



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**Estudio de la depresión de pirita empleando
Schinopsis Balansae (T5) en el proceso de
flotación selectivo Pb-Zn, a través de flotación en
celda Hallimond**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

PRESENTA

DALIA AMÉZQUITA ALVARADO



CIUDAD DE MÉXICO

2017



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: Antonio Huerta Cerdán.

VOCAL: Faustino Juárez Sánchez.

SECRETARIO: Juan Manuel de la Rosa Canales.

1er. SUPLENTE: José Fernando Flores Álvarez.

2° SUPLENTE: Andrés Vela Avitúa.

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**CIUDAD UNIVERSITARIA, FACULTAD DE QUÍMICA, EDIFICIO D, LABORATORIO 006
DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA.**

ASESOR DEL TEMA:

Antonio Huerta Cerdán _____

SUSTENTANTE:

Dalia Amézquita Alvarado _____



ÍNDICE

LISTADO DE FIGURAS	1
LISTADO DE TABLAS.....	4
ABREVIATURAS	5
RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	7
OBJETIVOS.....	9
HIPÓTESIS	9
CAPÍTULO 1	10
1.2 Marco teórico.....	10
1.2.1 Flotación de minerales.....	10
1.2.2 Schinopsis Balansae.....	17
1.2.3 Celda de flotación Hallimond	20
CAPÍTULO 2.	21
2.1 Desarrollo experimental	21
2.1.1 Caracterización de los minerales.....	21
2.1.2 Pruebas de flotación.....	23
2.2 Materiales y equipo	28
2.3 Minerales y reactivos	29



CAPÍTULO 3	30
3.1 Resultados y análisis de resultados.....	30
3.1.1 Resultado de la caracterización de los minerales	30
3.1.2 Resultado de las pruebas de flotación.....	36
CAPÍTULO 4	53
4.1 Conclusiones	53
BIBLIOGRAFÍA	55
APÉNDICE A.....	61
A.1 Soluciones amortiguadoras.....	61
A.1.1 Estabilidad de soluciones amortiguadoras	61
APÉNDICE B.....	63
B.1 Cálculos para los minerales	63
B.1.1 Cantidad de elemento de interés en el mineral	63
B.1.2 Porcentaje de sólidos en peso	63
APÉNDICE C	65
C.1 Cálculos de reactivos de flotación.....	65
C.1.1 Masa del depresor T5.....	65
C.1.2 Masa del colector XEK	65
C.1.3 Masa del activador CuSO_4	65
C.1.4 Cantidades de reactivos utilizadas en celda Hallimond.....	66
C.1.5 Cantidades de reactivos utilizadas en celda Denver.....	66



Apéndice D	67
D.1 Detalles del análisis químico EAA	67
D.1.1 Digestión ácida	67
D.1.2 Curvas de calibración.....	68
Apéndice E	70
E.1 Diagrama de Pourbaix $\text{FeS}_2/\text{H}_2\text{O}$	70
Apéndice F.....	71
F.1 Balances de materia	71
F.1.1 Balance de Fe, Pb, Zn y Cu a pH 7	71
F.1.2 Balance de Fe, Pb, Zn y Cu a pH 10	72



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Producción nacional de minerales en México. (Cámara Minera de México CAMIMEX, 2017).....	7
Figura 2. Esquema de una celda de flotación.....	10
Figura 3. a) ángulo de contacto entre las diferentes interfases b) relación entre el ángulo de contacto y la mojabilidad de una partícula	12
Figura 4. Estructura general de un colector xantato	14
Figura 5. Estructura molecular del xantato etílico de potasio (XEK)	15
Figura 6. Espuma de flotación cargada con mineral. (curioso, 2017)	16
Figura 7. a) sección transversal del árbol quebracho colorado y b) extracto de quebracho colorado. (gtpculturasdelmundo, 2010), (Aditan, 2017)	17
Figura 8. Estructura química de tanino condensado. (Vazquez F., et al., 2012)	19
Figura 9. Representación de la celda de flotación Hallimond	20
Figura 10. Diagrama del proceso empleado.....	21
Figura 11. Arreglo del sistema de flotación, donde: a) la entrada de aire, b) zona de acondicionamiento y colección de colas del mineral, c) reservorio de colección de la pirita flotada d) nivel de agua, e) zona de adición de reactivos de flotación y f) flujómetro.	24
Figura 12. a) celda de flotación Denver utilizada en la experimentación, b) colección de espuma cargada con mineral y c) concentrado obtenido	27



Figura 13. Reactivos de flotación empleados	29
Figura 14. Mineral de pirita que fue empleado en las pruebas a) previo a la molienda, b) mineral molido	30
Figura 15. Mineral de galena PbS empleado en las pruebas a) previo a la molienda b) mineral molido	31
Figura 16. Mineral complejo empleado en las pruebas a) previo a la molienda, b) mineral molido	32
Figura 17. Menografía del mineral complejo Pb-Zn tomadas a 100 X, Sin Polarización (SP) y Nícoles Paralelos (NP); donde: a) y b) son la misma figura tomadas con Campo Claro (CC) y Campo Oscuro (CO) respectivamente; por último, la figura c) fue tomada en otra zona en Campo Oscuro (CO).	33
Figura 18. Análisis granulométrico del mineral alimentado a las pruebas en celda Denver.....	35
Figura 19. Porcentaje de partículas liberadas valiosas del mineral en función de su tamaño. Mineral complejo utilizado en las pruebas en celda Denver .	35
Figura 20. Recuperación de pirita en celda Hallimond a diferentes valores de pH, a la concentración de 10 ppm del depresor T5, en presencia de colector, depresor, activador y mezcla de estos.....	37
Figura 21. Recuperación de pirita en celda Hallimond a diferentes valores de pH, a la concentración de 15 ppm del depresor T5, en presencia de colector, depresor, activador y mezcla de estos.....	39
Figura 22. Recuperación de pirita en celda Hallimond a diferentes valores de pH, a la concentración de 20 ppm del depresor T5, en presencia de colector, depresor, activador y mezcla de estos.....	40



Figura 23. Recuperación de pirita en celda Hallimond en función del pH en presencia de diferentes concentraciones de depresor T5.....	43
Figura 24. Recuperación de pirita en celda Hallimond en función del pH en presencia de colector 1.5×10^{-4} M y depresor T5 a diferentes concentraciones	44
Figura 25. Recuperación de pirita en celda Hallimond en función del pH en presencia de colector, activador (1.5×10^{-4} M) y depresor T5 a diferentes concentraciones.	45
Figura 26. Recuperación de pirita y galena empleando celda Hallimond a pH 7 en presencia de XEK, CuSO_4 y 10 ppm de T5	47
Figura 27. Recuperación y leyes de pirita y galena empleando celda Hallimond a pH 10 en presencia de XEK, CuSO_4 y 10 ppm de T5	48
Figura 28. Porcentaje de recuperación y de ley en concentrados para Fe, Pb, Zn y Cu en el concentrado bulk en presencia de diferentes reactivos de flotación a pH 7 empleando celda Denver	49
Figura 29. Porcentaje de recuperación y de ley en el concentrado bulk para Fe, Pb,Zn y Cu en presencia de diferentes reactivos de flotación a pH 10 empleando celda Denver	51
Figura 30. Espectroscopio de Absorción Atómica empleado en los análisis..	67
Figura 31. Curva de calibración del Fe para el análisis químico por EAA	68
Figura 32. Curva de calibración del Pb para el análisis químico por EAA	69
Figura 33. Curva de calibración del Zn para el análisis químico por EAA.....	69
Figura 34. Curva de calibración del Cu para el análisis químico por EAA.....	69



Figura 35. Diagrama de Pourbaix para el sistema $\text{FeS}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^+/\text{Fe}(\text{OH})_3$ en un medio acuoso (González, 2015). El cuadro punteado muestra los valores de pH utilizados durante la experimentación y por el comportamiento del mineral, el valor de potencial aproximado de trabajo..... 70

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Selección de cribas	22
Tabla 2. Condiciones experimentales para cada pH (6-11) empleando mineral de alta pureza FeS_2	25
Tabla 3. Tiempo de permanencia del reactivo con el mineral	25
Tabla 4. Condiciones experimentales para cada pH (7 y 10) empleando minerales de alta pureza FeS_2 y PbS en celda Hallimond.....	26
Tabla 5. Condiciones experimentales para cada pH (7 y 10) en celda Denver	27
Tabla 6. Resultados del análisis químico EAA del mineral de piritita empleado	30
Tabla 7. Resultados del análisis químico EAA del mineral de galena empleado	31
Tabla 8. Resultados del análisis químico EAA del mineral complejo empleado	34
Tabla 9. Sistema de amortiguamiento para cada pH para 200 mL de solución	61
Tabla 10. Estabilidad del pH de las soluciones amortiguadoras (6-11)	62



Tabla 11. Masa de reactivos requeridos en celda Hallimond	66
Tabla 12. Masa de reactivos requeridos en celda Denver	66
Tabla 13. Condiciones empleadas para realizar las curvas de calibración ...	68
Tabla 14. Balance de materia para el hierro a pH 7	71
Tabla 15. Balance de materia para plomo a pH 7	71
Tabla 16. Balance de materia para zinc a pH 7	72
Tabla 17. Balance de materia para cobre a pH 7	72
Tabla 18. Balance de materia para hierro a pH 10	72
Tabla 19. Balance de materia para plomo a pH 10	73
Tabla 20. Balance de materia para zinc a pH 10	73
Tabla 21. Balance de materia para cobre a pH 10	73

ABREVIATURAS

T5 Schinopsis Balansae	NP Nicles Paralelos
XEK Xantato Etílico de Potasio	CC Campo Claro
MIBC Metil Isobutil Carbinol	CO Campo Oscuro
EAA Espectroscopía de Absorción Atómica	SP Sin Polarizador
AG Análisis Granulométrico	Me Menografía



RESUMEN

Los procesos de flotación continúan siendo motivo de estudio de manera importante debido a la calidad de los concentrados que se requieren en una planta de beneficio, más aún en los procesos selectivos aplicados en menas complejas. Una etapa interesante del proceso de flotación es el adecuado control de la depresión de menas de hierro (pirita y pirrotita) en la flotación selectiva de menas de galena y esfalerita. Un reactivo que ha mostrado recientemente resultados favorables en la flotación de estas menas es el Schinopsis Balansae (T5) como depresor del Zn. Es importante realizar estudios que proporcionen información para la depresión de menas de hierro, es decir conocer las condiciones bajo las cuales existe la desorción y/o depresión del mineral de pirita, con ayuda de una celda Hallimond.

El tubo de flotación Hallimond es un dispositivo apropiado para realizar estudios básicos de flotación. Su importancia radica en el hecho de que se utilizan pequeñas cantidades de muestra de mineral y reactivos, obteniéndose resultados reproducibles, aplicables a celdas industriales.

Las pruebas de flotación en celda Hallimond realizadas en este estudio, se llevaron a cabo variando condiciones de pH, así como las concentraciones del depresor Schinopsis Balansae, manteniendo valores de flujo de aire, concentración del colector y activador constantes. Obteniéndose como resultado que las condiciones favorables para la depresión de la pirita fueron a valores de pH neutro y la concentración óptima del reactivo depresor fue de 10 ppm.



INTRODUCCIÓN

México es un país minero-metalúrgico por excelencia, donde la actividad en este ramo representó en el 2016 el sexto lugar en el sector productivo del país superado por los sectores automotriz, electrónico, remesas, turismo y petróleo con una derrama económica de 15 mil 681 millones de dólares que representa el 2.9% del PIB nacional, del cual el 37% de la producción está integrado por el oro, 19% cobre, 18% plata, 6.5% zinc, 2.8 % pellet de fierro, 2.4 % plomo, 1.7% carbón, 1.5% fosforita, 1.3% molibdeno y 9.8% por el resto de los minerales. (Cámara Minera de México CAMIMEX, 2017). La **Figura 1** muestra lo anterior, en un gráfico circular.



Figura 1. Producción nacional de minerales en México. (Cámara Minera de México CAMIMEX, 2017)

Datos obtenidos de INEGI 2017 reportaron que México ocupa el 5° y 6° lugar a nivel mundial en la producción de zinc y plomo con 661 mil y 241 mil toneladas respectivamente. La obtención de estos metales forma parte de la actividad económica nacional, siendo de gran importancia buscar formas más rentables y ecológicas de recuperarlos de los suelos mexicanos. (Cámara Minera de México CAMIMEX, 2017), (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2017)



La galena y la esfalerita son minerales de los cuales se obtienen el plomo y el zinc respectivamente, se encuentran en menas complejas provenientes de yacimientos polimetálicos; frecuentemente se les asocia además impurezas de pirita y de minerales de cobre, los cuales por sus propiedades fisicoquímicas similares son muy difíciles de separar.

La flotación por espuma es el principal proceso empleado en la concentración de minerales, la cual presenta una alta selectividad y se utiliza para llevar a cabo separaciones de minerales complejos de plomo-zinc, en dicha etapa se adiciona un reactivo llamado depresor, el cual actúa en contra de uno o varios compuestos evitando que estos floten; a nivel industrial se utiliza como reactivo depresor el cianuro de sodio, el cual es clasificado como reactivo tóxico y agresivo con el medio ambiente. Aunado a esto, las cantidades que se manejan son elevadas debido a la alta producción del país. Las empresas mineras-metalúrgicas invierten al año elevadas sumas de dinero y esfuerzo humano, en desechar este reactivo en forma controlada, optimizar su uso y evitar daños a la naturaleza; en la actualidad se requiere de procesar a dichos minerales a través de reactivos "limpios" (que no contaminen la naturaleza).

Debido a esta importancia, este trabajo sigue con la línea de investigación de un reactivo depresor orgánico Schinopsis Balansae el cual presenta un bajo impacto ambiental además de ser económico y de fácil manejo para el personal.



OBJETIVOS

- a) Obtener los efectos de concentración del reactivo Schinopsis Balansae (T5) y pH en minerales de FeS_2 a través de Flotaciones en celda Hallimond.
- b) A partir de los resultados obtenidos en el inciso anterior obtener condiciones de depresión y flotación en el proceso selectivo de sulfuros de Pb-Zn.

HIPÓTESIS

Si se realizan estudios de la depresión de pirita empleando diferentes concentraciones del reactivo Schinopsis Balansae (T5) como agente depresor y de pH, a través del empleo de celdas de flotación Hallimond y Denver, se coadyuvará en la mejora del grado de depresión inducido al mineral, aplicado a procesos de flotación selectivo de Pb-Zn.



CAPÍTULO 1

1.2 Marco teórico

1.2.1 Flotación de minerales

1.2.1.1 Definición

Es un proceso fisicoquímico cuyo objetivo es la separación de especies minerales a través del uso de la adhesión selectiva de burbujas de aire sobre partículas minerales con la asistencia de reactivos que favorezcan el fenómeno. (Morral, et al., 1985)

1.2.1.2 Mecanismo

El sistema está formado principalmente por agua, aire y el mineral hidrofóbico, que rechaza el agua y se adhiere a las burbujas de aire que asciende a la superficie del líquido. La **Figura 2** muestra un esquema del proceso de flotación. (Johnson & Munro, 2002), (Linares, 2010).

