a los circuitos propuestos de flotación primaria de Pb y Zn, utilizando como reactivo colector al XEK [$1 \times 10^{-4} \text{M}$], reactivo depresor al Quebracho T5 [20 mg/l] y como activador al CuSO_4 [$1 \times 10^{-4} \text{M}$], obteniéndose los resultados que se observan en las figuras 38,39,40 y 41.

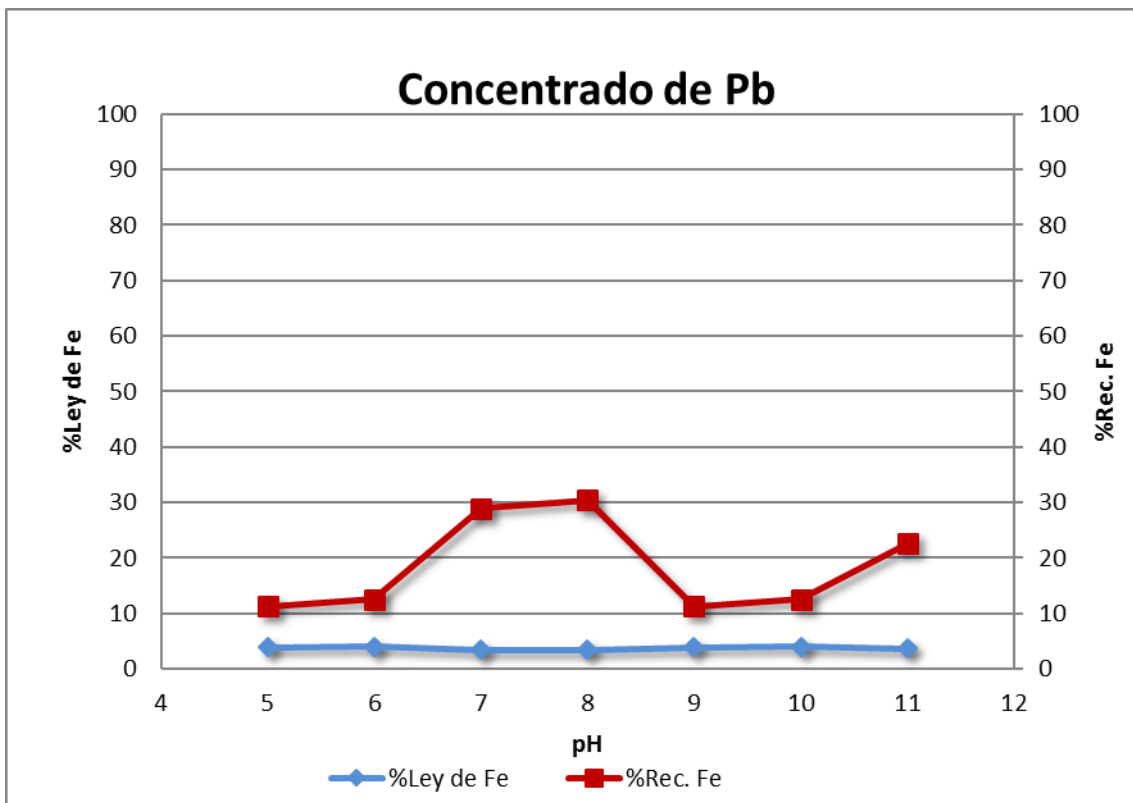


Figura 38. Efecto del pH en la ley y recuperación del Fe en el concentrado de Pb en presencia del depresor T5 [20 mg/L].

A partir de la figura 38 se muestra el efecto del pH en función de la concentración del depresor T₅ [20mg/l], durante el proceso de flotación primaria del concentrado del mineral de galena (PbS₂). En ella se observa que % ley de Fe es independiente del pH en todo el intervalo de estudio, las recuperaciones de Fe en este concentrado son también en realidad bajas y más aún en el intervalo de pH 5 a 6 y de pH 9 a 10, siendo del orden de 12% en promedio, todo ello a la concentración del reactivo depresor con [20 mg/].

