

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS:
**“ESTUDIO COMPARATIVO DE LA
MICROFLOTACIÓN DE ESFARELITA
EMPLEANDO AGUA DE MAR, AGUA RECICLADA
Y SOLUCIONES SINTÉTICAS”.**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
MECÁNICA**

PRESENTA:

ING. JOSÉ GILBERTO HERNÁNDEZ FLORES

ASESOR:

DRA. LAURA ALICIA IBARRA BRACAMONTES

COASESOR:

DR. FENG RAO WU

AGRADECIMIENTOS.

Se agradece el apoyo brindado a este trabajo de tesis a:

- La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, formadora de grandes personas y excelentes profesionales.
- La facultad de ingeniería Mecánica porque de ahí me forme como ingeniero y obtuve el conocimiento necesario para ingresar a su Posgrado.
- Al Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica por darme la oportunidad de seguir aprendiendo y progresando. Así como por el apoyo económico que recibí para asistir a diferentes congresos.
- A CONACYT por brindarme una beca para realizar mis estudios de maestría como alumno en el Programa de “Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica”
- Al Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, al Posgrado de Ingeniería Química y al laboratorio de Fisicoquímica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la UMSNH por permitirme el uso de sus instalaciones y equipos.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA.

Primeramente agradezco a Dios por mantenerme sano en cuerpo y alma, por darme la inteligencia que tengo con la que puedo razonar de buena manera y por permitirme aprender cosas nuevas día con día.

Con amor y admiración agradezco y dedico a mis padres, el Sr. Gilberto Hernández Martínez y la Sra. Ma. Estela Flores Hernández, porque gracias a su esfuerzo y dedicación me condujeron por el camino del bienestar y del progreso. Porque siempre están conmigo, en las buenas y en las malas. Gracias por los consejos que me dan, que llevo siempre presentes en mi mente y en mi corazón, y que me han llevado hasta donde estoy. También dedico y agradezco a mis hermanos; Benjamín, Julio y Judith Hernández Flores por hacerme los días más divertidos y menos estresantes, son parte de mi vida y los quiero mucho. Agradezco a mis abuelos, a los que ya partieron: al Sr. Margarito Hernández y a la Sra. Ma. Guadalupe Martínez y a los que aún están presentes: al Sr. Ismael Flores y a la Sra. Porfiria Hernández. Me siento muy honrado y agradezco enormemente por transmitirme sus experiencias y su cariño.

Agradezco a mi esposa Maritza Cuevas Cruz, porqué el amor que me demuestra a diario es el motor que me impulsa a superarme, a seguir creciendo y a seguir luchando por un futuro mejor. Me inspiras confianza y me transmites felicidad. Muchas gracias por tu comprensión y tu apoyo en esta etapa de mi vida.

Agradezco a mi asesora la Dra. Laura Alicia Ibarra Bracamontes y a mi coasesor el Dr. Feng Rao Wu por darme la oportunidad de formar parte de su equipo de investigación, por brindarme su apoyo, comprensión y confianza. Y porque aparte de que son excelentes investigadores, son magníficas personas y grandes amigos. Gracias por transmitirme sus experiencias y conocimientos.

Agradezco a los integrantes de mi mesa, al Dr. Gildardo Solorio, a la Dra. Alicia Aguilar y a la Dra. Georgina Carbajal por el apoyo y sugerencias brindadas para la realización de este trabajo de tesis.

También agradezco al Coordinador del programa de Maestría M. C. Víctor López Garza y a su esposa Verónica Aguilar por todo el apoyo y su amistad. Son personas muy amables y profesionales en su trabajo.

RESUMEN

El agua es un medio por el cual se pueden recuperar minerales en la industria minera, la escasez de los suministros de agua son un problema cada vez más grave para la industria, por ello es de vital importancia buscar alternativas para reducir el empleo de agua dulce. El uso de agua de mar y agua reciclada obtenida del proceso de flotación son opciones que podrían sostener el proceso y permitir implementar la industria de hidrometalurgia cerca del mar.

Sin embargo, el agua de mar y el agua reciclada presentan elevadas concentraciones iónicas e impurezas coloidales provenientes de sales solubles, oxidación de minerales y adición de reactivos, que pueden inducir efectos como la activación accidental o la depresión, la inestabilidad de la burbuja, cambios en la tensión superficial del agua, la reducción de solubilidad del aire entre otros efectos, que son generalmente perjudiciales para una buena selectividad y una buena recuperación de partículas de mineral valioso.

El mineral utilizado en esta investigación fue Esfalerita, o Sulfuro de Zinc (ZnS), el cual no es hidrofóbico cuando se pone en contacto con colectores de tipo Xantato. Por ello es necesario modificar la superficie de la Esfalerita para que presente mayor afinidad a dichos colectores, lo cual se logra activándola con Sulfato de Cobre ya que forma una capa de Sulfuro de Cobre sobre la Esfalerita haciéndola afín a los Xantatos.

Factores tales como la concentración de cobre, el tiempo de acondicionamiento, el pH, contaminantes en la superficie de la Esfalerita y contaminantes del agua, son factores importantes que afectan la activación de la Esfalerita. Por lo tanto, comprender el mecanismo entre las fuerzas interfaciales y las impurezas es de vital importancia para alcanzar un buen rendimiento en la flotación.

En este trabajo se presentan resultados obtenidos de la caracterización de la Esfalerita mediante estudios de Difracción de Rayos X, Espectroscopía Infrarroja y Microscopía Electrónica de Barrido, así como resultados obtenidos en un sistema de microflotación con celda Hallimond empleando agua destilada, agua de mar, agua sintética de mar, agua reciclada y agua reciclada sintética. Además se realizaron estudios de Espectroscopía infrarroja para determinar los grupos funcionales y los tipos de enlace formados después del proceso de microflotación.

Se presentan también resultados del Espectrómetro de Rayos UV/VIS para poder determinar la capacidad de adsorción del Xantato en la superficie de la Esfalerita, así como estudios de Espectroscopía de Emisión Atómica por Plasma para determinar la concentración de Cobre adsorbido en la superficie de Esfalerita. Por último se presentan los resultados de Potencial Z que permiten medir la distribución de cargas superficiales en las partículas de Esfalerita a diferentes condiciones de pH y concentración de reactivos.

Entre los principales resultados de la investigación se obtuvo que hay mayor adsorción de cobre empleando agua de mar y agua sintética de mar y por lo tanto mayor afinidad al Xantato lo cual repercute en una mayor recuperación de Esfalerita. Con lo cual se muestra la factibilidad del empleo de agua de mar y agua reciclada, así como aguas sintéticas de mar en los procesos de flotación de Esfalerita.

Palabras Claves: Microflotación, Agua de Mar, Agua Reciclada, Esfalerita y Recuperación.

ABSTRACT

In the mining industry water is a source used for the ores recovery, the problem of lack of water supply is increasing in the industry, for this reason the search for new alternatives to reduce the usage of fresh water is needed. The use of seawater and recycled water obtained from the flotation processes are becoming as a good option to sustain the flotation process and, therefore, for the implementation of hydrometallurgy plants near the sea.

However, seawater and recycled water have high ionic concentrations and colloidal impurities from soluble salts, mineral oxidation, and reagents, which may induce effects such as unexpected activation or depression, bubble instability, changes in water surface tension, reduction in air solubility, among others, which are generally detrimental effects on good selectivity and recovery of valuable ores.

Sphalerite, or Zinc Sulfide (ZnS), is the mineral used in this research. However, Sphalerite does not have a hydrophobic surface when is placed in contact with Xanthate type collectors. The Sphalerite surface needs to be modified to have greater affinity to Xanthate collectors, which is achieved by adding Copper Sulphate as it forms a Copper Sulphide layer on the Sphalerite surface that activates it.

Factors such as copper concentration, conditioning time, pH, surface pollutants of Sphalerite, and water contaminants are important factors affecting the activation of Sphalerite. Therefore, understanding the mechanisms that connect interfacial forces and impurities are important in order to achieve good flotation performance.

In this work, the results obtained from the Sphalerite characterization by X-ray diffraction, Infrared Spectroscopy and Scanning Electron Microscopy studies are presented; as well as the results obtained in a microflotation system with a Hallimond cell using either distilled water, seawater, synthetic seawater, recycled water, or synthetic recycled water. In addition, infrared spectroscopy studies were performed to determine the functional groups and bond types formed after the microflotation process.

Results of the UV / VIS spectrometer are also presented in order to determine the adsorption capacity of Xanthate on the Sphalerite surface, as well as studies of Plasma Atomic Emission Spectroscopy to determine the concentration of Copper adsorbed on the Sphalerite surface. Finally we present the results of Z Potential that allows to measure the distribution of surface charges in Sphalerite particles at different pH conditions and reagent concentration.

Among the main results obtained from the research is that there is a greater adsorption of copper using seawater and synthetic seawater. This leads to a greater affinity to the Xanthate collector using these type of water, and thus a greater recovery of Sphalerite. This

demonstrates the feasibility of the usage of seawater and recycled water, as well as synthetic seawater in the Sphalerite flotation processes.

Keywords: Microflotation, Seawater, Recycled Water, Sphalerite and Recovery

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABLAS	13
ECUACIONES	14
CAPÍTULO 1	15
1.1 INTRODUCCIÓN.	15
1.2 OBJETIVOS	17
1.3 JUSTIFICACIÓN.	18
1.4 HIPÓTESIS.	18
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 Generalidades del proceso de flotación.	19
2.1.1 Microflotación.	20
2.2 Reactivos de Flotación.	21
2.2.1 Colectores.	21
2.2.2 Tipos de adsorción en colectores.	21
2.2.3 Xantatos.	22
2.2.4 Isopropil Xantato de Sodio (SIPX).	22
2.2.5 Espumante.	23
2.2.6 Modificadores.	23
2.2.7 Sulfato de Cobre Pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).	24
2.3 Mecanismos de Flotación.	25
2.3.1 Flotación verdadera.	25
2.3.2 Flotación por arrastre.	28
2.4 Tamaño de partícula.	30
2.5 Importancia de la calidad del agua en el proceso de flotación de minerales.	30
2.6 Mecanismo de activación de la Esfalerita.	31
2.6.1 Activación de Esfalerita con Cu(II) .	31
2.6.2 Efectos de la adsorción del Xantato sobre la superficie de la Esfalerita con cobre.	33
2.7 Antecedentes de flotación de minerales en agua de mar.	34
2.8 Antecedentes de flotación de minerales en agua reciclada.	35
2.8.1 Tratamientos convencionales del agua residual en la presa de Jales.	38
2.9 Técnicas de Caracterización.	39
2.9.1 Difracción de Rayos X (XRD).	39
2.9.2 Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).	39
2.9.3 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB O SEM).	39
2.9.4 Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma.	39
2.9.5 Espectrómetro UV/VIS.	40
2.9.6 Potencial Z.	40
2.9.7 Doble Capa Eléctrica.	40

2.10 Minería en México.	42
2.11 Usos del Zinc.	43
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	44
3.1 Materiales y reactivos de flotación.	44
3.2 Tipos de agua empleados en los diferentes experimentos.	45
3.3 Metodología para obtener la Esfalerita de la piedra.	46
3.4 Equipos utilizados para la caracterización de la Esfalerita.	47
3.4.1 Difracción de Rayos X (XRD).	47
3.4.2 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).	48
3.4.3 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB O SEM).	48
3.5 Equipo experimental.	49
3.5.1 Celda Hallimond.	49
3.5.2 Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma.	49
3.5.3 Espectrómetro UV/VIS.	50
3.5.4 Equipo de potencial Z.	50
3.5.5 Equipo menor	50
3.6 Técnica de microflotación.	52
3.7 Espectroscopía Infrarroja posterior al proceso de microflotación de Esfalerita.	55
3.8 Espectroscopía de Emisión Atómica por Plasma.	56
3.9 Espectroscopía UV/VIS	57
3.10 Potencial Z.	59
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
4.1 Resultados de la caracterización de la muestra.	60
4.1.1 Difracción de Rayos X (XRD).	60
4.1.2 Espectroscopía Infrarroja Media por Transformada de Fourier (FTIR).	60
4.1.3 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).	61
4.2 Resultados de la microflotación de Esfalerita	64
4.2.1 Microflotación en celda Hallimond con agua destilada.	64
4.2.2 Microflotación en celda Hallimond con agua de mar.	66
4.2.3 Microflotación en celda Hallimond con agua sintética de mar.	67
4.2.3.1 Microflotación en celda Hallimond con agua sintética de mar Tipo 1 (NaCl, KCl).	67
4.2.3.2 Microflotación en celda Hallimond con agua sintética de mar Tipo 2 (CaCl ₂).	68
4.2.4 Microflotación en celda Hallimond con agua reciclada de una planta minera.	69
4.2.5 Microflotación en celda Hallimond con agua sintética reciclada tipo 3 (CaSO ₄ .2H ₂ O).	70
4.2.6 Tamaño de burbuja en el proceso de microflotación.	73
4.3 Resultados de Espectroscopía Infrarroja posterior al proceso de microflotación de Esfalerita.	74
4.3.1 Espectroscopía Infrarroja del Sulfato de Cobre e Isopropil Xantato de Sodio	74

