



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

T E S I S

“Estudio del efecto de la concentración del Ca(OH)_2 en la depresión de la Pirita sobre la flotación de menas de pórfidos de cobre y su relación con el Potencial de Reposo y el Potencial de Flotación”

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA:

EDUARDO SALINAS MORALES

DIRECTOR DE TESIS:

M. EN C. ANTONIO HUERTA Cerdán

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Antonio Huerta Cerdán

VOCAL: Profesor: Faustino Juárez Sánchez

SECRETARIO: Profesor: Juan Manuel De La Rosa Canales

1er. SUPLENTE: Profesor: Andrés Vela Avitua

2° SUPLENTE: Profesor: Ilse Irene Hernández Mendoza

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio 006 (Procesado de Minerales.) Departamento de Ingeniería Metalúrgica,
Edificio D, Facultad de Química, Ciudad Universitaria, UNAM.

Asesor del tema:

M. en C. Antonio Huerta Cerdán

Sustentante:

Eduardo Salinas Morales

Tabla de contenido

RESÚMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	7
HIPOTESIS.....	8
OBJETIVOS.....	8
CAPITULO 1.....	9
1.1 MARCO TEÓRICO.....	9
1.1.1 FLOTACIÓN DE MINERALES.....	9
1.1.2 CALCOPIRITA Y PIRITA EN FLOTACIÓN.....	11
1.1.3 REACTIVOS DE FLOTACIÓN.....	11
1.1.4 CONDICIONES DE FLOTACIÓN.....	14
1.1.5 POTENCIAL QUÍMICO EN PROCESOS DE FLOTACIÓN DE MINERALES DE PIRITA Y CALCOPIRITA.....	15
CAPITULO 2.....	20
2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	20
2.1.1 DIAGRAMA DE FLUJO.....	20
2.2 PREPARACIÓN DE ELECTRODOS DE TRABAJO.....	21
2.3 CARACTERIZACIÓN Y PREPARACIÓN DE MINERAL PARA PRUEBAS DE FLOTACIÓN.....	22
2.4 MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE REPOSO EN FUNCIÓN DEL pH A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE XEK Y T5.....	26
2.5 MEDICION DE POTENCIALES DE FLOTACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS MINERAL-REACTIVO A PARTIR DE UNA FLOTACIÓN PRIMARIA.....	29
2.5.1 CONDICIONES DE FLOTACIÓN.....	30
2.6 ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.....	32
CAPITULO 3.....	33
3.1 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	33
3.2 RESULTADOS DE PREPARACIÓN DE ELECTRODOS DE TRABAJO.....	33
3.3 RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN Y PREPARACIÓN DE MINERAL PARA PRUEBAS DE FLOTACIÓN.....	34
3.4 RESULTADOS DE POTENCIAL DE REPOSO EN FUNCIÓN DEL pH A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE XEK Y T5.....	37
3.4.1 RESULTADOS DE CONCENTRACIÓN DE $\text{Ca}(\text{OH})_2$ REQUERIDO PARA AJUSTE DE pH.....	37
3.4.2 RESULTADOS DE POTENCIAL DE REPOSO EN AUSENCIA DE REACTIVOS DEPRESOR T5 Y XEK EN FUNCIÓN DEL pH.....	38

3.4.3	RESULTADOS DE POTENCIAL DE REPOSO EN AUSENCIA DE REACTIVOS DEPRESOR T5 Y Y XEK EN FUNCIÓN DEL pH.....	39
3.4.4	RESULTADOS DE POTENCIAL DE REPOSO EN AUSENCIA DE XEK Y PRESENCIA DE DEPRESOR T5 EN FUNCIÓN DEL pH.....	40
3.4.5	RESULTADOS DE POTENCIAL DE REPOSO EN PRESENCIA DE COLECTOR XEK Y DEPRESOR T5 EN FUNCIÓN DEL pH.....	42
3.5	RESULTADOS DE POTENCIALES DE FLOTACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS MINERAL-REACTIVO A PARTIR DE UNA FLOTACIÓN PRIMARIA	44
3.5.1	RESULTADOS DE POTENCIAL DE FLOTACIÓN DE PIRITA Y CALCOPIRITA	44
3.5.2	RESULTADOS DE POTENCIAL DE FLOTACIÓN, % LEY Y % DE RECUPERACIÓN DE CALCOPIRITA EN CONCENTRADOS	46
3.5.3	RESULTADOS DE POTENCIAL DE FLOTACIÓN, % LEY Y % DE RECUPERACIÓN DE PIRITA EN CONCENTRADOS.....	48
3.5.4	RESULTADOS DE POTENCIAL DE FLOTACIÓN, % LEY Y % DE RECUPERACIÓN DE CALCOPIRITA EN COLAS.....	50
3.5.5	RESULTADOS DE POTENCIAL DE FLOTACIÓN, % LEY Y % DE RECUPERACIÓN DE PIRITA EN COLAS	52
3.6	RESULTADOS DE ABSORCIÓN ATÓMICA.....	54
CAPITULO 4.....		55
4.1	CONCLUSIONES	55
BIBLIOGRAFÍA.....		56
ANEXO 1. ECUACIONES PARA CALCULOS GENERALES.....		58
ANEXO 2. CALCULOS GENERALES		62
ANEXO 3. CLASIFICACIÓN DE DUREZA DE MINERALES.....		66
ANEXO 4. LECTURAS DE POTENCIAL DE REPOSO Y POTENCIAL DE FLOTACIÓN.....		67
	LECTURAS DE POTENCIAL DE REPOSO	67
	LECTURAS DE POTENCIAL DE FLOTACIÓN.....	70
ANEXO 5. BALANCES METALÚRGICOS.....		71
ANEXO 6. ANALISIS ESTEQUIOMÉTRICO DE HIERRO PRESENTE EN CONCENTRADOS DE FLOTACIÓN.....		76

RESÚMEN

Los procesos de flotación de menas de cobre son cada vez de mayor reto y más interesantes dadas las condiciones de bajo grado, inclusiones, textura y presencia de impurezas como la pirita, las cuales dificultan la operación del proceso, repercutiendo en productos con menores leyes y recuperaciones.

Se tiene, por tanto, gran interés en realizar estudios [5], [10], [11] enfocados a la mejora en el control de la flotación en cuanto a la participación de agentes depresores de minerales de hierro. Los estudios relacionados con la variación del potencial originado por las reacciones redox intrínsecas en los sistemas de flotación, hablan de su aplicación en el uso de reactivos depresores empleados en este proceso de concentración.

Dadas las características de las reacciones que ocurren en las interfaces mineral/solución, es posible entonces operar con potenciales denominados de Flotación, donde se asiste al control del potencial para ajustar los parámetros de operación de la concentración por flotación.

Así por ejemplo, las reacciones del tipo redox de los sulfuros minerales como es el caso de la Calcopirita y la Pirita en la pulpa estudiadas, pueden ajustarse también por reacciones redox entre dos o más sólidos minerales diferentes, uno de ellos con el mayor potencial de reposo como cátodo y el otro con el potencial de reposo más bajo, como ánodo. De aquí que es importante estudiar y analizar los sistemas de Sulfuros de Cobre (CuFeS_2) y Hierro (FeS_2), con el objeto de mejorar las condiciones de flotación de los valores de Cu y la correspondiente depresión de Fe.

Las pruebas y resultados obtenidos mostrarán la interacción de estos reactivos con Hidróxido de Calcio (Ca(OH)_2) presente en un sistema de Sulfuros de Cobre y Sulfuros de Hierro al ser empleado como modificador de pH en valores de 10, 10.5, 11, 11.5 y 12, con el objeto de mejorar las condiciones de flotación de los valores de Sulfuros de Cobre de los concentrados y la correspondiente depresión de los Sulfuros de Hierro de un mineral de Calcopirita de la empresa Grupo México, planta Buenavista del Cobre, Cananea Sonora.

En el siguiente estudio se emplean reactivos de bajo impacto ambiental así como de alto rango de operabilidad a nivel industrial. Como colector y depresor se tiene Xantato Etílico de Potasio (XEK) y Schinopsis Balansae (T5) correspondientemente.

Las pruebas constan de mediciones de Potencial de Reposo de electrodos de Sulfuro de Cobre y de Hierro para conocer el comportamiento electroquímico de los minerales ante la presencia de los reactivos, además de flotaciones primarias de un mineral de Sulfuro de Hierro y Cobre para conocer el Potencial de Flotación, así como las condiciones de operación que permitan obtener mejor calidad en la selectividad de Pirita y Calcopirita.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los procesos de flotación de minerales han sido sometidos a los más diversos estudios de investigación y desarrollo de innovación tecnológica, sin embargo estos estudios, en su gran mayoría, se han enfocado a optimizar recuperaciones, a mejorar las condiciones hidrodinámicas de contacto partícula-burbuja y al desarrollo de sistemas de control cada vez más sofisticados, pero aún basados en los conceptos de proceso esencialmente clásicos.

En la actualidad se intenta aprovechar la naturaleza electroquímica de la flotación para incrementar su eficiencia metalúrgica. Aunque los resultados obtenidos son promisorios, aún no se dispone de un patrón sistemático de comportamiento que permita enlazar la electroquímica con la flotación, probablemente porque existen otras variables que interactúan con las anteriores mediante mecanismos no establecidos hasta hoy en día.

Este proceso electroquímico, determinado por la interacción electroquímica en la superficie del mineral, depende de la composición y morfología de este. La modificación superficial ocurre debido a la formación de una composición heterogénea y a una morfología que depende de muchos factores, entre ellos, el potencial aplicado y el pH.

Son pocos los estudios realizados sobre la base electroquímica de la flotación y la influencia sobre la flotabilidad de las diferentes especies que componen la pulpa. [1] Al tener un mineral inmerso en una solución aireada se generan reacciones químicas y electroquímicas que generan cargas superficiales en las partículas disueltas en la pulpa. Lo anterior es relevante en el caso de minerales sulfurados que son inestables en medios acuosos con presencia de oxígeno disuelto. [9]

Está bien establecido que el desarrollo de hidrofobicidad en los minerales de Sulfuro surge de un proceso anódico estimulado por el colector que se junta con un proceso catódico como la reducción de oxígeno disuelto. Dado que las reacciones anódicas dan lugar al carácter hidrofóbico de la superficie del mineral, existe una clara relación entre la recuperación y el Potencial de Flotación. [5]

HIPÓTESIS

Si se conocen la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que modifica el pH de flotación y a su vez la calidad de Fe deprimido, con su correspondiente valor de Potencial de Flotación y de Reposo en presencia del colector Xantato Etílico de Potasio (XEX) y depresor Schinopsis Balansae (T5), podrá controlarse de manera más eficiente el proceso selectivo de menas $\text{CuFeS}_2\text{-FeS}_2$.

OBJETIVOS

- a) Analizar los efectos de concentración del reactivo depresor T5 en presencia de colector XEK en función del pH modificado por cambios en la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en minerales de CuFeS_2 y FeS_2 a través de la medición de los Potenciales de Reposo y Potencial de Flotación.
- b) Evaluar flotaciones de los CuFeS_2 y FeS_2 , por medio de una celda de flotación Denver Lab 12 con la correspondiente comparación de los Potenciales de Reposo y Potencial de Flotación.
- c) Obtener las condiciones de máximo grado y recuperación en flotación primaria del circuito de flotación de Cu en presencia de los reactivos XEK y T5.

CAPITULO 1

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 FLOTACIÓN DE MINERALES

La flotación es un proceso donde se tiene por objeto la separación de especies minerales a partir de una dilución de los mismos, aprovechando sus propiedades de afinidad (hidrofílica) o repulsión (hidrofóbica) por el agua. Las especies valiosas o útiles constituyen una fracción menor, mientras que las gangas o especies que no tienen valor en el proceso constituyen la mayor parte de la composición química del mineral, por ejemplo, 8 toneladas de concentrado por 92 de materiales estériles.

El carácter hidrofílico o de afinidad hace que estas partículas se mojen y permanezcan en suspensión en la pulpa para finalmente hundirse.

El carácter hidrofóbico o de repulsión evita el mojado de las partículas minerales que pueden adherirse a las burbujas y ascender.

Algunos minerales presentan estas propiedades hidrofóbicas o hidrofílicas de forma natural al estar disueltas, pero estas pueden mejorarse con la adición de reactivos de flotación. [6]

El mecanismo esencial de la flotación comprende la anexión de partículas minerales en un medio acuoso donde se inyectan burbujas de aire, de tal modo que dichas partículas son transportadas a la superficie por medio de las burbujas donde pueden ser removidas

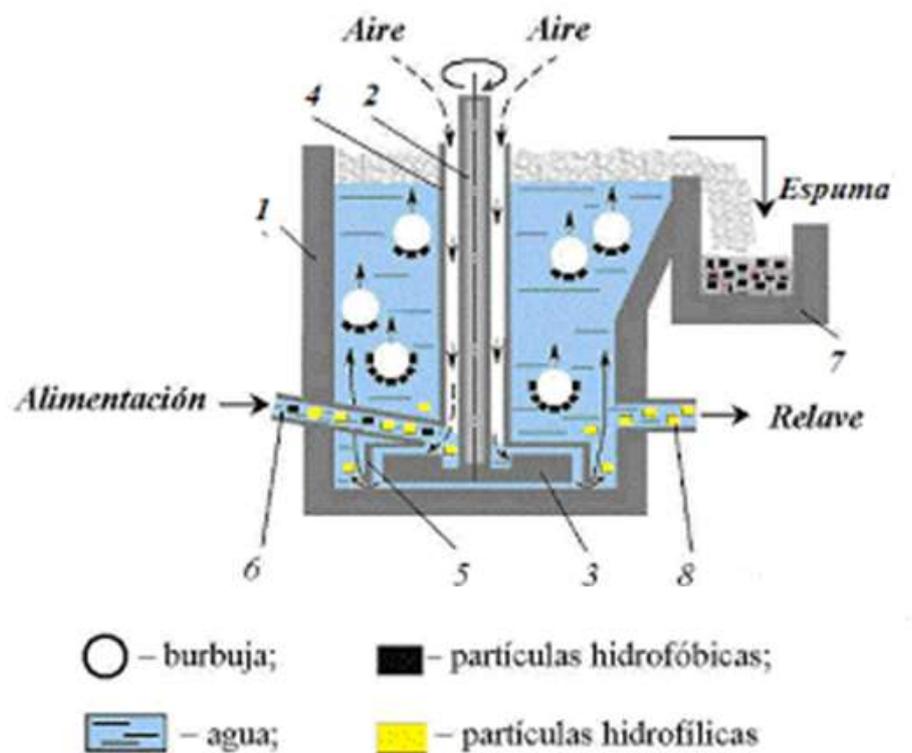
Este proceso abarca diferentes etapas donde primero, el mineral es molido hasta un tamaño previamente analizado (tamaño de liberación), donde posteriormente se agrega a agua para formar una pulpa. La pulpa que se forma, puede alcanzar un porcentaje de sólidos en peso entre 15% y 45%.

Posteriormente se adicionan pequeñas cantidades de reactivos, que modifican la superficie de los minerales, entre los cuales se encuentra el reactivo colector, específicamente seleccionado, para que actúe sobre el mineral que se desea separar por flotación. Este reactivo cubre la superficie del mineral haciéndola aerofílica e hidrofóbica. Luego se adiciona otro reactivo, que ayuda a estabilizar la espuma para después tener la pulpa químicamente tratada en un depósito apropiado, la cual entra en contacto con aire introducido por agitación o por la inyección directa a baja presión.

Así, el mineral hidrofóbico, como parte de la espuma, sube a la superficie de donde es rebalsado. La pulpa empobrecida, pasa a través de una serie de tanques y celdas, con el objetivo de proveer tiempo y oportunidad a las partículas de mineral para contactar burbujas de aire y pueden ser recuperadas en la espuma.

En conjunto, estas condiciones hacen posible la separación de sulfuros de interés y por lo tanto, podemos señalar que la flotación es un macro fenómeno de hidrofobicidad y de hidrofilidad que ocurre en la superficie de los minerales a recuperar. [13]

En la Figura 1 se tiene la representación de la celda de flotación y sus características principales como lo son la agitación, la inyección de aire, las colas deprimidas y los concentrados flotados.



1 – celda, 2 – soporte, 3 – rotor, 4 – entrada del aire, 5 – estator, 6 – tubería de alimentación, 7 – canaleta, 8 – tubería de relave

FIGURA 1. Representación de una celda de flotación. [2]

1.1.2 CALCOPIRITA Y PIRITA EN FLOTACIÓN

La Calcopirita (CuFeS_2) es uno de los principales minerales de Sulfuro de Cobre a nivel mundial y representa del 70 al 80 % de las reservas de Cobre. Actualmente, las plantas de flotación de Cobre enfrentan desafíos y el más preocupante es la disminución de la ley de cabeza de Cobre en contraste con la creciente demanda de Cobre. Por lo tanto, para mantener los rendimientos de flotación requeridos, las plantas concentradoras de Cobre se ven sometidas a presiones significativas. [8]

La Pirita (FeS_2) es el sulfuro metálico más abundante a nivel mundial, y es especialmente encontrado con minerales sulfurosos valiosos como Calcopirita, Galena y Esfalerita.

La Pirita se considera un mineral de ganga que puede disminuir el rendimiento de otros minerales valiosos de sulfuros metálicos en la flotación, que es lo que sucede con la Calcopirita. En las últimas décadas se han desarrollado varios métodos para deprimir selectivamente la Pirita en la flotación de Calcopirita, en donde se incluyen:

1. El aumento del pH de la pulpa.
2. La adición de depresores inorgánicos específicos.
3. La selección de medios de molienda.

Sin embargo, la cantidad significativa de Pirita encontrada en la alimentación de flotación dificulta de gran manera la flotación de Cobre independientemente del método de depresión de Pirita aplicado.

El deterioro de la flotación de Calcopirita y la inestabilidad del rendimiento de la flotación que aumentan las dificultades del proceso de selectividad son las observaciones generales encontradas hoy en día sobre los impactos de la alta proporción de Pirita en las alimentaciones. [8]

1.1.3 REACTIVOS DE FLOTACIÓN

El cambio de grado de hidrofobicidad en la superficie de las partículas minerales depende, entre otros factores, del tratamiento con reactivos que favorecen la creación de estas condiciones en la pulpa.

Los reactivos de flotación pueden ser de origen orgánico e inorgánico y pueden estar en la pulpa en forma molecular o iónica. El orden y la forma de adición de los reactivos dependen del tipo de adsorción en la superficie de los minerales y del mecanismo de influencia a los componentes del sistema de flotación.

Los reactivos de flotación se dividen dependiendo el lugar de concentración y del mecanismo de influencia, existen reactivos que se concentran en el límite de fases sólido y líquido los llamados hidrofobizantes (colectores), la mayoría de los activadores y los depresores. También se encuentran los reactivos que se concentran en el límite de fases líquido y gas que en general son los espumantes y algunos hidrofobizantes. Por último y no menos importantes los reguladores del medio o modificantes de pH que son reactivos que se concentran en la fase líquida. [2]

1.1.3.1 COLECTORES

La función principal de estos reactivos es proporcionar propiedades hidrofóbicas a las superficies de los minerales.

Los colectores son empleados para crear condiciones favorables de adherencia mineral-burbuja y son usualmente de tipo orgánico, bastante diversos en composición y estructura cuya principal función es la hidrofobización selectiva de la superficie de las partículas de ciertos minerales. Los colectores disminuyen la humectación de las partículas del mineral y aumentan su capacidad de adherencia a las burbujas. [14]. Se tiene una amplia gama de reactivos colectores tales como los de tipo xantatos, ditiofosfatos, mercaptobezotiazol, etc.

1.1.3.2 ESPUMANTES

Sirven para la formación de una espuma estable, de tamaño de burbujas apropiado para arrastrar los minerales al concentrado.

Los agentes espumantes son sustancias tensoactivas que pueden absorberse en la superficie de separación agua-burbujas. Su acción eleva la resistencia de las burbujas de aire en la fase líquida de la pulpa de flotación y favorece su conservación en estado disperso, aumentando de esta forma la superficie de adherencia para las partículas de

mineral flotante. La eficacia del empleo de agentes espumantes depende en gran parte del pH de la pulpa ya que existen espumantes de diferente carácter químico entre los que se encuentran:

-Espumantes ácidos: Reactivos fenólicos, cresol, xilenol y los alquilaril sulfonatos (detergentes y azolatos).

-Espumantes alcalinos: Poseen una elevada propiedad de generación de espuma a valores de pH mayor a 7, como los son las bases de piridinas pesadas

-Espumantes neutros: Son alcoholes que contienen terpinol, alcoholes alifáticos o alcoholes que contienen sustancias con enlaces de éter, por ejemplo el Metil Isobutil Carbinol. [15]

El espumante permite que, dentro de la celda, por medio de la inducción de aire, se forme espuma ayudando a que el mineral de valor comercial pueda ser flotado hasta la superficie.

1.1.3.3 MODIFICADORES

Son sustancias empleadas para el aumento de la selectividad de sujeción de los colectores sobre la superficie de determinados minerales, es decir, sirven para regular las condiciones de funcionamiento de los colectores y aumentar su sensibilidad y selectividad.

Los agentes modificadores se clasifican de acuerdo a su función en:

Activadores. - Son reactivos que forman condiciones favorables para que los colectores se adhieran a la superficie de los minerales. Algunos de ellos son el Sulfato de cobre, Acetato de plomo, Hidrosulfuro de sodio, etc.

Depresores.- Los reactivos depresores son aquellos que se usan para prevenir la hidrofobización de los minerales. Son usados para aumentar la selectividad de flotación durante la separación de minerales que tienen propiedades hidrofílicas similares. Tal es el caso de Cianuro de sodio, Ferricianuro de sodio, Sulfato de Zinc.

Reguladores del medio.- Sustancias que regulan el pH del medio y que crean las condiciones óptimas para la interacción de los reactivos de flotación con la superficie de

los minerales. [2] Dentro de las celdas se debe manejar un pH balanceado, es aquí donde actúan los modificantes. Habitualmente se ocupa Oxido de Calcio (CaO), Hidróxido de Sodio (NaOH), o Hidróxido de Calcio (Ca(OH)₂) como reguladores de pH.

1.1.4 CONDICIONES DE FLOTACIÓN

1.1.4.1 PULPA

Es una mezcla de mineral molido en agua, y constituye el elemento básico de la flotación ya que contiene todos los elementos químicos que componen el mineral. La pulpa debe reunir ciertas condiciones de concentración y tamaño de partícula.

El intervalo de concentración abarca generalmente de 15-45% de sólidos en peso, además debe estar debidamente molido a un tamaño no mayor de la malla #48 mallas (0.3 mm), ni menor a la malla #270 (0.053mm), con el objeto de recuperar de una manera efectiva las partículas de los sulfuros valiosos (esto depende básicamente de la mineralogía del tipo de mineral y de su tamaño de liberación).

Cuando la pulpa contiene partículas gruesas (mayores a malla #48 o 0.42 mm), debido a una mala molienda, estas partículas tienden a sedimentarse en el fondo de las celdas de flotación y pueden llegar a forzar el impulsor de la celda, atorar la tubería y causar más problemas en el proceso (rebasarían los canales, se atorarían las bombas, etc.) Si la pulpa contiene partículas muy finas, por ejemplo, menores a malla #270 (53µm), la recuperación de los sulfuros valiosos no va ser efectiva ya que se perderían en forma de lamas. [6]

1.1.4.2 AIRE Y VELOCIDAD DE AGITACIÓN

El aire es parte fundamental en el proceso de flotación selectiva, éste ayudará a agitar la pulpa, generando las burbujas las cuales transportan los sulfuros valiosos. El conjunto de burbujas formará la espuma que dará paso a la recuperación de los elementos de interés.

Estas variables son importantes debido a que de ellas dependerá la turbulencia en el medio, la cual influye directamente a la generación de espuma y por ende en la precipitación o flotación del sulfuro de interés.

El aire se obtiene a través de la inyección de éste por medio de las revoluciones de giro por minuto que tenga la propela, así como por ventiladores que ingresan a baja presión ($2-6\text{lb/pulg}^2=2-6\text{PSI}$) al interior de la celda de flotación.

No debe utilizarse exceso de agitación ya que provoca que la espuma se reviente antes de rebosar por los labios de la celda o salga conjuntamente con la pulpa, llevándose consigo la ganga. La velocidad de agitación será limitada por las propiedades fisicoquímicas que ofrezca el espumante a la pulpa ya que de éste depende la ruptura de la burbuja en la espuma. Cuando se usan pocas revoluciones y bajo flujo de inyección de aire, la espuma que se forma no es suficiente para poder recuperar los elementos de interés y ésta se pierde en el relave general.