Cabe mencionar que estos valores de leyes de hierro son aceptables para esta etapa del proceso con recuperaciones cercanas al 10% en los intervalos de señalados con anterioridad.

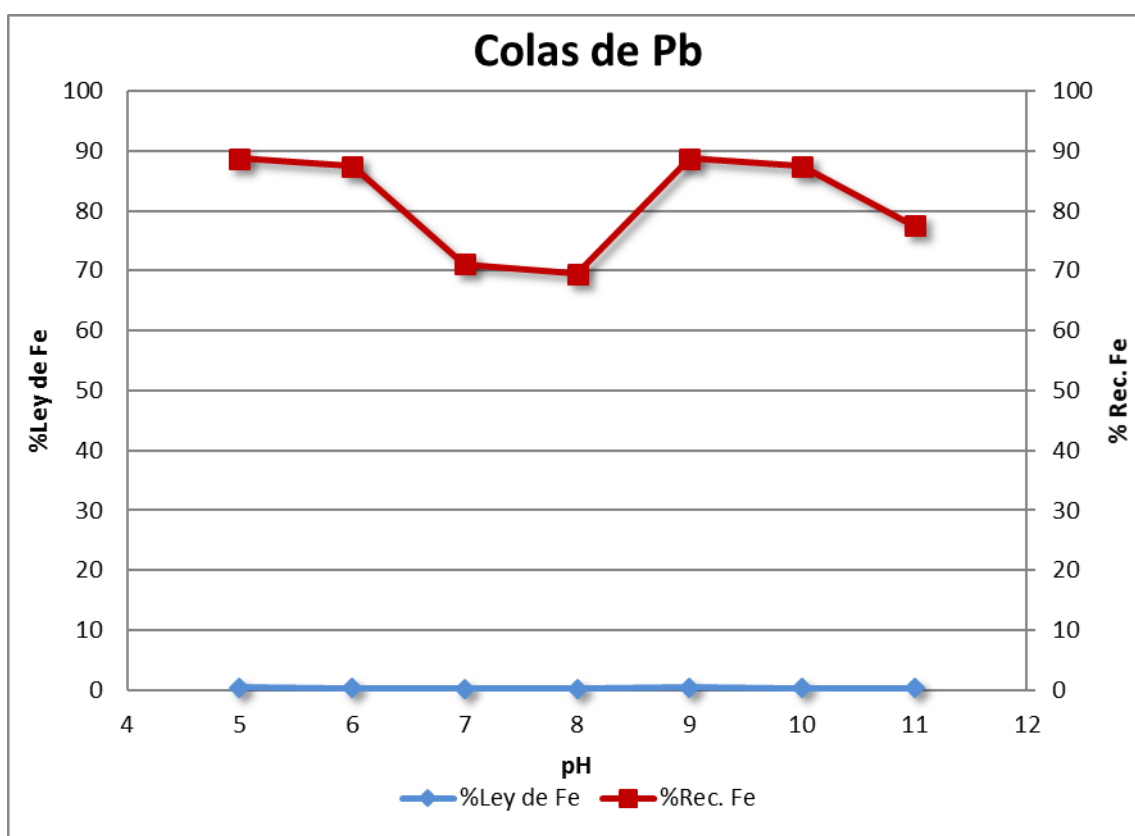


Figura 39. Efecto del pH en la ley y recuperación de FeS_2 en las colas de Pb, con depresor Quebracho T5 [20 mg/l]

A partir de la figura 39 se representa el efecto de del pH en función de la concentración del depresor, la cual muestra que en la fase terminal de la etapa 1, se observa que el % Ley de Fe, es independiente del pH y parecido a la primera etapa en el concentrado, dando un porcentaje de casi el cero %, en tanto que la recuperación

del Fe se obtuvieron buenos resultados en el intervalo de pH de 5-6 y 9-10 se obtuvieron aproximadamente un 90% y en el caso de valores de pH 7-8 se obtuvo un 70%, quedando en un recuperación media al pH 11 con un 78%.