en su forma original.	
4.3.2 Espectroscopía Infrarroja posterior al proceso de microflotación de Esfalerita en los diferentes tipos de agua.	75
4.4 Resultados de Espectroscopía de Emisión Atómica por Plasma.	80
4.4.1 Estudio de composición química del agua de mar y agua reciclada.	80
4.4.2 Densidad de adsorción de Cobre en la Esfalerita.	81
4.5 Resultados de Espectroscopía UV/VIS para la densidad de adsorción de Isopropil Xantato de Sodio (SIPX) en la Esfalerita.	82
4.6 Resultados de Potencial Z.	84
4.6.1 Medición de Potencial Z en agua desionizada y agua destilada a diferentes pH.	84
4.6.2 Medición de Potencial Z en agua de mar.	87
4.6.3 Medición de Potencial Z en agua sintética de mar.	88
4.6.3.1 Medición de Potencial Z en agua sintética de mar tipo 1 (NaCl, KCl).	88
4.6.3.2 Medición de Potencial Z en agua sintética de mar tipo 2 (CaCl ₂).	89
4.6.4 Medición de potencial Z en agua reciclada a diferentes pH.	90
4.6.5 Medición de Potencial Z en agua sintética reciclada tipo 3 (CaSO ₄ .2H ₂ O).	91
4.6.6 Tamaño de partícula en equipo de Potencial Z.	92
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.	93
5.1 TRABAJO A FUTURO.	94
CAPÍTULO 6. ACCIONES DE DIFUSIÓN REALIZADAS.	95
REFERENCIAS.	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Celda Mecánica.	19
Figura 2.2 Celda Hallimond.	20
Figura 2.3 Colector Iónico.	21
Figura 2.4 Estructura del SIPX.	22
Figura 2.5 Espumante.	23
Figura 2.6 Flotación verdadera de minerales.	25
Figura 2.7 Mecanismos dentro de la flotación verdadera.	26
Figura 2.8 Atrapamiento.	28
Figura 2.9 Soporte.	28
Figura 2.10 Slime Coatings – Heterocoagulación.	29
Figura 2.11 Wake.	29
Figura 2.12 Datos de tamaños de partícula para procesos de flotación de sulfuros.	30
Figura 2.13 Diagrama de distribución de especies Cu-H ₂ O.	31
Figura 2.14 Uso del agua en la industria minera.	35
Figura 2.15 Esquema de la doble capa eléctrica.	41
Figura 2.16 Esquema de potencial Z contra pH.	41
Figura 2.17 Principales Regiones Mineras en México.	42
Figura 3.1 Piedra de Calcopirita-Galena -Esfalerita.	44
Figura 3.2 A) Aspecto comercial del SIPX, B) Aspecto físico del SIPX.	44
Figura 3.3 A) Aspecto comercial del Sulfato de Cobre, B) Aspecto físico del Sulfato de Cobre.	44
Figura 3.4 Reguladores de pH A) NaOH, B) HCl.	45
Figura 3.5 Sales empleadas para preparar los diferentes tipos de agua sintética de mar A) NaCl, B) KCl, C) CaCl ₂ .	45
Figura 3.6 Sulfato de Calcio para preparar el agua sintética reciclada.	46
Figura 3.7 A) Granos de Esfalerita B) Esfalerita en Mortero.	46
Figura 3.8 Tamizador vibratorio.	47
Figura 3.9 Difractómetro de Rayos X.	47
Figura 3.10 Espectrofotómetro de Infrarrojo Medio con Transformada de Fourier.	48
Figura 3.11 Microscopio Electrónico De Barrido (MEB).	48
Figura 3.12 Montaje experimental para realizar microflotación.	49
Figura 3.13 Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma.	49
Figura 3.14 Espectrómetro UV/VIS.	50
Figura 3.15 Equipo NanoBrook 90 Plus Z.	50
Figura 3.16 pHmetro Horiba.	50
Figura 3.17 Balanza analítica AND.	51
Figura 3.18 Bomba de vacío SIEMENS.	51
Figura 3.19 Horno Felisa.	51
Figura 3.20 Esquema General de la Celda Hallimond para microflotación.	53

Figura 3.21 Esquema de mineral flotado, concentrado y colas dentro de la celda Hallimond.	54
Figura 3.22 Muestras de Esfalerita posteriores al proceso de microflotación.	55
Figura 3.23 Patrones de absorción para diferentes concentraciones de SIPX.	57
Figura 3.24 Valores máximos de absorbancia para diferentes concentraciones de SIPX.	58
Figura 4.1 Difracción de Rayos X de Esfalerita.	60
Figura 4.2 Espectroscopía Infrarroja de Esfalerita.	60
Figura 4.3 A) MEB de Esfalerita a 100X B) MEB de Esfalerita a 250X.	61
Figura 4.4 Muestra de Grano de Esfalerita a 800X para Análisis Químico.	61
Figura 4.5. Elementos Químicos Presentes en la Muestra Seleccionada de Esfalerita.	62
Figura 4.6 Partículas finas 1 y 2 encima de un grano de Esfalerita a 2500X.	62
Figura 4.7 A) Elementos Químicos Presentes de la partícula 1, B) Elementos Químicos Presentes de la partícula 2.	63
Figura 4.8. Recuperación de Esfalerita vs tiempo a diferentes pH en agua destilada.	64
Figura 4.9 Diagrama de distribución de especies del Sulfato de Cobre (CuSO_4) mediante el programa de MEDUSA.	65
Figura 4.10 Diagrama de distribución de especies de la activación de ZnS con Cu (II) mediante el programa de HSC Chemistry.	66
Figura 4.11 Recuperación de Esfalerita vs tiempo a pH original de 7.5 en agua de mar mediante microflotación.	67
Figura 4.12 Recuperación de Esfalerita vs tiempo a pH neutro en agua sintética de mar tipo 1 empleando microflotación.	68
Figura 4.13 Recuperación de Esfalerita vs tiempo a pH neutro en agua sintética de mar tipo 2 empleando microflotación.	69
Figura 4.14 Recuperación de Esfalerita vs tiempo a diferentes pH en agua reciclada empleando microflotación.	70
Figura 4.15 Recuperación de Esfalerita vs tiempo a pH neutro en agua sintética reciclada empleando microflotación.	71
Figura 4.16 Comparación de recuperaciones de Esfalerita a pH neutro empleando microflotación.	72
Figura 4.17 Relación de tamaño de agitadores con sus respectivas velocidades de mezclado para no rebasar la zona de mezclado en la celda Hallimond.	73
Figura 4.18 Diferentes grupos funcionales del Isopropil Xantato de Sodio y del Sulfato de Cobre Pentahidratado.	74
Figura 4.19 Diferentes grupos funcionales presentes después del proceso de microflotación de Esfalerita en agua destilada a diferentes pH.	75
Figura 4.20 Diferentes grupos funcionales presentes después del proceso de microflotación de Esfalerita en agua de mar.	76
Figura 4.21 Diferentes grupos funcionales presentes después del proceso de microflotación de Esfalerita en agua sintética de mar tipo 1 a diferentes concentraciones.	76
Figura 4.22 Diferentes grupos funcionales presentes después del proceso de	77

microflotación de Esfalerita en agua sintética de mar tipo 2 a diferentes concentraciones.	
Figura 4.23 Diferentes grupos funcionales presentes después del proceso de microflotación de Esfalerita en agua reciclada a diferentes pH.	77
Figura 4.24 Diferentes grupos funcionales presentes después del proceso de microflotación de Esfalerita en agua sintética reciclada a diferentes concentraciones.	78
Figura 4.25 Representación gráfica de la Ley de Lambert-Beer.	79
Figura 4.26 A menor % de Transmitancia de luz mayor es la adsorción de Cobre y SIPX.	80
Figura 4.27 Densidad de adsorción de Cobre en la Esfalerita.	81
Figura 4.28 Densidad de adsorción de SIPX en la Esfalerita.	83
Figura 4.29 Potencial Z de Esfalerita en agua desionizada.	84
Figura 4.30 Potencial Z de Esfalerita en agua destilada.	85
Figura 4.31 Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua destilada a diferentes pH.	86
Figura 4.32 Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua de mar a pH de 7.5.	87
Figura 4.33 Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua sintética de mar tipo 1-3 a pH de 7.	88
Figura 4.34 Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua sintética de mar tipo 2-3 a pH de 7.	89
Figura 4.35 Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua reciclada a diferentes pH.	90
Figura 4.36 Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua sintética reciclada tipo 3-3 a pH de 7.	91
Figura 4.37 Intensidad vs diámetro de partícula.	92
Figura 6.1 Constancia de participación en el 26 Tianguis de la Ciencia.	95
Figura 6.2 Constancia de participación en Congreso de División de Dinámica de Fluidos.	96
Figura 6.3 Constancia 1 de participación en el 5th Young Water Professionals Conference.	98
Figura 6.4 Constancia 2 de participación en el 5th Young Water Professionals Conference.	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Análisis de espectroscopía de emisión atómica (ppm) de agua de mar Taltal.	34
Tabla 2.2 Análisis de espectroscopía de emisión atómica (ppm) de agua reciclada.	36
Tabla 2.3 Técnicas utilizadas para el tratamiento de efluentes mineros.	38
Tabla 2.4 Clasificación de tratamientos de agua.	38
Tabla 3.1 Concentraciones de Cloruro de Sodio y Cloruro de Potasio para preparar agua sintética de mar (Agua tipo 1).	52
Tabla 3.2 Concentraciones de Cloruro de Calcio para preparar agua sintética de mar (Agua tipo 2).	52
Tabla 3.3 Concentraciones de Sulfato de Calcio para preparar agua sintética reciclada (Agua tipo 3).	53
Tabla 4.1. Recuperación de Esfalerita a diferentes pH en agua destilada.	64
Tabla 4.2 Recuperación de Esfalerita a pH 7.5 en agua de mar.	66
Tabla 4.3 Recuperación de Esfalerita a pH neutro en agua tipo 1.	67
Tabla 4.4. Recuperación de Esfalerita a pH neutro en agua tipo 2.	68
Tabla 4.5 Recuperación de Esfalerita a diferentes pH en agua reciclada.	70
Tabla 4.6 Recuperación de Esfalerita a pH neutro en agua sintética reciclada tipo 3.	71
Tabla 4.7 A menor % de Transmitancia de luz mayor es la adsorción de Cobre y SIPX.	79
Tabla 4.8 Composición química del agua de mar empleada en este estudio.	80
Tabla 4.9 Composición química del agua reciclada obtenida de una planta minera.	80
Tabla 4.10 Densidad de adsorción de Cobre en la Esfalerita.	81
Tabla 4.11 Densidad de adsorción de SIPX en la Esfalerita.	82
Tabla 4.12 Valores de Potencial Z de Esfalerita en agua desionizada a diferentes pH.	84
Tabla 4.13 Valores de Potencial Z de Esfalerita en agua destilada a diferentes pH.	85
Tabla 4.14 Valores de Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua destilada a diferentes pH.	86
Tabla 4.15 Valores de Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua de mar a pH de 7.5.	87
Tabla 4.16 Valores de Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua sintética de mar (tipo 1-3) a pH de 7.	88
Tabla 4.17 Valores de Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua sintética de mar (tipo 2-3) a pH de 7.	89
Tabla 4.18 Valores de Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua reciclada a diferentes pH.	90
Tabla 4.19 Valores de Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita +	91

Cobre + SIPX en agua sintética reciclada tipo 3-3 a pH de 7.

ECUACIONES

2.1 Mecanismo general de activación de Esfalerita.	31
2.2 Mecanismo de activación de Esfalerita en medios ácido-neutro.	32
2.3 Mecanismo de activación de Esfalerita con Sulfato de Cobre.	32
2.4 Mecanismo de activación-precipitado de Esfalerita en medios alcalino.	33
2.5 Mecanismo de activación-superficie de Esfalerita en medios alcalino.	33
2.6 Mecanismo de adsorción de Xantato en la Esfalerita.	33
3.1 Porcentaje de Recuperación de Esfalerita.	55
3.2 Porcentaje de Colas.	55
3.3 Densidad de Adsorción.	56
3.4 Concentración de Xantato proveniente de la absorbancia.	58
4.1 Ley de Lambert-Beer.	78

CAPÍTULO 1.

1.1 INTRODUCCIÓN.

El proceso de flotación es una de las alternativas más utilizadas para separar selectivamente minerales que contienen especies económicamente valiosas de los que no las tienen (ganga). Es un proceso fisicoquímico de tres fases (sólido- líquido-gas) que aprovecha las propiedades hidrofóbicas de las superficies de los minerales para llevar a cabo la separación y flotación de los mismos. En el proceso se hace pasar aire en forma de burbujas a través de una suspensión de partículas en movimiento. Las partículas de mineral hidrofobizado se adherirán a las burbujas y generarán una fase espuma mineralizada en la parte superior de la suspensión. La microflotación es un proceso muy económico de extracción de micropartículas de minerales puros que se adhieren a burbujas con tamaños alrededor de 1 ml. A nivel laboratorio el instrumento adecuado para realizar microflotación es un tubo de vidrio llamado Hallimond.

El agua es un medio por el cual se pueden recuperar minerales en la industria minera, la escasez de los suministros de agua dulce (agua proveniente de ríos, lagos y presas) son un problema cada vez más grave para la industria, es de vital importancia buscar alternativas para reducir el empleo de agua dulce. La opción de utilizar agua de mar y agua reciclada del proceso de una planta minera para el procesamiento de minerales en lugar de agua dulce, prometen ser alternativas interesantes para la explotación de muchos depósitos minerales.

Pero es claro que al utilizar agua de mar cambia la calidad del agua, algunos iones y altas concentraciones de sales contenidos en el agua de mar podrían tener ya sea efectos positivos o negativos en el proceso de flotación.

El reciclaje del agua representa un reto para las plantas mineras. La calidad del agua de proceso es a menudo incontrolable y varía a través de las operaciones debido a los cambios en la cantidad de sólidos disueltos, la fuerza iónica y el pH. Un cambio en la fuerza iónica podría afectar el proceso de flotación y la estabilidad de la espuma, ya que se produce un mayor intercambio iónico entre la superficie de los minerales y los iones disueltos en el agua. Además el tamaño de la burbuja disminuye de forma significativa con un aumento en la fuerza iónica.

Los minerales sulfurosos como es el caso de la Esfalerita (ZnS) son muy abundantes en la naturaleza y en especial en nuestro país de ahí la gran importancia que tiene estudiar su comportamiento frente a la flotación en diferentes tipos de agua, pero en el caso del uso del agua reciclada está comprobado que ciertos iones de cobre, plomo, plata, etc. provenientes de los circuitos de flotación tienen efectos en la flotación de la Esfalerita.

Estudiar el impacto que tienen los iones significativos del agua de mar y agua reciclada de una planta minera proporcionan una mejor comprensión de efectos tales como la adsorción del colector a la superficie del mineral, el cambio de tamaño y coalescencia de las burbujas, que a su vez repercuten en la recuperación y selectividad de flotación.