El correcto control de aire y la velocidad de agitación adecuada nos darán siempre la espuma adecuada para la mejor eficiencia del sistema. [6]

1.1.5 POTENCIAL QUÍMICO EN PROCESOS DE FLOTACIÓN DE MINERALES DE PIRITA Y CALCOPIRITA

Se ha estudiado el efecto de la Pirita en la flotación de la Calcopirita, donde se ha propuesto un modelo de interacción galvánica para describir la interacción entre ambos minerales. Cuando la Calcopirita y la Pirita están presentes en la pulpa y entran en contacto, se formará un par galvánico de Calcopirita-Pirita debido a la diferencia de potencial entre estos dos minerales.

La Calcopirita con un Potencial de Reposo más bajo actúa como ánodo, mientras que la Pirita con un Potencial de Reposo más alto se convierte en cátodo. En este caso, se potencia la oxidación de la Calcopirita, lo que lleva a la producción de especies hidrófilas como el Hidróxido de Cobre ($\text{Cu}(\text{OH})_2$), Hidróxido Ferroso ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) e Hidróxido Férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) en la superficie de la Calcopirita, lo que reduce su flotabilidad. Durante la interacción galvánica entre la Calcopirita y la Pirita, la oxidación de la Calcopirita libera iones cúpricos (Cu^{2+}).

Estos iones Cu^{2+} pueden reducirse a iones cuprosos (Cu^+) al reducir el potencial de oxidación con la oxidación de las especies de Azufre de la Pirita, formando especies $[\text{Cu}^+\text{S}^{2-}]$ en la superficie de la Pirita. Este proceso se denomina activación de Cobre en la flotación de Pirita.

Los productos de activación de Cobre pueden interactuar con los colectores de flotación, lo que hace que la superficie de Pirita sea hidrofóbica en una solución alcalina y da como resultado una alta recuperación de Pirita en la flotación. Esta interacción se puede ver ejemplificada en la Figura 2. [8]

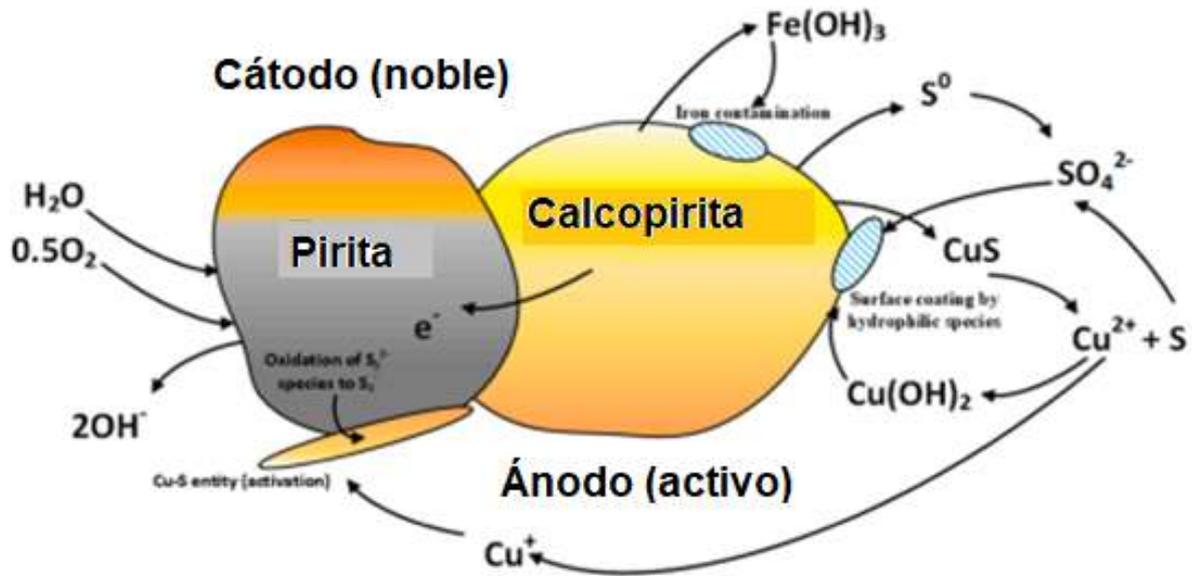


FIGURA 2. Representación esquemática de la interacción galvánica entre la calcopirita y la pirita. [8]

Aunado a esta información, existen diagramas que representan los comportamientos del potencial redox de los minerales en función del pH de trabajo en soluciones acuosas, los llamados diagramas de Pourbaix, los cuales están representados en las Figuras 3 y 4 para la Calcopirita y la Pirita respectivamente, diagramas en escala de Electrodo Normal de Hidrogeno.

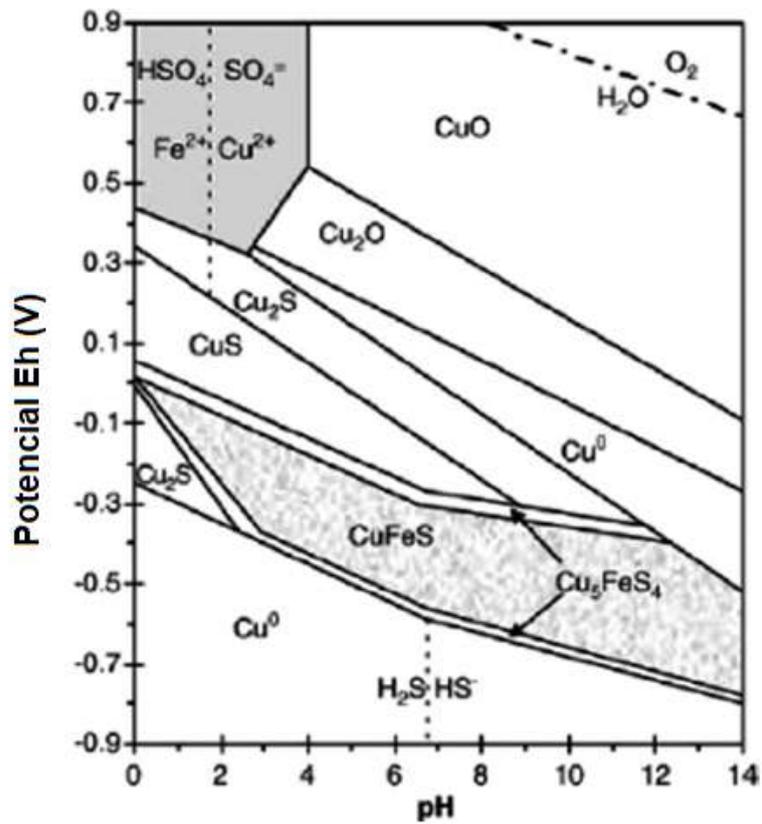


FIGURA 3. Diagrama de Pourbaix de Calcopirita. [10]

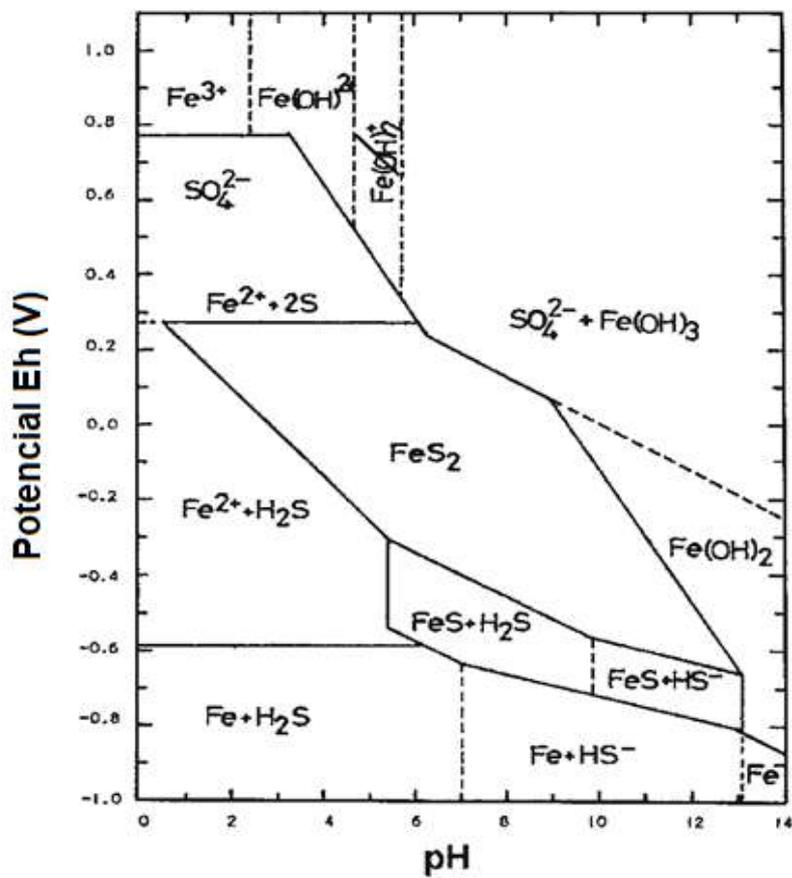


FIGURA 4. Diagrama de Pourbaix de Pirita. [11]

Cuando su superficie no está oxidada, la Calcopirita presenta flotabilidad natural, la cual depende del potencial de oxidación y el pH en la pulpa, tal como se muestra en la Figura 5. La Calcopirita es flotable sin colector en un amplio intervalo de potencial a valores de pH bajos. Con la formación de hidróxidos de Cobre y Hierro sobre la superficie del mineral, al ser especies hidrófilas, disminuye la flotabilidad de Calcopirita a valores de pH alcalinos. [4]

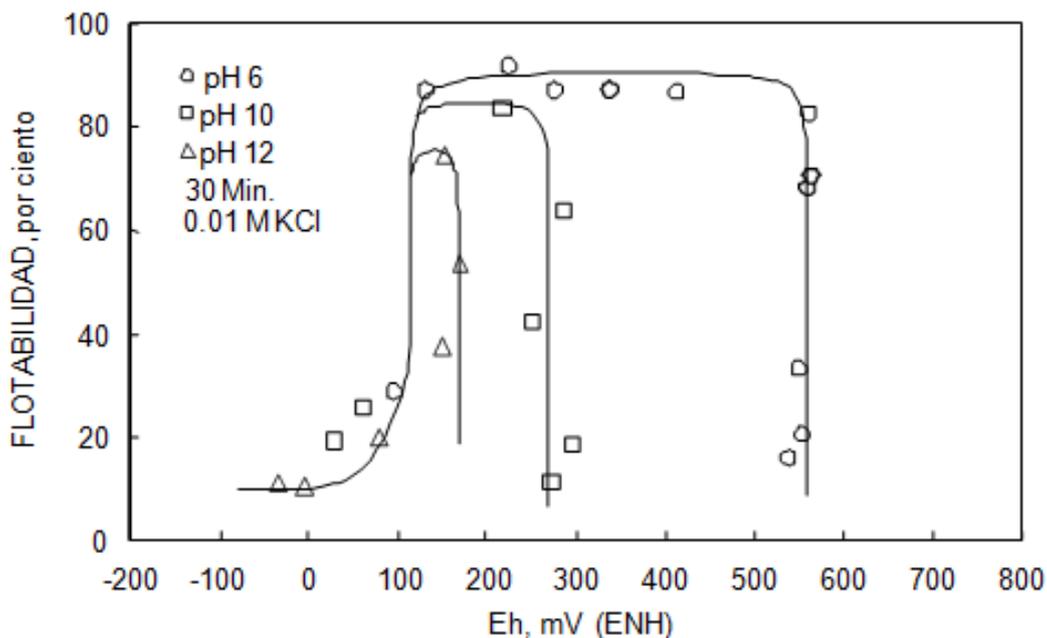


FIGURA 5. Flotabilidad natural de pirita en función del potencial de oxidación a varios valores de pH. [7]

La flotabilidad natural de Calcopirita se debe a la disolución preferencial de Cobre y Hierro, obteniéndose una superficie de Calcopirita rica en sulfuro y deficiente en metal.

Los hidróxidos se forman a partir de la hidrólisis de los iones oxidados Cu(II) y Fe(III) que predominan a altos valores de pH. Estos Hidróxidos de Cobre y Hierro se adhieren en la superficie de Calcopirita rica en sulfuro disminuyendo su hidrofobicidad.

En la Figura 6 se presentan resultados de flotabilidad de Calcopirita en función del pH en presencia de varias concentraciones del colector Xantato Etilico de Potasio. Este colector Xantato flota eficazmente a la Calcopirita a valores de pH menores de 12 lo cual se debe a la formación de Xantato de Cobre y Dixantógeno (Xantato del metal) en la superficie de Calcopirita. A valores de pH mayores de 12, la formación de estas especies hidrofóbicas no es favorable; pero, sí la de las especies hidrofílicas Hidróxido de cobre y de Hierro. [4]

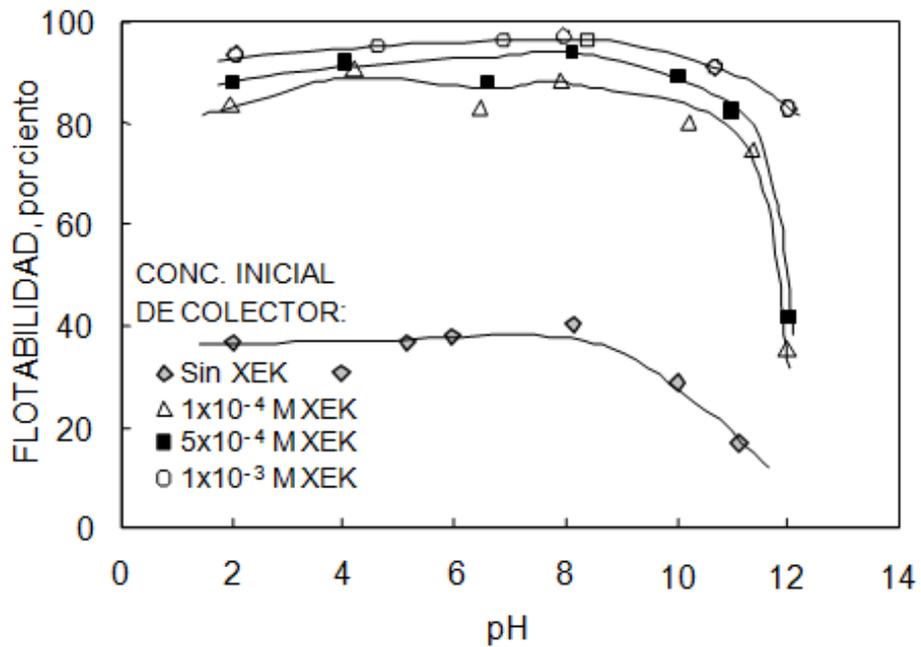


FIGURA 6. Flotabilidad de calcopirita en función del pH a varias concentraciones de colector Xantato Etilico de Potasio. [7]

Los colectores Xantato son muy eficaces para una alta recuperación de Sulfuros de Cobre pero tienen la desventaja de que no son muy selectivos. [4]

Existe poca flotabilidad de Pirita a bajas concentraciones de Xantato y pH de 6 a 10.5, arriba de 11 también existe una alta depresión de Pirita, desafortunadamente casi todos los sulfuros no son recuperados a valores de pH arriba de 11, por lo que la mejor estrategia para no flotar exceso de Pirita radica en la menor dosificación de colector. [14]

CAPITULO 2

2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1.1 DIAGRAMA DE FLUJO

Se realizaron pruebas de flotación a diferentes valores de pH, con la correspondiente medición de los Potenciales de Flotación, bajo diferentes condiciones trabajo, así como la medición del Potencial en Reposo para las diferentes condiciones de flotación efectuadas. Los reactivos empleados en dichas pruebas fueron: como reactivo colector el Xantato Etilico de Potasio [XEK], como depresor Schinopsis Balansae [T5], Hidróxido de Calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ como modificador de pH y como reactivo espumante al Metil Isobutil Carbinol (MIBC).

En la Figura 7 se muestra en forma resumida, el desarrollo experimental que se realizó en este trabajo por medio de un diagrama de flujo.

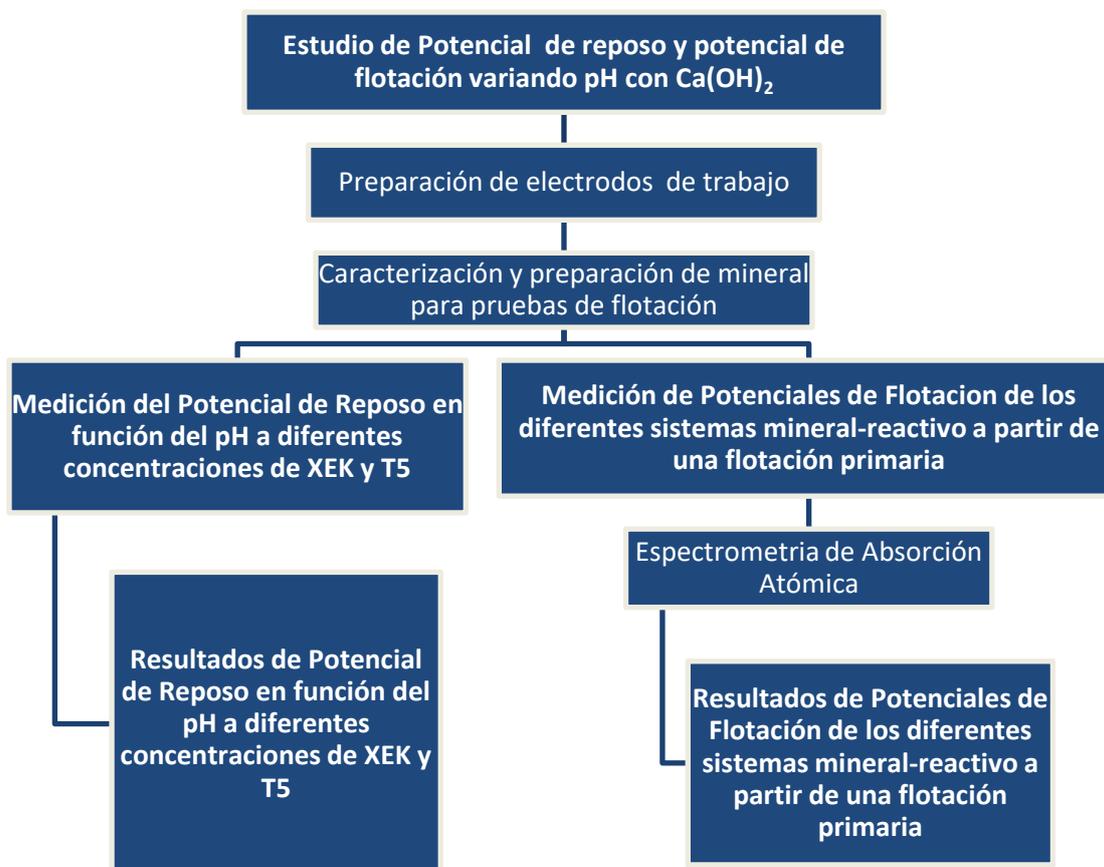


FIGURA 7. Diagrama de flujo del desarrollo experimental.

2.2 PREPARACIÓN DE ELECTRODOS DE TRABAJO

Se cortaron 2 piezas minerales, una de calcopirita y otra de pirita, ambas de alta pureza, en forma de paralelepípedo de 1 cm^3 , a través de una cortadora de disco de diamante de baja velocidad, marca BUEHLER modelo Isomet 1000 representada en la Figura 8, con la finalidad de evitar fracturas al realizar el corte así como tener una área constante en las mediciones.



FIGURA 8. Cortadora de disco de diamante para preparar el electrodo de trabajo.

Posteriormente el soporte de conexión entre el electrodo y el multímetro de alta impedancia se realizó a través de un alambre de Cobre con longitud de 20 cm. al cual se le quitó el recubrimiento aislante de plástico de las puntas, 2 cm. aproximadamente de cada lado, el cual se aplanó con un martillo en uno de los extremos.

Una vez acondicionados los alambres y los cubos de 1 cm^3 , se procedió a montar en resina de colada en frío, uniendo el extremo aplanado con una cara del cubo del mineral para obtener los electrodos, los cuales se pulieron para posteriormente realizar las mediciones de potencial de Calcopirita (Sulfuro de Cobre) y Pirita (Sulfuro de Hierro), figura 18 A) y B) respectivamente, encontradas en los resultados de preparación de electrodos.

2.3 CARACTERIZACIÓN Y PREPARACIÓN DE MINERAL PARA PRUEBAS DE FLOTACIÓN

Para la realización de todo el estudio experimental de flotación, se prepararon 4 kg de mineral, para ello se efectuaron los cálculos de molienda correspondientes para la caracterización y preparación del mineral.

La caracterización y preparación del mineral consistió de a) la realización de un análisis granulométrico de alimentación, b) Reducción de tamaño de partícula a través de una trituración primaria a nivel laboratorio, a tamaños menores 0.75 in (19.05 mm), c) el análisis granulométrico de la muestra triturada, d) la determinación del W_i vía método Directo (Work index) y e) la molienda con la que se determinó el tamaño de liberación y el tiempo óptimo de molienda del mineral, para posteriormente obtener el producto al 80% Ac(-) en el tamaño de liberación así como f) preparación de material molido para las pruebas de flotación.

Para realizar el análisis granulométrico de alimentación del mineral se consideró que la primera criba no retuviera más del 10% de la muestra alimentada, después se seleccionaron las cribas subsecuentes al tamaño de malla con una progresión geométrica de $\sqrt{2}$. Una vez seleccionadas se colocaron en un equipo vibratorio Ro-Tap modelo RX-29 representado en la Figura 9 y se programó por un tiempo de 15 min para hacer una separación selectiva por tamaños de partícula del mineral triturado.



FIGURA 9. Equipo vibratorio para torre de cribas Ro-Tap.

Posteriormente se realizó el registro de los pesos del mineral en cada criba y se obtuvo el análisis granulométrico compuesto por tamaño de abertura de la criba en pulgadas o micrómetros, el porcentaje Retenido (% Ret), el porcentaje Acumulado positivo (%Ac(+)) y el porcentaje Acumulado negativo (%Ac(-)) a partir de las ecuaciones 1, 2 y 3 del Anexo 1.

Para determinar el W_i se procedió a tomar una muestra representativa del mineral por el método de cuarteo, antes de someterse a algún tipo de proceso de conminución (trituración primaria a -3/4 in) se realizó un análisis granulométrico con el que se obtuvo el tamaño de partícula al 80% acumulado negativo de la alimentación (F_{80}) a partir del de los datos registrados en la tabla 3 y su representación gráfica en la Figura 19, donde se extrapolaron los datos trazando una línea recta en 80 % del acumulado negativo e interceptando con la curva generada para obtener el tamaño de partícula.

Después se realizó, bajo el mismo procedimiento, la determinación del tamaño de partícula al 80% acumulado negativo del producto (P_{80}) a partir de la representación gráfica en la Figura 20, del análisis granulométrico del producto de trituración mostrado en la tabla 4.

Al momento del proceso de trituración se registraron en la tabla 5 los valores de trabajo de desarrollados por la trituradora de quijadas (Figura 10).



FIGURA 10. Trituradora de quijadas trifásica.

Para los cálculos del W_i se utilizaron los parámetros de trabajo de la trituradora de quijadas Denver registrados en la Tabla 5 y los valores de F_{80} y P_{80} obtenidos con anterioridad, así como las expresiones de potencia, capacidad de trituración y de consumo de energía, ecuaciones 4, 5, 6, 7 y 8 que se muestran en el Anexo 1, en las que se calcularon los Kilowatts (Kw) desarrollados en la trituradora con la ecuación 4 y se calculó la capacidad de trabajo del equipo (Cap) a través del registro del tiempo de residencia (t) del mineral en el interior de la trituradora y la cantidad de alimentación (a) de mineral a la misma, con la ecuación 5.

Posteriormente se calculó el trabajo (W) con la ecuación 6 y teniendo los datos anteriores de la ecuación 7 se despejó el W_i quedando así la ecuación 8, que sustituyendo los valores de F_{80} , P_{80} y W nos dará el valor del W_i .

Se procedió a realizar una molienda para determinar el tamaño de liberación del mineral, para ello se empleó una muestra de 0.5 kg de mineral triturado (trituración primaria), la muestra se colocó en un molino de bolas de laboratorio con dimensiones de 20.7 cm de diámetro por 15.7 cm de longitud sobre unos rodillos giratorios como lo muestra la Figura 11, utilizando como medio molurante 8 kg de bolas de acero y se realizó la primera molienda con un tiempo de 5 minutos.



FIGURA 11. Sistema utilizado para la molienda del mineral.