De dicha gráfica, se analiza que los intervalos con pH 7-8 y 9-10 se obtuvieron mayores porcentajes de recuperación en la etapa primaria indicando que en esta primera etapa del proceso indica que la mayoría del Fe se fue a la segunda etapa del proceso como se describe en la gráfica.

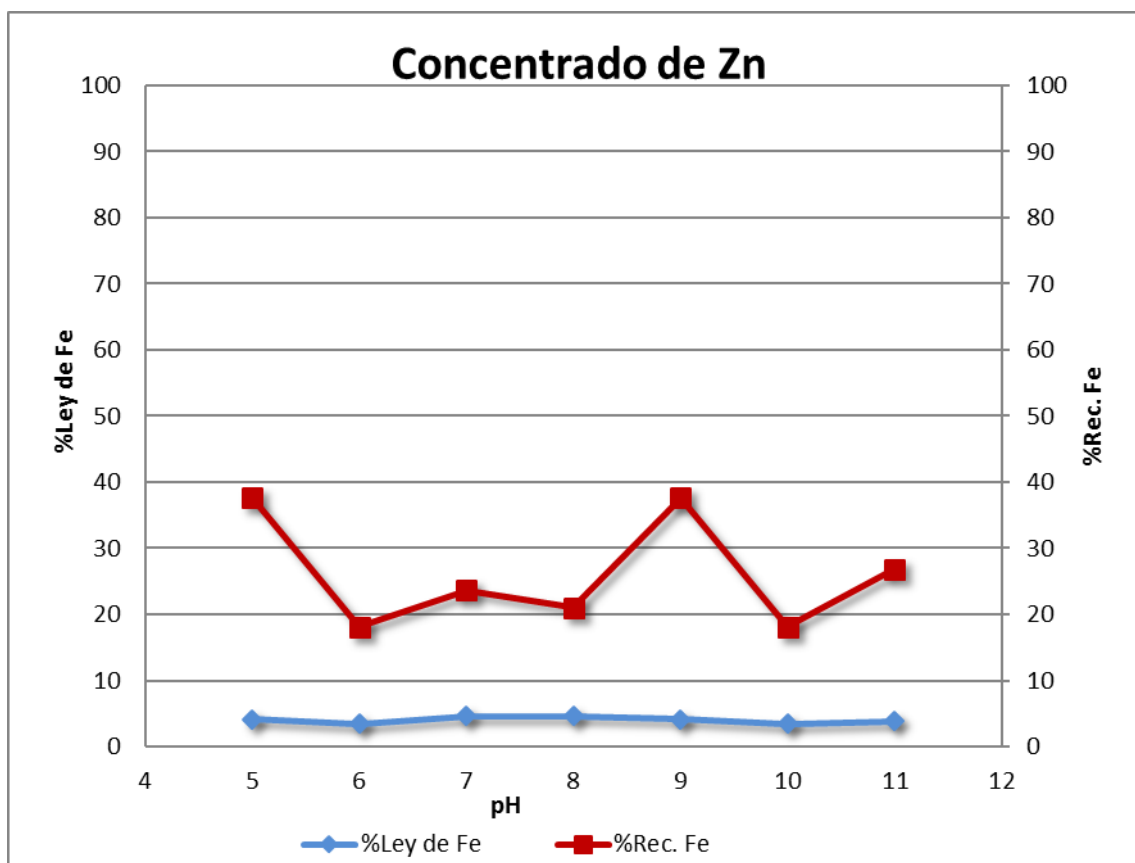


Figura 40. Efecto del pH en la ley y recuperación de FeS_2 en el concentrado de Zn, con depresores de Quebracho T5 [20 mg/l]



En la figura 40 se muestra el efecto del pH en el concentrado de Zn en presencia de quebracho T5 a una concentración de 20 mg/L, el cual proviene de la primera etapa del proceso, el cual mostro que el pH es independiente del % Ley del Fe en el barrido de 5-11, mostrando un intervalo de 1-2%, en el caso del %de Rec., se observa que las mayores recuperaciones se dan en pH 5 y 9 con un 38%, dándose a notar que en los pH 6,8 y 10 se obtuvo un baja recuperación en un intervalo de 18-20%, quedando en una recuperación media los pH 7 y 11 con un intervalo de 23 a 26%.