El presente trabajo propone el uso de agua de mar y agua reciclada del proceso de una planta minera como opciones que sustenten el proceso de flotación cuyo propósito es poder consumir menos agua dulce y descargar menos agua contaminada con reactivos de flotación al ambiente, así como para implementar industria minera en regiones áridas cerca del mar. Para ello se espera contrarrestar los efectos negativos de las altas concentraciones de iones e impurezas presentes en dichas aguas agregando reactivos de flotación y cambiando las condiciones de la pulpa de flotación para obtener una buena recuperación del mineral. Con los estudios correspondientes se podrá determinar si el agua que utilizamos es factible para el proceso de microflotación de Esfalerita.

1.2 OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

Estudiar el efecto que provocan los iones presentes al utilizar agua de mar y agua en las propiedades interfaciales liquido-gas para el caso de las burbujas y liquido-sólido para la superficie de la Esfalerita adicionando reactivos de flotación y comparar los resultados empleando soluciones sintéticas de agua de mar y agua reciclada.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- I. Caracterizar la muestra del mineral de Esfalerita por Difracción de Rayos X, Espectroscopía Infrarroja y MEB.
- II. Determinar la recuperación de Esfalerita al emplear un sistema de microflotación con agua destilada, agua de mar, agua sintética de mar, agua reciclada y agua sintética reciclada.
- III. Estudiar el mecanismo de activación de la Esfalerita a diferentes pH en agua destilada.
- IV. Determinar los grupos funcionales que se formaron después del proceso de microflotación de Esfalerita mediante FTIR.
- V. Determinar la capacidad de adsorción de cobre y xantato en la superficie de la Esfalerita por medio del estudio de Emisión Atómica por Plasma y Rayos UV/VIS respectivamente, en los diferentes tipos de agua.
- VI. Realizar mediciones de Potencial Z para determinar los cambios en la carga superficial de la Esfalerita durante el proceso de flotación.
- VII. Estudiar el impacto que provocan los iones significativos presentes en el agua de mar y agua reciclada durante la adsorción de los reactivos de flotación sobre la superficie de la Esfalerita.

1.3 JUSTIFICACIÓN.

El uso del agua en lugares donde esté localizada la planta minera puede representar una porción importante de las fuentes del agua locales resultando en una escasez de agua para otros usos. Además las descargas de aguas contaminadas provenientes de las operaciones mineras son potencialmente dañinas al ambiente ya que contienen sólidos suspendidos, así como muchos compuestos químicos tóxicos en solución, en su mayoría agentes de flotación y sus productos de degradación. Por otro lado, hay grandes yacimientos de minerales en regiones aledañas al mar que no se han explotado, debido a la necesidad de consumo de agua dulce para el proceso de flotación. Pero el transporte de agua dulce normalmente es caro y afecta los costos de operación de la industria minera.

Es necesario implementar alternativas que sustenten el proceso de flotación en una planta minera. El agua de mar y el agua reciclada de la misma planta minera son opciones que reducirían la demanda de agua dulce y los volúmenes de descarga de aguas contaminadas al medio ambiente, así como la implementación de industria minera en regiones áridas cercanas al mar.

1.4 HIPÓTESIS.

Se espera contrarrestar los efectos negativos de las altas concentraciones de iones e impurezas coloides en el agua reciclada y agua de mar agregando reactivos de flotación y cambiando las condiciones de la pulpa de flotación para obtener una buena recuperación del mineral, con esto podremos determinar si el agua que utilizamos es factible para el proceso de microflotación.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

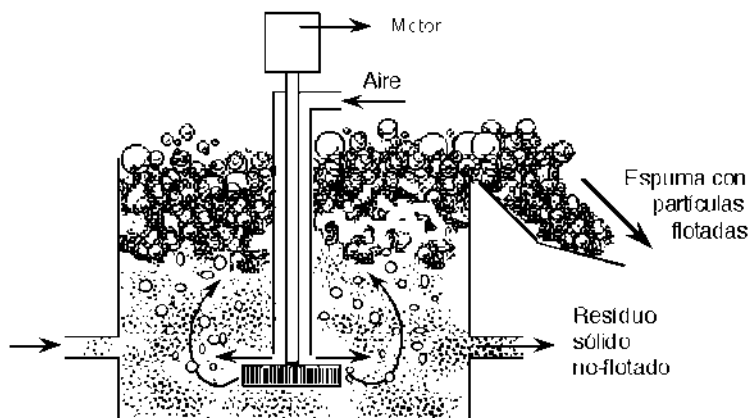
2.1 Generalidades del proceso de flotación.

La flotación es un proceso fisicoquímico de tres fases (sólido- líquido-gas) que tiene por objetivo la separación de especies minerales mediante la adhesión selectiva de partículas de mineral a burbujas de aire [1, 2]. En otras palabras, se trata de un proceso de separación de minerales entre una especie valiosa y otra de poco interés económico, provocada por las propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas de las superficies de los minerales. Las especies valiosas o útiles constituyen una fracción menor del mineral, mientras que las especies no valiosas o estériles constituyen la mayor parte [3].

Los minerales con propiedades hidrofílicas son de afinidad al agua, permanecen en suspensión en la pulpa y se hunden. Son mojables por el agua, constituidos por: óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros, que generalmente representan la mayoría de los minerales estériles, ganga o colas. Por otro lado los minerales con propiedades hidrofóbicas o de repulsión al agua pueden adherirse a las burbujas y ascender. Son minerales que no son mojables o son poco mojables por el agua, dentro de ellos tenemos: Los metales nativos, Sulfuros de metales o especies tales como: Grafito, carbón bituminoso, talco y otros. Estas propiedades de algunos minerales pueden darse de forma natural o mediante los reactivos de flotación [2, 5].

El proceso de flotación ocurre cuando se hace pasar aire en forma de burbujas a través de la pulpa de flotación (mineral, agua y reactivos de flotación). Las partículas de material hidrofobizado se adherirán a las burbujas y generarán una fase espuma mineralizada en la parte superior de la suspensión. La flotación industrial se efectúa exclusivamente con aire ya que se obtiene del medio ambiente y se introduce a la celda de flotación de manera muy sencilla, por medio de unos ventiladores y a baja presión (2-6 libra/pulgada²) [2, 6].

A nivel industrial en el proceso de flotación la celda más común y utilizada es la celda Mecánica, se caracteriza por tener un impulsor o agitador mecánico (rotor). Alrededor del eje del rotor se tiene un tubo concéntrico hueco que sirve de conducto para el ingreso del gas al interior de la pulpa, se forman y se dispersan pequeñas burbujas (1-3 mm) entre el espacio del rotor y el estator de la celda. Los volúmenes de agua que puede ocupar esta celda van de .5-300 m³ [2].



2.1.1 Microflotación.

La microflotación es un proceso de extracción de micropartículas, especialmente microorganismos y coloides que se adhieren a microburbujas de un tamaño alrededor de 1 μ m. Generalmente el gas que se utiliza para la producción de burbujas en las pruebas de microflotación es el nitrógeno, la ventaja de usar este gas es que no oxida la superficie de los minerales y mejora la adsorción de activadores y colectores [4].

El instrumento más adecuado para realizar microflotación a nivel laboratorio es un tubo de vidrio llamado Hallimond. Las pruebas de flotación en la celda Hallimond, consisten en micro flotaciones, que permiten encontrar una tendencia en cada una de las variables analizadas para poder realizar las pruebas de flotación en celda de flotación convencional (celda mecánica). Estas microflotaciones se realizan solamente con partículas de minerales puros y el rendimiento se determina por conteo de partículas recuperadas. Los resultados de estas pruebas nos permiten establecer el comportamiento en la flotación selectiva, con diferentes reactivos de flotación y diferentes condiciones. La ventaja de utilizar esta celda son las bajas cantidades de agua (hasta 120ml), mineral (1 a 2 gr), reactivos de flotación y tiempos de acondicionamiento. El siguiente esquema muestra donde se encuentran el mineral flotado, concentrado y colas en la celda Hallimond. Todo el mineral flotado tendrá que llegar al concentrado [7, 8, 9].

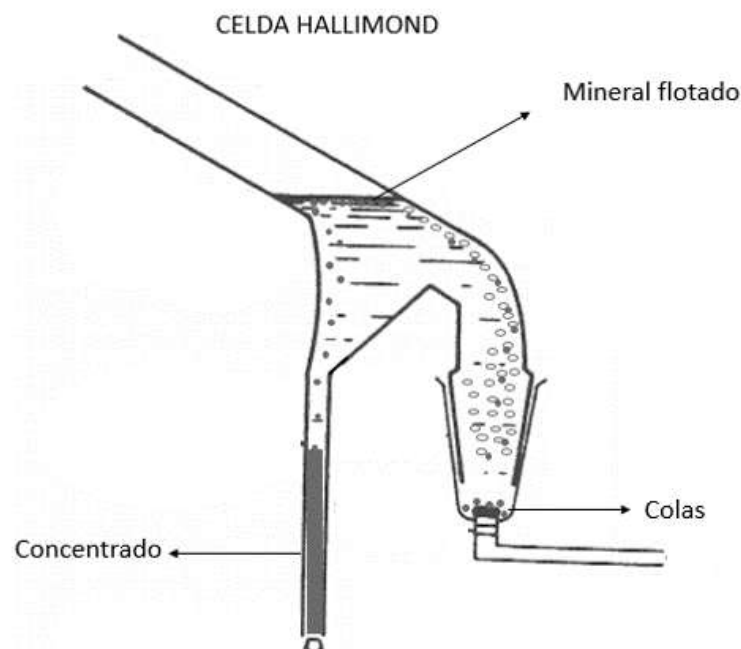


Figura 2.2 Celda Hallimond.

2.2 Reactivos de Flotación.

Los reactivos usados en la flotación son: colectores, espumantes y modificadores. Son sustancias orgánicas que promueven, intensifican y modifican las condiciones óptimas del mecanismo físico-químico del proceso [2].

2.2.1 Colectores.

Son compuestos orgánicos que se adsorben selectivamente en la superficie de las partículas del mineral, permitiéndole características de repelencia al agua (hidrofobicidad) [10, 11]. Estos reactivos se pueden dividir en iónicos y no iónicos. Los primeros son compuestos heteropolares que se disocian en agua, cuyas moléculas contienen un grupo polar y uno no-polar. El anión o catión del grupo polar permiten al ión del colector quedar adsorbido mediante una fisisorción o quimisorción a la superficie también polar, del mineral. Por el contrario, el grupo no-polar o hidrocarburo queda orientado hacia la fase del agua; esta orientación hace que la superficie del mineral sea impermeable. Los colectores del tipo no iónicos, no son solubles en agua, pero cumplen el mismo rol que los iónicos. Además no poseen grupos polares, la superficie del mineral es cubierta mediante una fina película de hidrocarburos saturados o no saturados, aceites, gasolina, kerosén, etc. que hacen al mineral repelente al agua. La siguiente figura muestra un esquema del colector iónico [1, 2, 5].

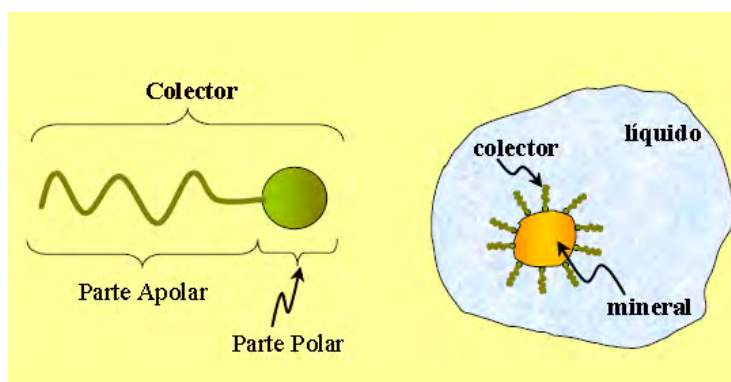


Figura 2.3 Colector Iónico

2.2.2 Tipos de adsorción en colectores.

Adsorción física (Fisisorción). Adsorción de iones de signo contrario (contraiones) por atracción electrostática sin producir cambio químico. Este tipo de adsorción se produce en la flotación de óxidos y silicatos.

Adsorción Química (Quimisorción). Los compuestos adsorbidos pierden su individualidad química y forman nuevos compuestos superficiales. Se distinguen por el intercambio de iones y formación de compuestos insolubles. Este tipo de adsorción se produce en la flotación de Sulfuros. [1,2]

2.2.3 Xantatos.

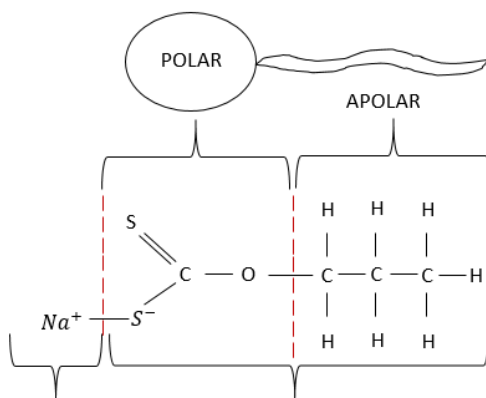
Los Xantatos son compuestos orgánicos obtenidos en reactores por reacción de Bisulfuro de Carbono, Potasa Cáustica y un determinado alcohol; el cual, le otorga las propiedades colectoras en el circuito de flotación para los minerales metálicos y poli metálicos. Se encuentran entre los primeros colectores orgánicos solubles en agua, tal razón hace que su adopción fuera inmediata y amplia en la industria minera. Estos compuestos se caracterizan por liberar un olor a Azufre y son utilizados en muchas industrias, siendo su principal aplicación en la industria minera como colector para la flotación de minerales sulfurados, estos se adhieren a la superficie de los minerales y por acción del aire logran flotar y concentrar variedades de especies minerales bajo condiciones controladas de pH y otros agentes químicos. No son empleados en circuitos muy ácidos, porque tienden a descomponerse [12].

Los Xantatos utilizados como reactivos de flotación, son sales de Xantatos de Sodio o Potasio (o ácido ditiocarbónico) y son hechos comercialmente de alcoholes conteniendo de 2 a 6 átomos de carbono. Los Xantatos de cadena larga usualmente no son efectivos. Los Xantatos son ampliamente utilizados como excelentes promotores para todos los minerales de Sulfuro. En ausencia de agentes modificadores son esencialmente no selectivos en su acción. Generalmente a medida que el carbono de cadena larga crece, se hace más potente, pero menos selectivos [2].