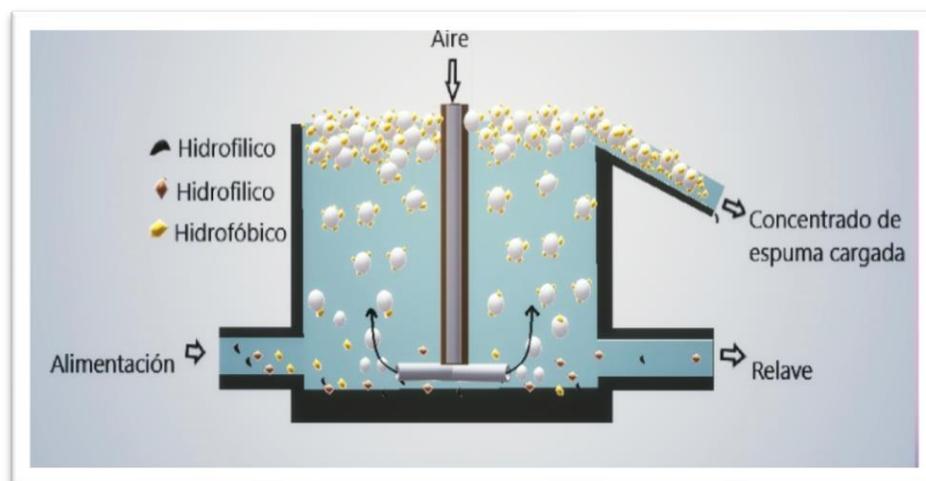


Figura 2. Esquema de una celda de flotación



El proceso aprovecha las propiedades hidrofóbicas e hidrofílica de los sólidos a separar, el fenómeno que más está involucrado es la mojabilidad de la partícula. (Johnson & Munro, 2002)

Los minerales sulfurosos tienen baja mojabilidad por lo que se llaman minerales hidrofóbicos. Se ha encontrado además que éstos minerales son aerofílicos por lo que tienen mucha afinidad por las burbujas de aire. (Linares, 2010).

Para separar selectivamente estos minerales, se utilizan reactivos que modifican la superficie del sólido haciéndolo hidrofílico. Esta modificación se realiza mediante la adición de colectores, depresores y activadores. (Linares, 2010).

1.2.1.3 Fenómenos de estudio en la Flotación

Para entender el proceso de flotación es necesario conocer ciertas propiedades fisicoquímicas de las superficies, como son:

1.2.1.3.1 Tensión superficial

Se define como la fuerza ejercida por la superficie del líquido por unidad de longitud y se representa con la letra γ . Es el costo energético asociado a incrementar en una unidad de área de la interfase. (Maron & Pruton, 1968)

Es una fuerza perpendicular al plano y dirigida al interior de la fase.

Se produce por el desbalance de fuerzas al interactuar una molécula con todos sus vecinos.

Se sabe que la tensión superficial es directamente proporcional a la fuerza intermolecular del líquido. (Joseph W. Kane, 2000)



1.2.1.3.2 Ángulo de contacto

Es el ángulo que se genera entre las tensiones interfaciales sólido líquido, líquido gas y sólido gas. (Maron & Pruton, 1968)

Las tensiones superficiales de las tres fases en equilibrio se pueden relacionar por la ecuación de Young con el ángulo de contacto (**Ecuación (1)**).

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

γ_{SG} es la tensión superficial entre el sólido y el gas

γ_{SL} es la tensión superficial entre el sólido y el líquido

γ_{LG} es la tensión superficial entre el líquido y el gas

El ángulo de contacto que existe entre fases se puede ilustrar en la **Figura 3** (a).

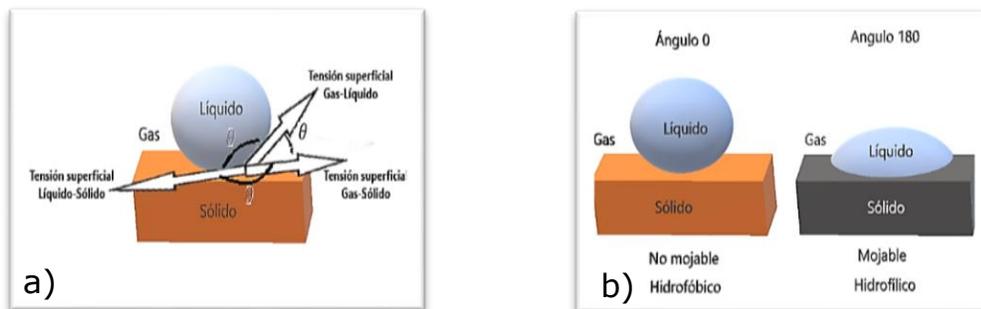


Figura 3. a) ángulo de contacto entre las diferentes interfases b) relación entre el ángulo de contacto y la mojabilidad de una partícula

Cuando no hay contacto entre las fases el ángulo es cero y cuando tienen máxima afinidad el ángulo es 180° . Esto quiere decir que en un sistema Líquido-Sólido, si no existe contacto entre la partícula sólida y el líquido el material no se moja o tiene baja mojabilidad, en cambio si el ángulo es 180° el material es mojable; para apreciar mejor lo anterior se puede observar la Figura 3(b).



1.2.1.3.3 Adsorción

Es un fenómeno de concentración de una sustancia sobre la superficie de un sólido o un líquido. La sustancia atraída hacia la superficie se llama fase absorbida mientras que aquella que se adhiere se llama adsorbente (Maron & Pruton, 1968)

La adsorción en una interfase es descrita por la ecuación de adsorción de Gibbs (**Ecuación 2**).

$$\Gamma_i = -\frac{1}{RT} \left(\frac{d\gamma}{d \ln C_i} \right) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

Γ_i = Adsorción relativa del componente i (densidad de adsorción).

C_i = Concentración del componente i

T = Temperatura absoluta

R = Constante de los gases

De lo que se deduce que a medida que disminuye la tensión superficial, la adsorción aumenta. Así mismo a mayor ángulo de contacto, mayor será el trabajo de adhesión entre la partícula y la burbuja, por lo tanto, la flotabilidad del mineral aumenta con el ángulo de contacto

Para el estudio de la flotación, se tiene adsorción entre el aire y el agua y se tiene entre la interfase del mineral y el agua.

1.2.1.4 Reactivos de flotación

El proceso de flotación se lleva a cabo en celdas de poseen mecanismos de agitación y dispositivos de inclusión de aire a la pulpa o al líquido de separación. La agitación favorece la separación y suspensión de las partículas, mientras que la inclusión de aire promueve la formación de burbujas. La modificación selectiva de las partículas a separar se obtiene mediante la adición de colectores, depresores y activadores.



1.2.1.4.1 Colectores

Sustancia orgánica que se encarga de convertir la superficie del mineral en hidrofóbicas, se adsorben en la interfase del mineral y el líquido, aumentando la tensión superficial del mineral haciéndolos menos mojables, favoreciendo la colección. (Linares, 2010).

Se los puede encontrar No ionizantes y también Inionizantes (se disocian en el agua); dentro de los ionizantes existen los catiónicos y aniónicos.

Los colectores aniónicos que son ampliamente usados son los xantatos, su estructura molecular general se muestra en la **Figura 4**. Donde: Me puede ser Na^+ o K^+ , R es el grupo radical o hidrocarburo (no polar) y el grupo aniónico -C-O-S₂ (polar).

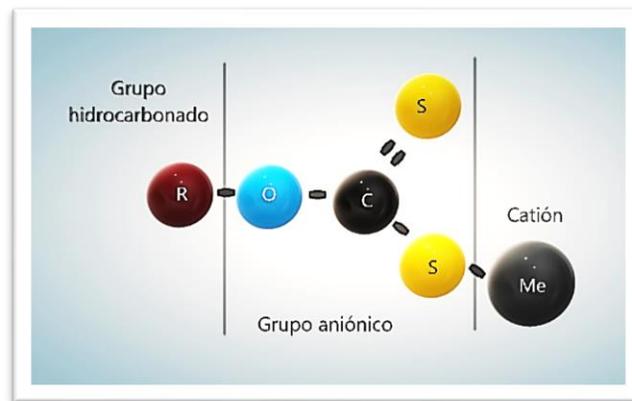


Figura 4. Estructura general de un colector xantato

Al disociarse, el grupo aniónico se adsorbe sobre la superficie del sólido, y el grupo no polar se orienta hacia el agua.



Algunos ejemplos de xantatos que más ampliamente son utilizados en la industria (Linares, 2010) son:

Xantato Etílico de Potasio	$C_2H_5OCS_2K$
Xantato Etílico de Sodio	$C_2H_5OCS_2Na$
Xantato Amílico de Potasio	$C_5H_{11}OCS_2K$
Xantato Isopropílico de Sodio	$C_3H_7OCS_2Na$
Xantato Exílico de Potasio	$C_6H_{13}OCS_2K$

Los xantatos tienden a descomponerse a pH inferiores a 6 y a pH superiores a 13 pierden la acción colectora puesto que los iones OH^- desplazan a los iones xantatos de la superficie mineral. (Linares, 2010)

La solubilidad del colector, así como la selectividad del mismo disminuye al aumentar la cadena hidrocarbonada.

Por esta razón, la experimentación fue realizada utilizando el Xantato Etílico de Potasio (XEK) por ser de cadena corta. Su estructura molecular se puede observar en la **Figura 5**.

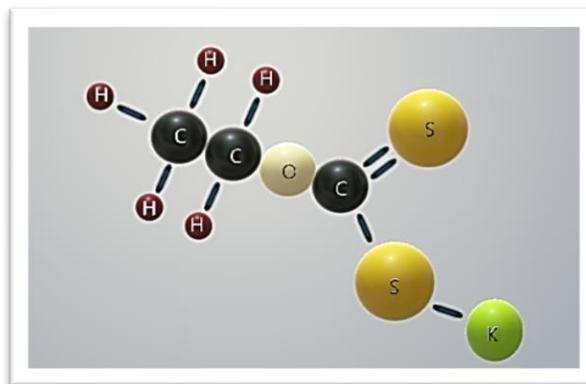


Figura 5. Estructura molecular del xantato etílico de potasio (XEK)

1.2.1.4.2 Espumantes

Son sustancias orgánicas heteropolares que modifican la tensión superficial del líquido, tienen por objeto la formación y estabilización de la espuma proporcionando una adecuada resistencia mecánica, permitiendo que las burbujas se encuentren dispersas y una vez que la espuma salga de la celda, debe romperse rápidamente. (Johnson & Munro, 2002)

Las estructuras no polares del espumante se adsorben en la interfaz orientada al aire y los grupos polares se orientan hacia el agua.

Un ejemplo de la colección de un mineral en la espuma se muestra en la **Figura 6**.

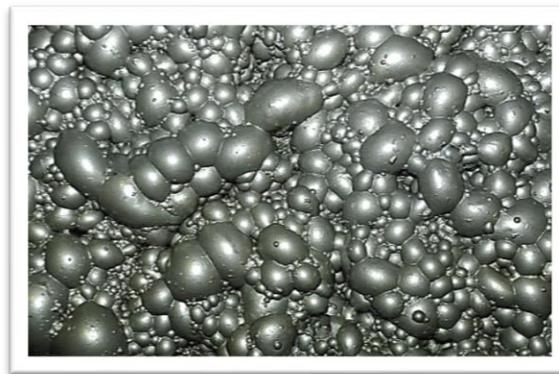


Figura 6. Espuma de flotación cargada con mineral. (curioso, 2017)

Se puede utilizar como reactivo espumante de minerales sulfurados el Metil Isobutil Carbinol (MIBC), el cual permite tener un excelente control del proceso debido a que no presenta propiedades colectoras (Linares, 2010).

1.2.1.4.3 Activadores

Estas sustancias en presencia de los colectores y espumantes, modifican las propiedades fisicoquímicas superficiales. Ayudando al colector a adsorberse en la superficie del mineral. Se pueden utilizar sales solubles de metales pesados no ferrosos para activar la superficie de algunos minerales sulfurados. (Linares, 2010)



1.2.1.4.4 Depresores

Impiden la acción del colector en la superficie del mineral. Disminuyen la flotabilidad del mineral haciendo su superficie hidrofílica. Para ello se requiere adicionar un ion que compita con el ion del colector.

Algunos reactivos que se pueden utilizar como depresores son el sulfuro de sodio NaS_2 , NaCN , sulfitos, bisulfitos, hiposulfitos y ciertos sulfatos.

1.2.1.4.5 Modificadores de pH

Como su nombre lo indica, su función es modificar el pH de la pulpa para mejorar el efecto de los demás reactivos.

Usualmente se utiliza cal y HCl o H_2SO_4 para modificar básica y ácidamente respectivamente. Cuando el ion calcio afecta la flotación se suele utilizar NaOH .

1.2.2 Schinopsis Balansae

También conocido como Quebracho colorado, es un árbol mediano que alcanza una altura de 10 a 24 m y su diámetro oscila entre los 0.4 y 1 m. Su fuste es cilíndrico recto, presenta una corteza de color castaño oscuro, agrietada y su centro es de color marrón (**Figura 7**).

El crecimiento de esta especie es lento alcanzando su máximo tamaño a los 250 años ^[9]. Se encuentra al noreste de Argentina, Paraguay y Brasil.

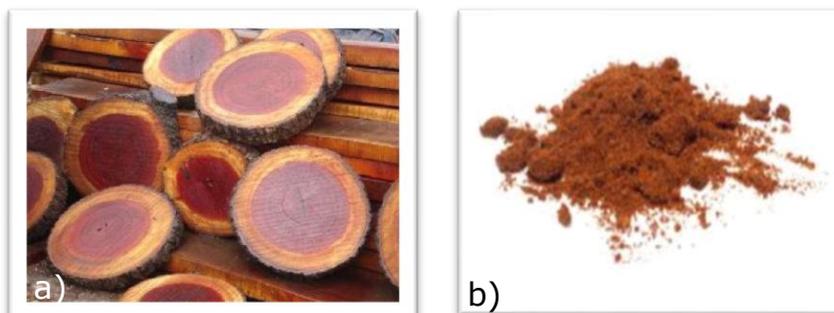


Figura 7. a) sección transversal del árbol quebracho colorado y b) extracto de quebracho colorado. (gtpculturasdelmundo, 2010), (Aditan, 2017)

Es un árbol ampliamente utilizado por las propiedades mecánicas que presenta debido a que su madera es muy dura y resistente por lo que se puede usar como elemento estructural.

El tronco de estos árboles está compuesto por agua, fibra y extractos inorgánicos (sales de calcio y sodio) y extractos orgánicos (taninos, no taninos e insolubles).

El extracto de quebracho de su madera (34-35 %) tiene un rendimiento de 63-67 % de tanino puro. (Valentini, 1960)

1.2.2.1 Taninos

Se conoce con el nombre de taninos a un grupo de sustancias de origen vegetal, que se hayan presentes en la corteza, frutos y trocos de numerosas plantas (Sarquís, et al., s.f.)

Los taninos son un grupo muy heterogéneo de compuestos fenólicos, con un alto peso molecular, que tiene la capacidad de formar complejos reversibles o irreversibles con proteínas, alcaloides, ácidos nucleicos, minerales, etc.

Los taninos o poli fenoles vegetales se clasifican en dos grupos, taninos hidrolizables y taninos condensados. La estructura de un tanino condensado se puede apreciar en la **Figura 8**.

Los primeros son fáciles de destruir por ácidos, álcalis o enzimas a temperatura ambiente.



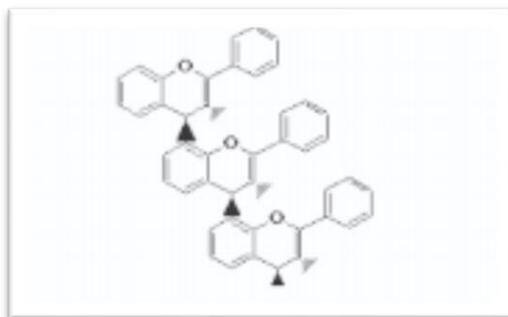


Figura 8. Estructura química de tanino condensado. (Vazquez F., et al., 2012)

Los taninos condensados también conocidos como procianidinas son polímeros aromáticos multihidroxilados basados en una unidad flavonoide de 15 carbonos ($C_6-C_3-C_6$), éstos compuestos tienen una amplia distribución en la naturaleza por su alta concentración en la madera y cortezas de muchas especies forestales entre ellas la madera del *Schinopsis Balansae* (Haslam, 1989). Debido a su estructura moléculas y solubilidad, este producto es usado en minería para flotación de minerales.

El extracto de Quebracho modificado T₅ (Figura 7b) es de alto peso molecular, compuesto de poli fenoles con grupos sulfonatos que se disuelven fácilmente en soluciones alcalinas.

Los extractos de quebracho son bastante estables en medio ácido y básico, disminuyendo su estabilidad a pH extremadamente básicos, mayores a 12 (Sarquís, et al., s.f.).