En tanto se puede decir que en esta etapa del proceso las mejor prueba de la etapa se dio a pH 6 y 10 con alto porcentaje de recuperación.

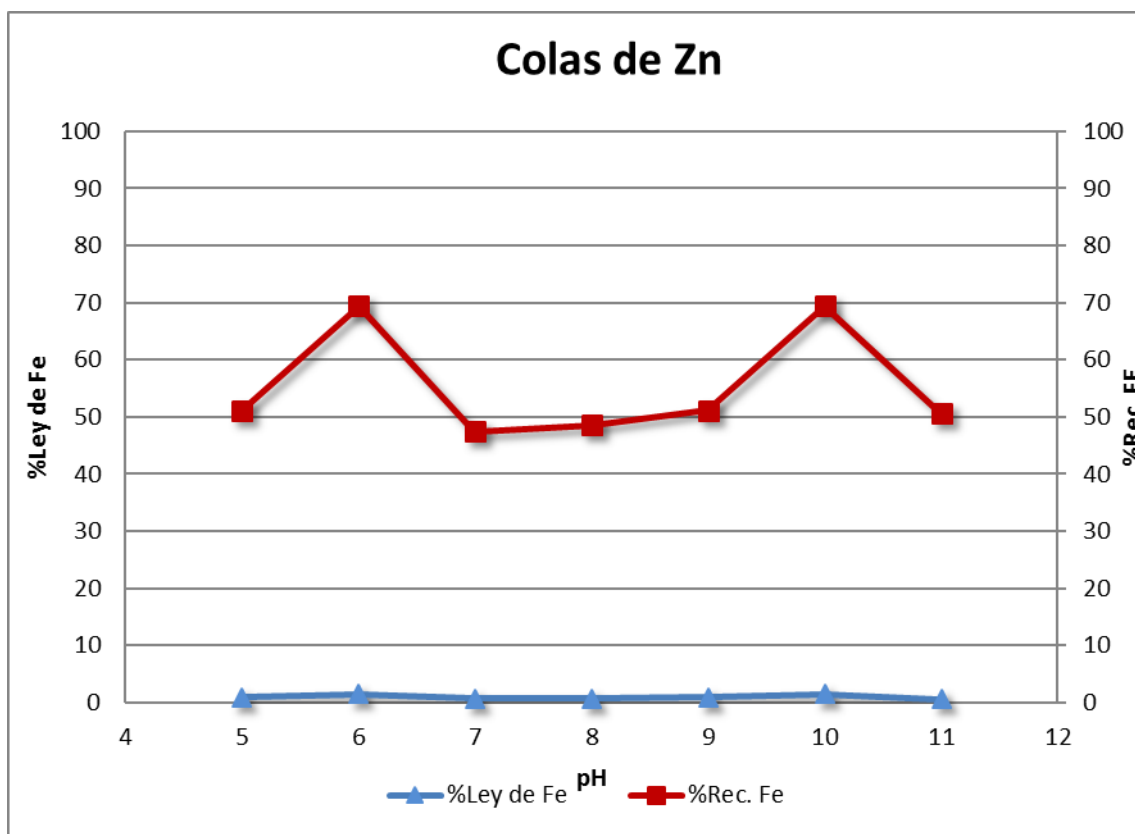


Figura 41. Efecto del pH en la ley y recuperación de FeS_2 en las colas de Zn, en presencia de Quebracho T5 [20 mg/L]

En la figura 41 se muestra el efecto del pH en las colas de Zn en presencia de quebracho T5 a una concentración de 20 mg/L, cuyos valores de % Ley son muy bajos ($1.46 \pm 1\%$) en todo el barrido de pH, por otro lado en el caso del % de Rec. de Fe, las menores recuperaciones se dan en los pH 5, 7, 8, 9 y 11 con un 48 a 51 %, teniendo las máximas en pH 6 y 11 con un 69.3%.

En esta etapa secundaria se puede concluir que la mejor condición para tener una buena recuperación se obtiene a pH 6 con 69.3%.