Posteriormente con ayuda de un partidador Jones mostrado en la Figura 12 se obtuvo la reducción de la cantidad de muestra a partir de 500 g, hasta obtener una muestra de

aproximadamente 30 g, la cual fue cribada para obtener el correspondiente análisis granulométrico.



FIGURA 12. Partidor Jones.

A través de un microscopio estereoscópico American Optical AO 570, Figura 13, se observaron todas y cada una de las muestras cribadas para poder determinar el tamaño de liberación del mineral.



FIGURA 13. Microscopio estereoscópico American Optical modelo AO 570.

El siguiente paso fue reprocesar la molienda de 500 g que anteriormente había sido molida durante 5 minutos pero ahora con un tiempo de 10 minutos más, es decir 15 minutos en total, por lo que se obtuvieron análisis granulométricos de molienda a 5 y 15 minutos.

Debido a la mayor dureza observada en una fracción de tamaños de partícula, se procedió a pulverizar las partículas con tamaños mayores a 0.055 in (1.4 mm), llevándolos a tamaños de partícula menores o iguales a 0.0041 in (0.1 mm), pero mayores a 0.0029 in (0.08 mm) con el objeto de no generar lamas que afectan la selectividad en el proceso de flotación.

Una vez teniendo los pulverizados, se mezclaron homogéneamente con las partículas de molienda por el método del cuarteo y se llevó a cabo un análisis granulométrico con 56 g de mineral, cribando durante 15 minutos en el equipo Ro-Tap. A partir de esto se obtuvo el análisis granulométrico del mineral para la alimentación en las pruebas de flotación, el cual está registrado en la tabla 6 de los resultados.

2.4 MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE REPOSO EN FUNCIÓN DEL pH A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE XEK Y T5

Las condiciones de concentración de reactivos para las pruebas de medición de Potencial de Reposo fueron constantes de 1.5×10^{-4} M para el colector XEK y las variaciones para el depresor T5 fueron de 10, 15 y 20 ppm en la solución, a valores de pH de 10 a 12 tomando lecturas en intervalos de 0.5 unidades. Como referencia de inicio la lectura del potencial se registró la lectura del Potencial de Reposo al valor de pH 7.

Para medir los potenciales de reposo de Pirita y Calcopirita se requirió del siguiente equipo:

- Parrilla con agitador magnético marca CORNING
- Electrodo de referencia de Ag/AgCl.
- pH-metro digital marca OAKLON modelo pH 2100
- Multímetro de alta impedancia con cables.
- Electrodo de pirita.
- Electrodo de calcopirita.
- Soporte universal.
- Celda electroquímica de baja capacidad Pyrex de 250 ml.

El equipo se montó como se muestra en la Figura 14 para medir Potenciales de Reposo de Pirita y Calcopirita.



FIGURA 14. Sistema de medición de pH y Potencial de Reposo.

Una vez montado el equipo, se conectó el electrodo de referencia (Ag/AgCl) al puerto “NOM” del Multímetro y, previamente lijado para quitar impurezas, el electrodo a medir (Pirita o Calcopirita) se introdujo en la celda y se conectó al puerto “VΩmA”.

Se procedió entonces a registrar las lecturas obtenidas en el multímetro de alta impedancia, correspondientes al Potencial de Reposo, para lo cual se vertieron 200 ml agua de grifo y posteriormente con agitación de 200 RPM, se agregó $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la celda electroquímica, para acondicionar al mineral hasta el valor de pH de trabajo y medir la concentración de reactivo requerido para llegar a los valores de pH deseados generando la curva representada en la Figura 21.

Simultaneo a esto se registró la respectiva lectura de potenciales en función del pH en ausencia y presencia de reactivos colector y depresor T5, con las condiciones mostradas en la fila 1 de la tabla 1.

Primero se tomó lectura del potencial del electrodo de Pirita y después del electrodo de Calcopirita, con tiempos de estabilización de valores de 10 a 15 minutos entre cada medición de potencial. Los resultados de las pruebas en ausencia de reactivos colector y depresor se muestran en la Figura 22.

Posteriormente se realizaron los cálculos de colector necesario en la celda electroquímica para tener la concentración planteada, (ver ecuación 10 en el Anexo 1), se adicionaron 4.8×10^{-4} g de XEK (1.5×10^{-4} M de XEK en la celda de 200 ml) y se registraron las lecturas en presencia del colector para los diferentes valores de pH (tabla 1, fila 2). Los resultados

de Potencial de Reposo de ambos sulfuros en función del pH con una concentración de colector XEK constante de 1.5×10^{-4} M se muestran en la Figura 23.

Así mismo para las pruebas de potencial en presencia de depresor se calculó la cantidad requerida en gramos de T5 para 10, 15 y 20 ppm (ecuación 11 en el Anexo 1), se realizaron las lecturas en presencia únicamente de depresor en las diferentes concentraciones planteadas en la fila 3 de la tabla 1. Los resultados de potenciales de reposo de ambos sulfuros en función del pH con una concentración de depresor T5 de 10, 15 y 20 ppm, se muestran en las Figuras 24 y 25.

Para finalizar con estas pruebas se realizaron lecturas en presencia de colector XEK y depresor T5 en los diferentes valores de pH mostradas en la fila 4 de la tabla 1 para así poder estudiar el efecto que tiene el Potencial de Reposo en el sistema con ambos reactivos, depresor y colector, teniendo un total de 48 pruebas de medición de Potencial en Reposo para cada electrodo en la tabla 1.

Los valores de lectura de Potencial de Reposo se encuentran en el Anexo 4 y los gráficos de resultados del potencial en función del pH a diferentes concentraciones de colector y depresor se encuentran en las Figuras 26, 27 y 28. Cabe señalar que una vez registrados los valores de Potencial de Reposo vs electrodo de Ag/AgCl se hizo la conversión a valores de potencial en Electrodo Normal de Hidrogeno (ENH) en mili Volts (mV) para obtener los comportamientos gráficos de cada mineral y el respectivo análisis de las mismas.

Tabla 1. Condiciones de medición para pruebas de potencial de reposo en electrodos de pirita y calcopirita.

FILA	CONDICIÓN	pH					
		7	10	10.5	11	11.5	12
1	Sin XEK, sin T5	.	.	.	.	.	.
2	XEK 1.5×10^{-4} M	.	.	.	.	.	.
3	T5 10 ppm	.	.	.	.	.	.
	T5 15 ppm	.	.	.	.	.	.
	T5 20 ppm	.	.	.	.	.	.
4	XEK 1.5×10^{-4} M, T5 10 ppm	.	.	.	.	.	.
	XEK 1.5×10^{-4} M, T5 15 ppm	.	.	.	.	.	.
	XEK 1.5×10^{-4} M, T5 20 ppm	.	.	.	.	.	.

2.5 MEDICION DE POTENCIALES DE FLOTACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS MINERAL-REACTIVO A PARTIR DE UNA FLOTACIÓN PRIMARIA

Para la realización de las pruebas de flotación y la respectiva determinación de los Potenciales de Flotación se requirió una Celda de Flotación Denver Lab 12 semiautomatizada, mostrada en la Figura 15, la cual cuenta con un software que automatiza la adición de solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por medio de una bomba peristáltica que, con ayuda de un pH-metro, también sincronizado al sistema, regula el valor de pH de la pulpa en tiempo real.

La Celda de Flotación Denver Lab 12 semiautomatizada también cuenta con un sistema de descarga por rebalse automático, el cual se detiene cuando ha transcurrido el tiempo de flotación o cuando se ha llenado el recipiente que colecta los concentrados.

Finalmente, el equipo también cuenta con un sistema de adición de agua a la celda que no permite que el volumen de ésta varíe.

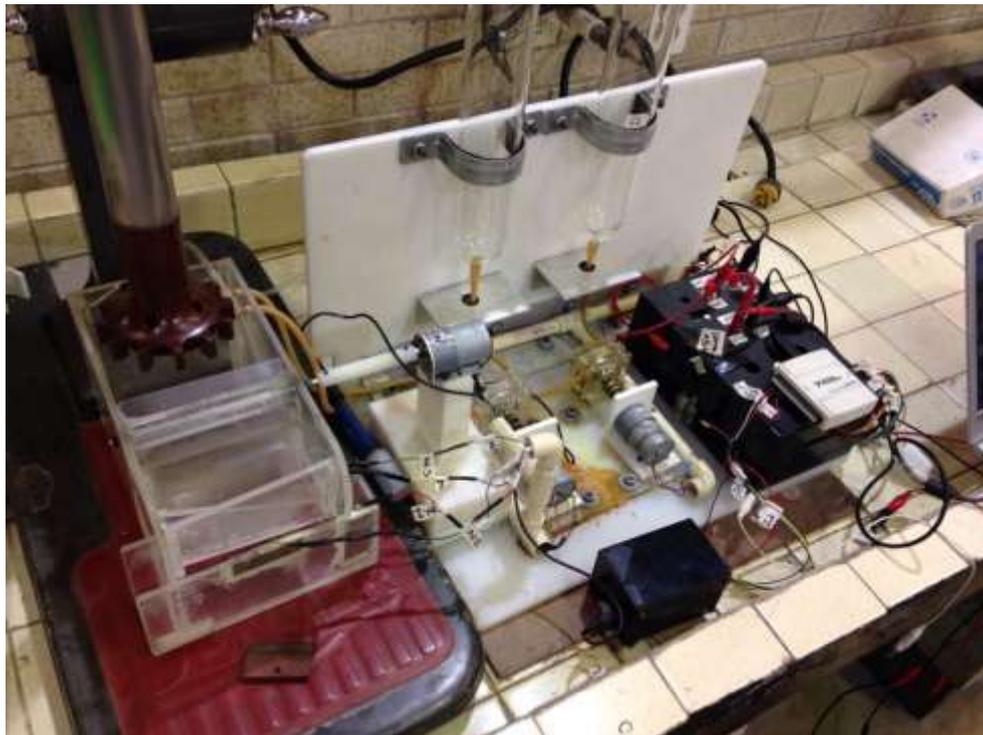


FIGURA 15. Celda de Flotación Denver Lab 12 semiautomatizada empleada en la experimentación.

2.5.1 CONDICIONES DE FLOTACIÓN

CONDICIONES DE CELDA

Para este caso, se utilizó una celda de 1.1L de volumen de agua y se trabajó con un 18% sol.wt en pulpa, por lo tanto se agregaron 241.5 g de mineral por celda de flotación de acuerdo a los cálculos realizados (ecuación 9 del Anexo 1), mineral que una vez caracterizado, fue seleccionado de manera aleatoria por el método de cuarteo para cada flotación.

En el caso específico de estas pruebas se usó una velocidad de 1200 rpm y la inyección de aire de 5 L/min brindado por el sistema hidráulico de compresión del laboratorio 006 del Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

COLECTOR

El colector en estudio fue el XEK en una concentración de 1.5×10^{-4} M, es decir 0.0264 g por celda de acuerdo a la ecuación 10 del Anexo 1.

MODIFICADOR DE pH Y DEPRESOR

Se empleó $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para regular automáticamente el pH en valores de 10, 10.5, 11, 11.5 y 12 según la condición de prueba, así como T5 como depresor en concentraciones de 10, 15 y 20 ppm, es decir 0.011 g, 0.0165 g y 0.022 g respectivamente, de acuerdo a los cálculos con la ecuación 11 del Anexo 1.

ESPUMANTE

Se utilizó el MIBC en una concentración de 0.14ml /L.

Una vez montada la celda, se adicionó el agua, se introdujo el mineral y se encendió el impulsor con la velocidad establecida sin inyección de aire.

Posteriormente se activó el equipo semi-automatizado, se calibró el pH-metro y se le proporcionaron los datos de pH a los que se quería trabajar, para que el software empezara a ajustarlo con adición de una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Para medir los potenciales de flotación se tomaron 4 lecturas para cada flotación:

- 1.- Después de ajustar pH.
- 2.- Después de agregar depresor T5.
- 3.- Después de agregar colector XEK.
- 4.- Después de agregar espumante MIBC.

Se siguieron los siguientes pasos en cada flotación con las variables de concentración de reactivos establecidas en la tabla 2:

- 1) Una vez ajustado el pH se registraron las lecturas de potencial de pirita y calcopirita.
- 2) Se adicionó el depresor T5, se acondicionó durante 2 minutos y se registraron las lecturas de potenciales de pirita y calcopirita.
- 3) Se adicionó el colector XEK, se dejó acondicionar 2 minutos y se registraron las lecturas de potenciales de pirita y calcopirita.
- 4) Se adicionó el espumante MIBC, se dejó acondicionar 2 min y se tomaron lecturas de potenciales de Pirita y Calcopirita.
- 5) Se abrió paso a la válvula de aire del impulsor para comenzar con la flotación activando el mecanismo de rebalse y nivelación de volúmenes de celda.

Cabe mencionar que las lecturas de potencial después de agregar cada reactivo fueron con la finalidad de inspeccionar y evaluar variaciones considerables en la lectura del potencial al agregar cada reactivo. Al no observar gran diferencia entre las lecturas de los potenciales al adicionar los reactivos se decidió solo trabajar con el último potencial de lectura segundos antes de comenzar los rebalses.

En total se realizaron 15 pruebas de flotación manteniendo constante el volumen de celda de 1.1 L, la concentración de XEK (1.5×10^{-4} M), la concentración de MIBC (0.14ml /L) y los sólidos en la pulpa (18% sol.wt) donde simultáneamente se hicieron las mediciones de Potenciales de Flotación, variando concentraciones de depresor T5 y pH como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Condiciones para pruebas de flotación y medición de Potencial de Flotación en electrodos de Pirita y Calcopirita con XEK y MIBC constantes.

CONDICIÓN	pH				
	10	10.5	11	11.5	12
T5, 10 ppm
T5, 15 ppm
T5, 20 ppm

Una vez registrados los valores de Potencial de Flotación vs electrodo de Ag/AgCl se ajustaron a valores de potencial en Electrodo Normal de Hidrogeno (ENH) en mili Volts (mV) para obtener los correspondientes comportamientos en ambos minerales y el

respectivo análisis de las mismas. Los valores de lectura Potencial de Flotación se encuentran en el Anexo 4. Después de las pruebas de flotación se registraron los pesos obtenidos en concentrados y colas que representaban teóricamente a Calcopirita y Pirita respectivamente. Los datos se registraron en la tabla 20 del Anexo 5.

2.6 ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Finalizadas las pruebas de flotación primaria se llevó a cabo la pulverización de aproximadamente 1g de concentrados y 1g colas de flotación para llevar a análisis químico por Espectrometría de Absorción Atómica (Figura 16) en el laboratorio 209 del Edificio D de la Facultad de Química de la UNAM, registrando los resultados en porcentaje en peso (% wt.) o % ley de Cobre y Hierro en la tabla 7 de los resultados de absorción atómica.



FIGURA 16. Espectrómetro de Absorción Atómica

Después de tener los análisis químicos de colas y concentrados de flotación, se hizo el tratamiento de datos respectivo con un balance metalúrgico y se obtuvieron los resultados de los estudios de recuperación de Cobre y Hierro en las flotaciones. En el Anexo 5 se encuentran las tablas donde se determinaron los contenidos metálicos y recuperaciones de Cu en los concentrados y los grados de Fe en las colas con esos valores de %wt a partir del balance metalúrgico.

Con los resultados del balance metalúrgico se realizaron los análisis correspondientes y se graficó el Potencial de Flotación, el % en ley y % de recuperación para Calcopirita y Pirita en los concentrados vs el pH de trabajo a diferentes concentraciones de depresor T5, manteniendo constante la concentración de XEK, así como el % ley y % de recuperación para Calcopirita y Pirita en las colas vs el pH de trabajo a diferentes concentraciones de depresor obteniendo los resultados mostrados en las Figuras 29 a 43.

CAPITULO 3

3.1 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la construcción de los electrodos de mineral de alta pureza y de las pruebas realizadas con éstos, se obtuvieron una serie de tablas y curvas que se muestran a continuación, con las cuales se hizo un análisis de los efectos que presentan los minerales en estudio con las variables de concentración de colector, depresor y pH empleadas experimentalmente.

3.2 RESULTADOS DE PREPARACIÓN DE ELECTRODOS DE TRABAJO



FIGURA 17. Mineral de Calcopirita con corte fino transversal.

En la figura 17 se observa el tipo de corte que requirió el mineral de alta pureza para no fracturarse.



FIGURA 18. A) Electrodo de trabajo de Calcopirita. B) Electrodo de trabajo de Pirita

Parte fundamental para la realización de las pruebas donde se midió el potencial de cada mineral fue la fabricación de los electrodos con minerales de alta pureza como se observan en la Figura 18, las cuales quedaron con 1 cm^2 de área de superficie de contacto de mineral pulido hacia la solución para las mediciones. Se verificó la funcionalidad midiendo la continuidad desde un extremo del cable hasta la superficie de contacto del mineral a través de un multímetro de alta impedancia.

3.3 RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN Y PREPARACIÓN DE MINERAL PARA PRUEBAS DE FLOTACIÓN

Tabla 3. Análisis granulométrico de la alimentación en la trituración del mineral.

TAMAÑO (in)	TAMAÑO (μm)	PESO (g)	%RET	%AC(+)	%AC(-)
1.25	31750	204.7	18.16	18.16	81.84
1	25400	557.7	49.48	67.64	32.36
0.75	19050	328	29.10	96.74	3.26
PAN		36.7	3.26	100.00	0.00
	TOTAL	1127.1			

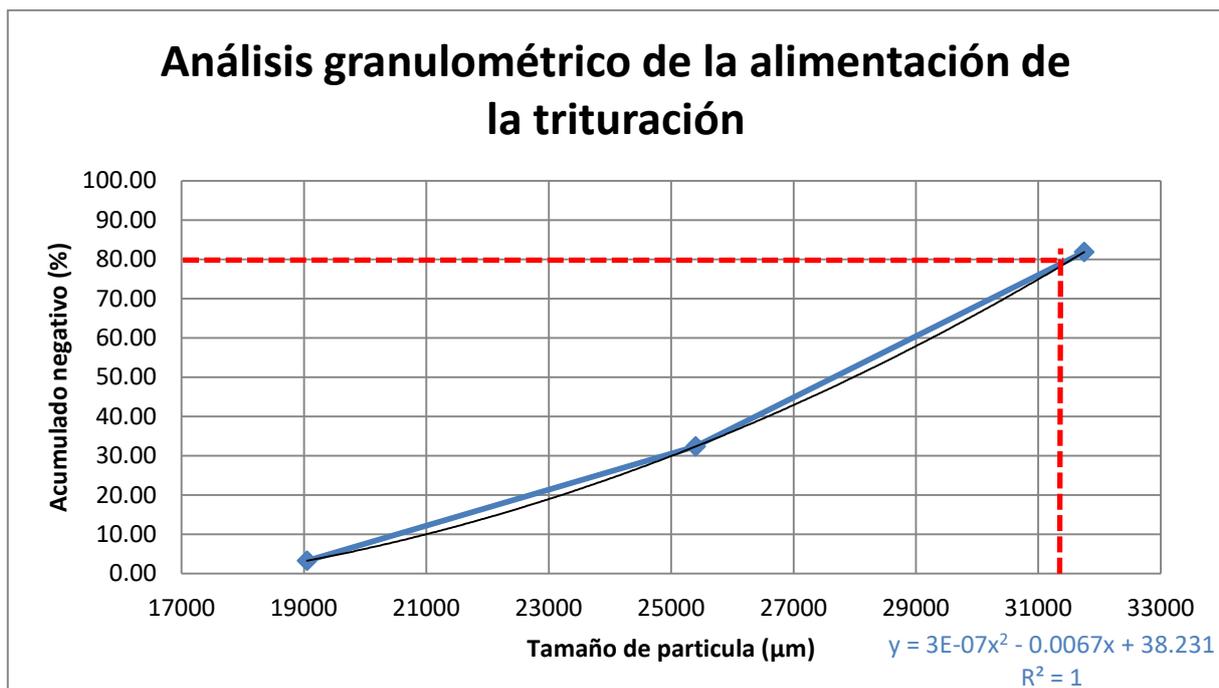


FIGURA 19. Representación gráfica del análisis granulométrico de la alimentación en la trituración para el cálculo del F_{80} .

De acuerdo a la gráfica obtenida en la Figura 20 con los datos de la tabla 3 se puede determinar que el valor del tamaño de partícula que tiene la alimentación al 80% de acumulado negativo es:

$$F_{80} = 31,250 \mu\text{m}$$

Tabla 4. Análisis granulométrico del producto de la trituración.

TAMAÑO (in)	TAMAÑO (µm)	PESO (g)	% RET	% AC(+)	% AC(-)
0.625	15875	18	9.15	9.15	90.85
0.5	12700	44.4	22.57	31.72	68.28
0.3125	7937.5	56	28.47	60.19	39.81
0.223	5664.2	28.3	14.39	74.58	25.42
0.157	3987.8	12.5	6.35	80.94	19.06
0.111	2819.4	7.3	3.71	84.65	15.35
PAN		30.2	15.35	100.00	0.00
	TOTAL	196.7			

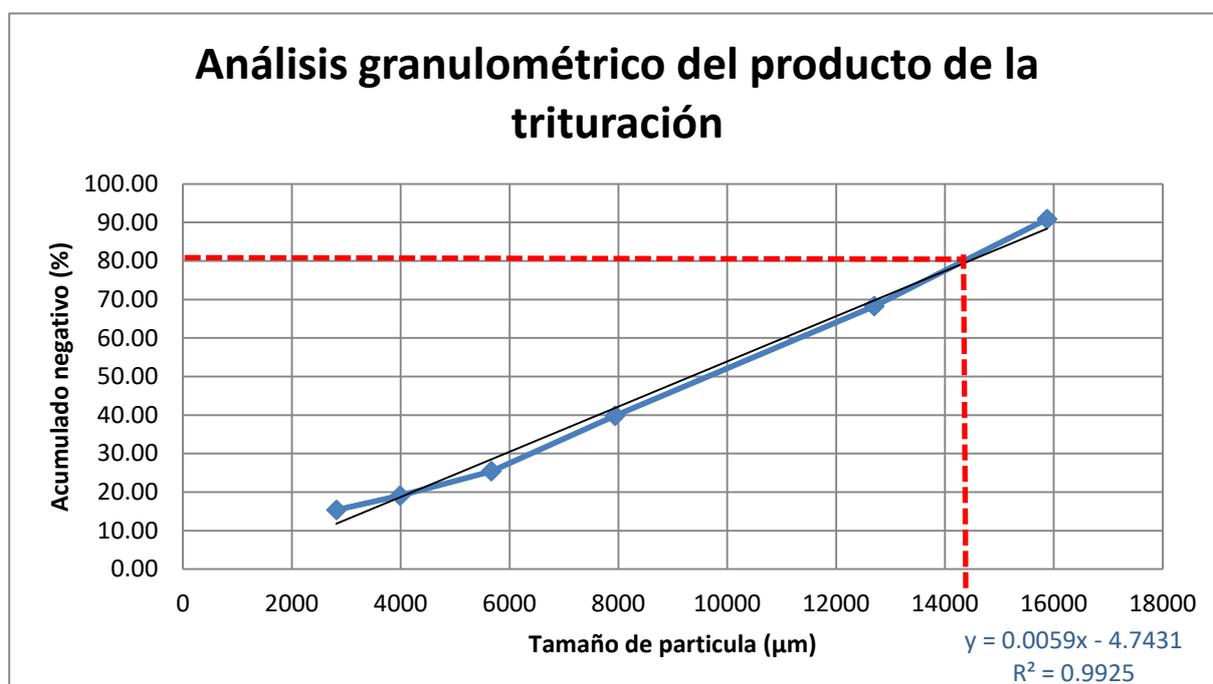


FIGURA 20. Representación gráfica del análisis granulométrico del producto de la trituración para el cálculo del P_{80} .

De acuerdo al comportamiento en el producto de trituración, Figura 21, se puede observar que más del 50% del mineral presenta tamaños menores a 9000 micrómetros y que el valor del tamaño de partícula que tiene el producto de la trituración al 80% de acumulado negativo es:

$P_{80} = 14,300 \mu\text{m}$.

Tabla 5. Datos de trabajo de la trituradora para el cálculo de W_i .

Voltaje (V)	220
Numero de Fases (NF)	3
Amperaje de vacío (A)	1.1
Amperaje con carga (A)	2.6
Capacidad (sTon)	0.0012
Tiempo de residencia (s)	4

A partir de los valores de la tabla 5, empleando las ecuaciones correspondientes a la evaluación del Work index, vía Método Directo del Anexo 1 y los cálculos de W_i del Anexo 2, para el mineral de trabajo se obtuvo un valor de **$W_i=18.89$ Kwh/sTon.**

Por lo tanto, de acuerdo a la clasificación de W_i de la tabla 8 del Anexo 3, este mineral está en los denominados “**Duros**” (W_i mayor a 18 kW – h/sTon), lo cual está en común acuerdo a los valores el W_i para la Calcopirita/Cuarzo siendo del orden de 20.4 Kwh/sTon. Se determinó que el tiempo de molienda debía ser de 15 minutos.