La presencia de los grupos fenólicos (ligeramente ácidos) activan los grupos sulfonatos y con ello incrementa su capacidad de adsorción debido a la formación de iones fenolatos complejos sobre la superficie del mineral por lo que se genera la interacción electrostática entre éstos y la superficie del mineral cargado.

Según un informe interno del Imperial College of London (1978), en la flotación de sulfuros, los mecanismos por los que se produce la depresión son diferentes, siendo probablemente la unión puente hidrógeno quién produce el recubrimiento de los sulfuros con las moléculas de quebracho modificado, convirtiendo ésta en hidrofílica.

El consumo del quebracho se debe controlar con cuidado debido a que no es totalmente selectivo, si hay un exceso la calidad de los concentrados se deteriora (Kelly, 1990).

1.2.3 Celda de flotación Hallimond

Existen muchos diseños diferentes de celdas para la flotación, su función es permitir que las partículas hidrofóbicas y el aire interactúen, se eleven a la superficie en la formación de espuma que es removida (Kelly, 1990).

Una celda de flotación es un instrumento de vidrio que se utiliza en la micro flotación (**Figura 9**). Permite reducir las cantidades de recursos necesarios para las pruebas pues la muestra de mineral de estudio varía entre los 0.5 y 5 g. Con ella se obtiene una flotación neumática a escala.



Figura 9. Representación de la celda de flotación Hallimond



CAPÍTULO 2.

2.1 Desarrollo experimental

En este capítulo se muestra el procedimiento de trabajo a detalle. El diagrama de flujo del proceso se ilustra en la **Figura 10**.

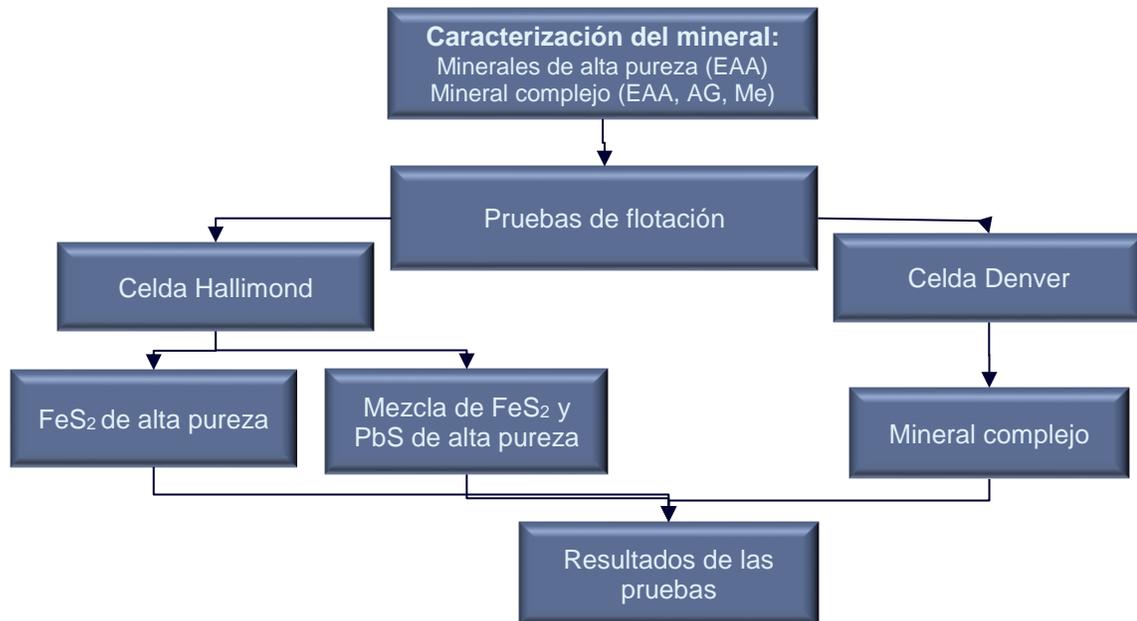


Figura 10. Diagrama del proceso empleado

2.1.1 Caracterización de los minerales

Para conocer las características de los minerales empleados se realizaron diferentes pruebas.

2.1.1.1 Minerales FeS₂ y PbS de alta pureza

Los minerales empleados para las pruebas en celda Hallimond fueron pirita y galena de alta pureza. Dichos materiales fueron previamente triturados, molidos y cribados; su granulometría se encuentra entre 70 μm y 150 μm .



Se les realizó un análisis químico por Espectrometría de Absorción Atómica (EAA). Las especificaciones del análisis se muestran en el Apéndice D.

2.1.1.2 Mineral complejo Pb-Zn

El mineral complejo Pb-Zn, se obtuvo por una donación de Grupo México. El cual ya se encontraba molido; con ayuda de un partidor Jones se separaron aproximadamente 50 g de mineral al cual se le realizó un análisis granulométrico y se determinó el tamaño de liberación.

2.1.1.2.1 Análisis Granulométrico

Para el análisis granulométrico se introdujo la muestra en las cribas (**Ver **Tabla 1****) las cuales fueron colocadas en un Rop Tap modelo RX-29 durante 25 minutos. Cabe señalar que se tomó en cuenta que la primera criba no retuviera más del 10%.

Tabla 1. Selección de cribas

# Malla	Tamaño (μm)
20	840,74
30	589,28
40	419,1
50	297,18
70	210,82
100	149,86
140	104,14
200	73,66
325	43,18
400	38,1

2.1.1.2.2 Determinación del tamaño de liberación

Para determinar el tamaño de liberación, se tomó una muestra del material retenido en cada criba y se observó en un microscopio estereoscópico American Optical AO 570, sobre una hoja milimétrica contabilizando las partículas valiosas liberadas que se encontraban en un centímetro cuadrado.



2.1.1.2.3 Menagrafía

Para poder visualizar el tipo de minerales valiosos que se encontraban en la muestra se realizó una prueba de menagrafía que consistió en montar una muestra del mineral de tamaño aproximado 1/2" sobre resina, se desbastó y pulió y se observó en un microscopio menagráfico. Se tomaron fotos a 100 X modificando la polarización, los nicoles y el campo.

2.1.1.2.4 Análisis Químico

Para decretar la composición química de los valores metálicos del mineral se analizaron 4 elementos Fe, Pb, Zn y Cu por Espectrometría de Absorción Atómica. La información detallada del análisis químico se puede ver en el Apéndice D.

2.1.2 Pruebas de flotación

Para poder comparar los resultados obtenidos en la celda Hallimond, se realizaron pruebas también en una celda mecánica Denver. La metodología empleada en cada una de ellas, se muestran a continuación:

2.1.2.1 Pruebas en celda Hallimond

Para encontrar las mejores condiciones de depresión de la pirita a diferentes valores de pH, variando las concentraciones de depresor, sin hacer un gasto excesivo de material, se utilizó la celda de flotación Hallimond. El valor de concentración de sólidos en peso fue 1 %. El cálculo necesario para determinar la cantidad de mineral utilizado se muestra en el Apéndice B.

Una vez encontradas las mejores condiciones de flotación-depresión del mineral puro, se prosiguió a hacer el estudio con mezcla de minerales de pirita y galena de alta pureza.



El arreglo realizado para las pruebas en tubo Hallimond se muestra en la **Figura 11**, en el cual el aire pasa a través de un flujómetro antes de entrar a la celda; previo a la zona de acondicionamiento la celda cuenta con un filtro poroso que evita el paso de material (únicamente permite el paso del aire al interior de la celda) el cual ayuda a la formación homogénea de las burbujas. Cuenta además con un conducto en el que se recibe el concentrado mineral y con un conducto por el cual se alimenta el mineral y los reactivos.

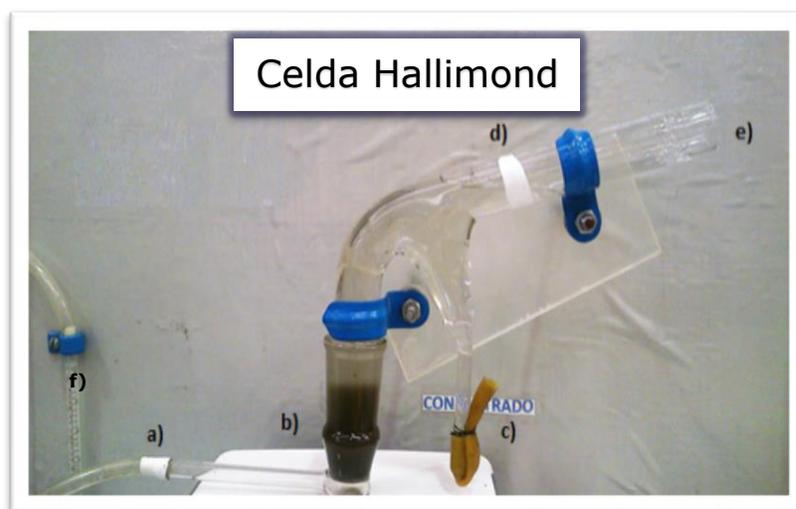


Figura 11. Arreglo del sistema de flotación, donde: a) la entrada de aire, b) zona de acondicionamiento y colección de colas del mineral, c) reservorio de colección de la pirita flotada d) nivel de agua, e) zona de adición de reactivos de flotación y f) flujómetro.

2.1.2.1.1 Pruebas en celda Hallimond con mineral FeS_2 de alta pureza

Para estudiar el comportamiento del mineral con respecto al reactivo depresor a diferentes pH (6 a 11), en las primeras pruebas se empleó aproximadamente 1 g de mineral de alta pureza de pirita. Las pruebas se realizaron desde pH 6 hasta 11 y las condiciones de flotación se muestran en la **Tabla 2**

Nota. Aunque se sabe por la literatura que las partículas de pirita son menos estables a pH 6^[18], los experimentos se realizaron desde este valor para tener dato de comparación entre los valores de recuperación en medios ácido y básico.



Tabla 2. Condiciones experimentales para cada pH (6-11) empleando mineral de alta pureza FeS₂

<i>Prueba</i>	<i>XEK [M]</i>	<i>T5 (ppm)</i>	<i>CuSO₄ [M]</i>
1	1.5 x 10 ⁻⁴	-	-
2	-	10	-
3	-	15	-
4	-	20	-
5	1.5 x 10 ⁻⁴	10	-
6	1.5 x 10 ⁻⁴	15	-
7	1.5 x 10 ⁻⁴	20	-
8	1.5 x 10 ⁻⁴	10	1.5 x 10 ⁻⁴
9	1.5 x 10 ⁻⁴	15	1.5 x 10 ⁻⁴
10	1.5 x 10 ⁻⁴	20	1.5 x 10 ⁻⁴

El mineral de pirita se adicionó a la zona de acondicionamiento de la celda proporcionándole movimiento a través de un agitador magnético.

Los reactivos fueron adicionados tomando en cuenta el tiempo de acondicionamiento para cada uno de ellos (Ver **Tabla 3**).

Tabla 3. Tiempo de permanencia del reactivo con el mineral

<i>Reactivo</i>		<i>Tiempo (min)</i>
<i>Depresor</i>	T5	5
<i>Colector</i>	XEK	3
<i>Activador</i>	CuSO ₄	2
<i>Espumante</i>	MIBC	1

Transcurrido el tiempo de acondicionamiento de cada reactivo se detuvo la agitación y se abrió la válvula del aire durante 1 minuto promoviendo la etapa de aireación.

Posteriormente, se recolectaron los concentrados y las colas, los cuales fueron filtrados, secados pesados y analizados.



2.1.2.1.2 Pruebas en celda Hallimond con mineral PbS de alta pureza

Para estudiar la competencia del colector con el depresor en la depresión de la pirita cuando éste se encontró en presencia de galena se realizaron las siguientes pruebas en la celda Hallimond por triplicado, a valores de pH de 7 y 10. La granulometría de la galena fue similar para no afectar los resultados.

Estas pruebas se realizaron pesando 0.5 g de mineral de pirita y 0.5 g de mineral de galena, se mezclaron y se adicionaron a la zona de acondicionamiento, proporcionándole movimiento a la mezcla a través de un agitador magnético

Las condiciones experimentales se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Condiciones experimentales para cada pH (7 y 10) empleando minerales de alta pureza FeS₂ y PbS en celda Hallimond

Prueba	XEK [M]	T5 (ppm)	CuSO ₄ [M]
1	1.5×10^{-4}	10	-
2	1.5×10^{-4}	15	-
3	1.5×10^{-4}	20	-

Los productos obtenidos se analizaron vía EAA para obtener la cantidad de pirita y galena flotada.

2.1.2.2 Pruebas en celda Denver

2.1.2.2.1 Pruebas en celda Denver con mineral complejo Pb-Zn

Tras la verificación del comportamiento de la pirita, se decidió proseguir a la implementación de las mejores condiciones de flotación en celda Denver, para observar el efecto del depresor (T5) utilizando un mineral complejo de Pb-Zn.

Las pruebas se realizaron en una celda de laboratorio Lab12 Denver. (Ver **Figura 12**).





Figura 12. a) celda de flotación Denver utilizada en la experimentación, b) colección de espuma cargada con mineral y c) concentrado obtenido

Las condiciones de flotación de los experimentos realizados en la celda Denver Lab12 se muestran en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Condiciones experimentales para cada pH (7 y 10) en celda Denver

Prueba	XEK [M]	T5 [ppm]	CuSO ₄ [M]
1	-	10	-
2	1.5×10^{-4}	10	-
3	1.5×10^{-4}	10	1.5×10^{-4}

2.2 Materiales y equipo

- Micro pipeta, pro pipeta
- Balanza Analítica Ohaus Pioneer PA 224
- Parrilla Magnética Corning PC 620
- Papel filtro con apertura de 1 a 3 micrómetros
- Espátula
- Vasos de precipitado (10mL, 50 mL, 100mL, 250 mL, 500 mL y 1L)
- Matraz Kitasato de 500 mL
- Tapón de plástico
- Embudo de vacío
- Celda de flotación Hallimond
- Vasos pequeños de plástico con tapa
- Celda de flotación Denver Lab 12
- Filtro de vacío
- Separador Jones
- Equipo Rop Tap, RX-29
- Cribas (No malla: 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200, 325, 400,)
- pH-metro Oakton serie 2100



2.3 Minerales y reactivos

- Mineral de FeS_2
 - Mineral de PbS
 - Mineral complejo Pb-Zn
 - Na_2HPO_4
 - Ácido Cítrico
 - HCl
 - Bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)
 - NaOH
 - $\text{Cu}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 - Xantato Etílico de Potasio (XEK)
 - Schinopsis Balansae (T5)
 - Metil isobutil carbinol (MIBC)
 - Ácido Nítrico
- Modificadores de pH
- Activador
- Colector
- Depresor
- Espumante

La **Figura 13** muestra la fotografía de los reactivos de flotación empleados en la experimentación.

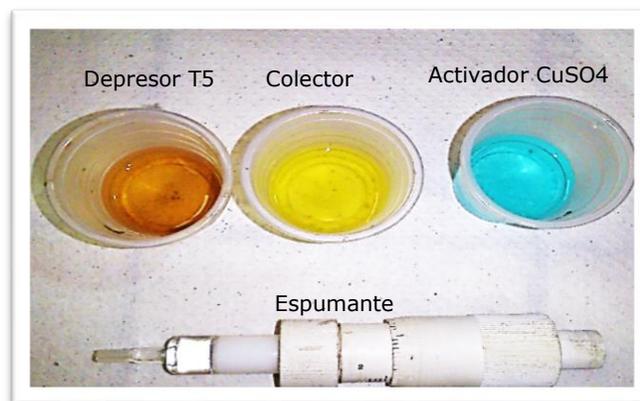


Figura 13. Reactivos de flotación empleados

CAPÍTULO 3

3.1 Resultados y análisis de resultados

Este capítulo incluye los resultados de las pruebas realizadas, así como el análisis de los mismos.

3.1.1 Resultado de la caracterización de los minerales

3.1.1.1 Mineral FeS_2 de alta pureza

El mineral que se utilizó en la prueba fue FeS_2 previamente molido, en la **Figura 14** se muestra la pirita antes de la conminución de tamaño.