Conclusiones:

Con base a las pruebas electroquímicas efectuadas se puede afirmar que el mineral de hierro mantiene una tendencia a no flotar o poca flotabilidad en el intervalo de pH 6-7 con un Potencial Zeta con valores promedio entre -27.5 mV.

A mayor concentración de Quebracho T5 se obtiene una mayor recuperación de Fe, siendo una buena condición [20mg/L], así como presentando una adsorción física y manteniendo una condición de estabilidad la pirita en presencia del T5.

El %Ley del Fe es independiente del pH.

Las mejores condiciones de depresión del hierro en el circuito primario de zinc se obtuvieron en el intervalo de pH 6-8, a una concentración de Quebracho T5 [20mg/L] aun en presencia del activador CuSO_4 y colector XEK.

La técnica de Potencial Zeta ayuda a la predicción de la flotabilidad de los minerales, así se demuestra que la flotación del mineral (Pirita), con condiciones del T5 a una concentración de 20mg/L, además con la ayuda del colector XEK y activador CuSO_4 , corroborando, que el quebracho ayuda a deprimir al mineral.



BI **B**LI OGRAFÍA.

1. Cámara Minera de México, "Informe anual 2016"

<https://www.camimex.org.mx/index.php/secciones1/publicaciones/informe-anual/informe-anual-2016/> (consultado el 7 de diciembre de 2016).

2. Sarquís Pedro, Ciribeni Víctor, González Mercedes, "Depresión selectiva de sulfuros usando extractos naturales", Instituto de Investigaciones Mineras, Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Congreso SAM/CONAMET 2007.

3. Ciribeni Víctor, Sarquís Pedro y González Mercedes, "Estudio del efecto depresor de reactivos orgánicos naturales en la flotación de sulfuros", Instituto de Investigaciones Mineras. Universidad Nacional de San Juan, Argentina, Congreso CONAMET/SAM Materia 2002.

4. Wills Barry A., "Mineral processing technology", An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery, 7a. Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK., 2006.

5. Kelly G. Errol and Spottiswood J. David, "Introduction to mineral processing", 1ª. Edition, John Wiley & Sons Inc, New York, USA, 1982.



6. Fuerstenau C. Maurice and Kenneth N. Han, "Principles of mineral processing", Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME), Littleton, Colorado, USA, 2003.

7. Komar Kawatra S., "Advances in comminution", Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME), Littleton, Colorado. USA, 2006.

8. Gutiérrez Ramírez J., "Estudio de la concentración por flotación en espuma de una mena compleja de Pb-Zn", tesis Ingeniero Químico Metalúrgico, Facultad de Química, UNAM, 2006.

9. Arbiter Nathaniel, Fuerstenau C. Maurice, Kuhn Martin C., and Miller Jan D., "Flotation. In: SME mineral processing handbook", Edited by N.L. Weiss, AIME, Vol. 1, New York, USA, 1985.

10. Parekh B. K. and Miller Jan D., "Advances in flotation technology", Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME), Littleton, Colorado, USA, 1999.

11. Somasundaran P. and Sivakumar A., "Advances in understanding flotation mechanisms" Minerals and Metallurgical Processing, AIME Transactions, Part B Minerals & Metallurgical Processing, Volume 284, 1988.



12. Ramachandra Rao S., "Surface chemistry of froth flotation" 2^a Edition, Volume 1, Fundamentals, Plenum Publishers, New York, USA, 1982.

13. Wilson Adamson A. and Petry Gast A., "Physical chemistry of surfaces", 6th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1997.

14. Mantilla César, Pedraza Julio y Laverde Dionisio, "Utilización de estudios de Potencial Zeta en el desarrollo de un proceso alternativo de flotación de mineral feldespático" Universidad Industrial de Santander, Dyna, Vol. 75, Nro. 154, Medellín, Colombia, Marzo de 2008.

15. Hunter R. J., "Zeta potential in colloid science". Principles and applications. By Robert J Hunter, Academic Press, London, England, 1981.