2.2.4 Isopropil Xantato de Sodio (SIPX).

Este xantato ha llegado a ser el más ampliamente usado de todos los Xantatos debido a su bajo costo y elevado poder colector. Generalmente es un poco más lento que los Xantatos de etílico y a menudo puede sustituirlos con una definida reducción en la cantidad y costo de colector requerido. Se han obtenido aplicaciones muy exitosas en la flotación de prácticamente todos los minerales sulfurados. Se emplea en gran escala en la flotación de Cobre, Plomo y Zinc; minerales complejos de Plomo-Zinc y Cobre-Hierro, en los que los principales minerales Sulfurosos son: Calcopirita, Calcocita, Calcopirita, Galena, Esfalerita, Marmatita, Pirita y Pirrotita [2].

ESTRUCTURA DEL ISOPROPIL XANTATO DE SODIO



2.2.5 Espumante.

Para lograr que la separación sea lo más eficiente posible, las burbujas de aire que ingresan al sistema deben ser estables y poseer un tamaño apropiado para realizar la colección del mineral. Para esto, se adicionan los reactivos conocidos como espumantes, que poseen estructura similar a los colectores iónicos (heteropolares), pero en este caso, el grupo polar presenta gran afinidad con el agua. El objetivo principal del espumante es estabilizar a las burbujas de aire que suben a la superficie, para formar espumas sustentadoras. Entre otras funciones también mejoran la cinética de interacción burbuja-partícula, disminuyen la tensión superficial del agua y el fenómeno de unión de dos o más burbujas (coalescencia). Además la estabilidad de la espuma aumenta con una viscosidad creciente, también depende de la temperatura y del pH de la pulpa. El Metil Isobutil Carbinol (MIBC) es uno de los espumantes más utilizados en la industria minera. La siguiente figura muestra un esquema de los que es un espumante [2, 6].

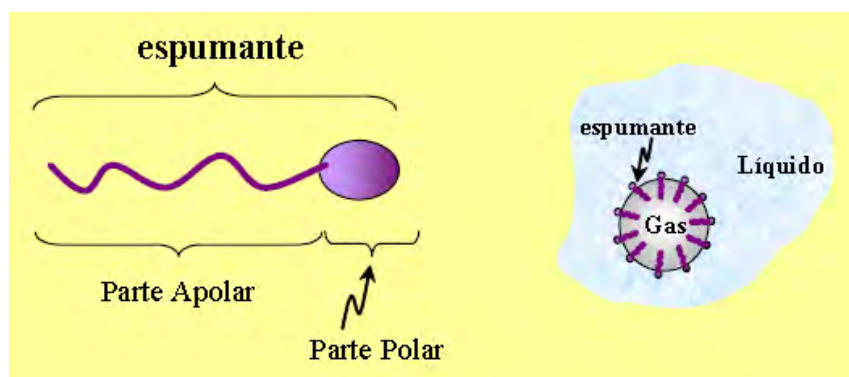


Figura 2.5 Espumante

2.2.6 Modificadores.

La función específica de los reactivos modificadores es preparar las superficies de los minerales, para la adsorción o desorción de un determinado reactivo sobre ellas y crear en la pulpa las condiciones propicias para realizar una buena flotación. Estos reactivos pueden ser de tres tipos: activadores, depresores y reguladores de pH [1, 2].

- **Los activadores** son reactivos químicos que sirven para aumentar la adsorción de los colectores sobre la superficie de los minerales. Los iones de estos reactivos pasan a la red del mineral o forman compuestos superficiales, reduciendo su hidratación superficial y aumentando la cantidad de colector adherido al mineral. Crea una nueva superficie en el mineral y lo hace susceptible a la flotación. También hacen flotar a los minerales que fueron deprimidos en la pulpa de flotación. El activador más usado en la flotación de minerales Sulfurosos es el Sulfato de Cobre Pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).
- **Los depresores** tienen la función específica de disminuir la flotabilidad de un mineral haciendo su superficie más hidrofílica o impidiendo la adsorción de colectores que pueden hidrofobizarla. Impiden la flotación de algunos minerales, mientras se hacen flotar otros. Los iones del depresor forman compuestos superficiales o pasan a la red cristalina por intercambio iónico para impedir la adherencia del colector e incrementan la hidratación de la superficie mineral. El Cianuro de Sodio (NaCN) y el Sulfato de Zinc son los reactivos más utilizados para deprimir minerales Sulfurosos.
- **Los reguladores de pH** tienen la misión de dar a la pulpa el pH necesario para una mejor flotación. Son los reactivos que controlan la acidez o alcalinidad de la pulpa. Es un reactivo que cambia la concentración del ión Hidrógeno de la pulpa, lo cual tiene como propósito incrementar o decrecer la adsorción del colector como se requiera. La efectividad de todos los agentes de flotación, depende grandemente de la concentración de Hidrógeno (H^+) o ión Hidroxilo (OH^-) en la pulpa. Uno de los principales objetivos de la investigación por flotación, es encontrar el pH óptimo para cualquier combinación de reactivos y mineral. La mayoría de plantas de flotación, que tratan minerales sulfurados, operan con una pulpa alcalina para dar óptima metalurgia, así como para mantener la corrosión al mínimo. Cada Sulfuro tiene su propio pH de flotación, donde puede flotar mejor. A nivel industrial el regulador de pH más usado es la cal caústica (CaO) y la Cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) aunque a altas concentraciones se convierten en los depresores más comunes de algunos minerales Sulfurosos como la Esfalerita (ZnS) y la Pirita (FeS_2). Por otro lado a nivel laboratorio los reguladores de pH más usados son el Ácido Clorhídrico (HCl) para disminuir el pH y el Hidróxido de Sodio (NaOH) para aumentar el pH.

2.2.7 Sulfato de Cobre Pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

El sulfato de Cobre con 5 moléculas de agua, está en forma de cristales azules brillantes asimétricos con una densidad de 2.28 g/ml. La materia prima para la fabricación del sulfato de cobre se produce del ácido sulfúrico, cobre en forma de chatarra y desperdicios en la industria de labrado de metales o productos metalúrgicos semielaborados.

Es un activador de la Esfalerita, Pirita, Calcopirita, Pirotilita, Arsenopirita y Cuarzo. Es ampliamente usado en los circuitos de flotación de Zinc para la reactivación de los Sulfuros.

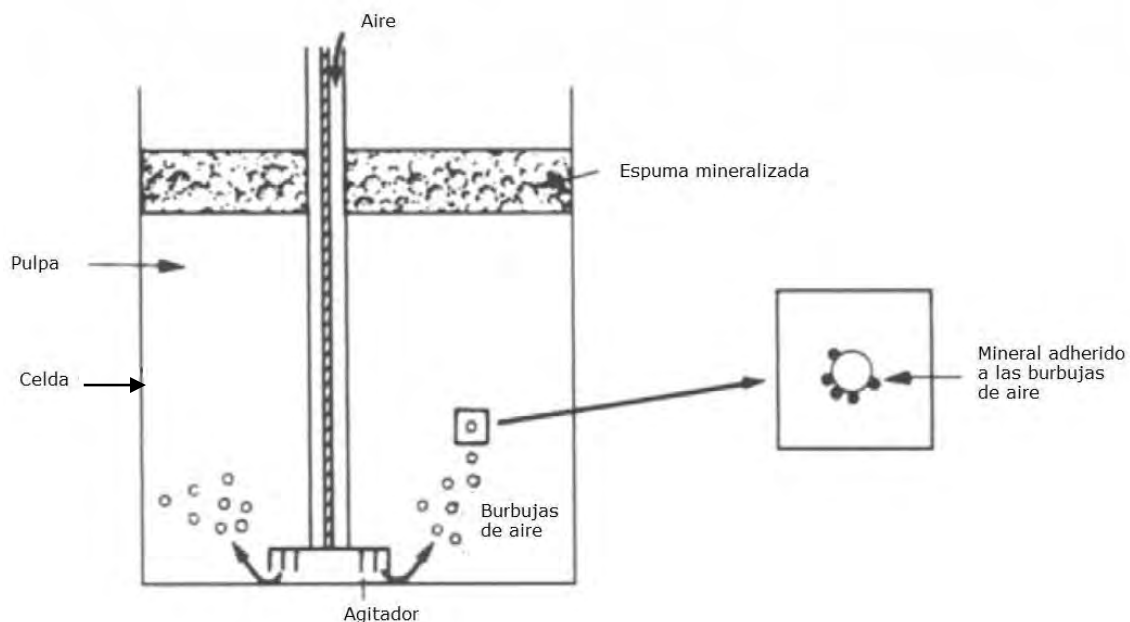
de Zinc que han sido deprimidos en etapas anteriores. La acción activadora, consiste en que el ión cobre del Sulfato de Cobre reemplaza al ión Zinc en la celda cristalina del mineral, formando una película de CuS sobre la Esfalerita; la Esfalerita seguidamente se comporta como mineral de Cobre, sobre el cuál el Xantato puede ser absorbido y por consiguiente, el mineral puede ser flotado [2].

2.3 Mecanismos de Flotación.

Los principales mecanismos que describen el movimiento de las partículas dispersas en la zona de pulpa de una celda de flotación hacia el concentrado, son la flotación verdadera y la flotación por arrastre, estos se describen en las siguientes dos subsecciones [6].

2.3.1 Flotación verdadera.

La flotación verdadera se describe como el proceso por medio del cual partículas que contienen minerales de carácter mayormente hidrofóbico dispersos en la pulpa son transferidos al concentrado, a través de la adhesión selectiva de las partículas a las burbujas de aire. El mecanismo contempla la interacción de tres estados de la materia identificables dentro de la celda de flotación, el estado sólido compuesto por el mineral en suspensión en la pulpa, el estado líquido que contiene al solvente en el cual las partículas están dispersas y el estado gas que se refiere a las burbujas de aire que se ingresan en el sistema. La siguiente figura muestra la descripción de la flotación verdadera [6].



Dentro de la flotación verdadera, para que exista la unión entre partículas y burbujas (mineralización de la burbuja) deben ocurrir 3 mecanismos: colisión, adhesión y estabilización [11].

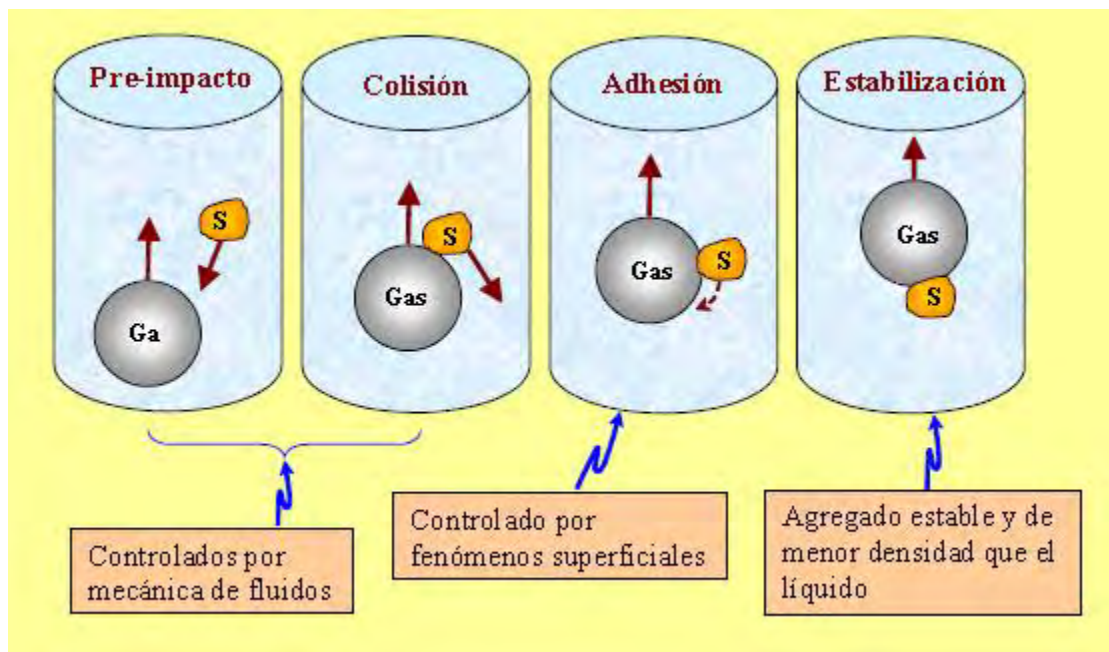


Figura 2.7 Mecanismos dentro de la flotación verdadera.

1. **Colisión:** Esta etapa del mecanismo está referida al encuentro que se produce entre las burbujas de aire y las partículas en la zona de pulpa, bajo la influencia de fuerzas gravitacionales, hidrodinámicas y de inercia [6].
 - **Encuentro por gravedad:** El encuentro se produce debido a la velocidad de sedimentación de las partículas, las cuales al desviarse de la trayectoria del líquido, chocan con la superficie de las burbujas produciendo el encuentro entre ambas fases.

- **Encuentro por intercepción:** Las partículas siguen la trayectoria del líquido encontrándose con las burbujas. Debido a la compresión de las líneas de agua, el centro de la partícula se encuentra a una distancia menor a la esperada produciendo el encuentro con la superficie de la burbuja.
- **Encuentro por impacto inercial:** Debido a efectos de la inercia, las partículas no siguen el movimiento curvilíneo del líquido y siguen una línea recta como las burbujas, produciéndose el encuentro.
- **Encuentro debido a movimientos turbulentos:** La turbulencia del medio provoca que las burbujas y partículas se muevan relativamente entre ambas produciendo el encuentro.

Cabe mencionar que el encuentro entre burbujas y partículas no se produce por la acción separada de cada uno de estos tipos de encuentros, sino por la combinación de dos o más.

2. **La adhesión:** La siguiente etapa del mecanismo se conoce como la adhesión de las partículas a las burbujas. Para que la adhesión entre la partícula y la burbuja sea efectiva, es necesario que, debido a la acción de fuerzas intermoleculares, se genere una presión de interface entre las burbujas y las partículas hidrófobas. Dicha presión tenderá a desestabilizar el film de líquido que rodea a las burbujas, ocasionando su drenaje y adelgazamiento, hasta llegar a la ruptura de éste. Luego de lo anterior, se promoverá el contacto entre las tres fases sólida, líquida y gaseosa produciendo el agregado partícula- burbuja [6].