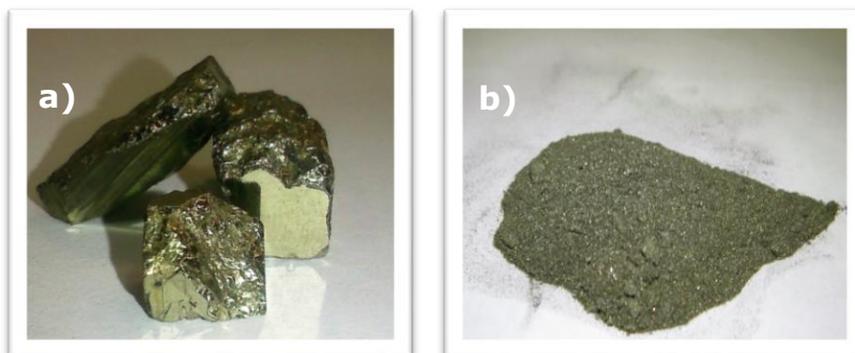


Figura 14. Mineral de pirita que fue empleado en las pruebas a) previo a la molienda, b) mineral molido

Para verificar que el material utilizado fue de alta pureza, el mineral se caracterizó químicamente por Espectrometría de Absorción Atómica (EAA), en el cual se analizó la cantidad de Fe presente. El valor obtenido se muestra en la **Tabla 6**. (Ver Apéndice D)

Tabla 6. Resultados del análisis químico EAA del mineral de pirita empleado

Elemento	% Peso
Fe	45.83



Dada la estequiometría del compuesto FeS_2 se sabe que el porcentaje máximo de hierro que puede tener una muestra totalmente pura es de 46.55 % (Ver Apéndice B). Con el valor teórico y el resultante del análisis, se obtuvo el valor de pureza del mineral empleando la **Ecuación (3)**. El valor obtenido nos indica que el material presenta un nivel aceptable de pureza (98.45%) por lo que es apto para poder utilizarse en las pruebas.

$$\% \text{ Pureza} = \frac{45.83}{46.55} * 100 = 98.45 \% \text{ de pureza} \quad \text{Ecuación (3)}$$

3.1.1.2 Mineral PbS de alta pureza

La Figura 15 muestra la imagen del mineral de galena empleado en las pruebas.

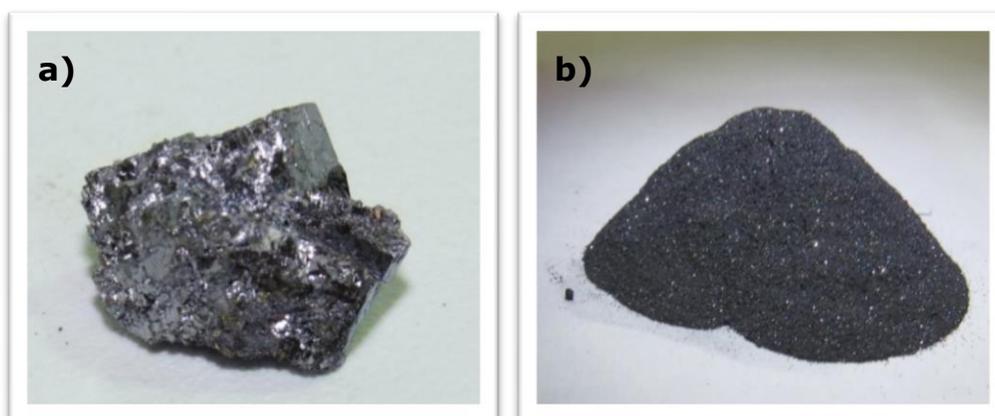


Figura 15. Mineral de galena PbS empleado en las pruebas a) previo a la molienda b) mineral molido

Para obtener la pureza del mineral de galena, se analizó el porcentaje en peso de Plomo que contenía dicho material a través de Espectrometría de Absorción Atómica. Los resultados se muestran en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Resultados del análisis químico EAA del mineral de galena empleado

Elemento	% Peso
Pb	81.29



Dada la estequiometría del compuesto PbS el porcentaje máximo de plomo que puede tener una muestra totalmente pura es de 86.62 % (Ver apéndice B). Con el valor teórico y el resultante del análisis, se obtuvo el valor de pureza del mineral empleando la **Ecuación (4)**.

$$\% \text{ Pureza} = \frac{81.29}{86.62} * 100 = 93.84 \% \text{ de pureza} \quad \text{Ecuación (4)}$$

El valor anterior nos indica que el material presenta un nivel aceptable de pureza (93.84 %) por lo que es adecuado para poder utilizarse en las pruebas

3.1.1.3 Mineral complejo Pb-Zn

El mineral complejo (previo al proceso de molienda) que se utilizó para las pruebas, se muestra en la **Figura 16**.

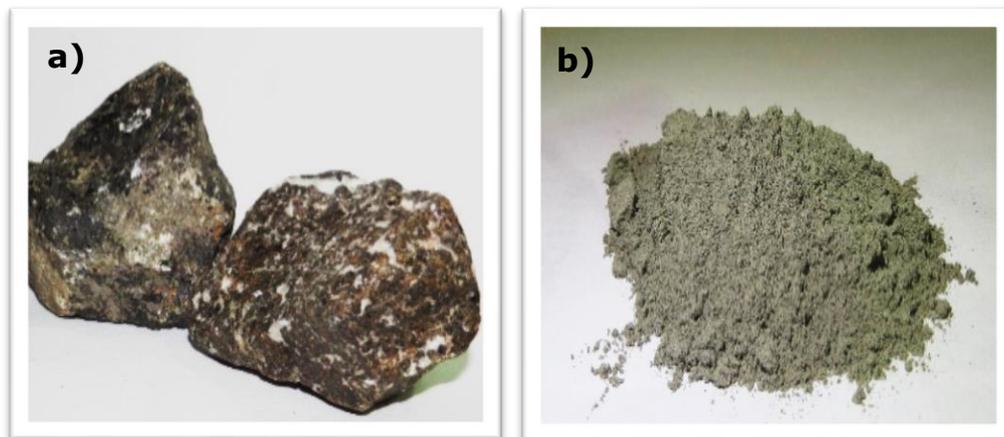


Figura 16. Mineral complejo empleado en las pruebas a) previo a la molienda, b) mineral molido

3.1.1.3.1 Menagrafía

Para hacer una primera inspección de los minerales presentes se realizó un estudio de menagrafía, que se muestran en la **Figura 17**. En la cual se puede observar en campo claro tres fases diferentes por sus tonalidades: una gris (F1), una "banca" (F2) y una amarilla (F3), las cuales al observarlas en campo oscuro por los tonos adquiridos que la fase 1 es cuarzo, la fase 2 es esfalerita, la fase 3 es pirita y adicional a esto, se observa una cuarta fase más brillante que circunda a la fase amarilla la cual corresponde a la calcopirita.

En otra sección Figura 17 c, se puede observar en campo oscuro otra fase gris azulada la cual corresponde a la fase de galena (F5).

Con estos resultados se puede apreciar que el material presenta los minerales de interés.

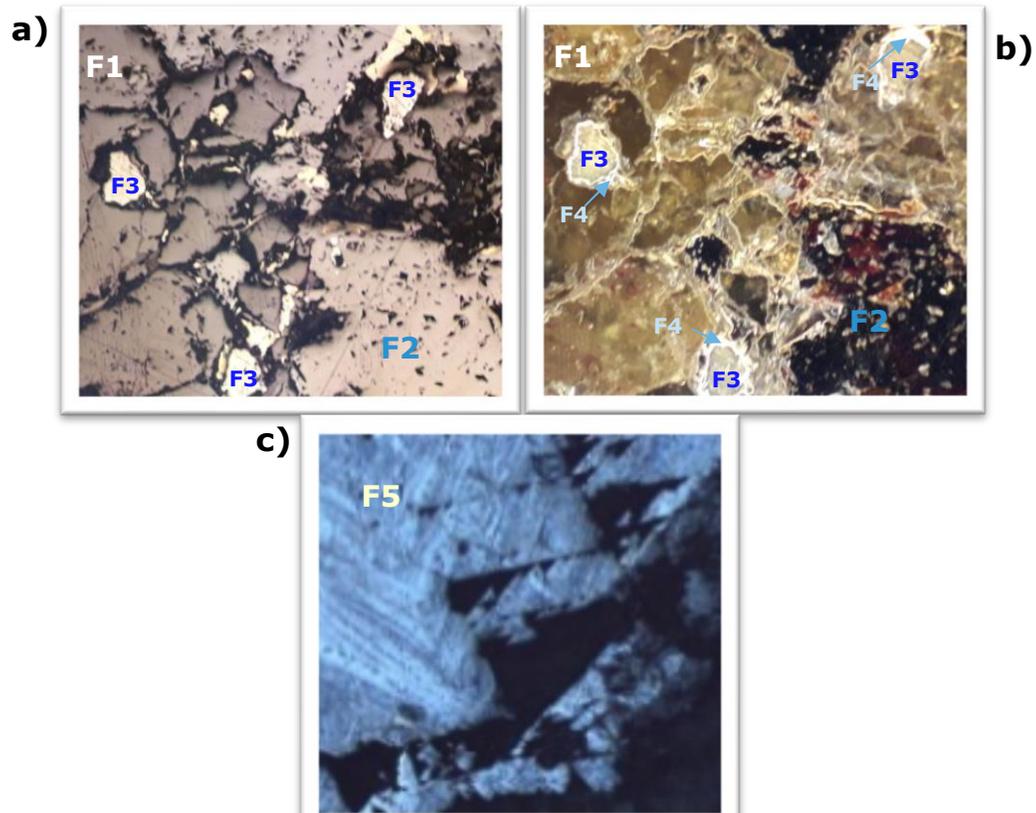


Figura 17. Menagrafía del mineral complejo Pb-Zn tomadas a 100 X, Sin Polarización (SP) y Nícoles Paralelos (NP); donde: a) y b) son la misma figura tomadas con Campo Claro (CC) y Campo Oscuro (CO) respectivamente; por último, la figura c) fue tomada en otra zona en Campo Oscuro (CO).

3.1.1.3.2 Análisis Químico

Posterior a los resultados anteriores, se analizó el mineral por EAA para Fe, Pb, Zn y Cu y con ello lograr tener el % en peso de cada elemento. Los resultados se muestran en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Resultados del análisis químico EAA del mineral complejo empleado

<i>Elemento</i>	<i>% Peso</i>	<i>Elemento</i>	<i>% Peso</i>
<i>Fe</i>	6,12	Zn	2,87
<i>Pb</i>	2,49	Cu	0,26

Estos valores indican que el elemento que más se encuentra es hierro, el cual puede provenir principalmente de la pirita como lo muestra la menagrafía, sin embargo no es el único mineral que contiene Fe, otros son especialmente calcopirita (CuFeS_2) por la menagrafía, pero también puede presentar: bornita (Cu_5FeS_4) y tetraedrita ($(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$) lo que explicaría la baja ley de Cu, así como la esfalerita con presencia de hierro.

3.1.1.3.3 Análisis Granulométrico

Las pruebas de flotación tienen mejores resultados cuando no hay gran cantidad de lamas y el material está totalmente liberado, para ello es necesario hacer el análisis granulométrico del mineral, así como obtener el tamaño de liberación de las partículas valiosas.

Una vez que se realizó la conminución necesaria, se realizó un análisis granulométrico para separar el mineral que podría ser empleado, partiendo del tamaño de liberación y no sobrepasando el tamaño de las lamas (menores a $40 \mu\text{m}$).

El resultado del análisis granulométrico realizado al mineral se presenta a continuación en la **Figura 18**. De este gráfico se obtuvo una ecuación con una regresión polinomial de 6º orden la cual describe el tamaño de distribución del mineral empleado, la cual varía desde $840 \mu\text{m}$ hasta $38 \mu\text{m}$.



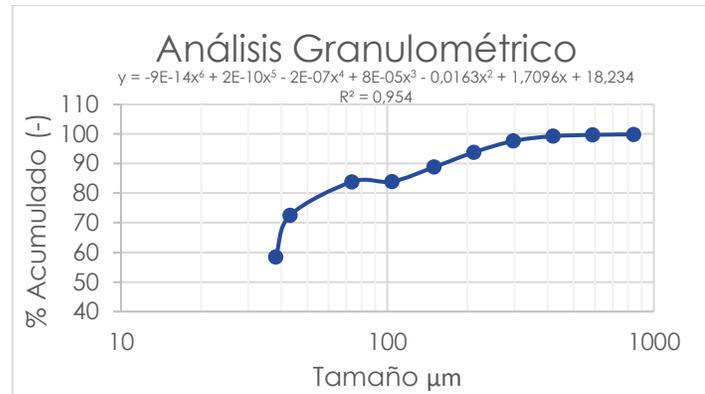


Figura 18. Análisis granulométrico del mineral alimentado a las pruebas en celda Denver

3.1.1.3.4 Determinación del tamaño de liberación

Los resultados del tamaño de liberación se pueden apreciar en la **Figura 19**, el cual muestra que a medida que disminuye el tamaño del mineral, la liberación aumenta hasta cierto punto donde se mantiene constante.

Esto quiere decir que para que las partículas se encontraran liberadas el mineral tuvo una reducción de tamaño hasta llegar a ser menores de 150 μm para poder ser empleado.

Cabe resaltar que un tamaño tan pequeño de partícula involucra un incremento en el gasto de los reactivos de flotación al haber un área superficial de contacto mineral-reactivo mayor.

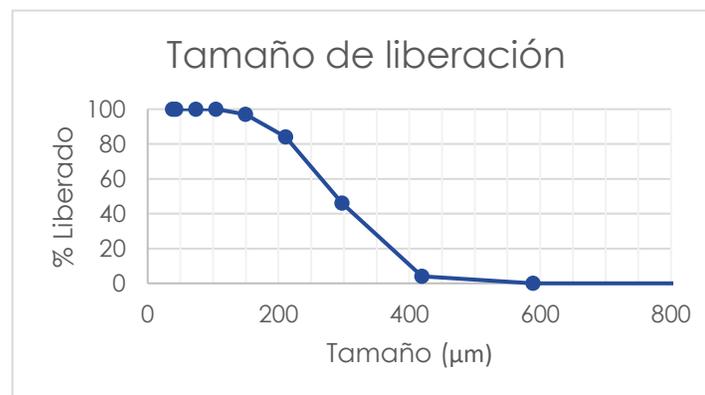


Figura 19. Porcentaje de partículas liberadas valiosas del mineral en función de su tamaño. Mineral complejo utilizado en las pruebas en celda Denver



3.1.2 Resultado de las pruebas de flotación

Los resultados de las pruebas llevadas a cabo se muestran a continuación.

3.1.2.1 Pruebas en celda Hallimond

Esta celda se utilizó para realizar pruebas con minerales de galena y pirita de alta pureza. Los resultados se muestran en las siguientes secciones.

3.1.2.1.1 Pruebas en celda Hallimond con mineral FeS₂ de alta pureza

Las pruebas elaboradas en la celda de flotación Hallimond empleando mineral de pirita de alta pureza se realizaron variando la concentración de depresor y el pH del medio. Una vez analizados los resultados se analizaron para ver el efecto que tienen los reactivos de flotación y el pH y posteriormente se analizará el efecto que tienen la concentración del depresor T5.

3.1.2.1.1.1 Efecto de los reactivos de flotación

Para ver el efecto que tiene la concentración de depresor T5 en función del pH se realizaron las pruebas a diferentes concentraciones (10 ppm, 15 ppm y 20 ppm) utilizando diferentes condiciones: a) mineral en ausencia de reactivos, b) mineral con colector, c) mineral con depresor, d) mineral con colector y depresor, e) mineral con colector, depresor y activador.

En todas las pruebas, la concentración de colector (XEK) y de activador (CuSO₄) fue de 1.5×10^{-4} M.



En la **Figura 20** se comparan los resultados de los experimentos realizados desde pH 6 a 11 bajo la concentración de depresor de 10 ppm.