Tabla 6. Análisis granulométrico de una muestra representativa del producto de molienda para pruebas de flotación.

TAMAÑO (μm)	MALLA	TAMAÑO (in)	PESO (g)	%RET	%AC (+)	%AC (-)
1270	14	0.05	0.1	0.18	0.18	99.82
787.4	20	0.031	0.4	0.71	0.89	99.11
584.2	30	0.023	0.3	0.54	1.43	98.57
431.8	40	0.017	0.4	0.71	2.14	97.86
297.18	50	0.0117	0.6	1.07	3.21	96.79
185.42	70	0.0073	1.3	2.32	5.54	94.46
149.86	100	0.0059	2.7	4.82	10.36	89.64
104.14	140	0.0041	4.5	8.04	18.39	81.61
73.66	200	0.0029	6.6	11.79	30.18	69.82
43.18	325	0.0017	14	25.00	55.18	44.82
38.1	400	0.0015	11.1	19.82	75.00	25.00
0	PAN		14	25.00	100.00	0.00
		TOTAL	56			

Finalmente, como se muestra en el análisis granulométrico de la tabla 6, el mineral preparado para las pruebas de flotación presentó tamaños menores o iguales a 104.14 μm con el 81.61% Ac(-).

3.4 RESULTADOS DE POTENCIAL DE REPOSO EN FUNCIÓN DEL pH A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE XEK Y T5

3.4.1 RESULTADOS DE CONCENTRACIÓN DE Ca(OH)_2 REQUERIDO PARA AJUSTE DE pH

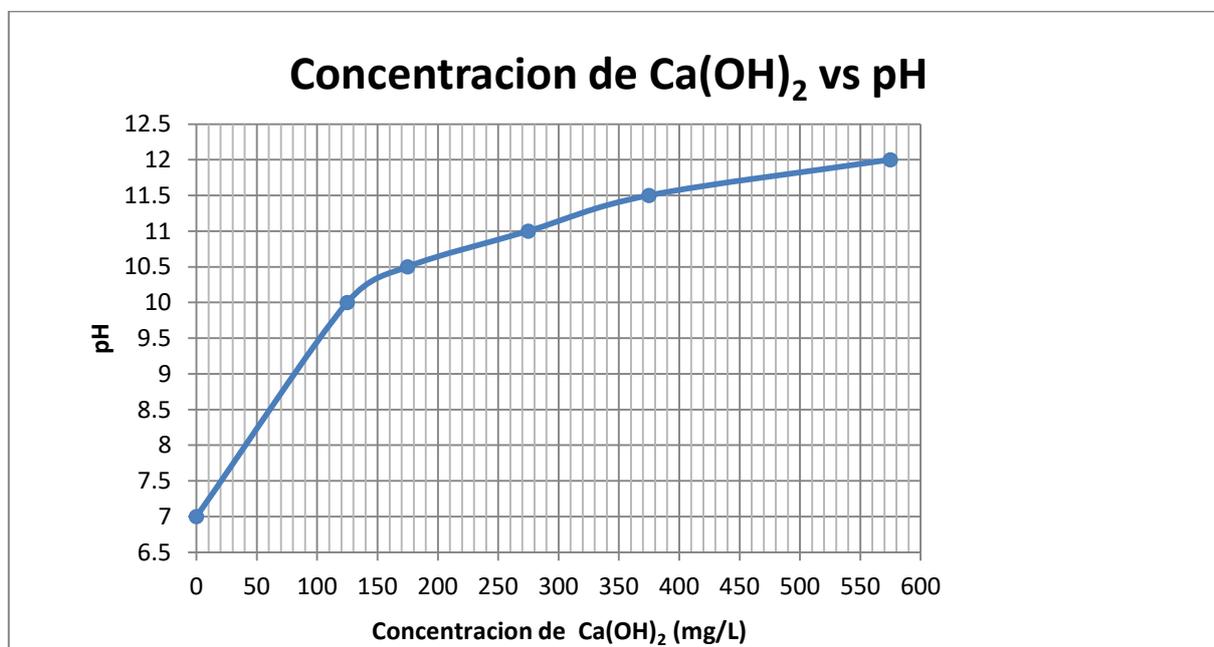


FIGURA 21. Valores de pH en función de la concentración de Ca(OH)_2 .

En la Figura 21 se puede observar el incremento del pH en función del aumento de la concentración de Ca(OH)_2 , a partir de concentraciones mayores de 125 mg/L se requiere de mayores cantidades para elevar el valor de pH. A partir de esta información fue posible modificar el pH en el rango establecido en el sistema semiautomatizado de la celda de flotación para este trabajo, desde valores de 7 a 12.

3.4.2 RESULTADOS DE POTENCIAL DE REPOSO EN AUSENCIA DE REACTIVOS DEPRESOR T5 Y XEK EN FUNCIÓN DEL pH

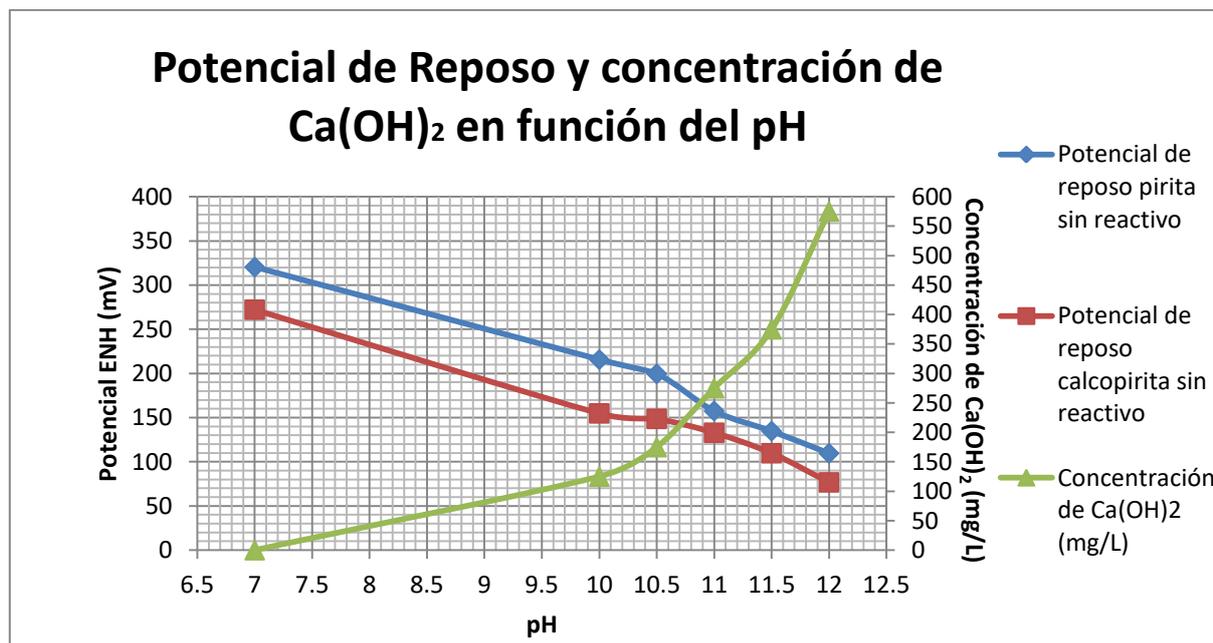


FIGURA 22. Representación del Potencial de Reposo de Calcopirita y Pirita en función del pH en ausencia de colector XEK y depresor T5.

En ausencia de reactivos colector y depresor, se puede observar en la Figura 22, las curvas de potencial en ambos minerales muestran un comportamiento inversamente proporcional con el incremento de pH, siendo una constata que la curva de Potencial de Reposo de la Pirita siempre continua por encima de la curva de potencial de la Calcopirita, tendiendo a mostrar valores más cercanos de potencial entre ambos electrodos a concentraciones más elevadas de Ca(OH)₂, a partir de valores de pH 11.

3.4.3 RESULTADOS DE POTENCIAL DE REPOSO EN AUSENCIA DE REACTIVO DEPRESOR T5 Y EN PRESENCIA DE XEK EN FUNCIÓN DEL pH

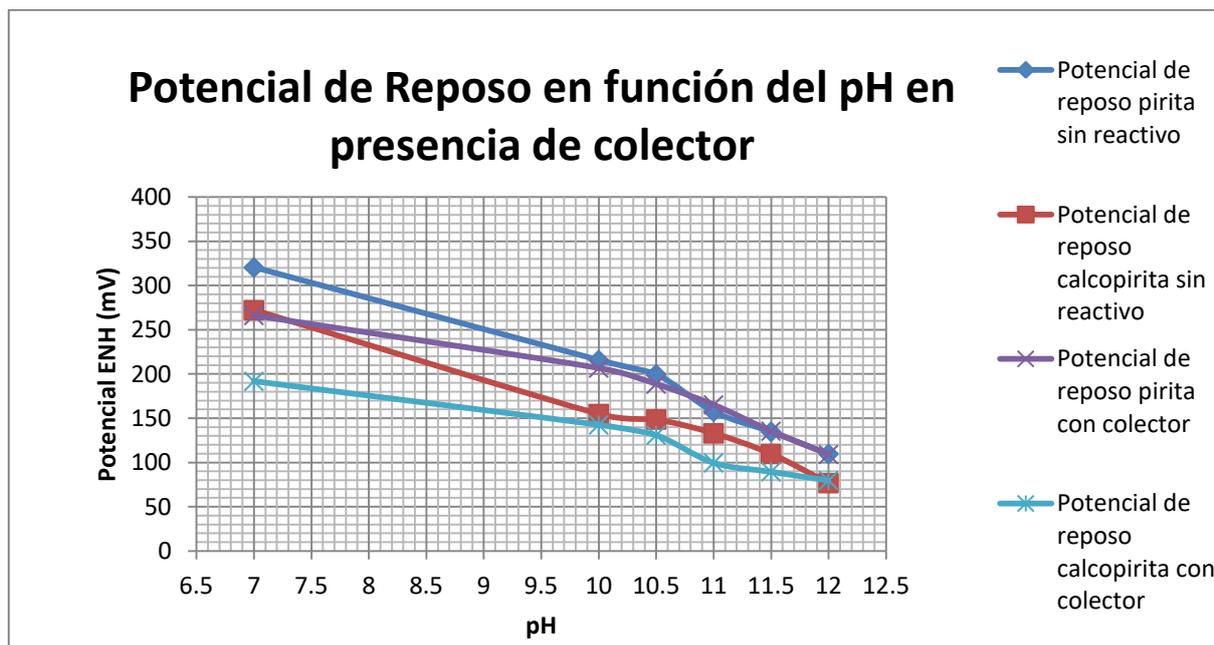


FIGURA 23. Representación del Potencial de Reposo de Calcopirita y Pirita en función del pH en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

En la Figura 23 se presenta el efecto sobre el potencial de reposo en presencia de colector KEX, para el intervalo de pH en estudio, así como la inclusión del comportamiento de minerales en ausencia de éstos para su fácil comparación.

Como se puede observar, el colector modificó la superficie de ambos minerales haciéndolos más anódicos con el incremento de pH, manteniendo la misma tendencia que es más anódico el mineral de Pirita con respecto al de Calcopirita, esto debido al efecto del par galvánico en el cual la Calcopirita actúa como ánodo y la Pirita como cátodo en la interacción. También se observa que en este par galvánico se tuvo una diferencia de potencial promedio del orden de 60 mV.

Se muestra un efecto mayor en la curva de potencial de la Calcopirita con la adición de XEK donde el potencial se vuelve aún más anódico a partir de valores de pH de 10.5 hasta 11.5. En el valor de pH de 12 la curva de Potencial de Reposo de la Calcopirita sin colector cae drásticamente debido a la posible formación de óxidos de Cobre e Hidróxidos de Hierro conforme a los diagramas de Pourbaix de ambos minerales mostrados en las Figuras 3 y 4.

3.4.4 RESULTADOS DE POTENCIAL DE REPOSO EN AUSENCIA DE XEK Y PRESENCIA DE DEPRESOR T5 EN FUNCIÓN DEL pH

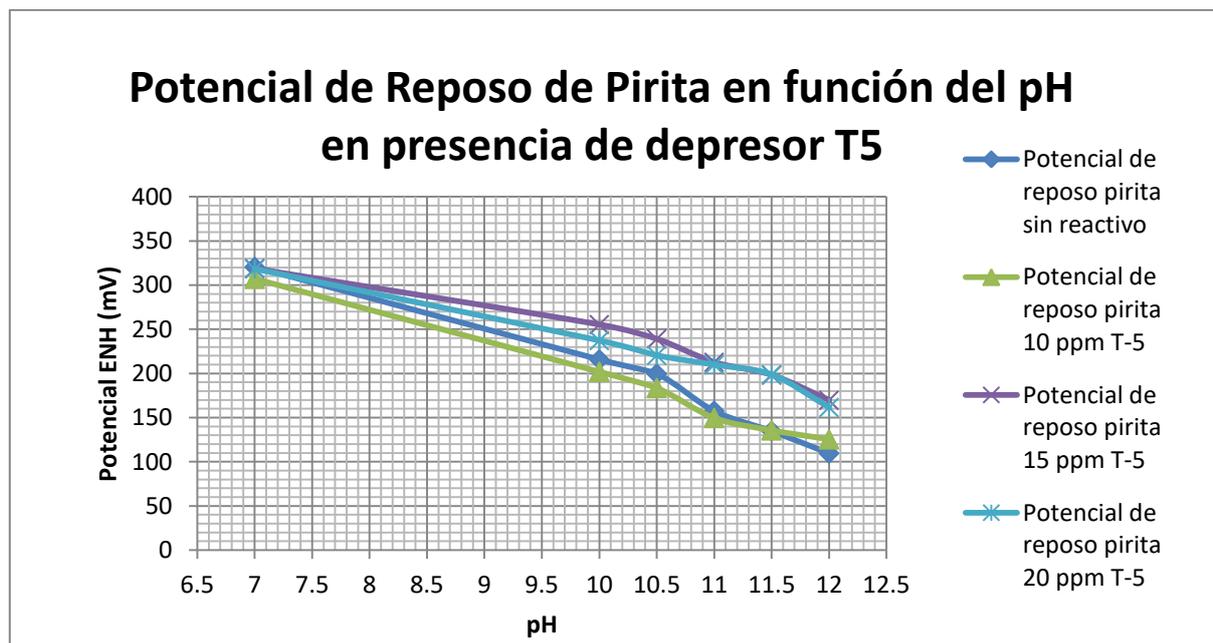


FIGURA 24. Representación del Potencial de Reposo de Pirita en función del pH solo en presencia de depresor a 10, 15 y 20 ppm de T5.

En las curvas representadas en la Figura 25 donde se registraron los Potenciales de Reposo en función del pH para el electrodo de Pirita a diferentes concentraciones de depresor se observa que al tener una concentración de 10 ppm de T5, el potencial se vuelve más anódico con respecto a los valores de potencial en ausencia de depresor.

En concentraciones de 15 y 20 ppm de T5 se observa que las curvas toman valores de potencial más elevados, resaltando que con estas concentraciones de depresor en valores de pH a partir de 10.5 y hasta 11.5 los potenciales tienden a estabilizarse, sobre todo en la curva de potencial que corresponde a la concentración de 20 ppm.

A valores de pH 12 se nota un ligero declive en el potencial y esto se debe principalmente a la posibilidad de que existan reacciones que incrementan la producción de óxido de Hierro e hidróxido de Hierro en la superficie del electrodo de Pirita de acuerdo al diagrama de Pourbaix de la Figura 4 que vuelven más anódicos los valores de potencial en presencia de mayor concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

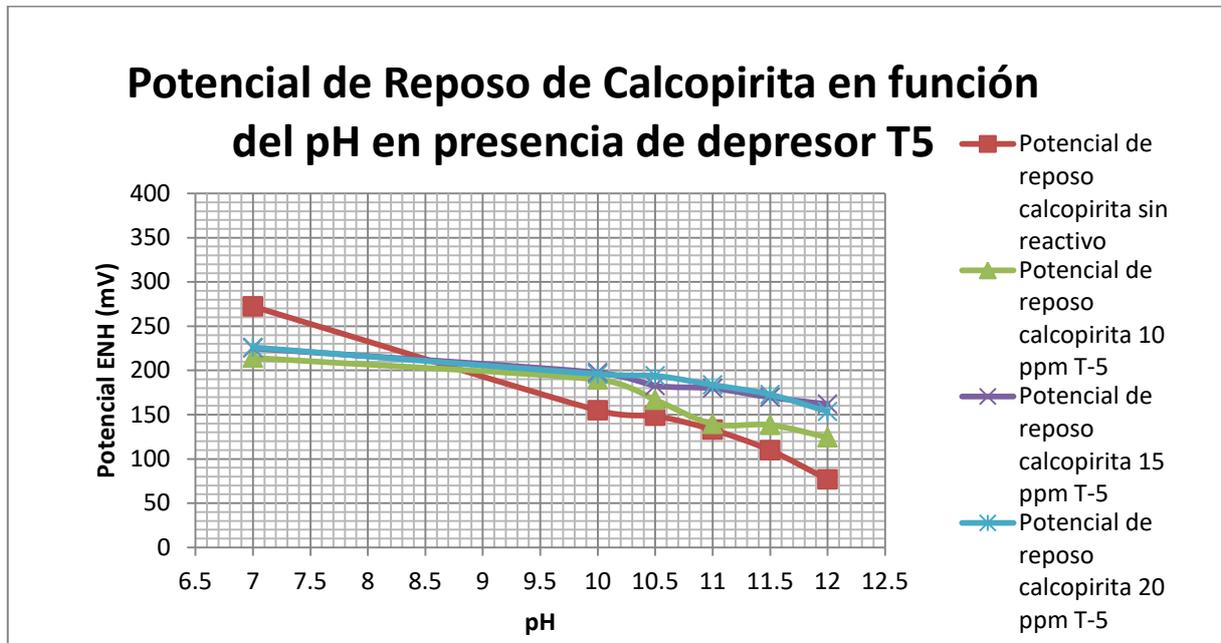


FIGURA 25. Representación del Potencial de Reposo de Calcopirita en función del pH solo en presencia de depresor a 10, 15 y 20 ppm de T5.

En la Figura 25, se puede observar que el uso de depresor T5 en diferentes concentraciones afecta directamente el potencial de la Calcopirita para los intervalos de pH en estudio, mostrando una tendencia que a mayor concentración de depresor y a mayor pH el potencial tiende a valores más altos (catódicos), frenándose este comportamiento en concentraciones de 20 ppm de depresor dándonos valores de potencial casi idénticos con la curva que registró los valores de potencial a 15 ppm de depresor.

La tendencia a la estabilidad del Potencial de Reposo en función del incremento de pH en el electrodo de calcopirita en presencia de depresor nos indica la formación de óxidos e hidróxidos de Cobre que tienden a valores de potencial mas catódicos partir de pH de 11, esto de acuerdo al diagrama de Pourbaix de la Calcopirita de la Figura 3, y por lo tanto a mayor concentración de depresor estaremos obteniendo mayor formación de estas especies en función del incremento de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

3.4.5 RESULTADOS DE POTENCIAL DE REPOSO EN PRESENCIA DE COLECTOR XEK Y DEPRESOR T5 EN FUNCIÓN DEL pH

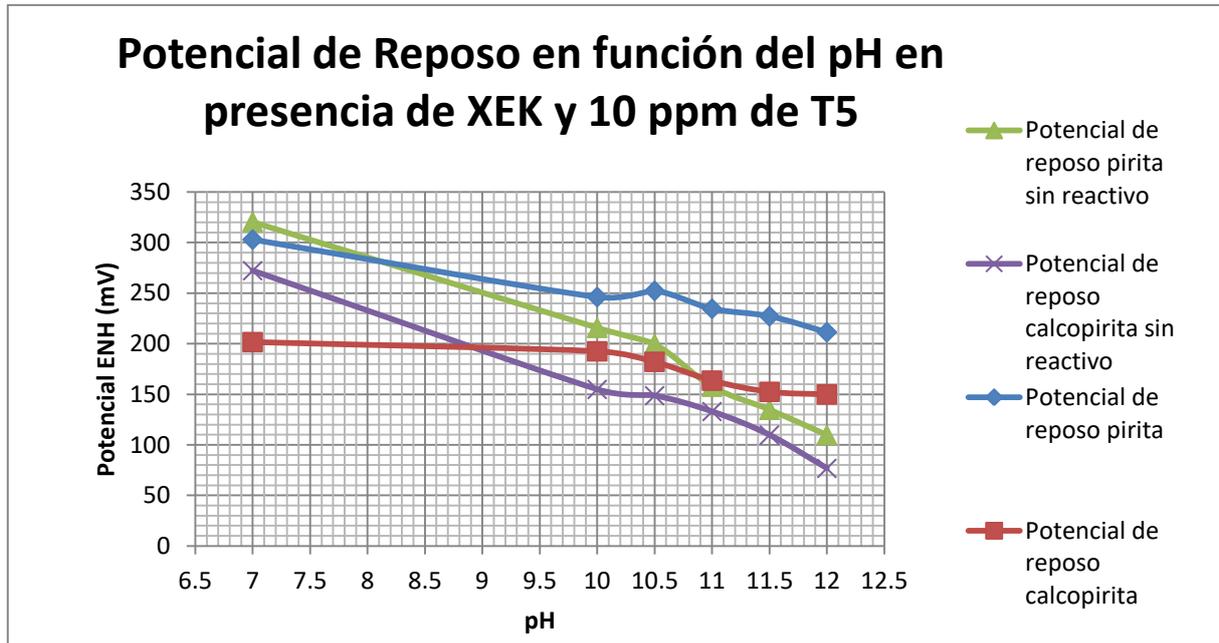


FIGURA 26. Representación del Potencial de Reposo de Calcopirita y Pirita en función del pH en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M y 10 ppm de depresor T5.

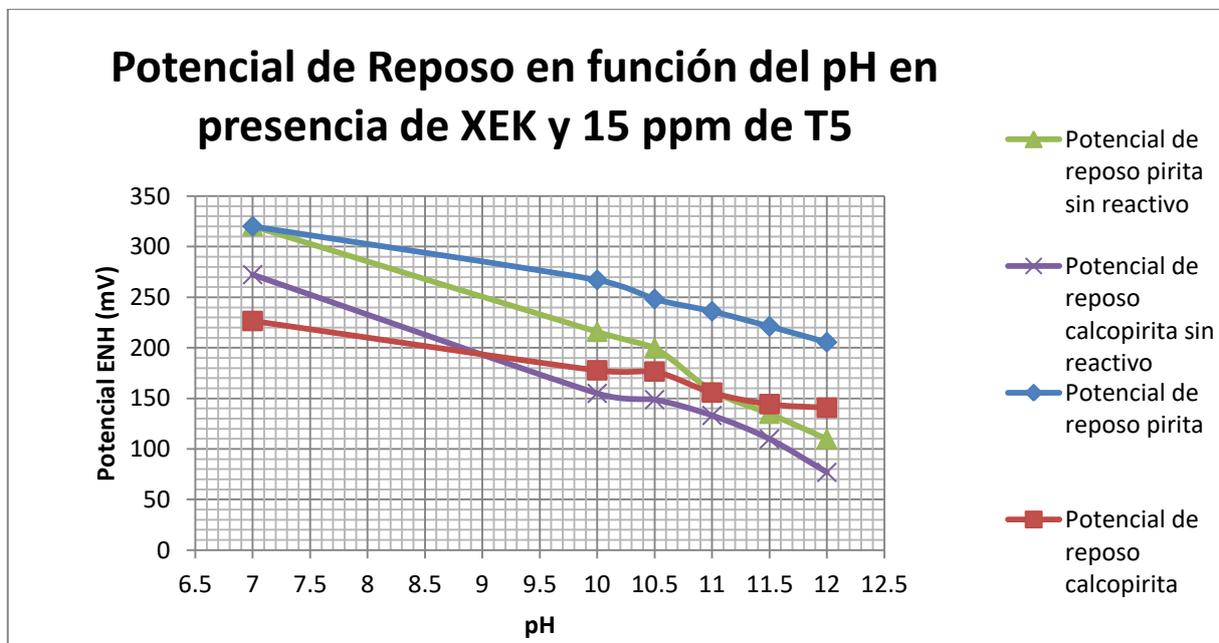


FIGURA 27. Representación del Potencial de Reposo de Calcopirita y Pirita en función del pH en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M y 15 ppm de depresor T5.