Las fuerzas que intervienen en este proceso son:

- Fuerzas de Van der Waalls
- Fuerzas debido a doble capa eléctrica
- Otras fuerzas

El tiempo necesario para que se ocasione la adhesión mediante el mecanismo descrito se conoce como tiempo de inducción, si el tiempo de contacto entre la burbuja y la partícula es mayor al tiempo de inducción, se produce la adhesión.

3. **La estabilización:** Es la probabilidad de que la partícula una vez adherida no se desprenda de la burbuja y de que la unión partícula-burbuja sea estable. Muchas de las partículas que en un comienzo fueron adheridas a las burbujas, durante la elevación de estas hacia la fase espuma dejan el agregado burbuja-partícula, debido a la acción de fuerzas gravitacionales (empuje y peso), fuerzas de capilaridad (tensión superficial) y efectos de turbulencia del medio [6].

Para que exista ascenso de una burbuja cargada con partículas, se debe cumplir que la densidad conjunta del agregado burbuja – partículas sea menor que la del líquido en que se encuentran.

2.3.2 Flotación por arrastre.

La flotación por arrastre también conocida como flotación mecánica o flotación carryover se refiere al proceso por medio del cual las partículas de carácter hidrofílico e hidrofóbico son transferidas al concentrado, sin involucrar la adhesión de éstas a las burbujas, sino que por otros mecanismos, los cuales son mencionados a continuación [13].

- **Atrapamiento.** Entre las burbujas se forman unas trampas que retienen partículas que no son de interés o ganga.

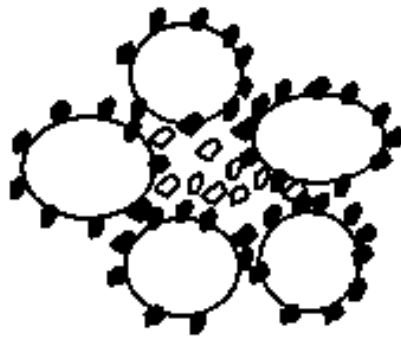


Figura 2.8 Atrapamiento [6].

- **Soporte.** Cuando se agrupan cierta cantidad de burbujas y forman una barrera, al momento que ascienden a la superficie captan partículas de mineral no valioso.



- **Slime Coatings – Heterocoagulación.** En el agua de proceso se encuentran partículas muy finas o coloides provenientes de lodos principalmente, que se adhieren a la superficie de los minerales, este efecto se conoce como slime coatings. Por otro lado a la hora del proceso de molienda la superficie de los minerales puede tener adheridas algunas partículas muy finas provenientes de otros minerales que podrían ser de poco interés, a este efecto se le conoce como heterocoagulación.

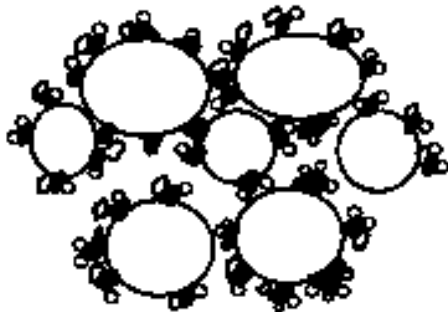


Figura 2.10 Slime Coatings – Heterocoagulación [6].

- **Wake.** Las líneas de corriente que producen las burbujas en el agua dejan una estela que atrapa algunas partículas de minerales no valiosos, estas ascienden y llegan a la etapa del concentrado.



Figura 2.11 Wake [6].

La flotación por arrastre no es selectiva, lo que lleva a que partículas indeseables o de poco interés económico sean recuperadas en el concentrado (disminuye la ley del concentrado), restándole valor al mismo. El concepto de ley del concentrado se refiere a que tan contaminado está el mineral valioso de otros minerales de poco interés [14, 15].

Los factores que intervienen en el arrastre son la densidad de pulpa, flujo de aire, velocidad de agitación, recuperación de agua, granulometría de la alimentación, altura de espuma, entre otros [15].

2.4 Tamaño de partícula.

La eficiencia del proceso de flotación se limita a un rango estrecho de tamaño de partícula. Para el caso de minerales de Sulfuro, este intervalo crítico se limita a una banda estrecha de diámetros de partícula entre aproximadamente 10 y 100 micrómetros (μm). Esta limitación está bien ilustrada por los datos de flotación tamaño por tamaño reportados por Lynch en 1981 para las plantas industriales de flotación que operan con Sulfuros. La siguiente figura muestra los tamaños de partícula más óptimos para obtener una buena recuperación de minerales [17].

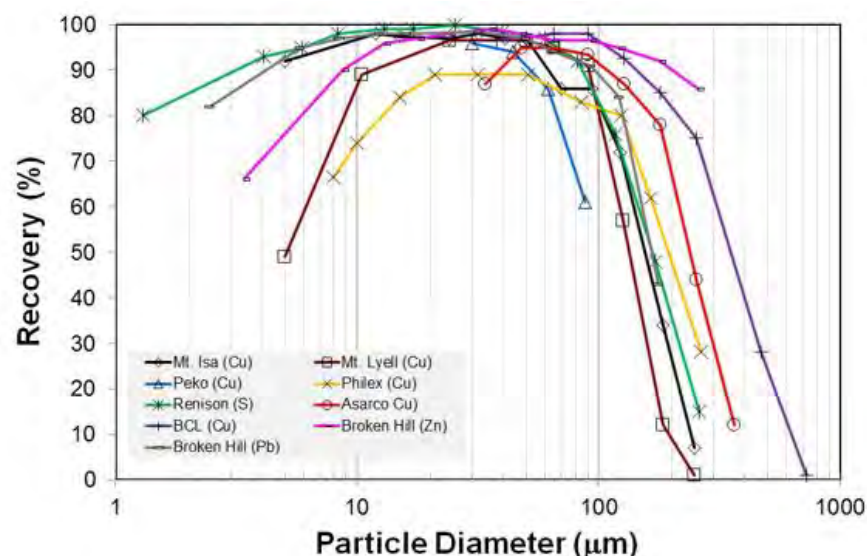


Figura 2.12 Datos de tamaños de partícula para procesos de flotación de sulfuros [17].

La pobre recuperación de partículas más finas de aproximadamente 10 micras ha sido atribuida históricamente a la baja frecuencia de colisión hidrodinámica entre partículas de

tamaño micrométrico muy pequeño y burbujas de tamaño milimétrico relativamente grandes [18].

Para las partículas muy gruesas, la disminución de la recuperación se ha atribuido al aumento del desprendimiento de partículas de burbujas y a la sobrecarga de burbujas [19, 20].

2.5 Importancia de la calidad del agua en el proceso de flotación de minerales.

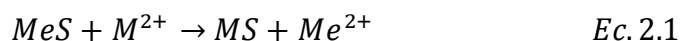
En los circuitos de flotación, el agua representa el 80 - 85% del volumen de la pulpa. Por lo tanto la calidad del agua juega un papel importante en el proceso de flotación, y es controlada por la fuente de agua (agua dulce, agua recirculada del proceso o agua de mar), los minerales disueltos y los productos químicos (reactivos de flotación) añadidos deliberadamente en el proceso de flotación. En general, cuanto mejor sea la calidad del agua, más eficiente será la flotación [21, 22].

2.6 Mecanismo de activación de la Esfalerita.

La activación es el proceso por medio del cual se produce la adsorción de especies metálicas en la superficie del mineral, creando sitios de afinidad con el colector que permiten la recuperación de los minerales a través de flotación. Las especies recuperadas vía activación pueden ser, valiosas o gangas, lo que determinará si la activación es un proceso deseable o no [23].

La Esfalerita (ZnS) es un mineral Sulfuroso de Zinc y es uno de los minerales que requiere activación para lograr su recuperación por flotación y generar concentrados de Zinc ya que de forma natural no interactúa con colectores del tipo Xantato [24]. El proceso se produce por medio de iones del tipo Cu(II), Pb(II), Fe(II/III) [32].

El proceso de activación en minerales de origen sulfurado ha sido estudiado por diversos autores [24, 25, 26, 27]. El mecanismo convencional por el cual se explica el fenómeno de activación es intercambio iónico [28], y ha sido adoptado especialmente en el caso de la activación de la Esfalerita (ZnS) por iones Cu (II) [24, 29, 30, 31], esto es:



Donde MeS representa el mineral sulfurado, M^{2+} es el ion metálico activador, MS la nueva superficie resultante de la activación y Me^{2+} es el ión libre. Donde la razón de intercambio en el caso de la Esfalerita es 1:1 entre el Zn(II) y Cu(II) [30].

Los iones que producen la activación provienen de distintas fuentes y pueden ser introducidos en el sistema de manera deliberada o bien, de forma accidental (disolución de minerales, iones presentes en el agua, etc.).

Factores tales como la concentración de cobre, el tiempo de acondicionamiento, el pH, contaminantes en la superficie de la Esfalerita y contaminantes del agua, son factores importantes que afectan la activación del cobre sobre la Esfalerita [21, 33].

2.6.1 Activación de Esfalerita con Cu(II).

La activación de la Esfalerita con cobre se puede llevar a cabo mediante dos diferentes mecanismos, los cuales dependerán de la especie presente en la solución (Cu^{2+} y $Cu(OH)_2$). Como se observa en el siguiente diagrama de distribución de especies del sistema Cu – H₂O a 25 °C (Fig. 2.13), la especie responsable de la activación a pH ligeramente ácido pH de 5.4 es el Cu^{2+} ya que es la especie predominante a este valor de pH, mientras que a pH de 9 la especie predominante es el $Cu(OH)_2$, la cual será la responsable de la activación, de acuerdo al mecanismo de precipitación superficial [33].

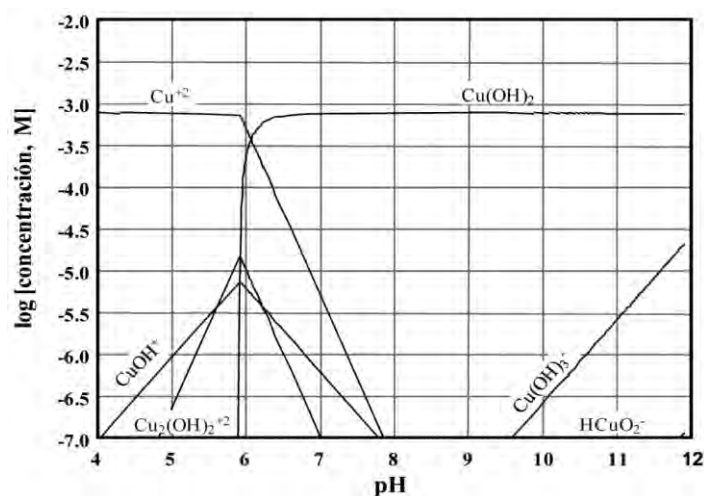
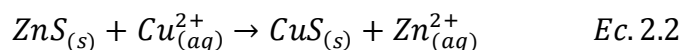


Figura 2.13 Diagrama de distribución de especies Cu-H₂O [33].

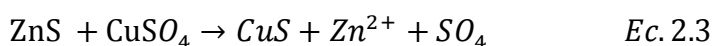
Debido a que la cinética de la activación de la Esfalerita con Cu(II) depende directamente de la actividad del Cobre en solución, aquellas condiciones donde el catión Cu^{2+} sea la especie predominante del sistema Cu(II)-H₂O (pH 5.4), favorecerán la activación y por lo tanto, la hidrofobización del mineral. En consecuencia, también se espera que la predominancia del $Cu(OH)_2$ precipitado (pH 9), de lugar a menores velocidades de activación y, por lo tanto, al desarrollo de una menor hidrofobicidad [29].

Además del intercambio de iones, la adsorción e incorporación de Cu(II) en la red cristalina de la Esfalerita, se provoca una reacción de oxidación- reducción en la que el Cu(II) oxida al Sulfuro del mineral, reduciéndose a Cu(I) , dando como productos finales a la Covelita (CuS), la Calcocita (Cu₂S) y Azufre elemental, de naturaleza hidrofóbica [33].

La siguiente ecuación representa el mecanismo de activación en medios ácidos o ligeramente ácidos donde el Cu²⁺ y el Zn²⁺ son las especies estables de los sistemas Cu-H₂O y Zn-H₂O, respectivamente [24].

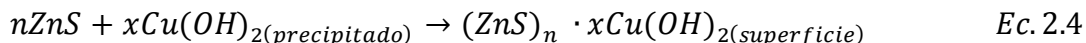


La Esfalerita principalmente es activada por el Sulfato de Cobre, la siguiente ecuación muestra la reacción:

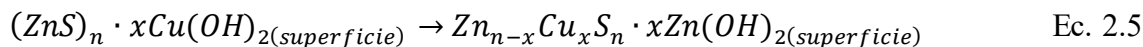


La cinética de reacción entre el Cu(OH)₂ y la Esfalerita es lenta debido a las bajas actividades de las especies de Cu(II) en solución, principalmente Cu²⁺ y CuOH⁺, quienes son finalmente las que se adsorben sobre la superficie del mineral y sustituyen al Zn²⁺, que es entonces liberado lentamente de la red cristalina, permaneciendo sobre la superficie del mineral en forma de Hidróxido [33].

El mecanismo de la activación de la Esfalerita por medio de Cu(OH)₂ fue propuesto por Prestidge y Col, y reportado por Chandra y Gerson, y ocurre de acuerdo a las siguientes reacciones [24, 34]:



El Cu(II) del Hidróxido se puede entonces intercambiar por el Zn(II) del Sulfuro

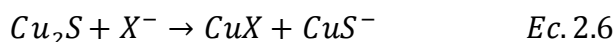


El Cobre incorporado a la red cristalina de la Esfalerita se reducirá oxidando al Sulfuro (S²⁻), para producir una especie rica en Azufre (CuS+Cu₂S+S⁰), de naturaleza hidrofóbica, como se discutió anteriormente.