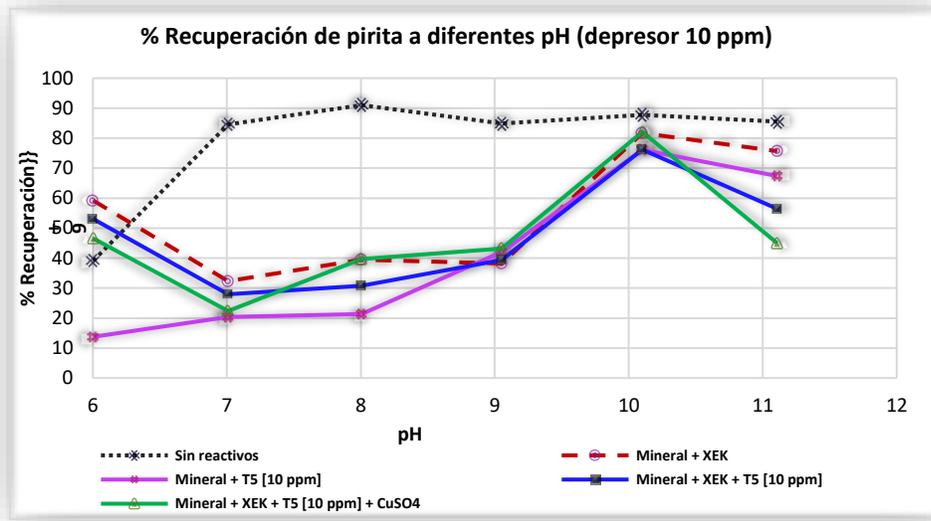


Figura 20. Recuperación de pirita en celda Hallimond a diferentes valores de pH, a la concentración de 10 ppm del depresor T5, en presencia de colector, depresor, activador y mezcla de estos.

Se puede observar que cuando el mineral se encontraba en ausencia de reactivos, presentó alta flotabilidad, incrementado el efecto a pH superiores a 7, con valores hasta de 90 % de recuperación. Valores de menor recuperación se obtuvieron cuando el mineral estaba en contacto con algún tipo de reactivo de flotación.

Ahora bien, al comparar el comportamiento del mineral cuando se tuvo la presencia sólo del colector y al encontrarse en contacto con cualquier proceso que lleve depresor, se observó que las recuperaciones son menores siempre que se encuentra el T5 independientemente del valor del pH lo que nos indica que nuestro agente depresor en una concentración de 10 ppm cumple con su función.



Al efectuar el análisis de la competencia del depresor con los demás reactivos, se observa que a pH menores o iguales a 8, se tiene un mejor efecto depresor cuando el T5 es el único reactivo que se adiciona; a pH 9 y 10 la recuperación es similar para los tres casos, sin embargo se logra apreciar que se pierde efecto depresor cuando el mineral se encuentra en presencia de colector, activador y depresor; en cambio a valores de pH más básicos el efecto se invierte, teniéndose así a pH 11 que las menores recuperaciones se tienen al adicionar todos los reactivos de flotación.

El comportamiento general que presenta el mineral muestra las mínimas recuperaciones a pH 7 (22%) y las máximas recuperaciones a pH 10 (88%). Estos valores se encuentran en común acuerdo con estudios de potencial Z (Ramírez, 2017) ya que la estabilidad de la pirita es menor a pH 7 que a pH 10 debido a que el mineral en condición neutra tiende a formar aglomerados reduciendo con ello su flotabilidad.

Por lo tanto, se deduce que si se quiere deprimir a la pirita con una concentración de 10 ppm de T5 se debe hacer a pH 6 en presencia exclusiva del depresor. Si el material tiene además presencia de colector y activador se debe realizar a pH 7 para prácticamente no recuperar FeS_2 .

En la **Figura 21** se comparan los resultados de los experimentos realizados desde pH 6 a 11 bajo la concentración de depresor de 15 ppm. Se puede observar que cuando el mineral se encontraba en ausencia de reactivos, presentó alta flotabilidad, incrementado el efecto a pH mayores de 7, con valores superiores a 85 % de recuperación. Esto se debe probablemente a la hidrofobicidad natural del mineral de FeS_2 a estas condiciones. Valores de menor recuperación se obtuvieron cuando el mineral se encontraba en contacto con algún tipo de reactivo de flotación.



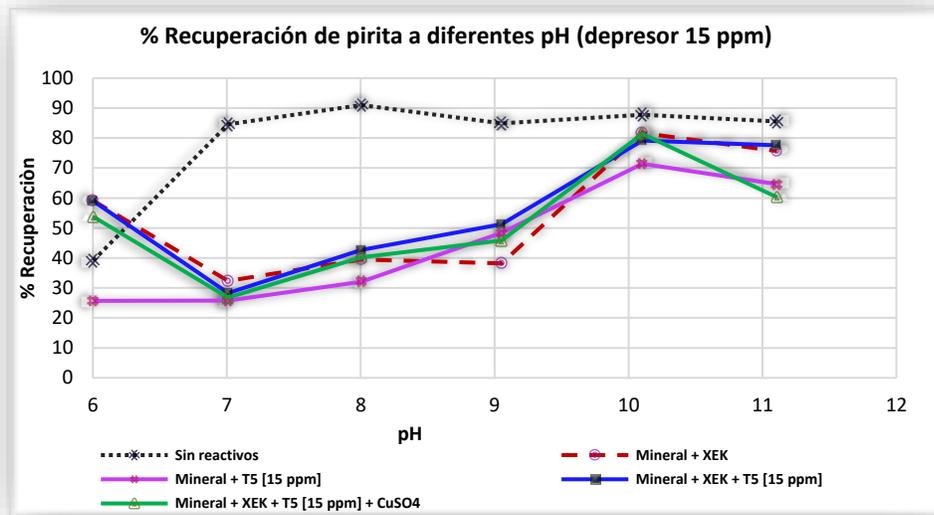


Figura 21. Recuperación de pirita en celda Hallimond a diferentes valores de pH, a la concentración de 15 ppm del depresor T5, en presencia de colector, depresor, activador y mezcla de estos.

Al comparar el comportamiento del mineral en presencia exclusiva del colector y al encontrarse en contacto con cualquier proceso que llevó depresor, se observó que no se ven afectados los valores de recuperación de mineral en presencia o ausencia del agente depresor.

En el análisis de la competencia del depresor con los demás reactivos, se observó que, a pH menores de 7, se tuvo un mejor efecto depresor cuando el T5 fue el único reactivo que se adicionó; cuando el valor de pH se encontró entre 7 y 10, no se apreció gran distinción entre la presencia o ausencia de algún reactivo debido a que los valores de recuperación fueron similares, en cambio a pH 11, se perdió el efecto depresor cuando se tuvieron presente los tres reactivos de flotación.



Al igual que con la concentración anterior, el comportamiento general que se obtuvo en la pirita cuando el depresor tuvo una concentración de 15 ppm mostró las mínimas recuperaciones a pH 7 (27 %) y las máximas recuperaciones a pH 10 (81.4%) aun utilizando todos los reactivos de flotación debido probablemente a que las partículas tienden a formar aglomerados a esas condiciones neutras ya que presentan menor estabilidad que a pH 10 (Ramírez, 2017).

Por lo tanto, se deduce que si se quiere deprimir a la pirita con una concentración de 15 ppm de T5 se debe realizar a pH 7 para obtener menores recuperaciones.

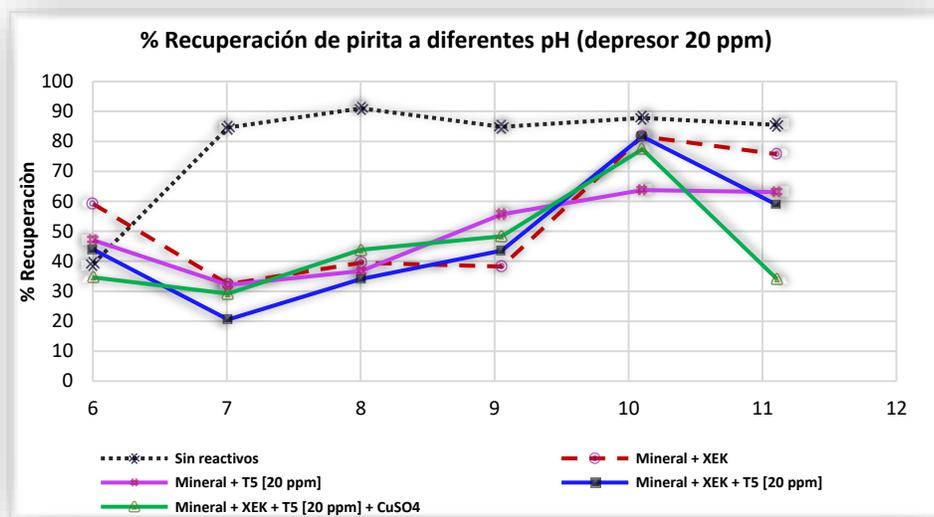


Figura 22. Recuperación de pirita en celda Hallimond a diferentes valores de pH, a la concentración de 20 ppm del depresor T5, en presencia de colector, depresor, activador y mezcla de estos.



En la **Figura 22** se comparan los resultados de los experimentos realizados desde pH 6 a 11 bajo la concentración de depresor de 10 ppm.

Se puede observar que cuando el mineral se encontró en contacto en ausencia de reactivos, presentó también alta flotabilidad, incrementado el efecto a pH superiores a 7, con valores superiores a 85 % de recuperación. Valores de menor recuperación se obtuvieron cuando el mineral se encontró en contacto con algún tipo de reactivo de flotación.

Al comparar el comportamiento del mineral cuando se tuvo contacto con el colector y al encontrarse en contacto con cualquier proceso que llevó depresor, se observó que el comportamiento es similar para todos los procesos a valores de pH menores a 11, el cual fue disminuir la recuperación de mineral a valores de pH menores a 7, posteriormente a medida que el pH aumenta la recuperación se incrementa hasta llegar al máximo que se tuvo a pH de 10 y volviendo a disminuir en pH 11. Así que sin importar si el mineral se encuentra en presencia o ausencia del depresor, las recuperaciones serán similares a cuando el mineral se encuentra únicamente con colector.

En cambio, a pH 11 se puede observar que la recuperación del mineral es menor en los casos que involucran depresor que el proceso con puro colector. De los tres procesos que incluyeron al depresor, el que presentó menores recuperaciones fue aquél que involucró a los tres reactivos de flotación debido probablemente a que la presencia del sulfato de cobre, desestabilizó a la solución promoviendo la formación de aglomerados disminuyendo la flotabilidad.

El comportamiento general que presenta el mineral muestra las mínimas recuperaciones a pH 7 (29 %) y las máximas recuperaciones a pH 10 (77 %).



Cabe señalar que, en este caso, cuando la concentración del depresor es 20 pm y se encuentran los tres reactivos de flotación en contacto con el mineral, el valor de recuperación a pH 7 y pH 11 son muy parecidos: 29 % y 34 % respectivamente, siendo menor a pH 7. También en esta condición se tienen resultados que concuerdan con los estudios de potencial Z (Ramírez, 2017).

Por lo tanto, se deduce que si se quiere deprimir a la pirita con una concentración de 20 ppm de T5 se debe hacer a pH 7 para obtener menores recuperaciones.

3.1.2.1.1.1 Efecto de la concentración de depresor T5

Las siguientes gráficas se hicieron con el fin de poder analizar cuál es la concentración adecuada para cada proceso.

Para cada prueba se variaron las concentraciones de T5 (10 ppm, 15 ppm y 20 ppm). En todas las pruebas, la concentración de colector (XEK) y de activador (CuSO_4) fueron de 1.5×10^{-4} M.

El primero proceso que se analizó fue aquel en el cual, el mineral se encontró únicamente en presencia del depresor. Su comportamiento se puede observar en la **Figura 23**.

En ella se puede observar la tendencia antes mencionada que a medida que se incrementa el pH, la recuperación es mayor hasta pH 10, volviendo a disminuir en pH 11.



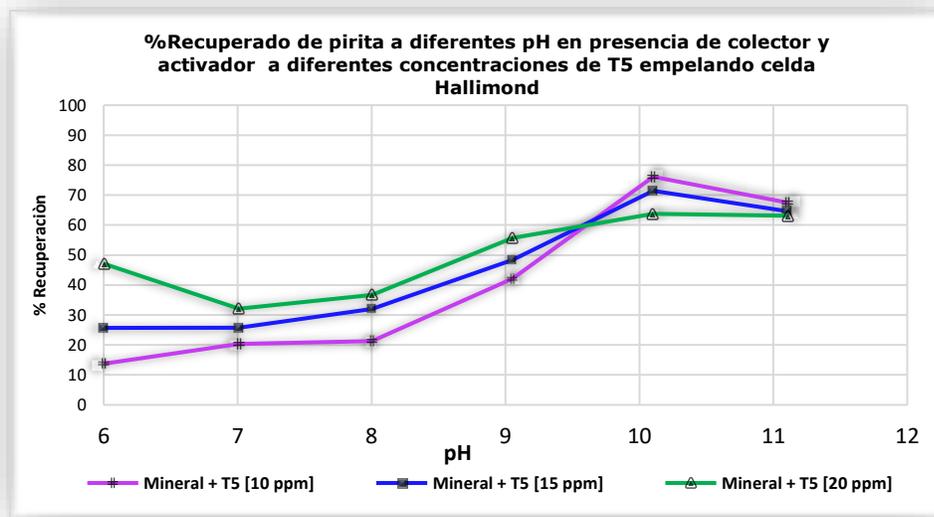


Figura 23. Recuperación de pirita en celda Hallimond en función del pH en presencia de diferentes concentraciones de depresor T5

Así que cuando se tiene el mineral únicamente con depresor, las mejores condiciones de depresión fueron a pH 6 con una concentración de 10 ppm teniendo una recuperación aproximada de 13% y las peores condiciones de depresión fueron a pH 10 a la misma concentración recuperando 76% de mineral.

Esto puede explicarse con ayuda del diagrama de Pourbaix "Pirita-Agua" (Ver Apéndice E) el cual nos indica que a $\text{pH} > 10$ la formación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ se vuelve muy estable y esta especie es más mojable lo que hace que la partícula se vuelva a deprimir. Lo cual coincide con el mecanismo de depresión de la pirita propuesto en la teoría (González, 2015).

El segundo caso que se analizó fue cuando el mineral además de permanecer en contacto con el depresor se adicionó colector. Los resultados se muestran en la **Figura 24**.



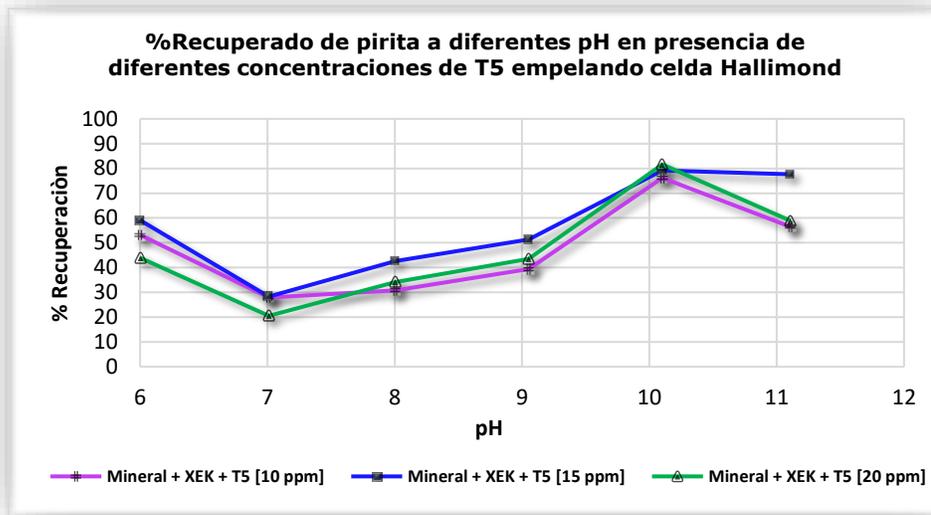


Figura 24. Recuperación de pirita en celda Hallimond en función del pH en presencia de colector $1.5 \times 10^{-4} M$ y depresor T5 a diferentes concentraciones

Al encontrarse el mineral de FeS_2 en contacto con colector, la tendencia siguió siendo la misma pues al aumentar el valor del pH aumenta la recuperación del mineral hasta pH 10, disminuyendo posteriormente.