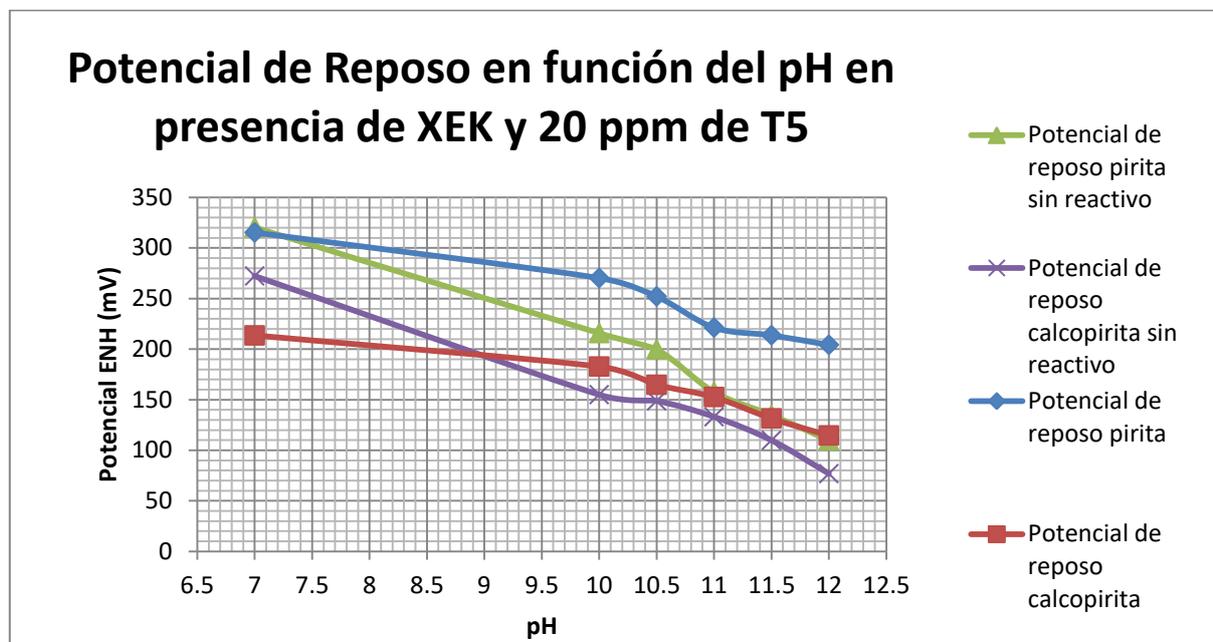


FIGURA 28. Representación del Potencial de Reposo de Calcopirita y Pirita en función del pH en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M y 20 ppm de depresor T5.

En las Figuras 26, 27 y 28 se tiene el comportamiento del Potencial de Reposo mostrando la interacción que tienen colector y depresor en el intervalo de pH en estudio para los electrodos de Pirita y Calcopirita, donde se observa que el uso de 20 ppm de depresor T5 incrementara la diferencia de potencial entre los electrodos de Pirita y Calcopirita desde valores de pH 7 hasta 12 en el orden de 80-100 mV dependiendo el valor de pH, además de tener los valores más anódicos para la curva de potencial de la Calcopirita, lo que nos puede garantizar una mayor selectividad de los minerales al entrar en una celda de flotación con una condición de concentración constante 1.5×10^{-4} M de colector XEK.

3.5 RESULTADOS DE POTENCIALES DE FLOTACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS MINERAL-REACTIVO A PARTIR DE UNA FLOTACIÓN PRIMARIA

3.5.1 RESULTADOS DE POTENCIAL DE FLOTACIÓN DE PIRITA Y CALCOPIRITA

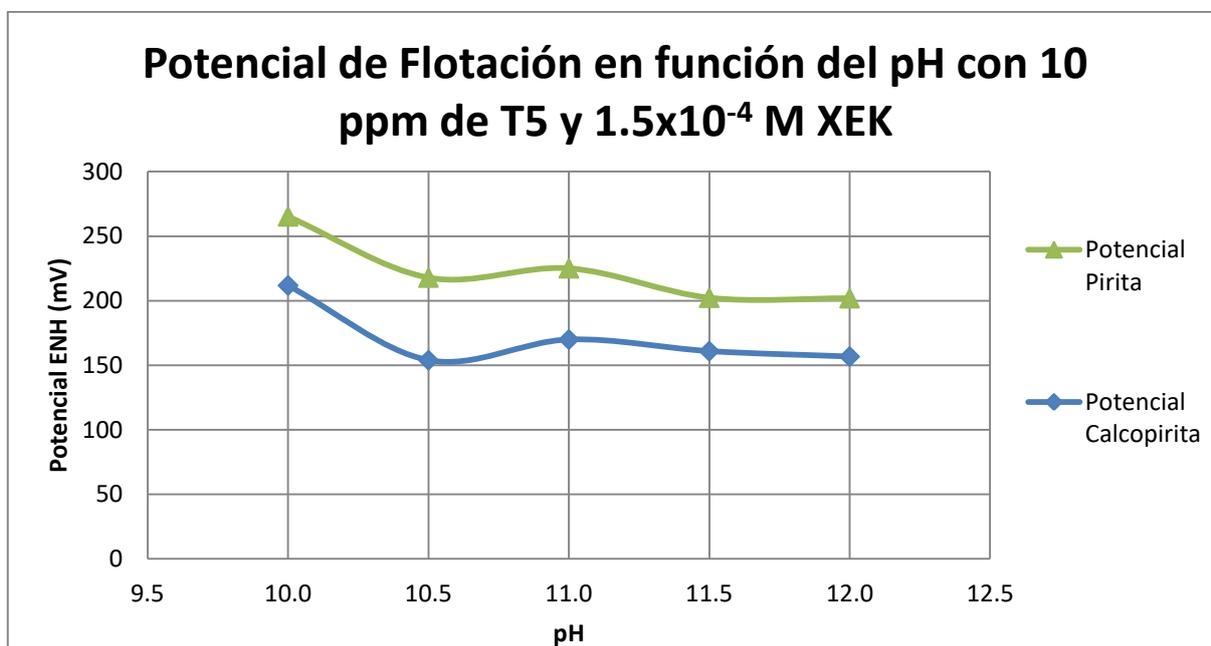


FIGURA 29. Representación del Potencial de Flotación de Pirita y Calcopirita, en función del pH con 10 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

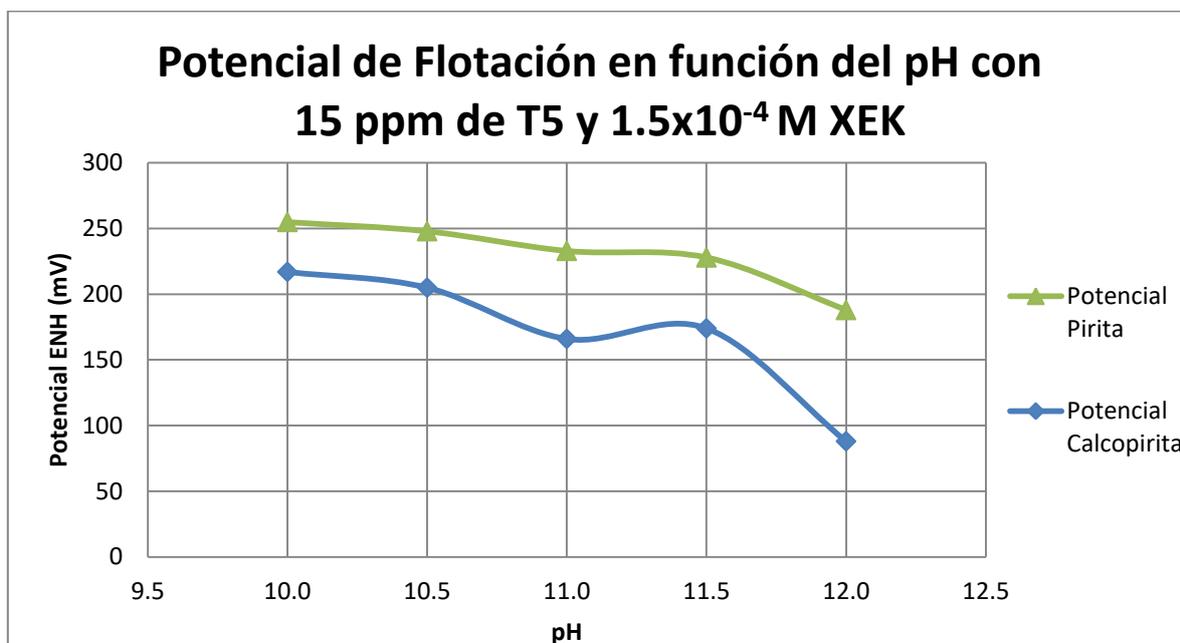


FIGURA 30. Representación del Potencial de Flotación de Pirita y Calcopirita, en función del pH con 15 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

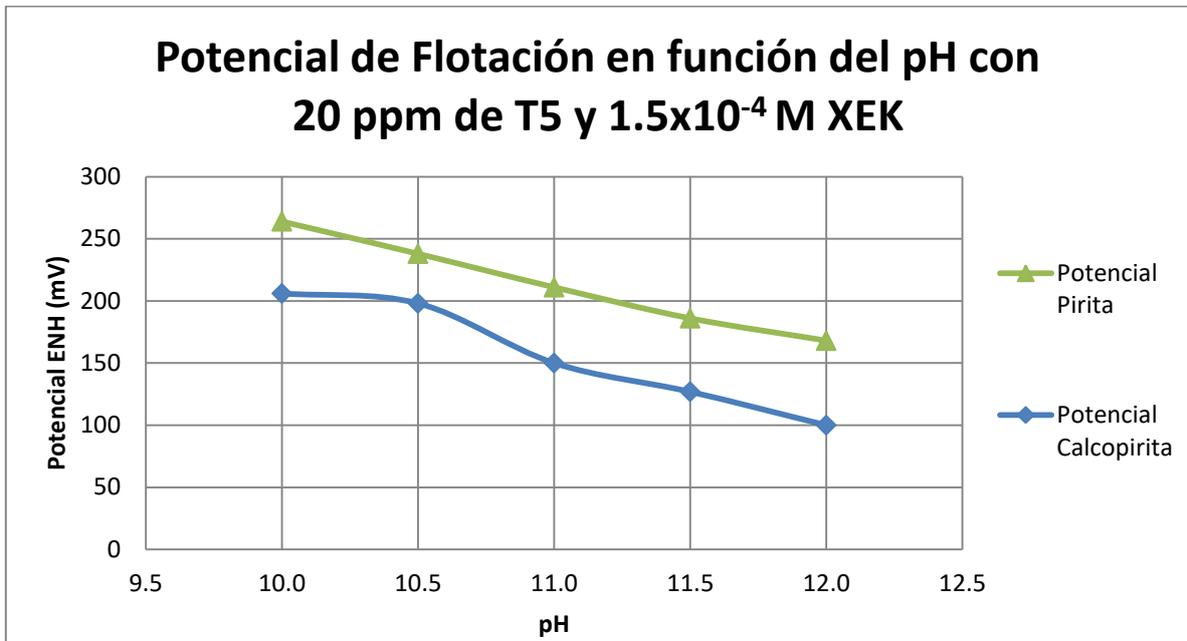


FIGURA 31. Representación del Potencial de Flotación de Pirita y Calcopirita, en función del pH con 20 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

En las Figuras 29, 30 y 31, que representan al Potencial de Flotación de Pirita y Calcopirita en las diferentes condiciones de flotación se observa que se mantiene la misma tendencia que en la Figura 22, que representa al Potencial de Reposo de los mencionados minerales, donde la curva de potencial de la Pirita siempre se desarrolla por encima de la curva de potencial de la Calcopirita en función del incremento de pH dada la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Esto representa claramente que durante la flotación se muestra la misma interacción de par galvánico que en el reposo entre el mineral de Pirita y de Calcopirita desarrollando reacciones que sugieren un comportamiento catódico en la Pirita y un comportamiento anódico en la Calcopirita. Se observa que el Potencial decrece en función del incremento del pH aun en condiciones diferentes de concentración de depresor T5, presencia de espumante MIBC, turbulencia e inyección de aire.

Una tendencia muy marcada entre estas Figuras es que la pendiente que se forma en las curvas decrece en función del incremento de la concentración de depresor T5, es decir, en la Figura 31 el decremento del valor del Potencial en función del pH para ambos minerales es mayor que en la Figura 30 y más aún marcada comparándola con la Figura 29 donde el decremento es mínimo y las curvas muestran valores de potencial con tendencia a la estabilidad.

3.5.2 RESULTADOS DE POTENCIAL DE FLOTACIÓN, % LEY Y % DE RECUPERACIÓN DE CALCOPIRITA EN CONCENTRADOS

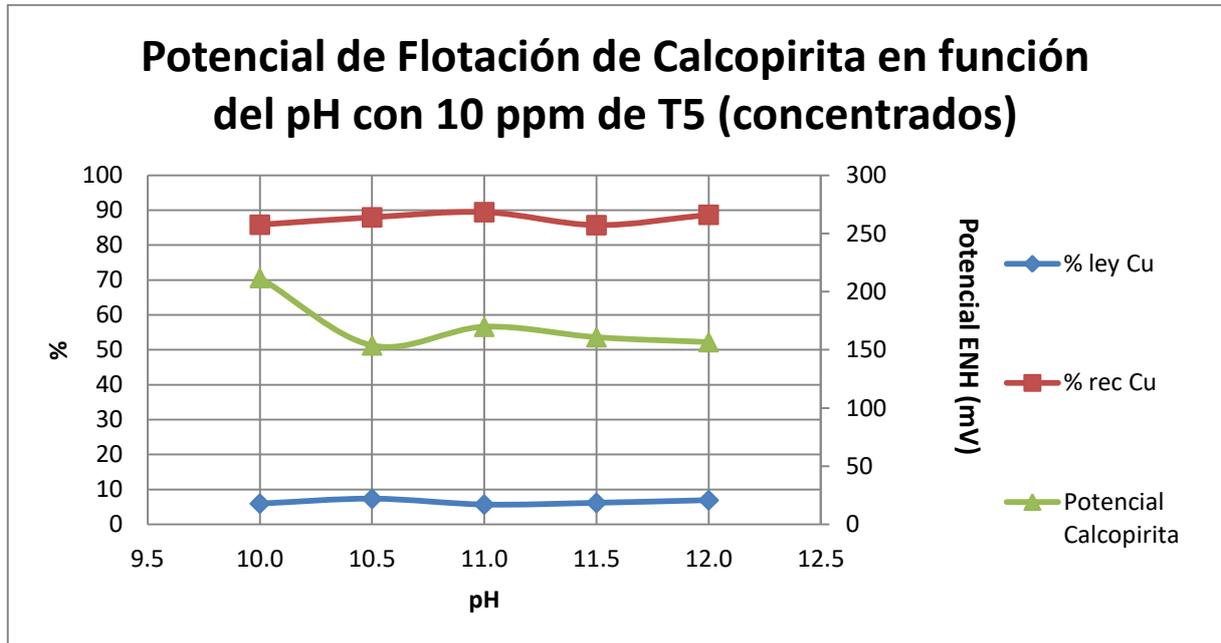


FIGURA 32. Representación del Potencial de Flotación de Calcopirita, % ley de Cu y % de recuperación de Cu en concentrados en función del pH con 10 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

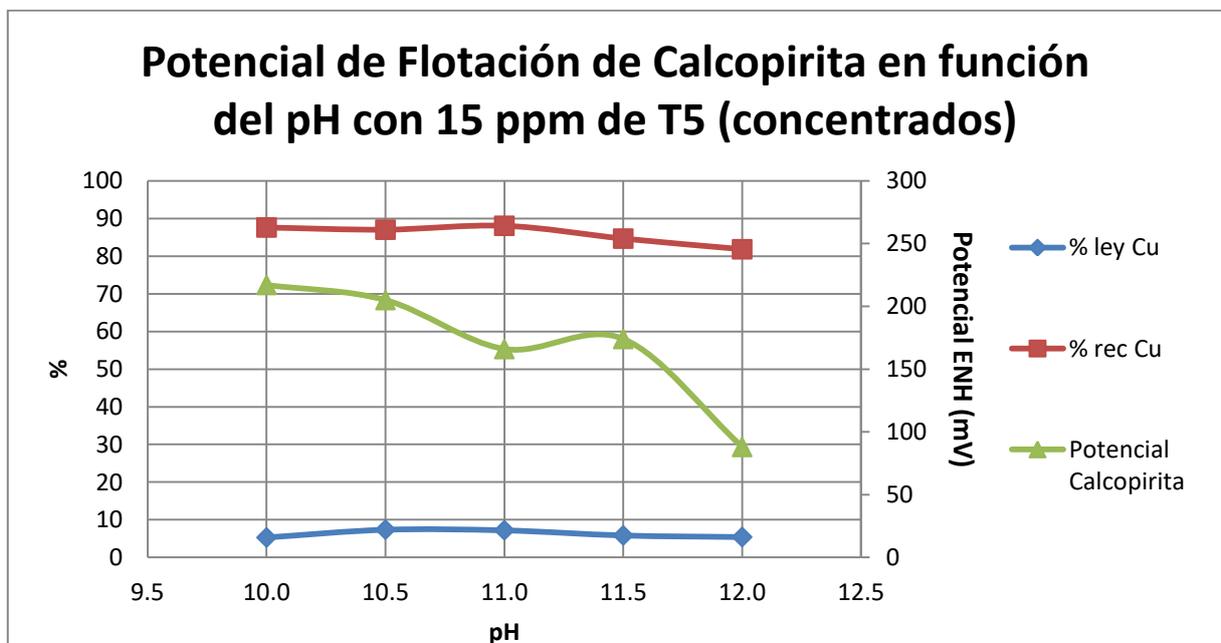


FIGURA 33. Representación del Potencial de Flotación de Calcopirita, % ley de Cu y % de recuperación de Cu en concentrados en función del pH con 15 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

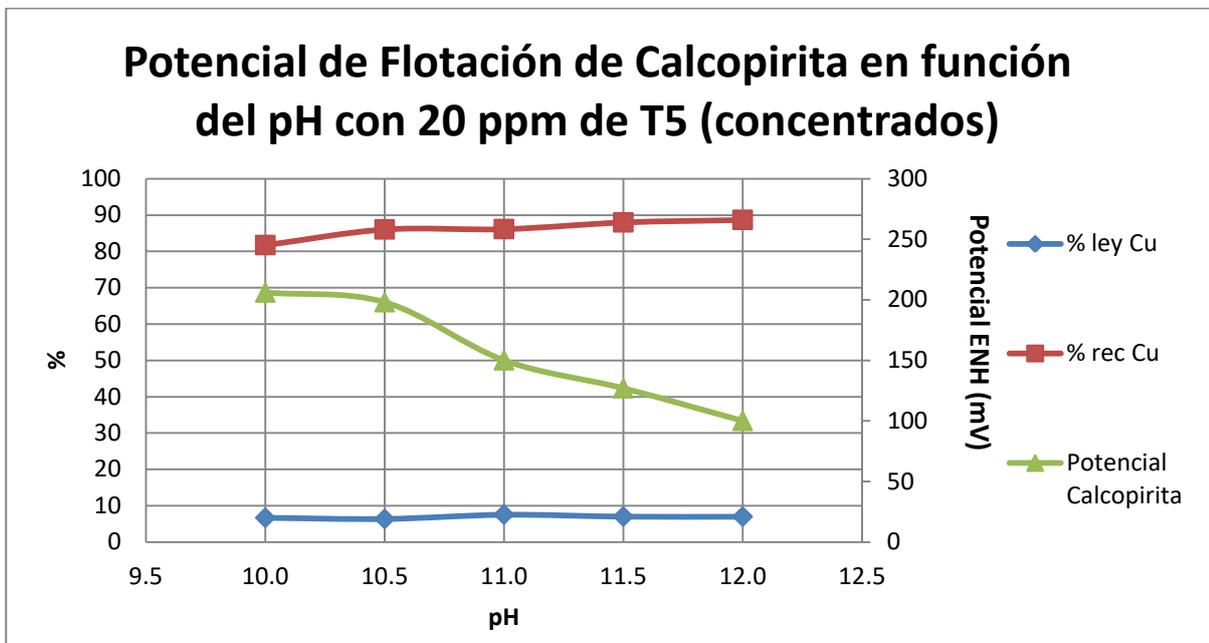


FIGURA 34. Representación del Potencial de Flotación de Calcopirita, % ley de Cu y % de recuperación de Cu en concentrados en función del pH con 20 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

En las Figuras 32, 33 y 34 se muestra el efecto en los cambios del valor potencial para la Calcopirita, así como el resultado de las recuperaciones y % ley de Cobre obtenido por el análisis de Espectrometría de Absorción Atómica en función de la adición de depresor T5, mostrando que el colector XEK en concentraciones de 1.5×10^{-4} M funciona mejor en conjunto con T5 en concentraciones de 20 ppm donde la curva muestra una tendencia que al tener un aumento del pH, el % de recuperación de Cobre aumenta, con la correspondiente disminución del Potencial de Flotación, evidenciando que a valores de potencial mas anódicos, la recuperación de Cobre será mayor.

Al tener un circuito de Flotación Primaria los valores del % en ley de Cobre no muestran variación considerable entre las pruebas, mostrando valores entre 5 y 8% dependiendo la concentración del depresor T5 y pH de la flotación efectuada.

Se observa una tendencia constante en estas 3 Figuras que, al aumentar el valor de pH de trabajo, el potencial de flotación de la Calcopirita decrece y el % de recuperación de Cobre tiene ligeros incrementos.

Se tiene que con 20 ppm de T5 a pH 12 se encuentran los mejores resultados de recuperación de Cobre, teniendo valores de 88.66 % de recuperación de Cobre en concentrados con un 6.97% ley, que al tratarse un circuito primario presenta un resultado aceptable.