2.6.2 Efectos de la adsorción del Xantato sobre la superficie de la Esfalerita con cobre.

La activación de Esfalerita con Cu(II) da lugar a la formación de una capa conductora de Calcocita (Cu₂S), mientras que la Esfalerita es naturalmente aislante, permitiendo así que los

colectores tipo Xantato (SIPX) formen complejos insolubles del tipo CuX en la superficie de la Esfalerita, de acuerdo a reacciones como la siguiente[24, 35]:



2.7 Antecedentes de flotación de minerales en agua de mar.

El agua es un medio por el cual se pueden recuperar minerales en la industria minera, la escasez de los suministros de agua dulce son un problema cada vez más grave para la industria, es de vital importancia buscar alternativas para reducir el empleo de agua dulce. El uso de agua de mar es una opción que podría sustentar el proceso e implementar industria en regiones áridas y lugares cercanos al mar [36,37].

El uso de agua de mar cambia la calidad del agua debido a elevadas concentraciones iónicas e impurezas coloidales provenientes de sales solubles, contaminantes orgánicos e inorgánicos y bacterias, que pueden inducir efectos como la pérdida de recuperación y selectividad ocasionado por la activación accidental o la depresión de minerales, así como el recubrimiento de partículas no deseadas sobre minerales valiosos (heterocoagulación) y recubrimiento hidrofóbico de material microbiológico sobre la superficie de minerales no valiosos causando una flotación no deseada [22].

Por otra parte también cambian las propiedades fisicoquímicas del agua como son el caso de un aumento en la densidad y la viscosidad, y una disminución en la tensión superficial del agua. En la flotación con agua de mar, se informa que los compuestos de superficie inactiva (iones inorgánicos) también pueden inhibir la coalescencia de las burbujas y disminuir el tamaño de burbuja. Las pequeñas burbujas aumentan la colisión partícula-burbuja y es probable que aumenten la recuperación de flotación, pero esto repercute en la reducción de la selectividad [38, 39].

La interacción de los iones provenientes de las sales produce efectos como la reducción de la capa de energía entre las partículas hidrofóbicas y las burbujas, este efecto aumenta la atracción hidrofóbica y una disminución en la tensión superficial del agua [40, 41, 42].

El Calcio tiene efectos negativos en la adsorción del cobre sobre la superficie de la Esfalerita, ya que los iones de Calcio compiten con los de cobre para adsorberse en dicha superficie y a su vez se forman precipitados de Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en combinación con el Sulfato, este efecto inhibe la activación de la Esfalerita y por consiguiente tiene efectos negativos en la flotación [21].

La siguiente tabla muestra el análisis de iones significativos de agua de mar en la planta minera de cobre Las Cenizas, ubicada en la ciudad del Taltal (Chile) [43].

Tabla 2.1. Análisis de Espectroscopía de emisión atómica (ppm) de agua de mar Taltal [43]

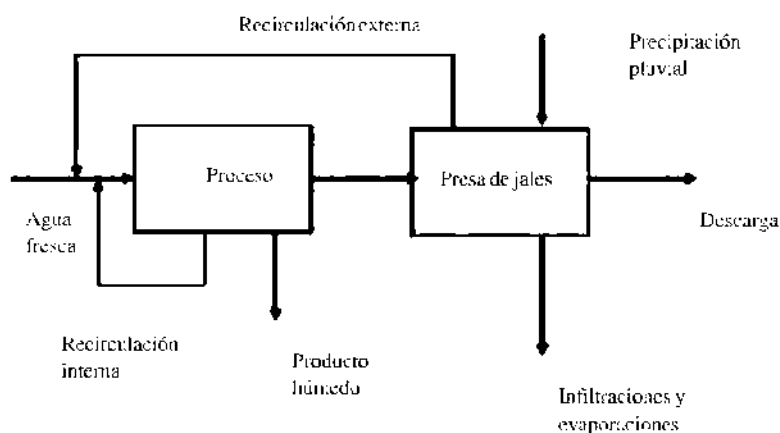
MUESTRA	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	SUM
AGUA DE MAR TALTAL	11400	380	390	1390	19800	2840	36200

El razonamiento de mecanismos que afectan la flotación en un proceso de agua salina es todavía insuficiente [44]

2.8 Antecedentes de flotación de minerales en agua reciclada.

El empleo del agua recirculada sin tratamiento en un proceso de beneficio ocasiona efectos negativos en la eficiencia del proceso de flotación de los minerales valiosos, por el grado y porcentaje de especies disueltas (orgánicas e inorgánicas) que se acumulan durante la operación. En una empresa minera en donde se encuentran presentes Sulfuros complejos existen pérdidas por selectividad y recuperación durante la recirculación del agua residual, las cuales se deben a la combinación de diversos factores: Xantatos residuales y productos de oxidación (Dixantógenos) que se adsorben en forma no selectiva a la mayoría de los Sulfatos; Sulfuros residuales que causan depresión indeseada; presencia de iones metálicos como Cu^{++} , Fe^{++} , Pb^{++} , que causan la activación indeseada y, finalmente, iones alcalinos que activan a la ganga no Sulfurosa. Los efectos específicos del agua de reciclado en el rendimiento de flotación de minerales Sulfurosos y no Sulfuros han sido reportados por muchos trabajadores [45, 46, 47, 49].

La siguiente figura muestra el uso de agua en una planta minera [49].



El agua recuperada del proceso puede ser reciclada y mezclada con agua dulce. A esto se le conoce como reciclaje interno. También es posible reciclar parte del agua acumulada en la presa de jales. A esto se le conoce como reciclaje externo. Ambas recirculaciones, afectan la composición de la corriente de alimentación del aguay determinarán la cantidad de agua dulce utilizada. El reciclaje interno requiere una recirculación del agua de las unidades de deshidratación hacia el concentrador. Esto implica una deshidratación del concentrado o de las colas. Este tipo de recirculación puede simplificar la química del agua hasta cierto punto ya que el agua se recupera de manera rápida y los reactivos de flotación no sufrirán una descomposición significativa. Sin embargo, este tipo de recirculación requiere un equipo complejo de deshidratación para obtener una calidad de agua aceptable libre de sólidos suspendidos. Esta consideración hace más económico el recircular el agua de la presa de jales donde los sólidos son separados por un proceso de sedimentación natural aprovechando la gravedad [46].

La siguiente tabla muestra el análisis de iones significativos de agua reciclada de una planta minera, [39].

Tabla 2.2 Análisis de Espectroscopía de emisión atómica (ppm) de agua reciclada [51]

MUESTRA	Ca	Mg	Na	Cl	SO4	NO3	CO ² 3	SUM
AGUA RECICLADA	800	700	1530	2870	2400	1760	2870	8300

El consumo de agua por la industria minera en México es un porcentaje pequeño del consumo total (menos del 3%) [50]. Sin embargo, existen muchos factores para aumentar el “reciclaje” de agua “utilizada” entre los cuales se tienen los siguientes:

1. El uso de agua en donde esté localizada la mina puede representar una porción importante de las fuentes de agua locales resultando en una escasez de agua para otros usos
2. La producción y el transporte del agua dulce normalmente es cara, afectando los costos de operación de la industria minera
3. Las descargas de las operaciones mineras son potencialmente dañinas al ambiente ya que contienen sólidos suspendidos, así como muchos compuestos químicos tóxicos en solución, en su mayoría agentes de flotación y sus productos de degradación

Tales consideraciones, que tienen enfoques ambientales y económicos, muestran la necesidad del tratamiento del agua así como su conservación. Por tanto los dos objetivos del reciclaje del agua en la industria minera son:

- Reducir la demanda de agua dulce
- Reducir el volumen del efluente.

Generalmente, la flotación en agua dulce y en agua reciclada produce selectividad y recuperaciones diferentes. El uso de agua reciclada de plantas generalmente disminuye la selectividad y la recuperación mientras aumenta el consumo de reactivos [47, 48].

Las siguientes razones reducen el rendimiento de una planta de procesamiento de minerales que utiliza el reciclado del agua del mismo proceso [21]:

1. El uso de agua reciclada conduce a la acumulación de compuestos orgánicos e inorgánicos en el agua de proceso, así como el aumento de actividades microbiológicas.
2. Los compuestos no reconocidos y no controlados pueden adsorberse o precipitar en la superficie mineral, interfieren con la adsorción de activadores y colectores, y consumen reactivos de flotación debido a la precipitación, dando como resultado la pérdida de recuperación.
3. Las propiedades interfaciales sólido-líquido de las partículas minerales pueden ser afectadas significativamente por la conformación de capas adsorbidas y precipitadas.
4. Pueden producirse reacciones químicas entre los componentes del agua reciclada y las especies químicas presentes en la superficie de las partículas minerales, que pueden desempeñar un papel importante en la adsorción de los reactivos
5. Los componentes químicos y microbiológicos del agua reciclada pueden tener un efecto significativo en las propiedades interfaciales líquido-gas, que pueden influir fuertemente en la altura, la resistencia y la estabilidad de la espuma durante la flotación.
6. Las especies químicas disueltas como el Calcio, el Magnesio, el Hierro, el Cobre, el Plomo, el Zinc, el Níquel, los Sulfatos, los Fosfatos y los Carbonatos pueden tener un fuerte efecto sobre las propiedades electrocinéticas de los minerales de Sulfuro en determinados rangos de pH.
7. El uso de agua reciclada contiene minerales de ganga y residuos de lodos que podrían tener efectos negativos como la heterocoagulación indeseada y recubrimiento de lodo en minerales valiosos, esto provoca una pérdida por selectividad.
8. El reciclaje de agua también tiende a acumular partículas en suspensión muy finas. Las cantidades excesivas de sedimentos en el agua de proceso también pueden tener un efecto adverso en los procesos de flotación de minerales (Slime coatings).

El agua de proceso es una mezcla de aguas recicladas complementadas con agua dulce y por lo tanto contiene concentraciones importantes de especies no metálicas tales como Sulfatos, Tiosulfatos, carbonatos, Cloruros, en algunos casos Cianuros, Cianatos y Tiocianatos, así como especies metálicas tales como cationes y complejos hidroxido de metales pesados (Pb, Fe, Cu, Zn), metales alcalinotérreos (Ca y Mg) y alcalinos (Na y K). Estas especies pueden actuar como depresores de minerales específicos, como es el caso del Sulfato y el Calcio, que precipitan en forma de Yeso disminuyendo la flotabilidad de la Galena y la Esfalerita. La presencia del Calcio en las aguas de operaciones de flotación de Sulfuros se debe al empleo de Hidróxido de Calcio para el ajuste del pH alcalino que generalmente se requiere. Por lo tanto hay una depresión inadvertida de la Esfalerita, causada por la precipitación de Sulfato de Calcio Dihidratado (Yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [51].

Se ha demostrado que el agua de proceso sobresaturada de Yeso tiene un efecto adverso sobre la flotación de Esfalerita. La saturación de agua por Yeso retarda la adsorción de Cobre y por lo tanto la secuencia de adsorción de Xantato en la Esfalerita. El retraso de la adsorción de Cobre y Xantato en la Esfalerita también se observa mediante la adición de 800 ppm de Calcio.

La adsorción de Calcio sobre la superficie de la Esfalerita compite con las especies de Cobre por lo que da como resultado una reducción de adsorción de Cobre y Xantato [52].

2.8.1 Tratamientos convencionales del agua residual en la presa de Jales.

El tratamiento del agua residual de los procesos mineros requiere la remoción o la reducción de contaminantes orgánicos, así como la reducción de la concentración de las especies iónicas que dañan al proceso. Muchas de estas técnicas son modificaciones utilizadas en el tratamiento de efluentes, tanto regionales (Estatales y municipales) como industriales. Las técnicas más importantes utilizadas en la industria minera se resumen en las Tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2.3 Técnicas utilizadas para el tratamiento de efluentes mineros [49]

<i>Técnica</i>	<i>Aplicación</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Adsorción en la interfase líquido-gas	Remoción de sustancias orgánicas tensoactivas (sulfatos de alquilo)	Operación sencilla y en concentrado puede ser recirculado	Requiere equipo de dimensiones grandes
Adsorción con carbón activado	Remoción de casi todos los compuestos orgánicos	Una sola etapa de remoción de compuestos orgánicos y los adsorbentes pueden ser recuperados	Requiere unidades especiales para la regeneración del carbón activado
Adsorción con lodo mineral	Remoción de los iones metálicos y algunos compuestos orgánicos dependiendo en la composición del lodo	Uso adecuado de los lodos generados en las operaciones	Las cantidades removidas pueden no ser satisfactorias
Precipitación química	Remoción de metales alcalinos y metales pesados	Rápida	Requiere un control cuidadoso de los reactivos
Oxidación biológica	Remoción de materia orgánica biodegradable	Potencialmente barato usando un tanque de lodos de origen microbiano	Operación lenta, acondicionamiento posterior requerido
Oxidación química	Transformación de las moléculas de alto peso molecular a bajo peso molecular	La mayoría de los compuestos orgánicos son oxidados y no tiene problemas de manejo	Costo de capital
Resinas de intercambio iónico	Remoción de las especies iónicas	Las resinas pueden regenerarse si el proceso se realiza en columnas	Costo de capital. Bajo punto de saturación
Ósmosis inversa	Remoción de electrolitos	Todas las especies catiónicas y aniónicas se remueven en una	Problemas de mantenimiento y es necesaria una remoción

Tabla 2.4 Clasificación de tratamientos de agua [60]

<i>Categoría</i>	<i>Procesos</i>
Tratamiento químico y precipitación	Adición de hidróxido y carbonato de calcio Adición de sales de bario Proceso SAVMIN Proceso CESR
Membranas	Ósmosis inversa Proceso SPARRO Electrodialisis
Intercambio iónico	Proceso GYP-CIX Precipitación química con intercambio iónico
Remoción biológica de sulfatos	Humedales artificiales Biorreactores

2.9 Técnicas de Caracterización.

2.9.1 Difracción de Rayos X (XRD).

La técnica consiste en hacer incidir sobre una muestra Rayos X los que se difractan en ella y generan la emisión de fotones, cuya intensidad es medida y representada a través de un espectro que da cuenta de la composición química estructural y fase de la muestra. La radiación generada tiene directa relación con las distancias interatómicas de cristales y moléculas y permite identificar fases mineralógicas, porcentaje de cristalinidad, tamaño del cristal, etc. [53].