En estas condiciones a valores de pH inferiores a 10, cuando la concentración es de 15 ppm, y cuando se tienen 10 y 20 ppm el comportamiento es similar entre ellos teniendo menores recuperaciones con la mayor concentración.

Con el resultado anterior, se deduce que las mejores condiciones de depresión cuando el mineral se encontró en contacto con colector y depresor, fue a pH 7 utilizando una concentración de 20 ppm recuperando aproximadamente 20 % del total.



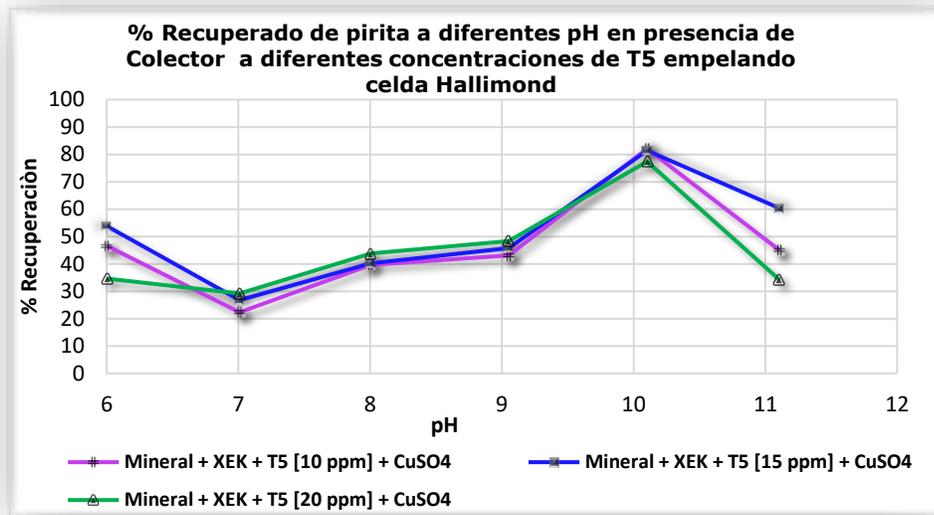


Figura 25. Recuperación de pirita en celda Hallimond en función del pH en presencia de colector, activador ($1.5 \times 10^{-4} M$) y depresor T5 a diferentes concentraciones.

Se sabe que, en la industria, el agua se recircula por lo que se analizó el último caso en el que se encontraron presentes los tres reactivos involucrados en el proceso de flotación, los resultados de estas pruebas se presentan en la **Figura 25.**

Como en el caso anterior, se puede observar que el efecto depresor se pierde al aumentar la concentración del T5 a valores de pH menores de 10 y se invierte el comportamiento a valores de pH superiores.

Esto se puede explicar por los estudios potenciodinámicos del depresor T5 sobre pirita (González, 2015) en el cual, durante la formación de $Fe(OH)_3$ que es una especie influyente en el proceso de depresión ya que además de tener como característica una alta mojabilidad, tiene la característica de que una excesiva concentración de iones OH^- puede saturar el medio disminuyendo la velocidad de formación del producto $Fe(OH)_3$.



Las mejores condiciones de depresión cuando todos los reactivos de flotación están involucrados se tienen a pH 7 y una concentración de 10 ppm, sin embargo, las recuperaciones son ligeramente mayores si se tienen 20 ppm a pH de 11.

3.1.2.1.2 Pruebas en celda Hallimond con mineral PbS de alta pureza

Una vez que se analizó el comportamiento de la pirita, se encontraron las condiciones favorables de pH y concentración del T5 para su flotación y depresión.

Dichos escenarios se emplearon en el estudio de la pirita en presencia de galena para investigar si existía algún cambio en su comportamiento frente al agente depresor.

Para verificar la reproducibilidad, las pruebas se realizaron pro triplicado para cada condición: a) pH 7, mineral + XEK + CuSO_4 + 10 ppm T5 y b) pH 10, mineral + XEK + CuSO_4 + 10 ppm T5.

Las concentraciones de XEK y CuSO_4 empleadas fueron 1.5×10^{-4} M.

Los resultados de las pruebas de flotación que se realizaron a pH 7 se pueden observar en la **Figura 26**, en la que se grafica el porcentaje de recuperación y la ley del concentrado para cada prueba.

Se observó que en general la recuperación de pirita fue ligeramente superior a la de galena, sin embargo, las leyes tuvieron un comportamiento inverso teniendo mayor ley de plomo que de hierro.



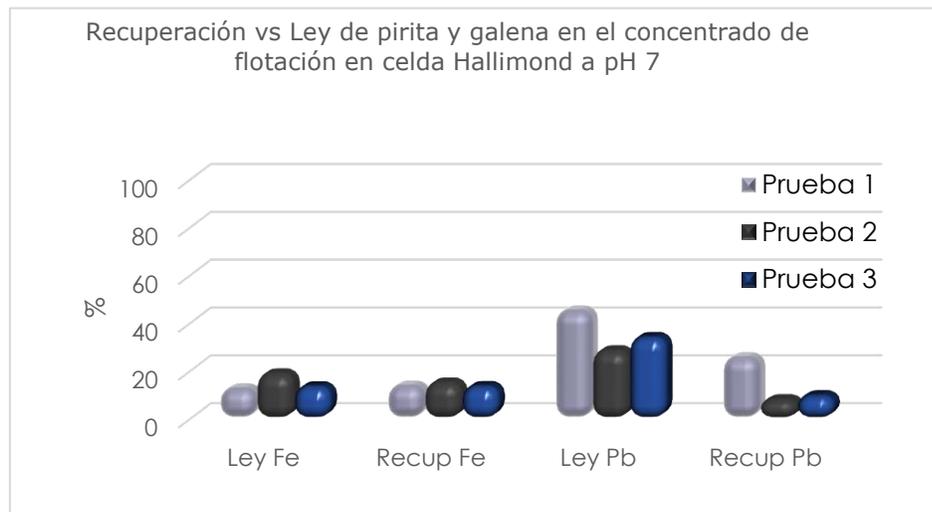


Figura 26. Recuperación de pirita y galena empleando celda Hallimond a pH 7 en presencia de XEK, CuSO_4 y 10 ppm de T5

A pesar de que la reproducibilidad para el plomo no es adecuada, la de hierro sí, ya que la desviación estándar para las leyes de Fe tienen un valor cercano a 3 y las recuperaciones presentan un valor menor a 1.

En cambio, cuando las pruebas se realizaron a pH 10 se obtuvieron muy buenos resultados para la flotación de galena y la depresión de pirita presentando bajas leyes y bajas recuperaciones de pirita, así como altas leyes con altas recuperaciones de galena (Ver **Figura 27**).

Al comparar ambos gráficos, cuando el mineral de pirita se encontró combinado con galena, presentó mayor flotabilidad a pH 7 que a pH 10 (14 % y 8 % respectivamente).

En cambio, para el plomo sucedió el efecto inverso; esto último puede explicarse porque las mejores condiciones de flotación de galena con estos reactivos de acuerdo con múltiples investigaciones, la galena presenta alta flotabilidad a pH 10 debido a la no mojabilidad que presenta el mineral.





Figura 27. Recuperación y leyes de pirita y galena empleando celda Hallimond a pH 10 en presencia de XEK, CuSO_4 y 10 ppm de T5

Cabe resaltar que la recuperación en esta celda no es exclusivamente por adherencia del mineral en la burbuja, sino que cierta cantidad se moviliza también por arrastre del flujo de aire.

Como el aire empleado en las pruebas de la toma general de la escuela, presentaba ligeras fluctuaciones que afectaron los resultados.

3.1.2.2 Pruebas en celda Denver

3.1.2.2.1 Pruebas en celda Denver con mineral complejo Pb-Zn

Una vez que se llevaron a cabo las pruebas anteriores y estando seguros del comportamiento del mineral puro y en presencia de galena, se prosiguió a realizar las pruebas con el mineral complejo en una celda de flotación Denver, con el fin de aproximarse a las condiciones industriales.

En las **Figura 28 y 29** se pueden visualizar los resultados de las pruebas de flotación que se realizaron en celda Denver a valores de pH de 7 y 10 respectivamente. Los resultados mostrados se calcularon a través de un balance de materia que se muestra en el Anexo F.



En ellas se grafica el porcentaje de ley, así como el porcentaje de recuperación para Fe, Pb, Zn y Cu que se encuentran presente en el concentrado. Los resultados se comparan para los tres procesos utilizados: a) mineral + T5, b) mineral + T5 + XEK y c) mineral + T5 + XEK + CuSO₄

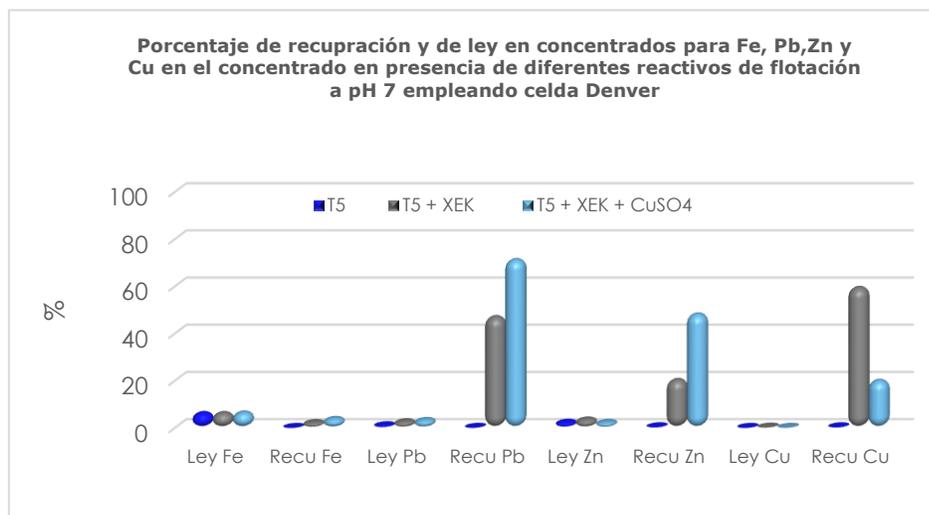


Figura 28. Porcentaje de recuperación y de ley en concentrados para Fe, Pb, Zn y Cu en el concentrado bulk en presencia de diferentes reactivos de flotación a pH 7 empleando celda Denver

En la **Figura 28** se puede observar que, a la condición de pH de 7, la ley de los concentrados para todos los elementos se mantuvo prácticamente constante a lo largo de las pruebas, sin importar qué reactivo de flotación estuvo presente, en cambio en las recuperaciones de cada elemento se pudieron observar cambios significativos.

Una vez efectuado el análisis químico se obtuvo que la ley de Fe fue aproximadamente (6%). Cuando se adicionó el T5, no se tuvo prácticamente recuperación alguna. Al agregar colector y depresor, se flotó una mínima cantidad y cuando además se adicionó el activador, la cantidad de Fe aumentó a 3 %, sin embargo, en los tres procesos no se sobrepasa el 4% de recuperación; valor que se encuentra por debajo del límite permitido de Fe en un concentrado (10%).



La ley de plomo en el concentrado aumentó conforme se adicionaron los reactivos, es decir, tuvo el valor más bajo cuando sólo tenía presente agente depresor y el máximo se obtuvo al estar en contacto con los tres reactivos, todos los valores fueron menores que las leyes de hierro y no sobrepasan el 4%.

Las recuperaciones en cambio se ven alteradas con la adición de cada reactivo ya que cuando el mineral se encontró en contacto con el agente depresor, no se flotó prácticamente nada, lo que nos indica que vuelve hidrófilo a la galena, al adicionar el reactivo colector, la superficie se convirtió en hidrófoba teniendo aproximadamente 50% de recuperación; por último, la presencia del activador CuSO_4 le confirió aún más al mineral de plomo las características adecuadas para lograr flotar un 70 %.

La ley de zinc fue más constante en los tres procesos y las recuperaciones se vieron favorecidas únicamente cuando estuvieron presentes los tres reactivos teniendo un máximo de 47 % de mineral de zinc flotado por la acción del activador que forma una capa de sulfato de zinc sobre la superficie del mineral lo que le confiere características hidrófobas y puede ser flotado; sin embargo, la recuperación es muy alta si lo que se pretende es tener un concentrado de plomo y muy baja si es de zinc.

Finalmente, el concentrado presentó bajas leyes de cobre que no sobrepasaron el 0.4 %, de lo cual al estar en contacto con depresor no se recuperó prácticamente nada, sin embargo, la presencia del colector modificó el comportamiento ya que se alcanzó una recuperación de aproximadamente 60 %, valor que disminuyó al adicionarse el CuSO_4 .



Por lo anterior se deduce que realizar una flotación a pH 7, utilizando como agente depresor T5, colectando con XEK y teniendo la presencia de iones Cu^{2+} asegura que los concentrados tendrán muy bajo porcentaje de Fe en él, baja recuperación de minerales de cobre, teniendo una buena recuperación de galena y moderada recuperación de esfalerita.

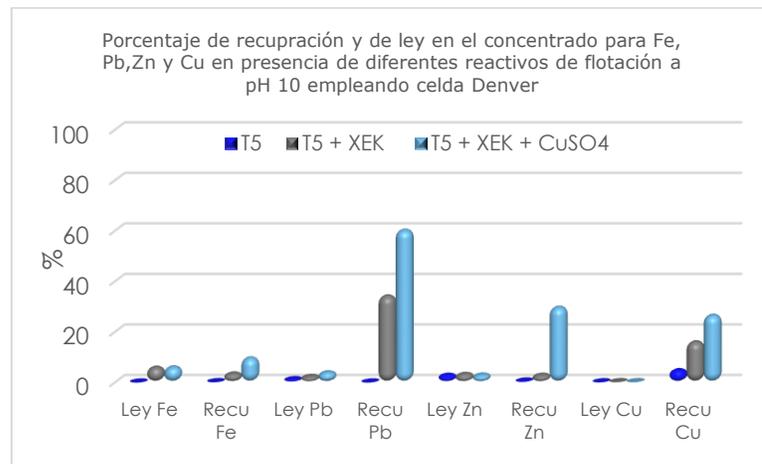


Figura 29. Porcentaje de recuperación y de ley en el concentrado bulk para Fe, Pb, Zn y Cu en presencia de diferentes reactivos de flotación a pH 10 empleando celda Denver

En la **Figura 29**, se tienen los resultados de la prueba de flotación realizada a pH 10. En ella se puede observar que la ley de los concentrados para todos los elementos se mantuvo prácticamente constante a lo largo de las pruebas, sin importar qué reactivo de flotación estuvo presente, en cambio en las recuperaciones de cada elemento se pudieron observar cambios significativos.

En los resultados del análisis químico se encontró que el concentrado tenía baja ley de Fe (menos de 6%) a excepción de la prueba con T5 que tuvo un valor muy bajo de Fe por lo tanto no hubo prácticamente nada recuperado. Al agregar colector y depresor, se flotó una pequeña cantidad y cuando se adicionó el activador, la especie tuvo un porcentaje de recuperación cercano a 10%. Sin embargo, los tres procesos sobrepasan el límite permitido de Fe en un concentrado (10%).



La ley de plomo en el concentrado aumentó conforme se adicionaron los reactivos, es decir, tuvo el valor más bajo cuando sólo tenía presente agente depresor y el máximo se obtuvo al estar en contacto con los tres reactivos, todos los valores fueron menores que las leyes de Hierro y no sobrepasan el 4%. Las recuperaciones en cambio se ven alteradas con la adición de cada reactivo ya que cuando el mineral se encontró en contacto con el agente depresor, no se flotó prácticamente nada, lo que nos indica que vuelve hidrófilo a la galena, al adicionar el reactivo colector, la superficie se convirtió en hidrófoba teniendo aproximadamente 34 % de recuperación; por último, la presencia del activador CuSO_4 le confirió aún más al mineral de plomo las características adecuadas para lograr flotar un 60 %

La ley de zinc fue más constante en los tres procesos y las recuperaciones se vieron favorecidas únicamente cuando se tuvo presente el CuSO_4 , obteniéndose un máximo de 30 % de mineral de zinc flotado por la acción del activador que forma una capa de sulfato de zinc sobre la superficie del mineral lo que le confiere características hidrófobas y puede ser flotado.