3.5.3 RESULTADOS DE POTENCIAL DE FLOTACIÓN, % LEY Y % DE RECUPERACIÓN DE PIRITA EN CONCENTRADOS

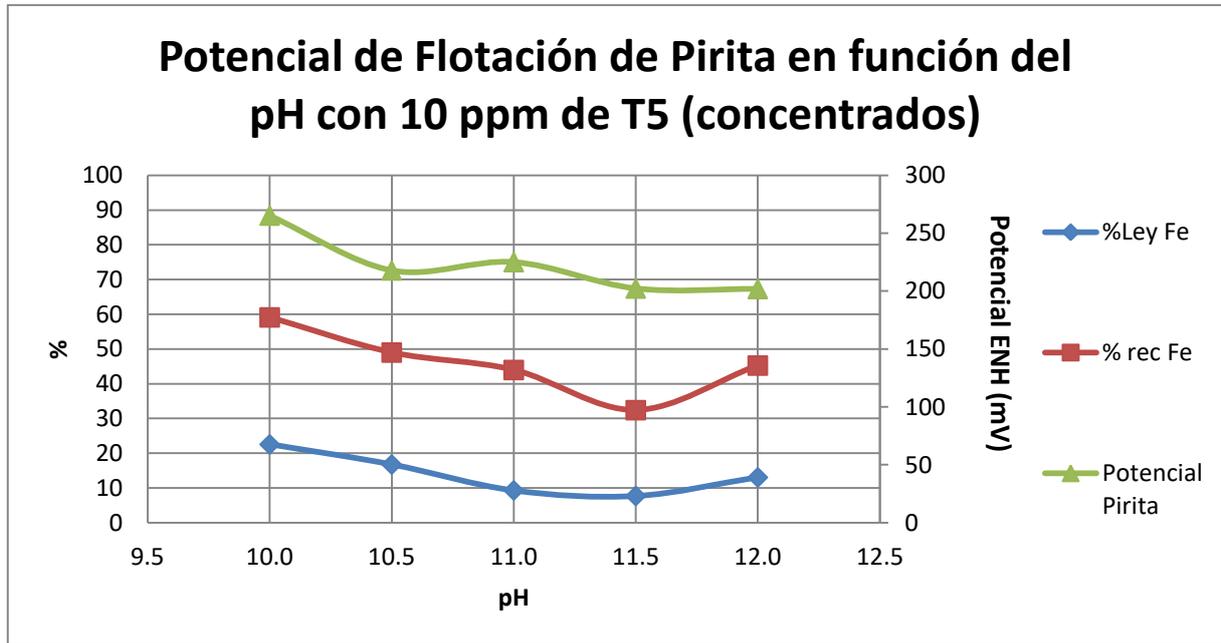


FIGURA 35. Representación del Potencial de Flotación de Pirita, % ley de Fe y % de recuperación de Fe en concentrados en función del pH con 10 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

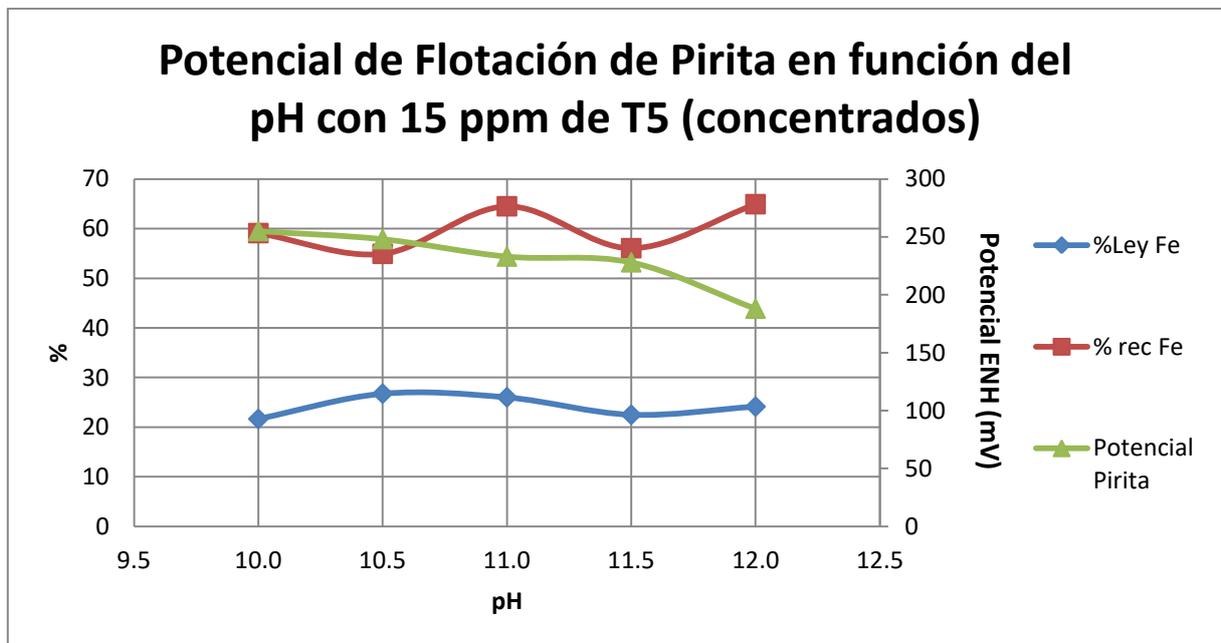


FIGURA 36. Representación del Potencial de Flotación de Pirita, % ley de Fe y % de recuperación de Fe en concentrados en función del pH con 15 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

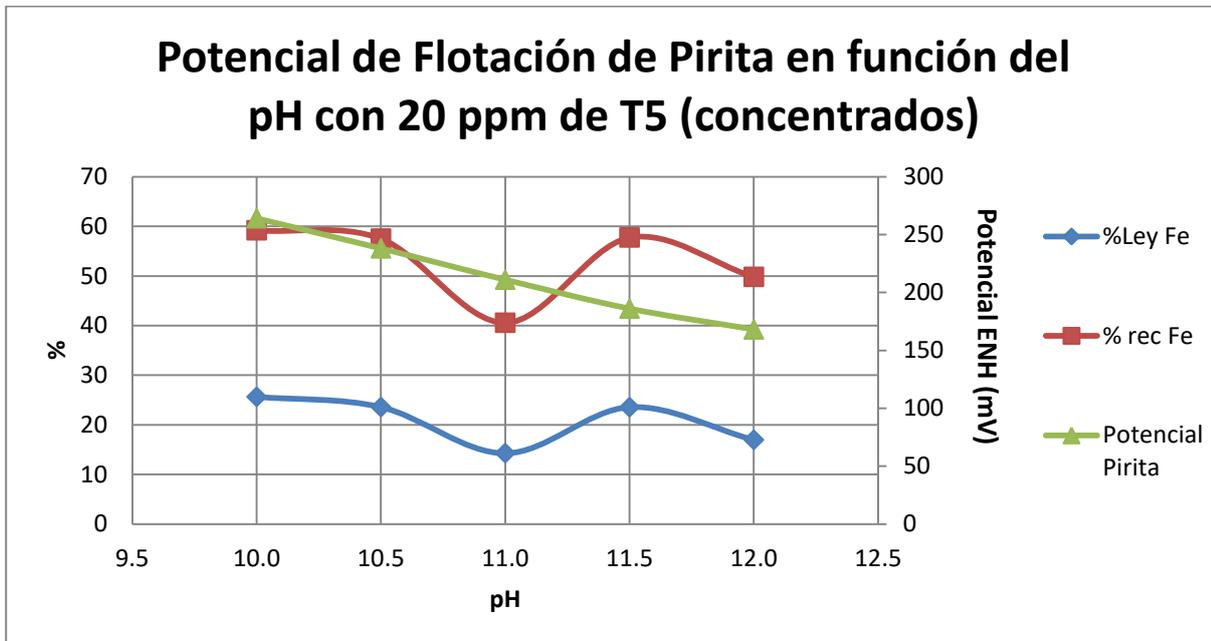


FIGURA 37. Representación del Potencial de Flotación de Pirita, % ley de Fe y % de recuperación de Fe en concentrados en función del pH con 20 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

Al comparar las Figuras 35, 36 y 37 se muestra que las mejores condiciones para la depresión de la Pirita se dan en la Figura 35 con 10 ppm de T5 a pH de 11.5 donde se tiene un % de recuperación de Hierro del 32.41% y 7.71% ley siendo este el punto con los valores más bajos de % de recuperación y % ley de Hierro para los concentrados de todas las pruebas de flotación.

Dado que los productos de activación de Cobre pueden interactuar con los colectores de flotación, haciendo que la superficie de Pirita sea hidrofóbica en valores de pH alcalinos, aunados al alto contenido de Pirita en cabeza, Se observa que existen valores de recuperación elevados de Hierro en los concentrados en todas las pruebas de flotación, mostrando valores entre 32% y 60%.

Se hizo un análisis estequiométrico (Anexo 5) del Hierro presente en los concentrados de Calcopirita, con el objetivo de verificar la cantidad de Pirita presente y se encontró que la condición en la que la cantidad de Hierro perteneciente a Pirita era menor que la cantidad de Hierro perteneciente a la Calcopirita se obtuvo a las condiciones de 10 ppm de T5 y pH de 11.5 observando que a pesar de haber obtenido 7.71 %wt. de Hierro en los concentrados, un 5.45% wt. perteneció a la Calcopirita y un 2.25% wt. a la Pirita, es decir la cantidad de Hierro recuperada en concentrados representó casi en un 70% a Calcopirita mientras que el 30% restante representó a la Pirita.

3.5.4 RESULTADOS DE POTENCIAL DE FLOTACIÓN, % LEY Y % DE RECUPERACIÓN DE CALCOPIRITA EN COLAS

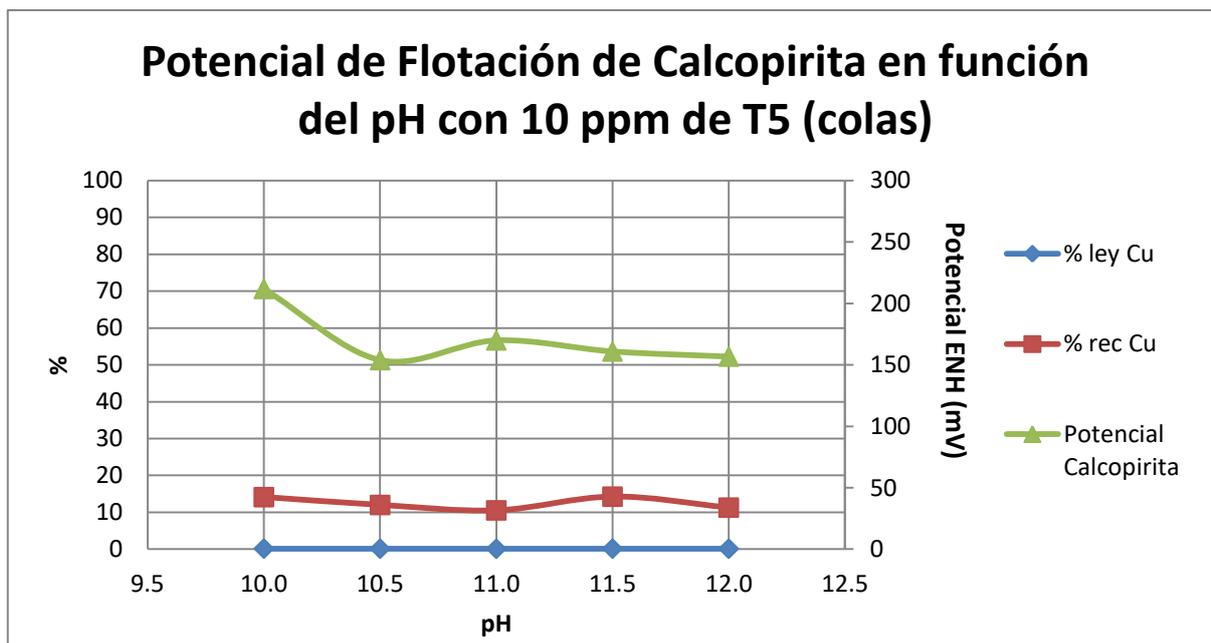


FIGURA 38. Representación del Potencial de Flotación de Calcopirita, % ley de Cu y % de recuperación de Cu en colas en función del pH con 10 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

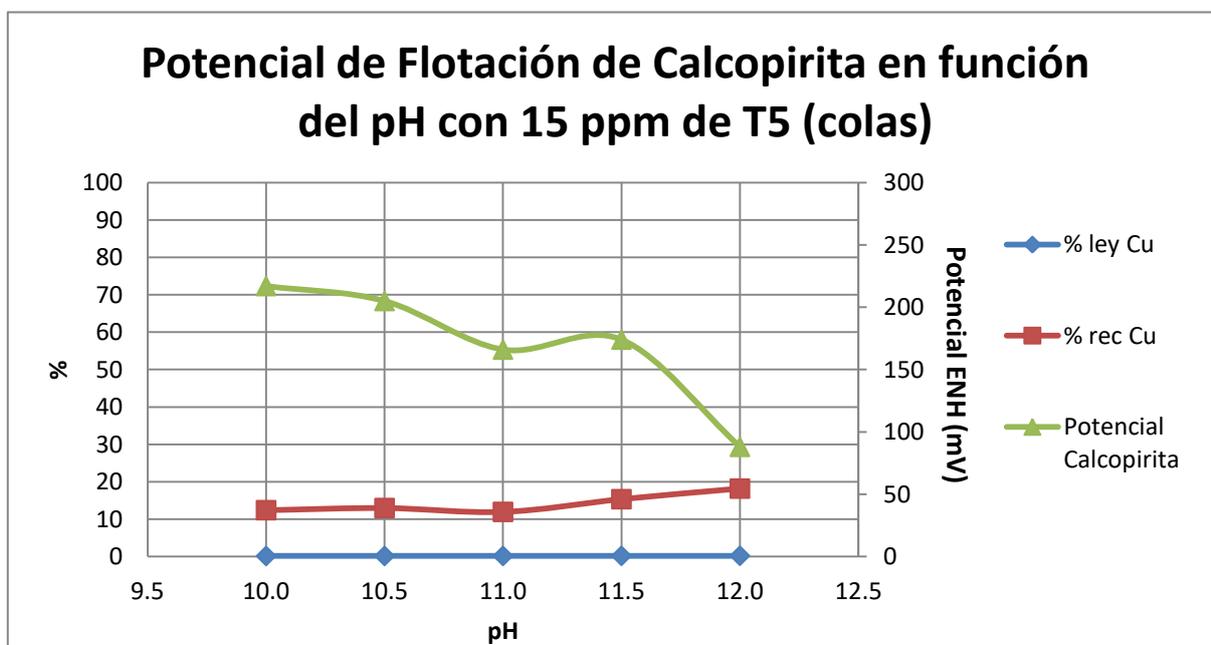


FIGURA 39. Representación del Potencial de Flotación de Calcopirita, % ley de Cu y % de recuperación de Cu en colas en función del pH con 15 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

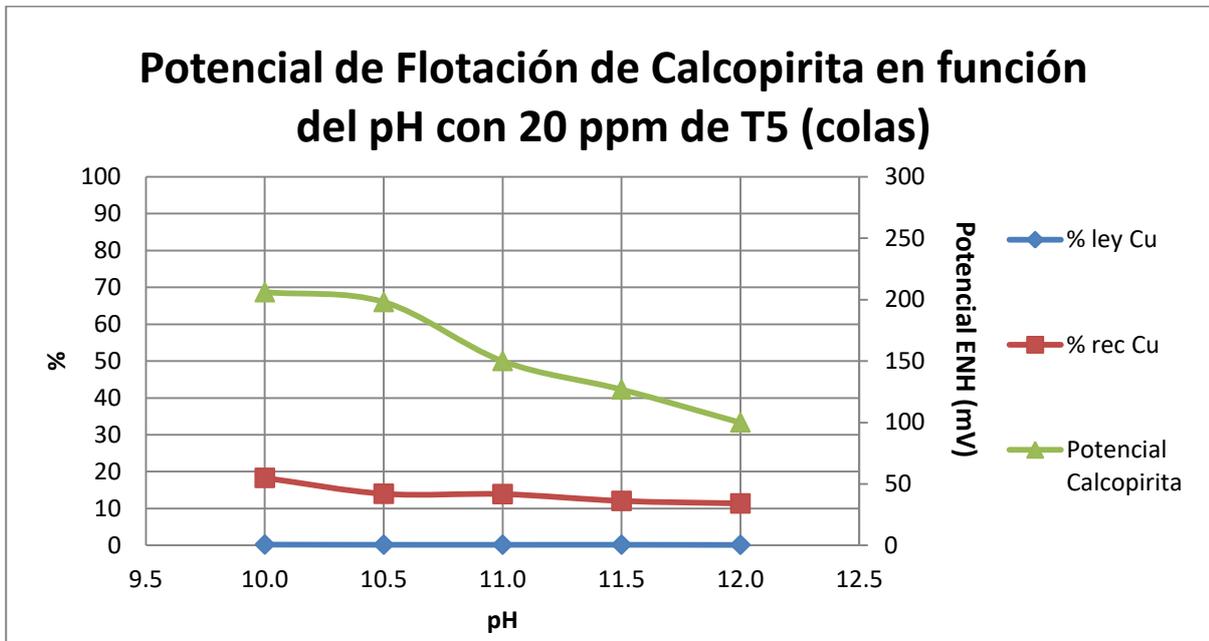


FIGURA 40. Representación del Potencial de Flotación de Calcopirita, % ley de Cu y % de recuperación de Cu en colas en función del pH con 20 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

Al comparar las Figuras 38, 39 y 40, se observa que en la Figura 39, al tener una concentración de 15 ppm de T5 en la celda a partir de valores de pH de 11 hasta 12, la función del colector XEK en una concentración de 1.5×10^{-4} M es afectado por la adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para la recuperación de Cobre, ocasionando que exista una tendencia a deprimir Calcopirita debido a que en estas condiciones se tiene la posible formación de especies hidrófilas como el Hidróxido de Cobre ($\text{Cu}(\text{OH})_2$), hidróxido ferroso ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) e hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) en la superficie de la Calcopirita, disminuyendo la formación de Xantato de Cobre y Dixantógeno hidrofóbico quienes favorecen la flotación de la Calcopirita, efecto diferente al observado en la Figura 40 donde con 20 ppm de depresor T5 se tiene la tendencia inversa, es decir, el % de recuperación de Cobre en colas tiende a decrecer en función del aumento del pH en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

En los Potenciales de Reposo analizados anteriormente se distingue que el potencial de la Pirita siempre se encuentra por encima del potencial de la Calcopirita, formando así interacciones de par galvánico donde la Calcopirita ejerce como ánodo y la Pirita como el cátodo en la reacción, perjudicando a la Calcopirita, que al ejercer como ánodo sufre reacciones que generan estos óxidos e hidróxidos mencionados en el párrafo anterior, lo cual afecta directamente la flotación del mineral de Cobre, volviéndolo hidrofílico especialmente en valores de pH superiores a 11.5 con 15 ppm de T5 y XEK 1.5×10^{-4} M.

3.5.5 RESULTADOS DE POTENCIAL DE FLOTACIÓN, % LEY Y % DE RECUPERACIÓN DE PIRITA EN COLAS

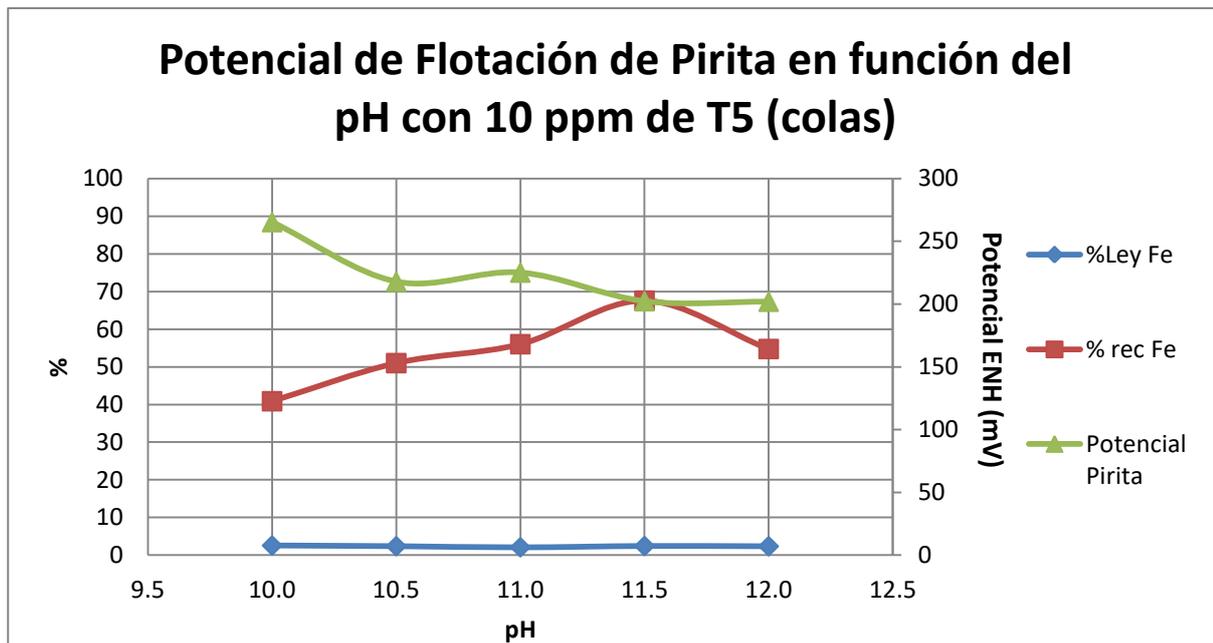


FIGURA 41. Representación del Potencial de Flotación de Pirita, % ley de Fe y % de recuperación de Fe en colas en función del pH con 10 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

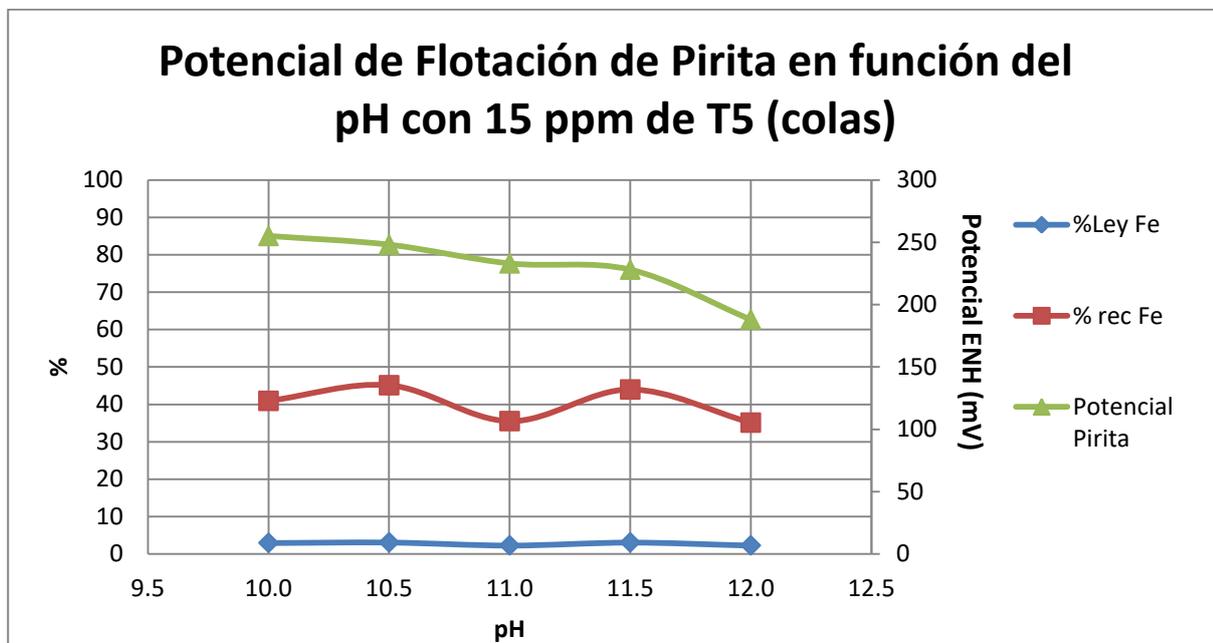


FIGURA 42. Representación del Potencial de Flotación de Pirita, % ley de Fe y % de recuperación de Fe en colas en función del pH con 15 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

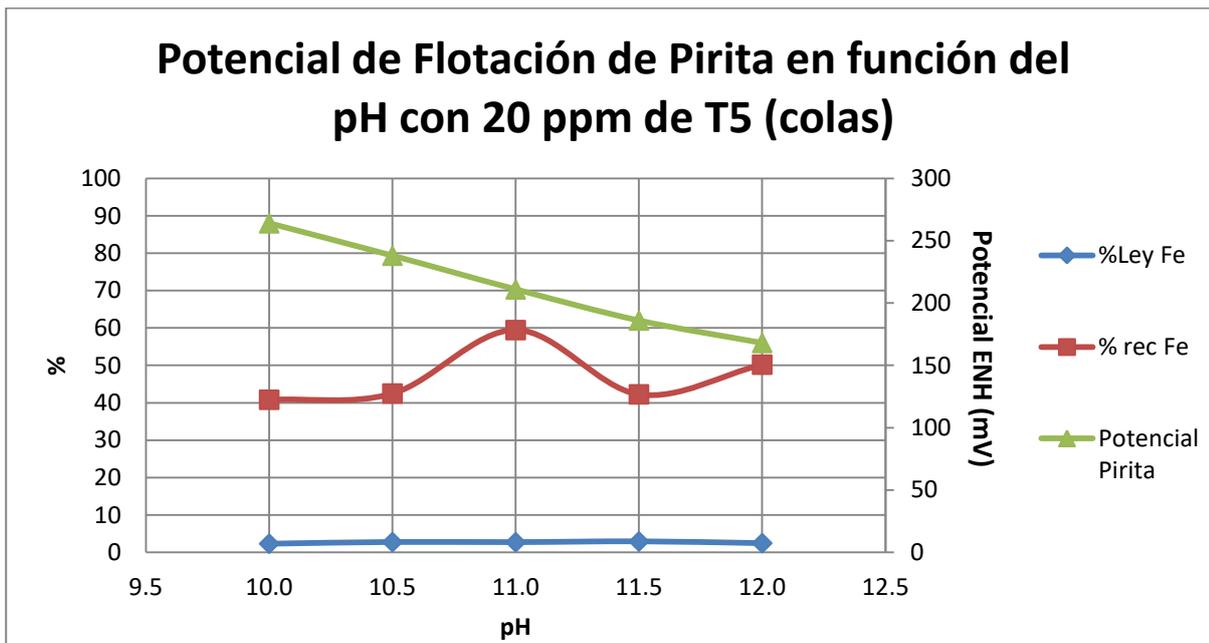


FIGURA 43. Representación del Potencial de Flotación de Pirita, % ley de Fe y % de recuperación de Fe en colas en función del pH con 20 ppm de depresor T5, en presencia de colector XEK 1.5×10^{-4} M.

Al analizar las Figuras 41, 42 y 43 que nos representan los resultados de % ley y % de recuperación de Hierro en las colas se observa una tendencia marcada en la Figura 41 que en función del aumento del pH, el potencial tiende a decrecer hasta estabilizarse en valores de potencial cercanos a 200 mV y la depresión de Hierro aumenta hasta llegar al valor más alto de 67.59% de recuperación, que es la condición de optima precipitación de Pirita en los circuitos de flotación estudiados.