16. Vidyadhar A. and Hanumantha R., "Mixed cationic/anionic collectors in the flotation separation of albite from greek stefania feldspar ore", International Journal of Mineral Processing, 2000.

17. Haslam E., "Plant polyphenols". Chemistry and significance of condensed tannins, Ed. by Hemingway R.W. and Karchesy J.J., Plenum Press, Cambridge University Press, Cambridge, UK., 1989.



18. Salgado López J. M., "Flotación y depresión selectiva de esfalerita en el sistema KEX-CuSO₄-ZnSO₄-NaCN-ZnS", tesis Ingeniero Químico Metalúrgico, Facultad de Química, UNAM, 1999.

19. Zeta-Meter, Inc. Potencial Zeta: Un Curso Completo en 5 Minutos [en línea]. Virginia, Staunton: Zeta-Meter, Inc., [Consulta: 15 de noviembre del 2014]. Disponible en: <<http://www.zeta-meter.com/5min.pdf>>

20. Planta de Beneficio [en línea] consultada el 20 de noviembre del 2016. Disponible en:

https://www.google.com.mx/search?q=planta+de+beneficio+de+mine+rales&biw=1366&bih=627&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKewjC4sWWt_fQAhUEJiYKHyo1B5wQ_AUIBigB#imgrc=7nfiEHor3M2rgM%3A

21. Molinos de bolas [en línea] consultada el 20 de noviembre del 2016. Disponible en:

https://www.google.com.mx/search?q=molino+de+bolas&biw=1366&bih=627&source=Inms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKewim_P39s_fQAhWBdSYKHcl4Bm0Q_AUIBigB#imgrc=ewqpZ7SnnZL6WM%3A

22. Corporativo química global S.A de C.V. [en línea] consultada el 20 de noviembre del 2016. Disponible en:

https://www.google.com.mx/search?q=separacion+de+minerales+por+flotacion&biw=1366&bih=676&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKewjDk_KpuPfQAhVFRIyKHePwBYQQ_AUIBigB#imgrc=yP1BJuoYmnL4sM%3A



23. Procesos BIO [en línea] consultada el 20 de noviembre del 2016.

Disponible en:

https://www.google.com.mx/search?q=minerales+hidrofobicos&biw=1366&bih=676&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj108ffuvfQAhXGNiYKHVpIBbUQ_AUIBigB&dpr=1#q=minerales+hidrofobicos&tbm=isch&tbs=ring:CZm26Ccam_1MxIjhxhDaMZRMCLRguGTu_1FiQbz9B1W-fwhk8FRpvyQQLAHPNJ-yitgRjGkOhYakknUsAdG6LLZCD1ioSCXGENoxIEwItEe4Nflqt6QisKhIJGC4ZO78WJBsRPlajo-O1g1EqEgnO30HVb5_1CGRFCDQy-27bCYyoSCTwVGm_1JBAsAERnDWdj_1Pc7HKhIJc80n7KK2BGMR19I83fEZdq4qEgkaQ6FhqSSdSxF_1X_13PPghQoSoSCQB0bostkIPWEVW44dejix2I&imgsrc=mbboJxqb8zGZOM%3A

24. es.slideshare.net [en línea] consultada el 20 de noviembre del 2016. Disponible en:

<http://es.slideshare.net/VictorAlvarez2/flotacion>

25. ALIBABA.COM [en línea] consultada el 28 de enero del 2016.

Disponible en:

https://www.alibaba.com/product-detail/GMG-20-300Tons-per-hour-Spiral_2008750633.html

26. METSO molino SAG [en línea] consultada el 28 de enero del 2017.

Disponible en:

<http://www.metso.com/es/productos/molienda/molinos-AG-SAG-sin/>



27. Particle sciences [en línea]. Consulta 28 de febrero del 2017.
Disponible en:

<http://www.particlesciences.com/news/technical-briefs/2010/surfactants.html>

28. "Basic Concepts: Rule of Thumb". En: Zeta-Meyer. Inc. Zeta-Meter System 3.0 Operating Instructions. Tercera revision. Virginia, Staunton. ZETA UI, 1992, p.12.