2.9.2 Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

La técnica consiste en hacer incidir sobre una muestra un pulso de radiación infrarroja. Parte de esta radiación es absorbida por la muestra y parte es transmitida, generando espectros producidos a partir de la conversión de la información registrada mediante transformadas de Fourier. El espectro es característico de la muestra irradiada permitiendo identificar materiales no conocidos, determinando la cantidad de los componentes de una mezcla y dar cuenta de información del enlace entre átomos [54].

2.9.3 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB O SEM).

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es un tipo de microscopio que utiliza electrones en vez de luz para generar la imagen. Este microscopio se utiliza para el estudio de superficies. Para ello un haz de electrones no atraviesa la muestra, sino que unas bobinas deflectoras realizan un barrido de la superficie de la muestra. Frecuentemente la técnica SEM es acompañada con un analizador de Energía dispersiva de Rayos X, para determinar la composición elemental y cuantificar la información de los compuestos. Los principales usos de la técnica corresponden a microanálisis de elementos, caracterización de partículas y generación de imágenes de alta resolución [55].

2.9.4 Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma.

La Espectroscopía de Emisión Atómica es un método de análisis químico que utiliza la intensidad de la luz emitida desde una llama, plasma, arco o chispa en una longitud de onda particular para determinar la cantidad de un elemento en una muestra. La longitud de onda de la línea espectral atómica da la identidad del elemento, mientras que la intensidad de la luz emitida es proporcional a la cantidad de átomos del elemento [21].

2.9.5 Espectrómetro UV/VIS.

La Espectroscopía Ultravioleta-Visible o Espectrofotometría Ultravioleta-Visible (UV/VIS) es una Espectroscopía de Emisión de Fotones. Utiliza radiación electromagnética (luz) de las regiones visible, ultravioleta cercana (UV) e infrarroja cercana (NIR) del espectro electromagnético, es decir, una longitud de onda entre 380 nm y 780 nm. La absorción o reflectancia en el visible, afecta directamente el color percibido de las especies químicas involucradas. En esta región del espectro electromagnético las moléculas llevan a cabo transiciones electrónicas. La radiación absorbida por las moléculas desde esta región del espectro provoca transiciones electrónicas que pueden ser cuantificadas, por ejemplo los valores de la absorbancia para el SIPX corresponden a una longitud de onda de 301. La Espectroscopía UV-visible se utiliza para identificar algunos grupos funcionales de moléculas, y además, para determinar el contenido y fuerza de una sustancia. El Espectrofotómetro es un instrumento que permite comparar la radiación absorbida o transmitida por una solución que contiene una cantidad desconocida de soluto, y una que contiene una cantidad conocida de la misma sustancia. Todas las sustancias pueden absorber energía radiante. El vidrio, que parece ser completamente transparente, absorbe longitudes de onda que pertenecen al espectro visible; el agua absorbe fuertemente en la región del IR. La absorción de las radiaciones UV, visibles e IR depende de la estructura de las moléculas, y es característica para cada sustancia química. El color de las sustancias se debe a que absorben ciertas longitudes de onda de la luz blanca que incide sobre ellas y sólo dejan pasar a nuestros ojos aquellas longitudes de onda no absorbida. Esta Espectrofotometría utiliza radiaciones del campo UV de 80 a 400 nm, principalmente de 200 a 400 nm (UV cercano) y de luz visible de 400 a 800 nm, por lo que es de gran utilidad para caracterizar las soluciones en la región ultravioleta-visible del espectro [21].

2.9.6 Potencial Z.

El Potencial Z es una medida de la magnitud de la repulsión o atracción entre las partículas. Su medida proporciona una idea detallada de los mecanismos de dispersión y es la clave del control de dispersión electrostático [56].

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

2.9.7 Doble Capa Eléctrica.

En una partícula mineral en contacto con un líquido, se desarrolla una carga eléctrica superficial que es compensada por una distribución equivalente de carga en la fase acuosa (capa Stern). Entre esta capa y el seno del líquido se forma una capa difusa de contraiones. Ambas capas en conjunto forman la denominada doble capa eléctrica, que influye directamente en la adsorción de los reactivos sobre la superficie de los minerales [56].

Aquellos iones que son quimioadsorbidos sobre la superficie del mineral establecen la carga superficial y son llamados iones determinantes del potencial. Estos pueden ser iones del mineral, iones Hidrógeno (H^+) o Hidroxilo (OH^-), iones colectores que forman sales insolubles con iones en la superficie del mineral, o iones que forman iones complejos con los iones de la superficie del mineral. La siguiente figura muestra el esquema de la doble capa.

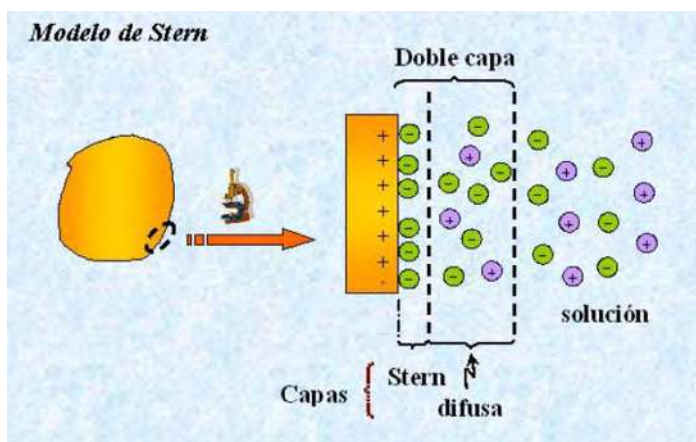


Figura 2.15 Esquema de la doble capa eléctrica.

En suspensiones acuosas de minerales, las partículas adquieren carga eléctrica superficial debido al desbalance eléctrico generado por la rotura de enlaces en la superficie. Esto genera una concentración de contra iones en la solución en la cercanía de la superficie de las partículas. Esta concentración disminuye al incrementar la distancia entre las partículas, provocando una diferencia de potencial entre la superficie de la partícula y el seno de la solución. Según el modelo de la doble capa eléctrica, se pueden asumir la existencia de dos capas en la vecindad de la interface sólido-solución; una capa en la cual se presenta un decaimiento lineal del potencial eléctrico y que permanece fija aun cuando las partículas se muevan, y una capa difusa con decaimiento exponencial. Esto implica la existencia de un plano de referencia entre la capa fija y la capa difusa y justo el potencial se denomina Potencial Z, o Potencial Electrodinámico [56].

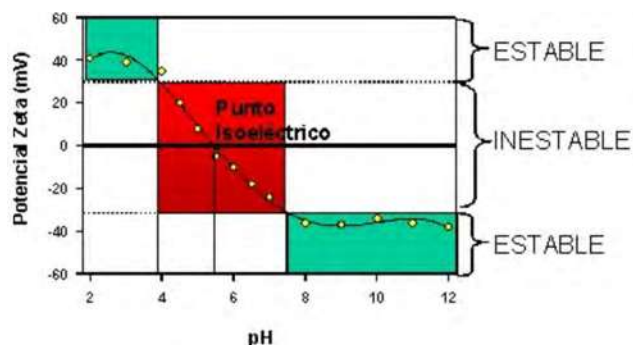


Figura 2.16 Esquema de Potencial Z contra pH.

2.10 Minería en México.

La minería mexicana comprende la explotación de metales preciosos, metales industriales, minerales metálicos y no metálicos, y metales obtenidos como subproductos. La producción minera estaba tradicionalmente dedicada a la plata y el oro, pero ha cambiado desarrollándose la de los metales industriales, hasta convertir al país en un importante productor de plomo y zinc. El sector minero aporta entre el 1.17 % y 1.5 % al producto interno bruto nacional y de manera estimada representa el 2.4 % de la producción minera mundial. México ocupa el 9º lugar en la producción minera mundial y el 4º lugar en la producción minera de Latinoamérica (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2004). La minería mexicana se ubicó entre los once principales productores mundiales en 18 minerales, desde la plata (primer lugar) hasta el cobre (onceavo lugar) (Secretaría de Economía, 2005). A nivel nacional, el grupo de minerales industriales no ferrosos cubrió 37.3 % del valor de la producción minero-metalúrgica nacional, seguido de los metales preciosos (25.2 %), metales y minerales siderúrgicos (21.4 %), y minerales no metálicos (16.1 %). Por mineral, la principal industria del sector, considerando el valor de la producción minero-metalúrgica, es la del cobre, con una participación de 20 %; seguido de la producción de plata y zinc. En la Figura 2.17 se muestran las principales regiones mineras productoras así como su aportación a nivel nacional [46].

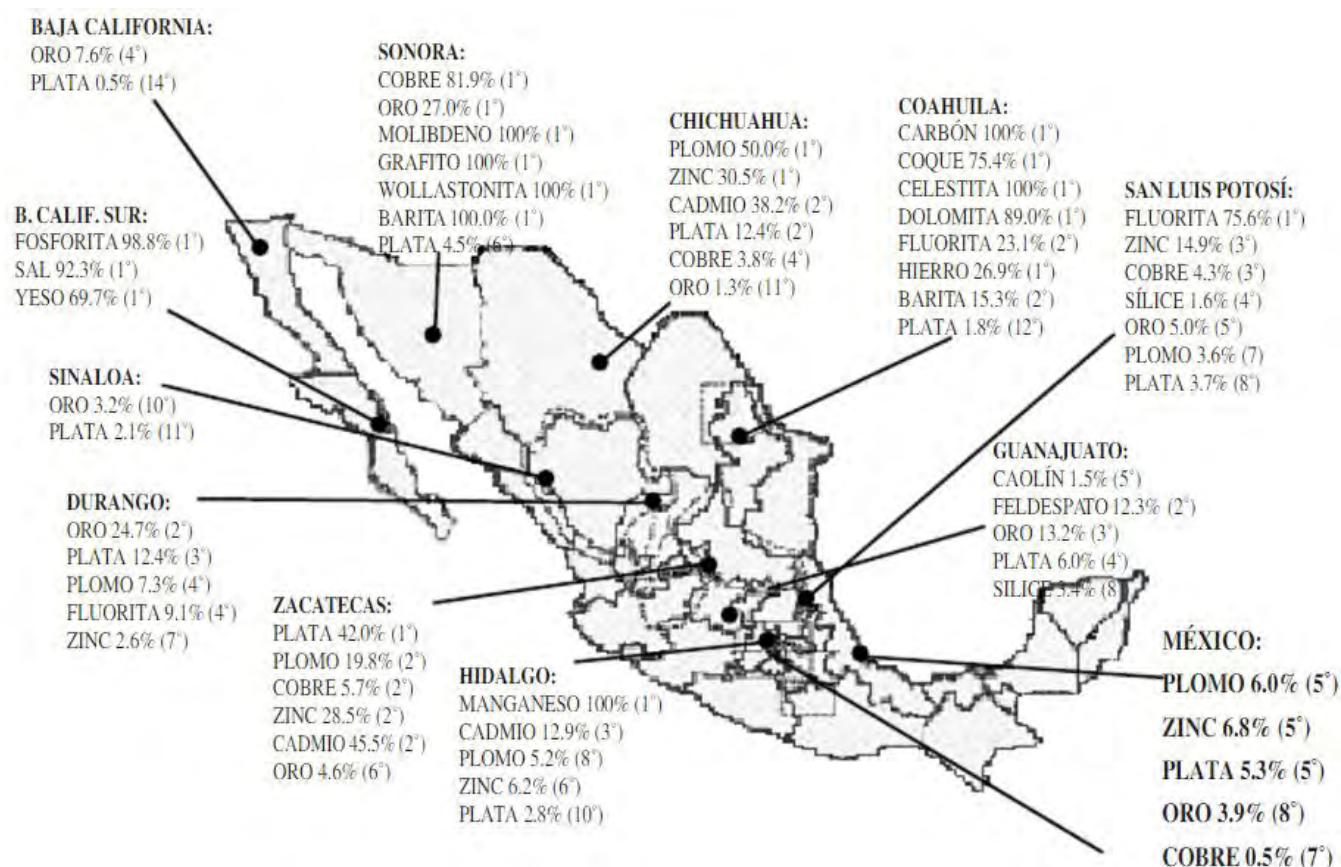


Figura 2.17 Principales Regiones Mineras en México [46].

2.11 Usos del Zinc.

Antes de mencionar los usos del Zinc es importante mencionar y entender que es una mena. Una mena de un elemento químico, generalmente un metal, es un mineral del que se puede extraer aquel elemento porque lo contiene en cantidad suficiente para poderlo aprovechar. Así, se dice que un mineral es mena de un elemento químico, o más concretamente de un metal, cuando mediante un proceso de minería se puede extraer ese mineral de un yacimiento y luego, mediante metalurgia, obtener el metal a partir de ese mineral.

El zinc (Zn) se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza y constituye aproximadamente un 0.02 % de la corteza terrestre. Adopta la forma desulfuro (esfalerita), carbonato, óxido o silicato (calamina) de zinc, combinado con muchos minerales. La esfalerita, es la principal mena de zinc ya que contiene al menos el 90 % del zinc metálico, contiene hierro y cadmio como impurezas. Casi siempre aparece acompañado de galena, el sulfuro de plomo, y ocasionalmente se encuentra asociado con minerales que contienen cobre u otros sulfuros metálicos básicos.

Cuando se expone a la acción del aire, el zinc se recubre de una película de óxido que protege el metal de oxidaciones posteriores. En esta resistencia a la corrosión atmosférica reside uno de sus principales usos: la protección del acero mediante galvanización. La capacidad del zinc para proteger los metales ferrosos de la corrosión puede potenciarse mediante electrólisis. El zinc actúa como ánodo con el hierro y otros metales estructurales, a excepción del aluminio y el manganeso, y así, los agentes corrosivos atacan preferentemente al zinc, y se protegen los demás metales. Esta propiedad se aprovecha también en otras aplicaciones importantes, como en la utilización de planchas de zinc como ánodos para la protección catódica de los cascos de buques, tanques enterrados, etc. El zinc metálico se puede troquelar para la fabricación de piezas de automóviles, equipos eléctricos, herramientas de maquinaria ligera, equipos informáticos, juguetes y artículos ornamentales. También puede laminarse para la obtención de planchas destinadas a tejados y cubiertas, forros de pilas secas, placas de fotograbado, etc. Además, puede alearse con cobre, níquel, aluminio y magnesio. Cuando se alea con cobre, se obtiene el importante grupo de aleaciones denominadas bronce.