Se observa también, para las curvas que representan las concentraciones de 15 y 20 ppm de depresor T5, que el porcentaje de recuperación tiene muchas variaciones en función del decremento del potencial dado por el incremento del pH y no muestra una tendencia marcada de comportamiento. Esto nos indica que la relación de depresión de Pirita en la flotación no es directamente proporcional a la cantidad de depresor T5 en la solución al menos para este sistema Mineral-Reactivo con 1.5×10^{-4} M de colector XEK.

El comportamiento inestable de depresión de Pirita posiblemente se deba a que al tener interacción galvánica con la Calcopirita, ésta última se oxida liberando iones cuprosos (Cu^+) que se depositan en la superficie de la Pirita generando interacción con el colector XEK y a su vez flotabilidad de la misma.

3.6 RESULTADOS DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Tabla 7. Valores en %wt de los elementos Cu y Fe obtenidos por absorción atómica

	MUESTRA	CONDICIONES (XEK CONSTANTE)		Cu (%wt)	Fe (%wt)
		pH	DEPRESOR T5 (ppm)		
CONCENTRADOS	1C	10	10	5.969	22.559
	2C	10.5	10	7.353	16.768
	3C	11	10	5.709	9.309
	4C	11.5	10	6.191	7.712
	5C	12	10	6.941	13.071
	6C	10	15	5.292	21.634
	7C	10.5	15	7.383	26.743
	8C	11	15	7.215	26.008
	9C	11.5	15	5.836	22.476
	10C	12	15	5.412	24.131
	11C	10	20	6.662	25.629
	12C	10.5	20	6.323	23.555
	13C	11	20	7.544	14.274
	14C	11.5	20	6.993	23.542
	15C	12	20	6.967	16.962
COLAS	1T	10	10	0.162	2.574
	2T	10.5	10	0.137	2.389
	3T	11	10	0.119	2.099
	4T	11.5	10	0.156	2.440
	5T	12	10	0.132	2.370
	6T	10	15	0.147	2.945
	7T	10.5	15	0.155	3.083
	8T	11	15	0.156	2.277
	9T	11.5	15	0.184	3.067
	10T	12	15	0.208	2.260
	11T	10	20	0.195	2.316
	12T	10.5	20	0.162	2.749
	13T	11	20	0.158	2.713
	14T	11.5	20	0.162	2.913
	15T	12	20	0.128	2.458

En la tabla 7 se registraron los Valores en %wt de los elementos Cu y Fe por medio de Espectrometría de Absorción Atómica obtenidos en concentrados y colas para las diferentes condiciones de prueba realizadas donde se observa una mayor recuperación en %wt de Cu en los concentrados. Cabe hacer énfasis en que estos resultados fueron utilizados para realizar las curvas de potenciales de flotación de los diferentes sistemas mineral-reactivo tratando previamente el balance metalúrgico.

CAPITULO 4

4.1 CONCLUSIONES

- El pH aumenta con adiciones de Ca(OH)_2 , al emplear este álcali como regulador de pH se modifica el potencial de la Calcopirita y la Pirita, lo que a su vez influye en su flotabilidad/depresibilidad.
- El depresor T5 y el colector XEK son reactivos que modifican el potencial redox de la superficie de los minerales alterando la hidrofobicidad en función del pH.
- Las condiciones de flotación de Calcopirita en presencia de XEK se ven favorecidas por el incremento del pH con Ca(OH)_2 así como por la interacción de par galvánico que se genera con la Pirita solo en ciertos valores de pH ya que existen factores como la posible formación de óxidos hidrofílicos que afectan la superficie de la Calcopirita ocasionando precipitación de la misma, sobre todo en valores de pH superiores a 11.
- Las condiciones de depresión de Pirita se ven favorecidas por el incremento del pH con Ca(OH)_2 hasta valores de 11.5 en presencia de T5 a 20 ppm, aunque existen factores como el alto contenido de Pirita en cabeza y la participación de iones cuprosos formados a partir de la interacción galvánica Pirita-Calcopirita que al interactuar con el colector XEK generan condiciones de hidrofobicidad en la superficie de la Pirita a partir de este valor de pH.
- En el estudio de potenciales mixtos se describe el comportamiento del mineral al ser flotado en diferentes condiciones de pH y por lo tanto es posible predecir la flotabilidad/depresión de un mineral de $\text{FeS}_2\text{-CuFeS}_2$ en determinadas condiciones.
- Las mejores condiciones de flotación de Calcopirita se tienen en la prueba con 20 ppm de T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK a pH 12 con valores de 88.66 % de recuperación de Cobre con un 6.97% ley, así mismo, las mejores condiciones de depresión de Pirita son las de la prueba con 10 ppm de T5, en presencia de XEK 1.5×10^{-4} M a pH 11.5 donde el % de recuperación de Hierro en colas es de 67.59% con un 2.44% ley.
- La mejor selectividad en flotación con potencial mixto con una concentración 1.5×10^{-4} M de KEX son las de la prueba con 10 ppm de T5 en pH 11.5, donde para la Pirita se tiene un potencial de 202 mV con un % de recuperación de Hierro en colas de 67.59% con un 2.44% y para la Calcopirita se tiene un potencial de 161 mV con un % de recuperación de Cobre en concentrados de 85.75% con un 6.19% ley.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Conference: Jornadas SAM/CONAMET. MEMAT (2005). Comportamiento electroquímico de Calcopirita utilizando reactivos de flotación y su influencia en parametros de proceso. Argentina. Disponible en sitio web: https://www.researchgate.net/publication/264898234_CORPORTAMIENTO_ELECTROQUIMICO_DE_CALCOPIRITA_UTILIZANDO_REACTIVOS_DE_FLOTACION_Y_SU_INFLUENCIA_EN_PARAMETROS_DE_PROCESO [Consultado el 08 de Noviembre del 2022]
- [2] Ph.D. Petrovskaya N. Petróvskaya, (2007) Fundamentos de la teoría de flotación. Libro electrónico, 192 pp. LinkedIn.
- [3] Ramírez, R., (2017). Estudio de la depresión de la pirita empleando Schinopsis Balansae (T-5) en el proceso de selección selectiva Pb-Zn, a través de estudios de Potencial Zeta, México. Tesis de Licenciatura UNAM.
- [4] Alejandro López Valdivieso y Juan Luis Reyes Bahena, (2005). Flotación de calcopirita, pirita y molibdenita en minerales de cobre tipo pórfidos. Flotación de calcopirita, pirita y molibdenita en minerales de cobre tipo pórfidos X Simposio sobre Procesamiento de Minerales, Chillán, Chile.
- [5] Meraz Buendia, Cynthia, (2019). Estudio del efecto de la concentración del CaO en un sistema de flotación selectivo FeS₂-PbS, con el potencial de reposo y el potencial de flotación, México. Tesis de licenciatura UNAM
- [6] Salcedo Delgado Bryan Adhemar, (2015). Estudio para mejorar la recuperación de Estaño mediante la flotación inversa de sulfuros en la planta piloto Bofedal 11 de la Unidad de San Rafael MINSUR S.A., Perú. Tesis de licenciatura. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/180/B2-M-18305.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Consultado el 08 de Noviembre del 2022]
- [7] Cabrera Tejeda, J. M., (2005). Adsorción de los colectores Xantato e isopropil tionocarbamato y del depresor dextrina en la interfase calcopirita/solución acuosa. Efecto de la adsorción en la flotabilidad de calcopirita. Instituto de Metalurgia/Facultad de Ingeniería, UASLP, Tesis de Maestría en Ingeniería de Minerales.
- [8] Richard Li Jie Lee, Xumeng Chen, Yongjun Peng, (2022). Flotation performance of chalcopyrite in the presence of an elevated pyrite proportion. Australia, Minerals Engineering.
- [9] Cayunao Collío, Bayron, (2014). Estudio comparativo de la activación de pirita en flotación de minerales a nivel industrial y de laboratorio usando la técnica

de espectroscopia foto electrónica de rayos X (XPS) Tesis de licenciatura. Santiago de Chile.

- [10] ResearchGate. (2011). Chemical-Electrochemical Approaches to the Study Passivation of Chalcopyrite. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Pourbaix-diagram-of-Cu-Fe-S-system-taken-from-Co-rdoba-et-al-2008a_fig5_254250249 [Consultado el 08 de Noviembre del 2022]
- [11] ResearchGate. (2004). Flotation behaviors of pyrites with different chemical compositions. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Potential-pH-diagram-for-pyrite-water-system-25C-10-5-M-dissolved-species-Kocabag_fig9_285651224 [Consultado el 08 de Noviembre del 2022]
- [12] ResearchGate. (2015). Modelling the specific grinding energy and ball mill scale-up india final. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Relationship-between-the-Bond-work-index-w-i-and-the-ore-hardness-designated-by_tbl1_284625503 [Consultado el 13 de Febrero del 2023]
- [13] Blogspot. (2012). Procesamiento de minerales. Disponible en: <http://procesaminerales.blogspot.com/2012/09/flotacion-minerales.html> [Consultado el 08 de Noviembre del 2022]
- [14] 911Metallurgy Corp. (2017). Minerals that float, Processing Engineers. Disponible en: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/colectores-y-quimica-de-la-flotacion/> [Consultado por última vez el 08 de Noviembre del 2022]
- [15] 911Metallurgy Corp. (2017). Minerals that float, Processing Engineers. Disponible en: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/espumantes-y-quimica-de-la-flotacion/> [Consultado el 08 de Noviembre del 2022]
- [16] ResearchGate. (N/D). Exergy of Comminution and the Crepuscular Planet. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Average-Bond-Work-Index-in-kJ-kg-for-some-minerals-and-rocks-Data-taken-from-Allis_tbl2_266501778 [Consultado el 13 de Febrero del 2023]
- [17] ResearchGate. (2020). Studying the effect of ore texture on the bond work index at the mahd ad dahab gold mine. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Geomechanical-geological-characteristics-and-Bond-work-index-for-the-tested-samples_tbl2_339279701 [Consultado el 13 de Febrero del 2023]

ANEXO 1. ECUACIONES PARA CALCULOS GENERALES

-Ecuaciones para cálculos de %Ret, %Ac(+) y %Ac(-)

$$\%Ret = \left(\frac{\text{Pesoretenido delacriba}}{\text{Pesodelamuestratotal}} \right) * 100 \quad (1)$$

$$\%Ac(+) = \frac{\sum \%Ret(\text{Ret1}+\text{Ret2}+\dots+\text{Retn})}{\text{Rettotal}} * 100 \quad (2)$$

$$\%Ac(-)=100-\%Ac(+) \quad (3)$$

-Ecuaciones para cálculo de Wi

$$Kw = \frac{(Ic-Iv)V\sqrt{NF}}{1000} \quad (4)$$

$$Cap = \frac{a \text{ (Kg)}}{t(\text{seg})} \quad (5)$$

$$W = \frac{Kw}{\frac{ston}{h}} \quad (6)$$

$$W = \frac{10Wi}{\sqrt{P80}} - \frac{10Wi}{\sqrt{F80}} \quad (7)$$

$$Wi = \frac{W}{\frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}}} \quad (8)$$

Donde:

- Ic= Amperaje desarrollado cuando la trituradora esta con carga (A)
- Iv= Amperaje desarrollado por la trituradora en vacío (A)
- V= Voltaje de línea (V)
- NF= Número de fases del motor.
- Kw= Kilowatts desarrollados en la trituradora

-Ecuaciones para el cálculo del porcentaje de sólidos en la pulpa para la celda de flotación

$$Masa\ de\ sólidos = \frac{\frac{18\%}{100\%}(masa\ de\ H_2O\ (g))}{\left(1 - \frac{18\%}{100\%}\right)} = masa\ de\ mineral\ (g)/celda\ (9)$$

-Ecuaciones para el cálculo de la concentración de XEK 1.5×10^{-4} M

$$g\ de\ XEK = \left(Molaridad \left(\frac{mol}{L} \right) \right) * (Litros\ de\ disolvente(L)) * \left(masa\ molar \left(\frac{g}{mol} \right) \right) \quad (10)$$

Donde:

Molaridad= 1.5×10^{-4} mol/Litro

Litros de disolvente=volumen de agua en celda

Masa molar XEK= 160.3 g/mol

-Ecuaciones para el cálculo de la concentración de T5 para 10,15 y 20 ppm en 200 ml

$$g\ de\ T5 = (X\ ppm) \left(\frac{1\ mg}{1\ ppm} \right) * \left(\frac{0.001\ g}{1\ mg} \right) * (Volumen\ de\ celda\ (L)) \quad (11)$$

Donde:

1ppm = 1 mg/L

1 mg= 0.001 g

X ppm= numero de ppm requeridas

Volumen de celda= 0.2 L

-Ecuaciones para balances metalúrgicos

$$CONT.METÁLICO = \frac{(P)*(\%W.t)}{\%W.ta} \quad (12)$$

$$\% Rec = \frac{CONT.METALICO}{CMA} \quad (13)$$

Donde:

P= Peso de la recuperación en concentrados o colas

% w.t= % en Ley de la recuperación en concentrados o colas, lecturas de Espectrometría de Absorción Atómica

%W.ta= % en peso total de la recuperación en concentrados + colas = 100%

CMA= Contenido metálico en la alimentación

% Rec = Porcentaje de recuperación del metal calculado

-Ecuaciones para análisis estequiométrico de Hierro

Fracción de Hierro en Calcopirita:

$$\%w.t Fe en CuFeS_2 = \frac{P.M.Fe}{P.M.CuFeS_2} * 100\% \quad (14)$$

Fracción de Cobre en Calcopirita:

$$\%w.t Cu en FeS_2 = \frac{P.M.Cu}{P.M.CuFeS_2} * 100\% \quad (15)$$

Para calcular el % w.t Fe presente en Calcopirita

$$\%w.t de Fe en CuFeS_2 = \frac{\%w.t Cu}{XCu} * (XFe) \quad (16)$$

Para calcular del % Fe total en concentrados referente a Calcopirita y Pirita:

$$\% \text{ de Fe total en Calcopirita} = \frac{\text{Fe de calcopirita}}{\text{Fe total en concentrados}} * 100\% \quad (17)$$

Donde:

Fe de calcopirita= %w.t Fe en Calcopirita

Fe total en concentrados= %Ley Fe= %w.t Fe en concentrados

Por lo tanto:

$$\% \text{ de Fe total en Pirita} = 100\% - \% \text{ de Fe total en Calcopirita} \quad (18)$$

ANEXO 2. CALCULOS GENERALES

-Cálculos para análisis granulométrico,

Ejemplo para el tamaño de partícula 1.25 in y peso de 204.7 g para los datos de la tabla 3:

$$\% Ret = \left(\frac{204.7 \text{ g}}{1127.1 \text{ g}} \right) * 100 = \mathbf{18.16\%} \quad (1)$$

$$\% Ac(+) = \left(\frac{204.7 \text{ g}}{1127.1 \text{ g}} \right) * 100 = \mathbf{18.16\%} \quad (2)$$

$$\% Ac(-) = 100 - 18.16 = \mathbf{81.84\%} \quad (3)$$

-Cálculos para la obtención del Wi:

$$Kw = \frac{(2.6-1.1)(220)\sqrt{3}}{1000} = \mathbf{0.5715 Kw} \quad (4)$$

$$Cap = \frac{1.127 \text{ kg}}{4 \text{ s}} \left(\frac{1 \text{ lb}}{0.454 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ sTon}}{2000 \text{ lb}} \right) \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) = \mathbf{1.117 sTon/h} \quad (5)$$

$$W = \frac{0.5715 \text{ Kw}}{1.117 \text{ sTon/h}} = \mathbf{0.512 Kwh/sTon} \quad (6)$$

$$W = \frac{10Wi}{\sqrt{14300}} - \frac{10Wi}{\sqrt{31250}} = \mathbf{0.512 Kwh/sTon} \quad (7)$$

$$Wi = \frac{0.512 \text{ Kwh/sTon}}{\frac{10}{\sqrt{14300}} - \frac{10}{\sqrt{31250}}} = \mathbf{18.89 Kwh/sTon} \quad (8)$$

-Cálculos para la cantidad requerida de XEK para tener una concentración de 1.5×10^{-4} M en la celda de 200 ml

$$(1.5 \times 10^{-4} \text{ mol/Litro}) * (0.2 \text{ L}) * \left(160.3 \frac{\text{g}}{\text{Mol}} \text{ de XEK} \right) = \mathbf{4.8 \times 10^{-4} \text{ g de XEK}} \quad (10)$$

-Cálculos para la cantidad requerida de T5 en gramos para tener concentraciones de 10, 15 y 20 ppm en la celda de 200 ml.

Para 10 ppm:

$$\mathbf{0.002\ g\ de\ T5} = (10\ \text{ppm}) \left(\frac{1\ \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{1\ \text{ppm}} \right) * \left(\frac{0.001\text{g}}{1\ \text{mg}} \right) * (0.2\text{L}) \quad (11)$$

Para 15 ppm:

$$\mathbf{0.003\ g\ de\ T5} = (15\ \text{ppm}) \left(\frac{1\ \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{1\ \text{ppm}} \right) * \left(\frac{0.001\text{g}}{1\ \text{mg}} \right) * (0.2\text{L}) \quad (11)$$

Para 20 ppm:

$$\mathbf{0.004\ g\ de\ T5} = (20\ \text{ppm}) \left(\frac{1\ \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{1\ \text{ppm}} \right) * \left(\frac{0.001\text{g}}{1\ \text{mg}} \right) * (0.2\text{L}) \quad (11)$$

-Cálculos para determinar la cantidad de mineral que se requirió por cada prueba de flotación:

$$\text{Masa de sólidos} = \frac{\frac{18\%}{100\%}(1100\text{gH}_2\text{O})}{\left(1 - \frac{18\%}{100\%}\right)} = \mathbf{241.5\ g\ de\ mineral/celda} \quad (9)$$

-Cálculos para determinar la cantidad de XEK en gramos que se requirió por cada celda de flotación de 1.1L:

$$(1.5 \times 10^{-4}\ \text{mol/Litro}) * (1.1\text{L}) * \left(160.3\ \frac{\text{g}}{\text{Mol}}\ \text{de XEK}\right) = \mathbf{0.0264\ g\ de XEK}$$

-Cálculos para determinar la cantidad de T5 en gramos que se requirió por cada celda de flotación de 1.1L para 10, 15 y 20 ppm:

10 ppm:

$$\mathbf{0.011\ g\ de\ T5} = (10\ \text{ppm}) \left(\frac{1\ \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{1\ \text{ppm}} \right) * \left(\frac{0.001\text{g}}{1\ \text{mg}} \right) * (1.1\text{L}) \quad (11)$$

15 ppm:

$$\mathbf{0.0165\ g\ de\ T5} = (15\ \text{ppm}) \left(\frac{1\ \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{1\ \text{ppm}} \right) * \left(\frac{0.001\text{g}}{1\ \text{mg}} \right) * (1.1\text{L}) \quad (11)$$

20 ppm:

$$\mathbf{0.022\ g\ de\ T5} = (20\ \text{ppm}) \left(\frac{1\ \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{1\ \text{ppm}} \right) * \left(\frac{0.001\text{g}}{1\ \text{mg}} \right) * (1.1\text{L}) \quad (11)$$

-Cálculo de balance metalúrgico, ejemplo para concentrados de Cobre de de la tabla 10, pH a valor de 10.

$$\mathbf{CONT. METÁLICO} = \frac{(34 \text{ g}) * (5.97)}{100} = \mathbf{2.03\%} \quad (12)$$

$$\% \mathbf{Rec} = \frac{2.03}{2.36} = \mathbf{85.87\%} \quad (13)$$

-Cálculos para análisis estequiométrico de Hierro

Peso Molecular:

P.M. Cu= 63.5 g/mol

P.M. Fe= 56 g/mol

P.M. S= 32 g/mol

P.M. Calcopirita (CuFeS₂)= (63.5 g/mol) + (56 g/mol) + 2(32 g/mol) = 183.5 g/mol

-Cálculo de fracción de Hierro en Calcopirita:

$$\% \mathbf{w. t Fe en CuFeS_2} = \frac{56 \text{ g/mol}}{183.5 \text{ g/mol}} * 100\% = \mathbf{30.5\%} \quad (14)$$

Base de cálculo= 1g

Por lo tanto

X_{Fe} en CuFeS₂= 30.5%= 0.305

-Cálculo de fracción de Cobre en Calcopirita:

$$\%w.t \text{ Cu en CuFeS}_2 = \frac{63.5 \text{ g/mol}}{183.5 \text{ g/mol}} * 100\% = \mathbf{34.6\%} \quad (15)$$

Base de cálculo= 1g

Por lo tanto

$X_{\text{Cu}} \text{ en CuFeS}_2 = 34.6\% = 0.346$

-Cálculo de % w.t Fe presente en Calcopirita:

Ejemplo para %w.t Cu= 5.97

$$\%w.t \text{ de Fe en CuFeS}_2 = \frac{5.97}{0.346} * (0.305) = \mathbf{5.26 \%w.t \text{ de Fe en CuFeS}_2} \quad (16)$$

-Cálculos del % Fe total en concentrados referente a Calcopirita y Pirita:

$$\% \text{ de Fe total en Calcopirita} = \frac{5.26 \%w.t \text{ Fe}}{22.56 \%w.t \text{ Fe}} * 100 = \mathbf{23.32\% \text{ de Fe total en Calcopirita}} \quad (17)$$

Donde:

%w.t Fe = 5.26

%w.t Fe= %Ley Fe= 22.56

Por lo tanto:

$$100\% - 23.32\% \text{ de Fe total en Calcopirita} = \mathbf{76.68\% \text{ de Fe total en Pirita}} \quad (18)$$

ANEXO 3. CLASIFICACIÓN DE DUREZA DE MINERALES

Tabla 8. Escala de Valores de dureza de minerales, W_i (kW-h/sTon). [12]

DUREZA DEL MINERAL	INDICE DE TRABAJO (W_i) kWh/sTon
suave	6.5
medio suave	9
medio	12
medio duro	15
duro	18

ANEXO 4. LECTURAS DE POTENCIAL DE REPOSO Y POTENCIAL DE FLOTACIÓN

El potencial en Electrodo Normal de Hidrogeno (ENH) en mV a partir de las lecturas de potencial en electrodo de Ag/AgCl 3 M en mV se obtuvo con de la siguiente relación:

$$\text{Potencial ENH (mV)} = \left(\frac{\text{Potencial } Ag/AgCl \text{ (mV)}}{1000} + 0.22 \right) * 1000$$

LECTURAS DE POTENCIAL DE REPOSO

Tabla 9. Potencial de Reposo de Pirita y Calcopirita con variación de pH con Ca(OH)₂.

POTENCIAL DE REPOSO vs ENH (mV)		
pH	Potencial de Reposo Pirita	Potencial de Reposo Calcopirita
7	320.5	272.3
10	215.8	154.9
10.5	199.7	148.7
11	157.6	133
11.5	134.8	109.8
12	109.7	76.8

Tabla 10. Potencial de Reposo de Pirita y Calcopirita con variación de pH con Ca(OH)₂ y 1.5X10⁻⁴ M de XEK sin depresor T5.

POTENCIAL DE REPOSO vs ENH (mV)		
pH	Potencial de Reposo Pirita	Potencial de Reposo Calcopirita
7	266.3	191.8
10	206.8	142.6
10.5	188.7	130.9
11	165.2	99.7
11.5	135.5	89.6
12	109.1	79.8

Tabla 11. Potencial de Reposo de Pirita y Calcopirita con variación de pH con Ca(OH)₂ y 10 ppm de T5 sin XEK.

POTENCIAL DE REPOSO vs ENH (mV)		
pH	Potencial de Reposo Pirita	Potencial de Reposo Calcopirita
7	307.2	214.4
10	201.9	189.8
10.5	183.6	166.8
11	149.7	139.5
11.5	135.7	138.4
12	125.5	124.4

Tabla 12. Potencial de Reposo de Pirita y Calcopirita con variación de pH con Ca(OH)₂ y 15 ppm de T5 sin XEK.

POTENCIAL DE REPOSO vs ENH (mV)		
pH	Potencial de Reposo Pirita	Potencial de Reposo Calcopirita
7	318.9	225.2
10	255.4	197.6
10.5	239.1	182.7
11	212.7	179.8
11.5	198.2	169.6
12	169.7	161.9

Tabla 13. Potencial de Reposo de Pirita y Calcopirita con variación de pH con Ca(OH)₂ y 20 ppm de T5 sin XEK.