Finalmente, el concentrado presentó bajas leyes de cobre que no sobrepasaron el 0.3 %. La recuperación de este elemento aumentó conforme se adicionaron los reactivos de flotación, es decir, se recuperó la mínima cantidad cuando hubo únicamente depresor y la máxima cantidad al estar en contacto con depresor, colector y activador.

Realizar una flotación a pH 10, utilizando como agente depresor T5, colectando con XEK y teniendo la presencia de iones Cu^{2+} asegura que los concentrados tendrán un bajo porcentaje de Fe en él, baja recuperación de minerales de cobre, teniendo una buena recuperación de galena y moderada recuperación de esfalerita. Sin embargo, se tienen mejores resultados si se realiza a pH 7.



CAPÍTULO 4

4.1 Conclusiones

Al emplear el Schinopsis Balansae en una flotación de un mineral de alta pureza de pirita se tienen las siguientes conclusiones:

Con el empleo del depresor el Schinopsis Balansae, la flotabilidad de la pirita es directamente proporcional al incremento de la basicidad del medio teniendo una máxima recuperación a pH 10 y un mínimo a pH 7.

La concentración del depresor Schinopsis Balansae afecta directamente la flotabilidad de la partícula. Este comportamiento depende del pH ya que, en presencia del colector y el activador, a pH ácido se tienen menores recuperaciones empleando 15 ppm, cuando el pH oscila entre 7 y 9 se debe emplear 10 ppm para deprimir mejor y cuando el pH es mayor a 10, se requieren 20 ppm para mejorar la condición de depresión.

Al emplear el Schinopsis Balansae en una flotación de un mineral complejo Pb-Zn que presente impurezas de pirita se tienen las siguientes condiciones:

En ausencia de colector y activador, el depresor actúa sobre la galena, la esfalerita y la pirita manteniendo una flotación prácticamente nula a lo largo de las pruebas.

A pH 7, cuando se encuentra presente el colector, se disminuye el efecto de depresor sobre la galena, y la esfalerita, manteniendo una baja flotabilidad sobre la pirita. En cambio, a pH 10, el efecto se pierde exclusivamente en la galena.



Al tener presente el colector y el activador, aumenta la flotabilidad de la galena y la esfalerita, por lo tanto, el depresor Schinopsis Balansae actúa sobre la pirita.

Las condiciones óptimas de depresión para la pirita se tienen al utilizar una concentración de 10 ppm y un pH neutro aún en presencia de colector y activador.

.



BIBLIOGRAFÍA

Aditan, 2017. *Aditan*. [En línea]
Available at: <https://aditan.mx/>
[Último acceso: 13 11 2017].

Anon., 2017. *Koprino, Materia primas para la industria*. [En línea]
Available at:
[http://www.koprino.com.mx/home/index.php/component/virtuemart/
minera/extracto-de-quebracho-tupasol-detail?Itemid=0](http://www.koprino.com.mx/home/index.php/component/virtuemart/minera/extracto-de-quebracho-tupasol-detail?Itemid=0)
[Último acceso: 10 02 2017].

Barberis, I. M. y otros, 2012. Biología de especies australes: *Schinopsis balansae* Engl. (Anacardiaceae). *Kurtziana*, 37(2), pp. Disponible en http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-59622012000200006.

Bellotti, N., Deyá, C. & Romagnoli, B. d. A., 2012. "Quebracho" tannin derivative and boosters biocides for new antifouling formulations.. *J. Coat. Technol. Res*, 9(5), pp. 551-559.

Beltrán, J., Sánchez, J. & Frutos, B. G., 2009. *Schinopsis balansae* tannin-based flocculant in removing sodium dodecyl benzene sulfonate. *Purif. Technol.*, Issue 67, pp. 295-303.



Cámara Minera de México CAMIMEX, 2017. *Situación minera en México 2016*, México: Informe anual.

curioso, E. p., 2017. *El planeta curioso, mundo curioso*. [En línea] Available at: <http://elplanetacurioso.es/esta-iglesia-es-todo-lo-que-queda-de-un-pueblo-pronto-sera-completamente-enterrada/> [Último acceso: 13 11 2017].

Franco, R., 1981. *Estudio, desarrollo y formulación de un producto preservante de maderas a partir de materias primas de materias primas regionales*, Provincia del Chaco, Argentina: Instituto de ecología, Recursos Naturales y Tecnología y Subsecretaría de Industrias del Ministerio de Economía..

Giménez, A. M. & Ríos, N. A., 1999. Crecimiento de *Schinopsis quebrachocolorado*(Schlecht.) Barkl. et Meyer, Anacardiaceae. *Maderas y bosques*, 5(2), pp. 35-51.

González, J. C., 2015. *Estudios potenciodinámicos del Depresor Schinopsis Balansae Sobre pirita Aplicado al Sistema de flotación Selectiva de Menas sulfuradas*, México: Tesis Licenciatura UNAM.

gtpculturasdelmundo, 2010. *gtpculturasdelmundosept2010*. [En línea] Available at: <https://gtpculturasdelmundosept2010.pbworks.com/w/page/29540956/Pagina%20con%20la%20pregunta%20formulada%20por%20el%20G>



[rupo%203%20y%20el%20espacio%20para%20a%C3%B1adir%20sus%20respuestas](#)

[Último acceso: 13 11 2017].

H. Maron, , S. & F. Prutton, C., 1968. *Fundamentos de fisicoquímica*. s.l.:Limusa.

Hanna, H. S. & Somasudaran, P., 1976. *Flotation: A. M. Gaudin memorial volume*. Volumen 1 ed. E.E.U.U.: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers.

Haslam, E., 1989. "*Plant polyphenols*" *Chemistry and significance of condensed tannins*, E. 1989, Cambridge, U, K: Hemingway R.W..

Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2017. *Datos estadísticos en México*, México: INEGI.

Johnson, N. & Munro, P., 2002. *Overview of Flotation, Technology and Plant Practice for Complex Sulphide Ores*. E.E.U.U.: Society of mining, mtallurgy & exploration, Inc.

Joseph W. Kane, M. M. S., 2000. *Física*. Massachusetts: Reverté.

Kelly, D. J., 1990. *Introducción al procesamiento de minerales*. 1 ed. México: Limusa.



Koutsché, V., 1932. *Contribución al estudio del Quebracho Colorado Chaqueño*, Buenos Aires: Dirección Forestal del Ministerio de Agricultura.

Linares, N., 2010. *Procesamiento de minerales (Mineralurgia II)*, Perú: Universidad Nacional Jorge Basadre.

Marín Martínez, R. y otros, 2009. Antimutagenic and antioxidant activities of quebracho phenolics (*Schinopsis balansae*) recovered from tannery wastewaters. *Bioresource Technol*, Issue 100, pp. 434-439.

Maron & Pruton, 1968. *Fundamentos de fisicoquímica*. 1a ed. México: Limusa.

Meyer, T., 1937. Los árboles indígenas de importancia económica del departamento de Resistencia (Chaco). *Revista Argent, Agron*(4), pp. 153-167.

Meyer, T. & A., B. F., 1973. Revisión del género *Schinopsis* (Anacardiaceae). *Lilloa*, Issue 33, pp. 207-257.

Mezey, E., 1946. *El quebracho colorado y su extracto tánico*, Buenos Aires, Argentina: Labor Argentina.

Morral, F. R., Jimeno, E. & Molera, P., 1985. *Metalurgia general*. Barcelona, España.: Reverté.



Ramírez, R., 2017. *Estudio de la depresión de la pirita empleando Schinopsis Balansae (T5) en el proceso de selección selectiva Pb-Zn, a través de estudios de Potencial Zeta*, México: Tesis Licenciatura UNAM.

Sánchez-Martín, J., González Velasco, M. & Beltrán Heredi, J., 2010. Surface water treatment with tannin-based coagulants from Quebracho (*Schinopsis balansae*). *Chem. Eng. J.*, Issue 165, pp. 851-858.

Sarquís, P. E., Gonzáles, M., Moyano, A. & Bazán, V., 2011. Coagulación de finos en flotación de pirita. *Revista de metalurgia*, Issue 47.

Sarquís, P. E., González, M., Rossetti, R. & Ciribeni, V., s.f. *Application of modified quebracho extracts in copper gold flotation*, Brasil: UNITAN.

Silis, S. A., 2015. *Flotación de minerales tipo sulfuros a través de reactivos naturales (Schinospsis Balansae)*, México: Tesis licenciatura UNAM.

Solá, W., 1942. *Árboles y arvustos de córdoba*, Buenos aires: Celtis.

Tondi, G. & Pizzi, A., 2009. Tannin-based rigid foams: Characterization and modification.. *Ind. Crop Prod*, Issue 29, pp. 356-363.

Tortorelli, L. A., 2009. *Maderas y bosques argentinos*. 2a ed. Buenos Aires: Orientación Gráfica.



Valentini, J., 1960. La reforestación con quebracho colorado y algunas normas silvícolas relacionadas con su aprovechamiento nacional. *Bomplandía*, 1(1), pp. 51-69.

Vazquez F., A. A., Alvarez P., E., López D., J. A. & Wall M., A., 2012. Taninos hidrolizables y condensados: Naturaleza Química, ventajas y desventajas de su consumo. *Tecnociencia Chihuahua*, VI(2), p. Recurso en línea Disponible en http://tecnociencia.uach.mx/numeros/v6n2/data/Taninos_hidrolizables_y_condensados_naturaleza_quimica_ventajas_y_desventajas_de_su_consumo.pdf.

Victor H. A. Ciribeni, P. E. S. y. M. G., 2002. *Estudio del efecto depresor de reactivos orgánicos naturales en la Flotación de sulfuros*, Argentina: Universidad Nacional de San Juan/CONAMET/SAM/Simposio.



APÉNDICE A

A.1 Soluciones amortiguadoras

Las pruebas fueron efectuadas con soluciones amortiguadoras para verificar que la variable pH se mantenía estable a lo largo de la adición de los reactivos. El rango de valores de pH fue de 6 a 11.

Fue necesario comprobar la estabilidad de las soluciones amortiguadoras. La metodología seguida y los resultados de la prueba se muestran a continuación.

A.1.1 Estabilidad de soluciones amortiguadoras

Para cada solución amortiguadora se realizó lo siguiente:

Se adicionaron 200 ml solución buffer en un vaso de precipitados al cual se le midió el pH inicial. Posteriormente se agregaron los reactivos de flotación y se registraron los valores de pH con cada adición.

El sistema de los reactivos involucrados para cada solución amortiguadora para una base de cálculo de 200 mL se muestra en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Sistema de amortiguamiento para cada pH para 200 mL de solución

pH	Sistema [R1/R2]	R1 [mL]	R2 [mL]	H ₂ O [mL]
6	Na ₂ HPO ₄ (0.2 M) / Ácido Cítrico (0.1 M)	82.35	36.85	
7	Na ₂ HPO ₄ (0.2 M) / Ácido Cítrico (0.1 M)	97.25	36.85	
8	Bórax (0.025 M) / HCl (0.1 M)	100	41	Aforar
9	Bórax (0.025 M) / HCl (0.1 M)	100	9.2	Aforar
10	Bórax (0.025 M) / NaOH (0.1 M)	100	36.6	Aforar
11	Na ₂ HPO ₄ (0.05 M) / NaOH (0.1 M)	100	8.2	Aforar



Los valores de pH obtenidos a través de las soluciones amortiguadoras preparadas se presentan en la **Tabla 10**, los cuales mostraron una buena estabilidad dadas por los valores de desviación estándar lo cual indica que las soluciones presentaron condiciones de experimentación adecuadas.

Tabla 10. Estabilidad del pH de las soluciones amortiguadoras (6-11)

Tiempo (min)	Reactivos	<i>pH Teórico</i>					
		6	7	8	9	10	11
		pH registrado					
0	Sin reactivos	6,401	7,105	8,043	9,061	9,982	11,075
1	T5	6,393	7,098	8,033	9,084	9,975	11,073
2		6,387	7,094	8,025	9,092	9,955	11,081
3	T5 + XEK	6,389	7,092	8,093	9,098	9,954	11,079
4	T5 + XEK + CuSO ₄	6,382	7,091	8,111	9,101	9,962	11,077
5	T5 + XEK + CuSO ₄ + MIBC	6,381	7,096	8,111	9,092	9,965	11,076
6	T5 + XEK + CuSO ₄ + MIBC	6,380	7,096	8,112	9,093	9,966	11,076
Desviación estándar		0,0076	0,0047	0,0399	0,0133	0,0101	0,0026



APÉNDICE B

B.1 Cálculos para los minerales

B.1.1 Cantidad de elemento de interés en el mineral

Para conocer la cantidad de hierro que presenta un mineral de pirita totalmente puro, se utilizó la **Ecuación (5)**.

$$\% \textit{Elemento} = \frac{\textit{Peso molecular elemento}}{\textit{Peso molecular del mineral}} * 100 \quad \text{Ecuación (5)}$$

Teniendo así que para el mineral de pirita:

$$\% \textit{Fe} = \frac{55.845 \frac{\textit{gFe}}{\textit{mol Fe}}}{119.98 \frac{\textit{g FeS}_2}{\textit{mol FeS}_2}} * 100 = 46.54 \% \textit{Fe} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Y para el mineral de galena:

$$\% \textit{Pb} = \frac{207.2 \frac{\textit{gPb}}{\textit{mol Pb}}}{239.265 \frac{\textit{g PbS}}{\textit{mol PbS}}} * 100 = 86.59 \% \textit{Pb} \quad \text{Ecuación (7)}$$

B.1.2 Porcentaje de sólidos en peso

Para realizar los cálculos del porcentaje de sólidos en peso se utilizó la **Ecuación 8**.

$$\% A = \frac{M_S}{M_P} * 100 \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

- A = Sólidos en peso [%]
- M_S = Masa de sólidos [g]
- M_P = Masa de pulpa [g]



B.1.2.1 Cálculos para celda Hallimond

Se utilizó para las pruebas en celda Hallimond 1 g de mineral, y 115 g de agua (por su densidad 1g/mL). Sustituyendo estos valores en la ecuación 8, el % de sólidos en peso utilizados en estas pruebas fue de:

$$A = \frac{1 \text{ g mineral}}{115 \text{ g H}_2\text{O} + 1 \text{ g mineral}} * 100 = 0.86 \% \quad \text{Ecuación (9)}$$

B.1.2.2 Cálculos para celda Denver

Para la celda Denver se utilizó 241 g de mineral y 1100 g de agua quedando así:

$$A = \frac{241 \text{ g mineral}}{1100 \text{ g H}_2\text{O} + 241 \text{ g mineral}} * 100 = 17.97 \% \quad \text{Ecuación (10)}$$



APÉNDICE C

C.1 Cálculos de reactivos de flotación

Las ecuaciones requeridas para el cálculo de la masa de cada reactivo se muestran a continuación

C.1.1 Masa del depresor T5

Sabiendo que 1ppm = mg/L se realizó el siguiente cálculo para cada concentración

$$T5 [g] = V \text{ total } [mL] * \frac{\text{Concentración } [mg]}{1000 [ml]} * \frac{1 [g]}{1000 [mg]} \quad \text{Ecuación (11)}$$

C.1.2 Masa del colector XEK

La concentración del colector que se utilizó fue 1.5×10^{-4} M

$$XEK [g] = V \text{ total } [mL] * \frac{1.5 \times 10^{-4} \text{ mol}}{1000 \text{ ml}} * \frac{249.68 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \quad \text{Ecuación (12)}$$

C.1.3 Masa del activador CuSO_4

La concentración del colector que se manejó fue de 1.5×10^{-4} M

$$\text{CuSO}_4 = V \text{ total } * \frac{1.5 \times 10^{-4} \text{ mol}}{1000 \text{ ml}} * \frac{160 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \quad \text{Ecuación (13)}$$



C.1.4 Cantidades de reactivos utilizadas en celda Hallimond

Las cantidades requeridas para cada experimento en celda Hallimond se muestran en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Masa de reactivos requeridos en celda Hallimond

<i>Reactivo</i>	<i>Concentración</i>	<i>Cantidad [g]</i>
<i>Depresor T5</i>	10 ppm	1.1×10^{-3}
	15 ppm	1.5×10^{-3}
	20 ppm	2×10^{-3}
<i>Colector XEK</i>	1.5×10^{-4} M	2.4×10^{-3}
<i>Activador CuSO₄</i>	1.5×10^{-4} M	4×10^{-3}

C.1.5 Cantidades de reactivos utilizadas en celda Denver

Las cantidades requeridas para cada experimento en celda Denver se muestran en la **Tabla 12**

Tabla 12. Masa de reactivos requeridos en celda Denver

<i>Reactivo</i>	<i>Concentración</i>	<i>Cantidad [g]</i>
<i>T5</i>	10 ppm	1.1×10^{-3}
<i>XEK</i>	1.5×10^{-4} M	2.4×10^{-3}
<i>CuSO₄</i>	1.5×10^{-4} M	4×10^{-3}



Apéndice D

D.1 Detalles del análisis químico EAA

D.1.1 Digestión ácida

De cada muestra recolectada se tomó $0.1 \text{ g} \pm 0.01$, se colocó en un vaso de precipitado de 50 mL y se le adicionó 20 mL de HCl 1:1 (HCl + H₂O), se tapó con un vidrio de reloj y se dejó reaccionar 2 horas.