POTENCIAL DE REPOSO vs ENH (mV)		
pH	Potencial de Reposo Pirita	Potencial de Reposo Calcopirita
7	318.3	226.1
10	237.3	195.7
10.5	220.5	193.9
11	209.9	183.6
11.5	198.7	172.7
12	161.6	153.5

Tabla 14. Potencial de Reposo de Pirita y Calcopirita con variación de pH con Ca(OH)_2 , 1.5×10^{-4} M de XEK y 10 ppm de T5.

POTENCIAL DE REPOSO vs ENH (mV)		
pH	Potencial de Reposo Pirita	Potencial de Reposo Calcopirita
7	303.1	201.7
10	246.3	192.6
10.5	252.4	182.2
11	234.7	163.6
11.5	227.3	152.5
12	211.5	149.9

Tabla 15. Potencial de Reposo de Pirita y Calcopirita con variación de pH con Ca(OH)_2 , 1.5×10^{-4} M de XEK y 15 ppm de T5.

POTENCIAL DE REPOSO vs ENH (mV)		
pH	Potencial de Reposo Pirita	Potencial de Reposo Calcopirita
7	320.1	226.5
10	267.1	177.7
10.5	248.2	176.5
11	236.1	155.7
11.5	221.2	144.3
12	205.5	140.8

Tabla 16. Potencial de Reposo de Pirita y Calcopirita con variación de pH con Ca(OH)_2 , 1.5×10^{-4} M de XEK y 20 ppm de T5.

POTENCIAL DE REPOSO vs ENH (mV)		
pH	Potencial de Reposo Pirita	Potencial de Reposo Calcopirita
7	315.3	213.5
10	270.3	182.7
10.5	252.1	164.7
11	221.3	152.6
11.5	213.7	131.5
12	204.2	114.6

LECTURAS DE POTENCIAL DE FLOTACIÓN

Tabla 17. Potencial de Flotación a 10 ppm de T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK.

POTENCIAL DE FLOTACIÓN Ag/AgCl		POTENCIAL DE FLOTACIÓN ENH		pH
Pirita (mV)	Calcopirita (mV)	Pirita (mV)	Calcopirita (mV)	
45.30	-8.20	265	212	10.0
-2.10	-66.10	218	154	10.5
5.10	-50.10	225	170	11.0
-17.70	-59.10	202	161	11.5
-18.10	-63.30	202	157	12.0

Tabla 18. Potencial de Flotación a 15 ppm de T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK.

POTENCIAL DE FLOTACIÓN Ag/AgCl		POTENCIAL DE FLOTACIÓN ENH		pH
Pirita (mV)	Calcopirita (mV)	Pirita (mV)	Calcopirita (mV)	
35.00	-3.00	255	217	10.0
28.00	-15.00	248	205	10.5
13.00	-54.00	233	166	11.0
8.00	-46.00	228	174	11.5
-32.00	-132.00	188	88	12.0

Tabla 19. Potencial de Flotación a 20 ppm de T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK.

POTENCIAL DE FLOTACIÓN Ag/AgCl		POTENCIAL DE FLOTACIÓN ENH		pH
Pirita (mV)	Calcopirita (mV)	Pirita (mV)	Calcopirita (mV)	
44.00	-14.00	264	206	10.0
18.00	-22.00	238	198	10.5
-9.00	-70.00	211	150	11.0
-34.00	-93.10	186	127	11.5
-52.00	-120.00	168	100	12.0

ANEXO 5. BALANCES METALÚRGICOS

Para realizar el balance metalúrgico se requirió del diagrama de flujo de la Figura 44 como orientación sobre lo ocurrido en la celda flotación.

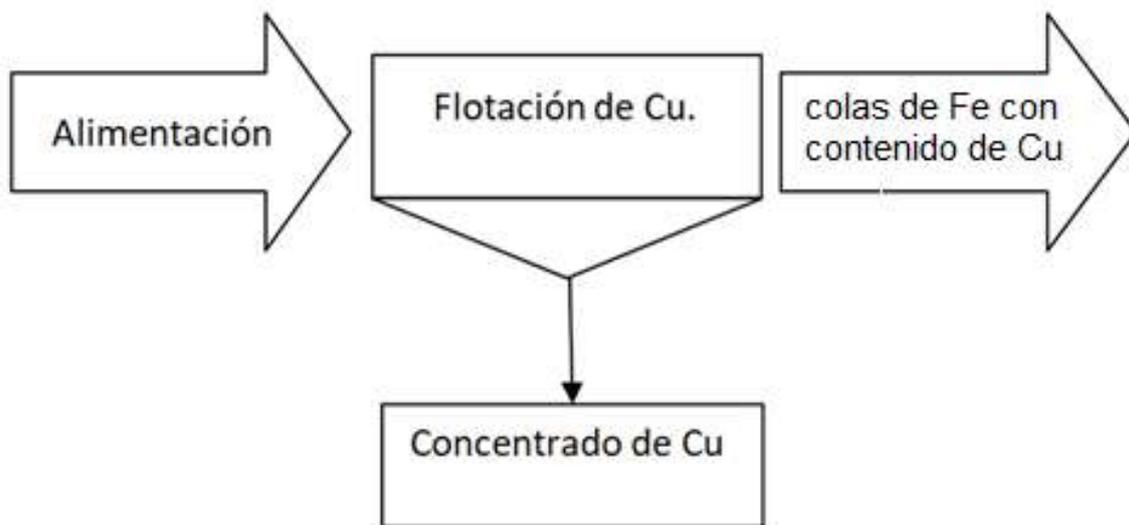


FIGURA 44. Diagrama de flujo del proceso en la celda de flotación.

Tabla 20. Registro de pesos finales en concentrados y colas de flotación.

		pH				
T5 (ppm)		10	10.5	11	11.5	12
10	CONCENTRADOS (g)	34	28.9	36.1	31.5	31.4
	COLAS (g)	206	211.1	204	207.6	209.5
15	CONCENTRADOS (g)	39.4	29.5	32.1	35.5	35.2
	COLAS (g)	200.3	210.1	201.8	204	203.1
20	CONCENTRADOS (g)	27.8	32.9	27.5	34	30.2
	COLAS (g)	212.1	208.2	212.1	201.1	210

Tabla 21. Valores de % Ley de Cobre analizados por absorción atómica.

T5 (ppm)		pH				
		10	10.5	11	11.5	12
10	CONCENTRADOS (g)	5.97	7.35	5.71	6.19	6.94
	COLAS (g)	0.16	0.14	0.12	0.16	0.13
15	CONCENTRADOS (g)	5.29	7.38	7.21	5.84	5.41
	COLAS (g)	0.15	0.15	0.16	0.18	0.21
20	CONCENTRADOS (g)	6.66	6.32	7.54	6.99	6.97
	COLAS (g)	0.20	0.16	0.16	0.16	0.13

Tabla 22. Valores de % Ley de Hierro analizados por absorción atómica.

T5 (ppm)		pH				
		10	10.5	11	11.5	12
10	CONCENTRADOS (g)	22.56	16.77	9.31	7.71	13.07
	COLAS (g)	2.57	2.39	2.10	2.44	2.37
15	CONCENTRADOS (g)	21.63	26.74	26.01	22.48	24.13
	COLAS (g)	2.95	3.08	2.28	3.07	2.26
20	CONCENTRADOS (g)	25.63	23.56	14.27	23.54	16.96
	COLAS (g)	2.32	2.75	2.71	2.91	2.46

A partir de los valores de % ley de Cobre y Hierro de los concentrados y las colas de flotación, con las ecuaciones y los cálculos para los balances, se obtuvieron las tablas 23, 24 y 25 con los balances metalúrgicos correspondientes de cada variación de depresor a los diferentes valores de pH.

Tabla 23. Balance metalúrgico de flotaciones con 10 ppm de depresor T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK.

pH	Flotaciones a 10 ppm de T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK								
	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Fe	%Ley Cu	Contenido Metálico Fe (g)	% Rec Fe	Contenido Metálico Cu (g)	%Rec Cu
10	Concentrado	34.00	14.17	22.56	5.97	7.67	59.13	2.03	85.87
	Colas	206.00	85.83	2.57	0.16	5.30	40.87	0.33	14.13
	Alimentación	240.00	100.00	5.41	0.98	12.97	100.00	2.36	100.00
10.5	Concentrado	28.90	12.04	16.77	7.35	4.85	49.00	2.13	87.99
	Colas	211.10	87.96	2.39	0.14	5.04	51.00	0.29	12.01
	Alimentación	240.00	100.00	4.12	1.01	9.89	100.00	2.42	100.00
11	Concentrado	36.10	15.04	9.31	5.71	3.36	43.98	2.06	89.47
	Colas	204.00	84.96	2.10	0.12	4.28	56.02	0.24	10.53
	Alimentación	240.10	100.00	3.18	0.96	7.64	100.00	2.30	100.00
11.5	Concentrado	31.50	13.17	7.71	6.19	2.43	32.41	1.95	85.75
	Colas	207.60	86.83	2.44	0.16	5.07	67.59	0.32	14.25
	Alimentación	239.10	100.00	3.13	0.95	7.49	100.00	2.27	100.00
12	Concentrado	31.40	13.03	13.07	6.94	4.10	45.26	2.18	88.72
	Colas	209.50	86.97	2.37	0.13	4.96	54.74	0.28	11.28
	Alimentación	240.90	100.00	3.76	1.02	9.07	100.00	2.46	100.00

Tabla 24. Balance metalúrgico de flotaciones con 15 ppm de depresor T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK.

pH		Flotaciones a 15 ppm de T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK							
10	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Fe	%Ley Cu	Contenido Metálico Fe (g)	% Rec Fe	Contenido Metálico Cu (g)	%Rec Cu
	Concentrado	39.40	16.44	21.63	5.29	8.52	59.10	2.08	87.60
	Colas	200.30	83.56	2.95	0.15	5.90	40.90	0.30	12.40
	Alimentación	239.70	100.00	6.02	0.99	14.42	100.00	2.38	100.00
10.5	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Fe	%Ley Cu	Contenido Metálico Fe (g)	% Rec Fe	Contenido Metálico Cu (g)	%Rec Cu
	Concentrado	29.50	12.31	26.74	7.38	7.89	54.91	2.18	87.03
	Colas	210.10	87.69	3.08	0.15	6.48	45.09	0.32	12.97
	Alimentación	239.60	100.00	6.00	1.04	14.37	100.00	2.50	100.00
11	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Fe	%Ley Cu	Contenido Metálico Fe (g)	% Rec Fe	Contenido Metálico Cu (g)	%Rec Cu
	Concentrado	32.10	13.72	26.01	7.21	8.35	64.50	2.32	88.06
	Colas	201.80	86.28	2.28	0.16	4.59	35.50	0.31	11.94
	Alimentación	233.90	100.00	5.53	1.12	12.94	100.00	2.63	100.00
11.5	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Fe	%Ley Cu	Contenido Metálico Fe (g)	% Rec Fe	Contenido Metálico Cu (g)	%Rec Cu
	Concentrado	35.50	14.82	22.48	5.84	7.98	56.05	2.07	84.66
	Colas	204.00	85.18	3.07	0.18	6.26	43.95	0.38	15.34
	Alimentación	239.50	100.00	5.94	1.02	14.24	100.00	2.45	100.00
12	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Fe	%Ley Cu	Contenido Metálico Fe (g)	% Rec Fe	Contenido Metálico Cu (g)	%Rec Cu
	Concentrado	35.20	14.77	24.13	5.41	8.49	64.92	1.91	81.83
	Colas	203.10	85.23	2.26	0.21	4.59	35.08	0.42	18.17
	Alimentación	238.30	100.00	5.49	0.98	13.08	100.00	2.33	100.00

Tabla 25. Balance metalúrgico de flotaciones con 20 ppm de depresor T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK.

pH	Flotaciones a 20 ppm de T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK								
10	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Fe	%Ley Cu	Contenido Metálico Fe (g)	% Rec Fe	Contenido Metálico Cu (g)	%Rec Cu
	Concentrado	27.80	11.59	25.63	6.66	7.12	59.19	1.85	81.72
	Colas	212.10	88.41	2.32	0.20	4.91	40.81	0.41	18.28
	Alimentación	239.90	100.00	5.02	0.94	12.04	100.00	2.27	100.00
10.5	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Fe	%Ley Cu	Contenido Metálico Fe (g)	% Rec Fe	Contenido Metálico Cu (g)	%Rec Cu
	Concentrado	32.90	13.65	23.56	6.32	7.75	57.52	2.08	86.03
	Colas	208.20	86.35	2.75	0.16	5.72	42.48	0.34	13.97
	Alimentación	241.10	100.00	5.59	1.00	13.47	100.00	2.42	100.00
11	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Fe	%Ley Cu	Contenido Metálico Fe (g)	% Rec Fe	Contenido Metálico Cu (g)	%Rec Cu
	Concentrado	27.50	11.48	14.27	7.54	3.93	40.56	2.07	86.12
	Colas	212.10	88.52	2.71	0.16	5.75	59.44	0.33	13.88
	Alimentación	239.60	100.00	4.04	1.01	9.68	100.00	2.41	100.00
11.5	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Fe	%Ley Cu	Contenido Metálico Fe (g)	% Rec Fe	Contenido Metálico Cu (g)	%Rec Cu
	Concentrado	34.00	14.46	23.54	6.99	8.00	57.74	2.38	87.97
	Colas	201.10	85.54	2.91	0.16	5.86	42.26	0.33	12.03
	Alimentación	235.10	100.00	5.90	1.15	13.86	100.00	2.70	100.00
12	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Fe	%Ley Cu	Contenido Metálico Fe (g)	% Rec Fe	Contenido Metálico Cu (g)	%Rec Cu
	Concentrado	30.20	12.57	16.96	6.97	5.12	49.80	2.10	88.66
	Colas	210.00	87.43	2.46	0.13	5.16	50.20	0.27	11.34
	Alimentación	240.20	100.00	4.28	0.99	10.29	100.00	2.37	100.00

ANEXO 6. ANALISIS ESTEQUIOMÉTRICO DE HIERRO PRESENTE EN CONCENTRADOS DE FLOTACIÓN

Para el análisis estequiométrico del porcentaje de Hierro que pertenece a Calcopirita y el porcentaje de Hierro que pertenece a la Pirita en los concentrados de flotación se hicieron los cálculos con las ecuaciones 14-18. Los resultados se observan en la Tabla 13 y las graficas representadas en las Figuras 45-47.

Tabla 26. Resultados de cálculos del análisis estequiométrico de Hierro presente en Pirita y Calcopirita relacionado a los concentrados de flotación.

pH	10 ppm T5				% Cu	% Fe	%Fe presente en CuFeS ₂	%ley Fe	%Fe en Calcopirita	%Fe en Pirita
	g CuFeS ₂	g Fe en CuFeS ₂	% CuFeS ₂	% FeS ₂						
10	5.87	1.79	2.44	5.33	0.85	2.45	5.26	22.56	23.32	76.68
10.5	6.14	1.87	2.56	2.69	0.89	1.24	6.48	16.77	38.66	61.34
11	5.96	1.82	2.48	1.40	0.86	0.64	5.03	9.31	54.06	45.94
11.5	5.64	1.72	2.36	0.65	0.82	0.30	5.46	7.71	70.77	29.23
12	6.30	1.92	2.61	1.97	0.90	0.91	6.12	13.07	46.81	53.19
pH	15 ppm T5				% Cu	% Fe	%Fe presente en CuFeS ₂	%ley Fe	%Fe en Calcopirita	%Fe en Pirita
	g CuFeS ₂	g Fe en CuFeS ₂	% CuFeS ₂	% FeS ₂						
10	6.03	1.84	2.51	6.06	0.87	2.79	4.66	21.63	21.56	78.44
10.5	6.29	1.92	2.63	5.42	0.91	2.49	6.51	26.74	24.34	75.66
11	6.69	2.04	2.86	5.86	0.99	2.70	6.36	26.01	24.45	75.55
11.5	5.99	1.83	2.50	5.58	0.86	2.57	5.14	22.48	22.89	77.11
12	5.51	1.68	2.31	6.22	0.80	2.86	4.77	24.13	19.77	80.23
pH	20 ppm T5				% Cu	% Fe	%Fe presente en CuFeS ₂	%ley Fe	%Fe en Calcopirita	%Fe en Pirita
	g CuFeS ₂	g Fe en CuFeS ₂	% CuFeS ₂	% FeS ₂						
10	5.35	1.63	2.23	4.98	0.77	2.29	5.87	25.63	22.91	77.09
10.5	6.01	1.83	2.49	5.33	0.86	2.45	5.57	23.56	23.66	76.34
11	6.00	1.83	2.50	1.90	0.87	0.88	6.65	14.27	46.59	53.41
11.5	6.87	2.10	2.92	5.46	1.01	2.51	6.16	23.54	26.18	73.82
12	6.08	1.85	2.53	2.96	0.88	1.36	6.14	16.96	36.21	63.79

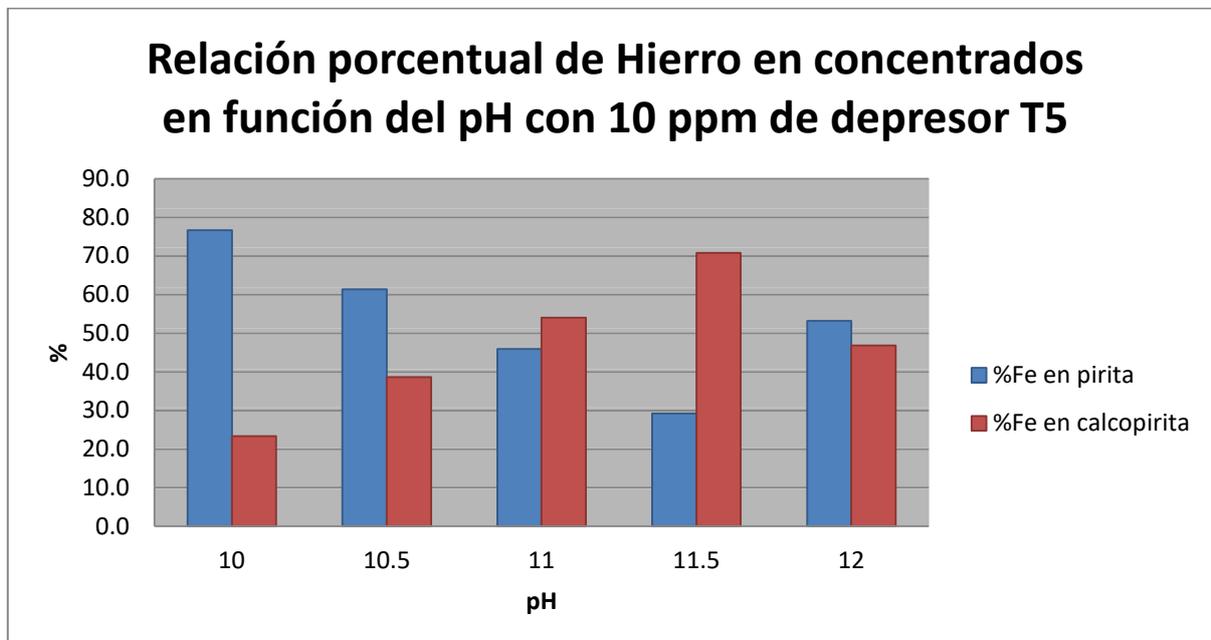


FIGURA 45. Relación porcentual de Hierro presente en concentrados correspondiente a Pirita y Calcopirita en función del pH con 10 ppm de colector T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK.

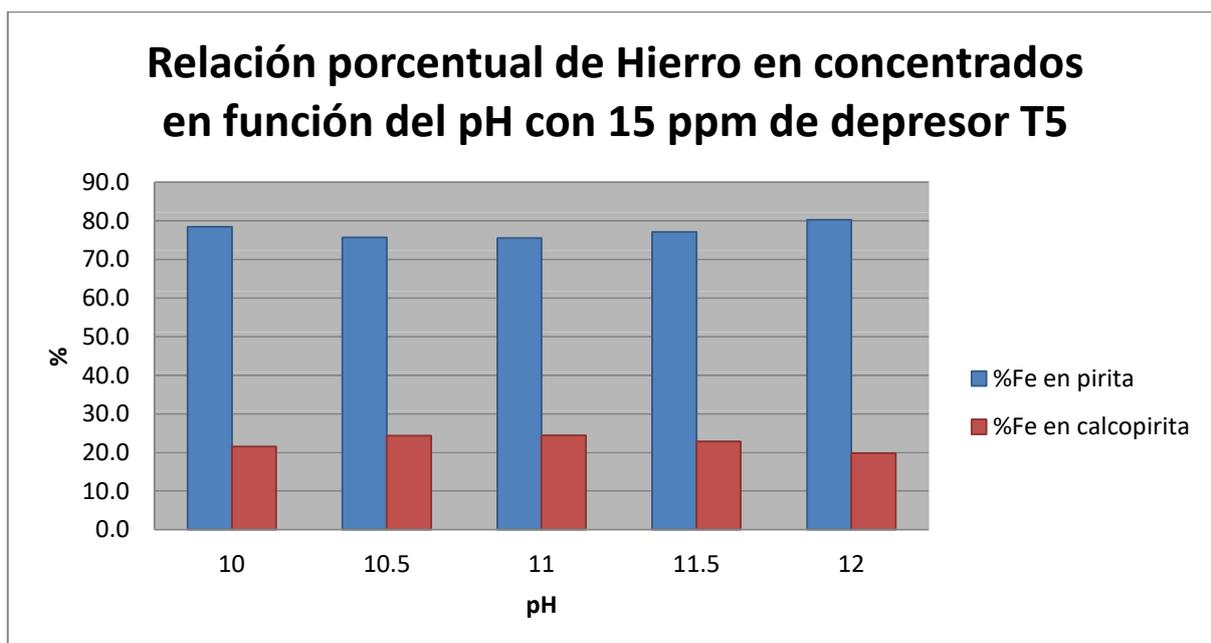


FIGURA 46. Relación porcentual de Hierro presente en concentrados correspondiente a Pirita y Calcopirita en función del pH con 15 ppm de colector T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK.

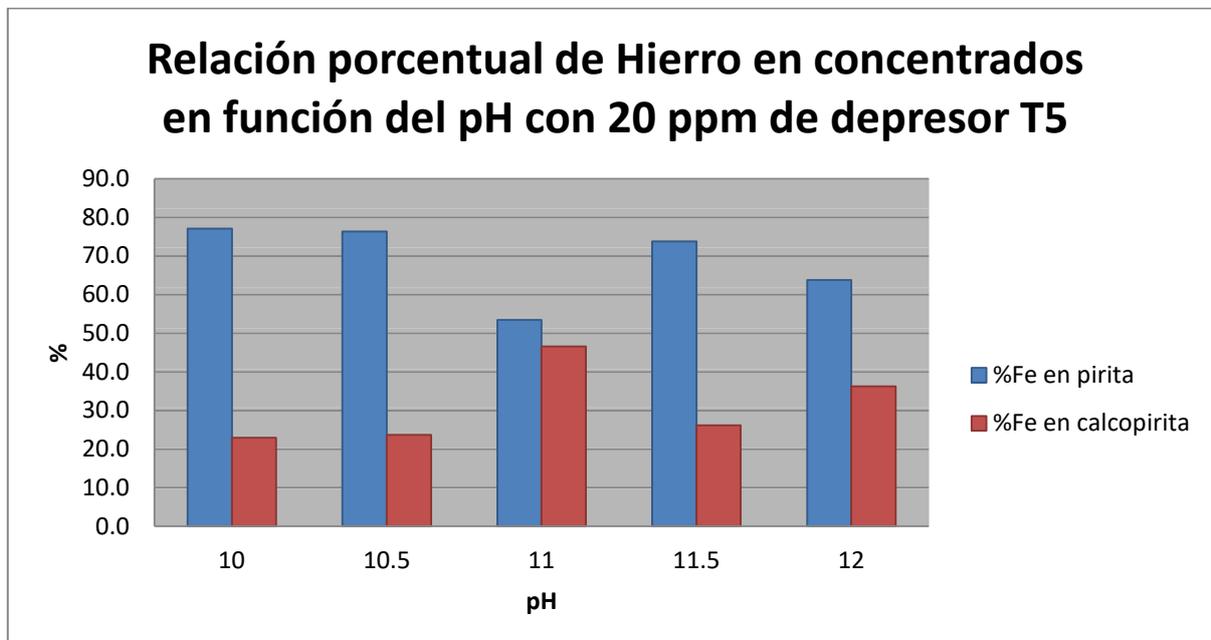


FIGURA 47. Relación porcentual de Hierro presente en concentrados correspondiente a Pirita y Calcopirita en función del pH con 20 ppm de colector T5 y 1.5×10^{-4} M de XEK.