Pasado el tiempo y como el mineral no se disolvió se agregaron 10 gotas de HNO₃ concentrado y se dejó reaccionar por 18 horas a una temperatura aproximada de 60 °C. Esta disolución obtenida de la digestión ácida se diluyó en un matraz de 100 mL. La cual fue analizada en el Espectroscopio de Absorción Atómica AAnalyst 400 PerkinElmer. (Ver **Figura 30**).



Figura 30. Espectroscopio de Absorción Atómica empleado en los análisis.

D.1.2 Curvas de calibración

Los patrones que se emplearon en las curvas de calibración, así como las longitudes de onda y el Slit que se utilizaron para cada elemento se muestran en la **Tabla 13**.

Tabla 13. Condiciones empleadas para realizar las curvas de calibración

	Fe*	Pb	Zn	Cu
Estándar 1 [ppm]	20	20	1	4
Estándar 2 [ppm]	50	40	2	8
Estándar 3 [ppm]	100	80	4	16
Longitud de onda [nm]	248.3	283.3	213.9	324.8
Slit	0.2	0.7	0.7	0.7

* Se realizó con moviendo el ángulo del quemador

Las curvas de calibración para Fe, Pb, Zn y Cu se muestran en las **Figuras 32, 33, 34 y 35** respectivamente.

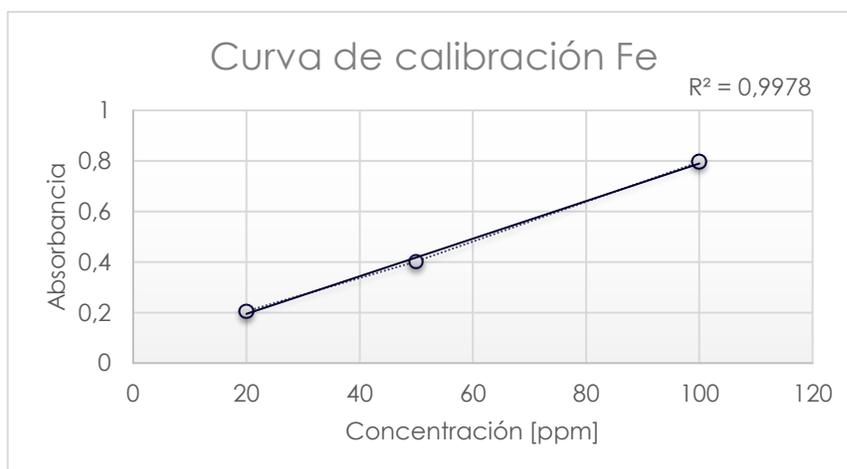


Figura 31. Curva de calibración del Fe para el análisis químico por EAA



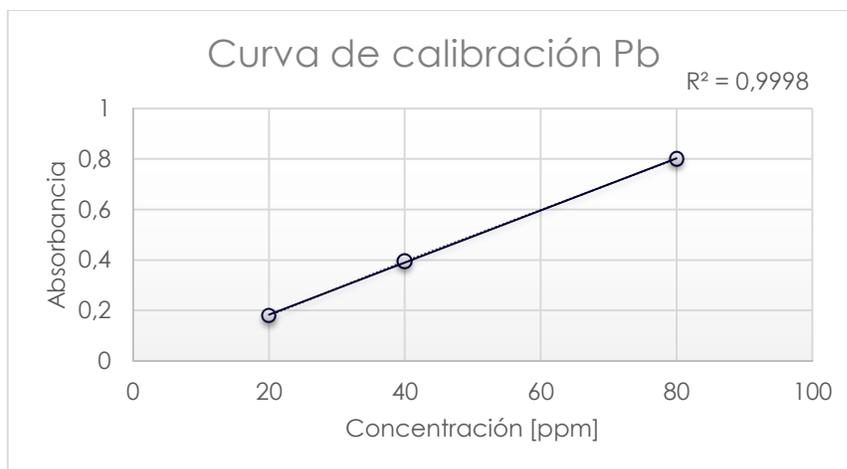


Figura 32. Curva de calibración del Pb para el análisis químico por EAA

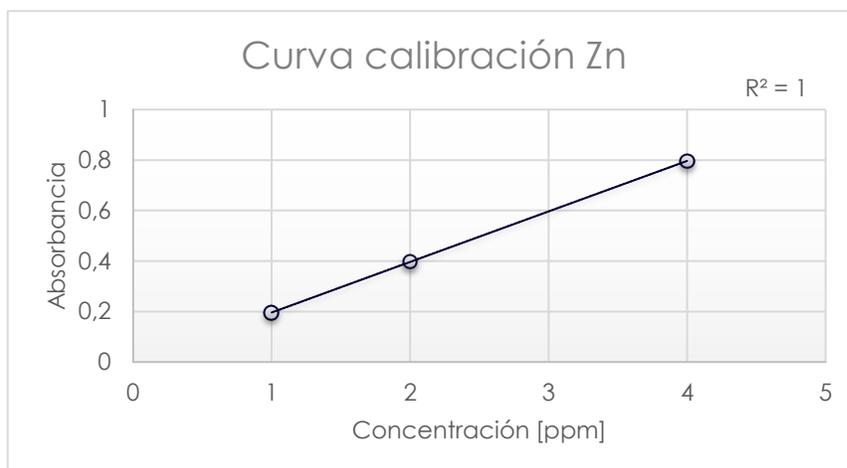


Figura 33. Curva de calibración del Zn para el análisis químico por EAA

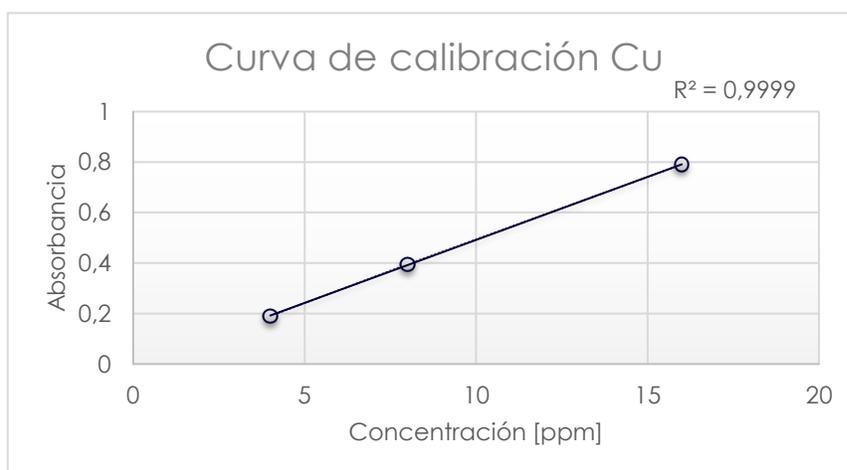


Figura 34. Curva de calibración del Cu para el análisis químico por EAA



Apéndice E

E.1 Diagrama de Pourbaix $\text{FeS}_2/\text{H}_2\text{O}$

Para entender el comportamiento del mineral en las pruebas realizadas en la celda Hallimond, se empleó el diagrama de Pourbaix del sistema pirita-agua y con ello predecir las reacciones que se llevan a cabo a los respectivos pH.

El diagrama se muestra en la **Figura 35**.

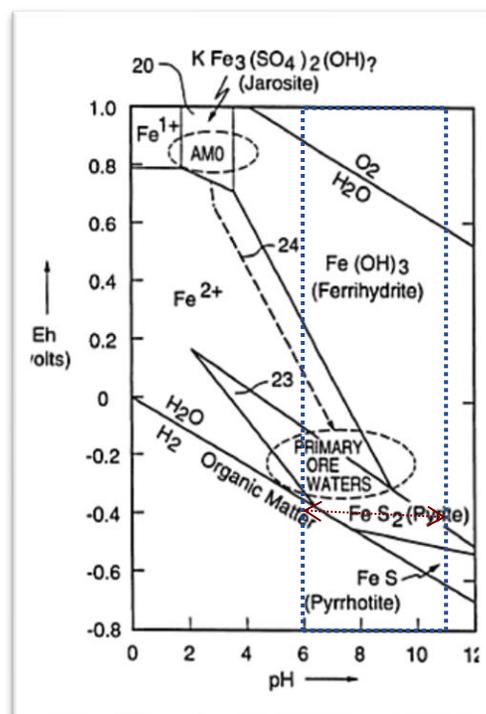


Figura 35. Diagrama de Pourbaix para el sistema $\text{FeS}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{+}/\text{Fe}(\text{OH})_3$ en un medio acuoso (González, 2015). El cuadro punteado muestra los valores de pH utilizados durante la experimentación y por el comportamiento del mineral, el valor de potencial aproximado de trabajo.

Apéndice F

F.1 Balances de materia

F.1.1 Balance de Fe, Pb, Zn y Cu a pH 7

Tabla 14. Balance de materia para el hierro a pH 7

	Nombre	Peso [g]	% Peso	% Ley Fe	CM Pb	% Recuperación
T5	C	0,50	0,24	3,85	0,02	0,15
	T	209,50	99,76	6,06	12,70	99,85
	F	210,00	100,00	6,06	12,72	100,00
T5 + XEK	C	4,10	1,88	7,70	0,32	2,40
	T	213,70	98,12	6,01	12,83	97,60
	F	217,80	100,00	6,04	13,15	100,00
T5 + XEK + CuSO ₄	C	7,00	3,28	7,44	0,52	3,88
	T	206,40	96,72	6,25	12,90	96,12
	F	213,40	100,00	6,29	13,42	100,00

Tabla 15. Balance de materia para plomo a pH 7

	Producto	Peso	% Peso	% Ley de Pb	CM Pb	% Recuperación
T5	C	0,50	0,24	1,19	0,01	0,22
	T	209,50	99,76	1,27	2,65	99,78
	F	210,00	100,00	1,27	2,66	100,00
T5 + XEK	C	4,10	1,88	69,84	2,86	46,83
	T	213,70	98,12	1,52	3,25	53,17
	F	217,80	100,00	2,81	6,11	100,00
T5 + XEK + CuSO ₄	C	7,00	3,28	73,80	5,17	71,00
	T	206,40	96,72	1,02	2,11	29,00
	F	213,40	100,00	3,41	7,28	100,00



Tabla 16. Balance de materia para zinc a pH 7

	Producto	Peso	% Peso	% Ley de Zn	CM Zn	% Recuperación
T5	C	0,50	0,24	6,72	0,03	0,63
	T	209,50	99,76	2,53	5,29	99,37
	F	210,00	100,00	2,53	5,32	100,00
T5 + XEK	C	4,10	1,88	38,89	1,59	20,18
	T	213,70	98,12	2,95	6,31	79,82
	F	217,80	100,00	3,63	7,90	100,00
T5 + XEK + CuSO ₄	C	7,00	3,28	36,00	2,52	47,95
	T	206,40	96,72	1,33	2,73	52,05
	F	213,40	100,00	2,46	5,25	100,00

Tabla 17. Balance de materia para cobre a pH 7

	Producto	Peso	% Peso	% Ley de Cu	CM Cu	% Recuperación
T5	C	0,50	0,24	0,42	0,00	0,62
	T	209,50	99,76	0,16	0,34	99,38
	F	210,00	100,00	0,16	0,34	100,00
T5 + XEK	C	4,10	1,88	12,58	0,52	59,19
	T	213,70	98,12	0,17	0,36	40,81
	F	217,80	100,00	0,40	0,87	100,00
T5 + XEK + CuSO ₄	C	7,00	3,28	1,26	0,09	19,82
	T	206,40	96,72	0,17	0,36	80,18
	F	213,40	100,00	0,21	0,44	100,00

F.1.2 Balance de Fe, Pb, Zn y Cu a pH 10

Tabla 18. Balance de materia para hierro a pH 10

	Producto	Peso	% Peso	% Ley de Fe	CM Fe	% Recuperación
T5	C	0,50	0,24	6,25	0,03	0,24
	T	209,50	99,76	6,23	13,06	99,76
	F	210,00	100,00	6,23	13,09	100,00
T5 + XEK	C	4,10	1,88	10,67	0,44	3,45
	T	213,70	98,12	5,74	12,26	96,55
	F	217,80	100,00	5,83	12,69	100,00
T5 + XEK + CuSO ₄	C	7,00	3,28	17,27	1,21	9,54
	T	206,40	96,72	5,55	11,46	90,46
	F	213,40	100,00	5,94	12,67	100,00



Tabla 19. Balance de materia para plomo a pH 10

	Producto	Peso	% Peso	% Ley de Pb	CM Pb	% Recuperación
T5	C	0,50	0,24	0,00	0,00	0,00
	T	209,50	99,76	1,34	2,80	100,00
	F	210,00	100,00	1,33	2,80	100,00
T5 + XEK	C	4,10	1,88	43,43	1,78	34,08
	T	213,70	98,12	1,61	3,44	65,92
	F	217,80	100,00	2,40	5,22	100,00
T5 + XEK + CuSO ₄	C	7,00	3,28	71,52	5,01	60,09
	T	206,40	96,72	1,61	3,33	39,91
	F	213,40	100,00	3,90	8,33	100,00

Tabla 20. Balance de materia para zinc a pH 10

	Producto	Peso	% Peso	% Ley de Zn	CM Zn	% Recuperación
T5	C	0,50	0,24	7,03	0,04	0,57
	T	209,50	99,76	2,90	6,08	99,43
	F	210,00	100,00	2,91	6,11	100,00
T5 + XEK	C	4,10	1,88	15,35	0,63	8,86
	T	213,70	98,12	3,03	6,47	91,14
	F	217,80	100,00	3,26	7,10	100,00
T5 + XEK + CuSO ₄	C	7,00	3,28	26,98	1,89	29,58
	T	206,40	96,72	2,18	4,50	70,42
	F	213,40	100,00	2,99	6,39	100,00

Tabla 21. Balance de materia para cobre a pH 10

	Producto	Peso	% Peso	% Ley de Cu	CM Cu	% Recuperación
T5	C	0,50	0,24	3,01	0,02	4,83
	T	209,50	99,76	0,14	0,30	95,17
	F	210,00	100,00	0,15	0,31	100,00
T5 + XEK	C	4,10	1,88	2,02	0,08	15,89
	T	213,70	98,12	0,20	0,44	84,11
	F	217,80	100,00	0,24	0,52	100,00
T5 + XEK + CuSO ₄	C	7,00	3,28	1,74	0,12	26,38
	T	206,40	96,72	0,17	0,34	73,62
	F	213,40	100,00	0,22	0,46	100,00