El óxido de zinc (ZnO), o blanco de zinc (flores de zinc), se produce por oxidación de zinc puro vaporizado o mediante la calcinación del mineral de óxido de zinc. Se utiliza como pigmento para la fabricación de pinturas, lacas y barnices. También tiene aplicación en la fabricación de cosméticos, cementos de fraguado rápido y en la industria farmacéutica. Es útil para la fabricación de vidrio, ruedas de automóviles, cerillas, pegamento blanco y tintas para imprenta y como semiconductor en la industria electrónica [59].

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.

3.1 Materiales y reactivos de flotación.

Mineral. Una piedra de Calcopirita-Galena-Esfalerita fue obtenida de una mina de la ciudad de Pachuca Hidalgo. La cual posteriormente fue procesada para únicamente obtener la Esfalerita.



Figura 3.1 Piedra de Calcopirita-Galena -Esfalerita

Colector. Como colector se utilizó Isopropil Xantato de Sodio (SIPX) en forma de pellets y de aspecto amarillezco de la marca ALKEMIN.



Figura 3.2 A) Aspecto comercial del SIPX, B) Aspecto físico del SIPX.

Activador. Para activar la superficie de la Esfalerita se utilizó Sulfato de Cobre Pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) de la marca J.T. Baker en forma de cristales azules grandes.



Figura 3.3 A) Aspecto comercial del Sulfato de Cobre, B) Aspecto físico del Sulfato de Cobre.

Modificadores de pH. Para aumentar el pH se utilizó Hidróxido de Sodio (NaOH) de la marca J.T. Baker y para disminuir el pH se utilizó Ácido Clorhídrico (HCl) de la marca Golden Bell.

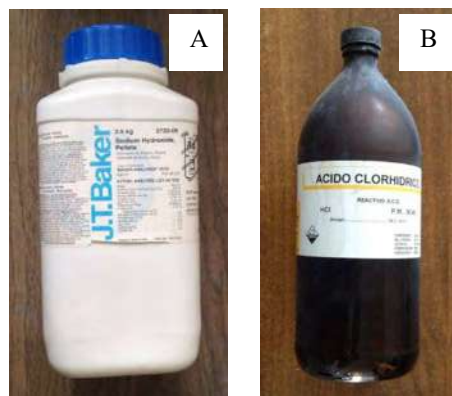


Figura 3.4 Reguladores de pH A) NaOH, B) HCl.

3.2 Tipos de agua empleados en los diferentes experimentos.

Agua destilada y agua desionizada. Se utilizó agua destilada y agua desionizada provenientes del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales (IIMM) de la UMSNH.

Agua de mar. Se utilizó agua de mar proveniente de la zona costera del estado de Guerrero, México.

Agua sintética de mar. Se produjeron 2 tipos de agua sintética de mar, el primer tipo de agua sintética de mar llamada agua tipo 1 utilizó sales de Cloruro de Sodio y Cloruro de Potasio (NaCl y KCl) en forma de cristales ambas de la marca J.T. Baker, y el segundo tipo de agua sintética de mar llamada agua tipo 2 utilizó Cloruro de Calcio Anhidro (CaCl_2) en forma de cristales de la marca REPROQUIFIN.



Figura 3.5 Sales empleadas para preparar los diferentes tipos de agua sintética de mar A) NaCl, B) KCl, C) CaCl_2 .

Agua reciclada. Se utilizó agua reciclada proveniente de un circuito de flotación Cu-Pb-Zn obtenida de una planta minera en Jalisco.

Agua sintética reciclada. El único tipo de agua sintética reciclada llamada agua tipo 3 utilizó Sulfato de Calcio Dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en forma de polvo fino de la marca QUIMICA MEYER.



Figura 3.6 Sulfato de Calcio para preparar el agua sintética reciclada.

3.3 Metodología para obtener la Esfalerita de la piedra.

Primeramente la piedra que contiene varios minerales e impurezas se redujo a fragmentos de piedra por medio de un martillo para posteriormente seleccionar y separar de manera manual mediante unas pinzas la Esfalerita de la Galena y la Calcopirita. Se tuvo mucho cuidado al momento de separar la Esfalerita de la Galena ya que son muy parecidas físicamente en forma de cristales y de color similar, la Esfalerita es de color negro y la Galena es de un color gris plomizo. Caso contrario con la Calcopirita, fue fácil de separar puesto que es de un color amarillo brillante. Después la Esfalerita se redujo a un polvo fino mediante un mortero.



Figura 3.7 A) Granos de Esfalerita B) Esfalerita en Mortero.

Enseguida el mineral molido pasó por una serie de mallas empleando un tamizador vibratorio (ver Fig. 3.8) que cuenta con diferentes tamaños de maya: $32\mu\text{m}$, $53\mu\text{m}$, $75\mu\text{m}$, $90\mu\text{m}$, $125\mu\text{m}$

y 150 μm . Se obtuvieron dos productos, el primero es un mineral de Esfalerita con un tamaño de partícula de 53 μm a 90 μm que servirá para hacer la mayoría de los experimentos y el segundo producto es un mineral de Esfalerita con un tamaño de partícula menor de 32 μm también llamado finos de esfalerita que servirá para realizar experimentos de Potencial Z.



Figura 3.8 Tamizador vibratorio.

3.4 Equipos utilizados para la caracterización de la Esfalerita.

3.4.1 Difracción de Rayos X (XRD).

Se utilizó el Difractómetro de Rayos X D8 Advanced del IIMM de la UMSNH para obtener la información de todos los minerales presentes en la muestra analizada. El tipo de muestra fue polvo de Esfalerita, el tipo de barrido se realizó por el método de Bragg Brentano con un tiempo de .3 s en 2 theta con un inicio de 10°, un final de 100° y el incremento fue de .02.



Figura 3.9 Difractómetro de Rayos X.

3.4.2 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

Se empleó un Espectrofotómetro de Infrarrojo Medio con Transformada de Fourier, marca Bruker, modelo Tensor 27 del IIMM de la UMSNH para identificar las bandas principales de energía en donde la muestra absorbe o emite energía. Para ingresar la muestra al equipo se prepara una pastilla al vacío de una mezcla de 1mg de Esfalerita con 100 mg de Bromuro de Potasio. Las condiciones de operación del equipo fueron 25.9 °C, 31% de humedad relativa, el alcance de medición es de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} , el tiempo de escaneo de muestra y de escaneo de background es de 32 scans. Cabe mencionar que este equipo también se utilizó para identificar los grupos funcionales después del proceso de microflotación.

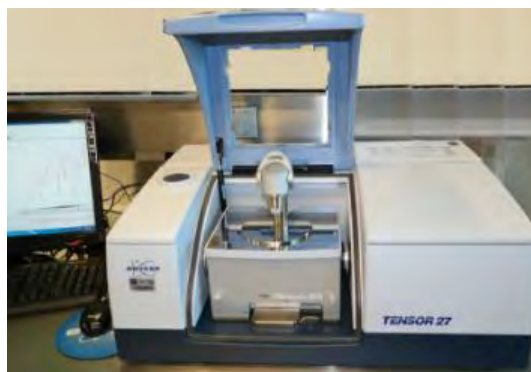


Figura 3.10 Espectrofotómetro de Infrarrojo Medio con Transformada de Fourier.

3.4.3 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB O SEM).

Por último se realizó un estudio empleando el equipo MEB (Microscopio Electrónico de Barrido) o también conocido como SEM (Scanning Electron Microscope) modelo JSM 7600F ubicado en el IIMM de la UMSNH para obtener la información de los elementos químicos e impurezas que contiene la muestra. Una muestra de polvo de Esfalerita se recubrió con un metal conductor, en este caso se utilizó el Cobre. Las condiciones de operación fueron las siguientes, un rango de corriente de sonda de 1 pA a 200 nA, el voltaje de aceleración fue de 15Kv con una ampliación hasta 1000,000X y una resolución SEI de 1 nm.



Figura 3.11 Microscopio Electrónico De Barrido (MEB).

3.5 Equipo experimental.

3.5.1 Celda Hallimond.

Para realizar las pruebas de microflotación se requirió del siguiente equipo como lo muestra la figura 3.12. Una celda Hallimond proveniente de China para realizar las microflotaciones, un mezclador magnético de la marca Thermo Scientific modelo SP131325 con un rango de 0-1200 RPM para mantener en movimiento constante la pulpa de flotación por medio de un agitador magnético pequeño, un tanque de nitrógeno de la marca INFRA para la producción de burbujas, un regulador de presión de nitrógeno marca INFRA modelo SH-1330-N para controlar la presión y evitar que se sobrepase la presión en el flujómetro y un flujómetro de la marca Supelco Rotameter modelo 23325 con un rango de 0-150 ml/min para controlar el caudal de flujo de Nitrógeno a la entrada de la celda.



Figura 3.12 Montaje experimental para realizar microflotación.

3.5.2 Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma.

Se utilizó un Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma de la marca Agilent, modelo 4100 ubicado en el laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas en la UMSNH para determinar la cantidad de Cobre adsorbida en la superficie de la Esfalerita, así como la composición química del agua de mar y el agua reciclada de una planta minera.



Figura 3.13 Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma.

3.5.3 Espectrómetro UV/VIS.

Se utilizó un espectrómetro UV/VIS de la marca Pekín Elmer, modelo Lambda 25 ubicado en el IIMM de la UMSNH para determinar la cantidad de SIPX adsorbido sobre la superficie de la Esfalerita cubierta con Cobre.



Figura 3.14 Espectrómetro UV/VIS

3.5.4 Equipo de Potencial Z.

Se realizaron mediciones de Potencial Z para determinar la distribución de la carga superficial de la Esfalerita mediante el equipo NanoBrook 90 Plus Z de la marca Brookhaven Instruments Corporation ubicado en el Posgrado de Ingeniería Química de la UMSHN.



Figura 3.15 Equipo NanoBrook 90 Plus Z

3.5.5 Equipo menor.

pHmetro. Para medir la lectura del pH de los diferentes tipos de agua se necesitó un pHmetro de la marca HORIBA, modelo LACUA act.



Figura 3.16 pHmetro Horiba

Balanza Analítica. Se utilizó una balanza analítica de la marca AND modelo HR-120 para pesar el mineral, los reactivos y el papel filtro.



Figura 3.17 Balanza analítica AND

Bomba de Vacío. Para agilizar el proceso de filtración se utilizó una bomba de vacío de la marca SIEMENS modelo G13.



Figura 3.18 Bomba de vacío SIEMENS

Horno. Para el secado del papel filtro posterior al proceso de filtración se utilizó un horno de la marca Felisa.



Figura 3.19 Horno Felisa

3.6 Técnica de microflotación.

Para realizar la microflotación introducimos 1.5 g de Esfalerita (con diámetro de partícula de $53\mu\text{m}$ a $90\mu\text{m}$) en la celda, seguido por 40 ml del agua a estudiar y agitamos por 1 min (tiempo de acondicionamiento del mineral en el agua destilada) ó 30 min (tiempo de acondicionamiento del mineral en el agua de mar, agua sintética de mar, agua reciclada o agua sintética reciclada). Para aumentar el pH del agua se agregaron unas gotas de Hidróxido de Sodio (NaOH) y para disminuirlo se agregó Ácido Clorhídrico (HCl). Posteriormente se agregaron 10 ml de Sulfato de Cobre Pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) con una concentración de $1 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$ y se agitó por un periodo de acondicionamiento de 5 min, después se introdujeron 10 ml de SIPX con una concentración de $5.443 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ y se agitó por 1 min. Por último se agregaron 50 ml del agua que se está estudiando y se agitó por 20 s para obtener una solución total de 110 ml. Se utilizó un agitador magnético de 1 cm de largo y la velocidad del mezclador fue de 1200 RPM. Para producir las burbujas se manejó un caudal de 30 ml/min de Nitrógeno. Las muestras de concentrado se obtuvieron cada minuto hasta llegar a 5 min, el pH se modificó de 5 hasta 12 para agua destilada. El pHmetro registro una lectura de 7.5 en el caso de agua de mar el cual no se modificó. Para el agua sintética de mar el pH se modificó hasta 7 y las concentraciones de sales que se utilizaron se muestran en las tablas 3.1 y 3.2. En el caso del agua reciclada de una planta minera el pH se modificó a los valores 5, 7, 8 y 12 siendo el valor de 8 el pH original del agua reciclada. Y por último, en el caso del agua sintética reciclada el pH se modificó hasta 7 y su concentración de Sulfato de Calcio se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.1 Concentraciones de Cloruro de Sodio y Cloruro de Potasio para preparar agua sintética de mar (Agua tipo 1).

CONCENTRACIÓN (mol/l)		
AGUA SINTÉTICA DE MAR	NaCl	KCl
AGUA TIPO 1-1	25×10^{-2}	1×10^{-2}
AGUA TIPO 1-2	50×10^{-2}	1×10^{-2}
AGUA TIPO 1-3	75×10^{-2}	1×10^{-2}

Tabla 3.2 Concentraciones de Cloruro de Calcio para preparar agua sintética de mar (Agua tipo 2).

CONCENTRACIÓN (mol/l)	
AGUA SINTÉTICA DE MAR	CaCl_2
AGUA TIPO 2-1	1×10^{-2}
AGUA TIPO 2-2	2×10^{-2}
AGUA TIPO 2-3	4×10^{-2}

Tabla 3.3 Concentraciones de Sulfato de Calcio para preparar agua sintética reciclada (Agua tipo 3).

CONCENTRACIÓN (mol/l)	
AGUA SINTÉTICA RECICLADA	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
AGUA TIPO 3-1	1.5×10^{-2}
AGUA TIPO 3-2	3×10^{-2}
AGUA TIPO 3-3	6×10^{-2}

La siguiente figura muestra un esquema general de la celda Hallimond, el cual es similar en todas las microflotaciones que se realizaron ya que únicamente cambia el tipo de agua y el tiempo de acondicionamiento del mineral en el agua.

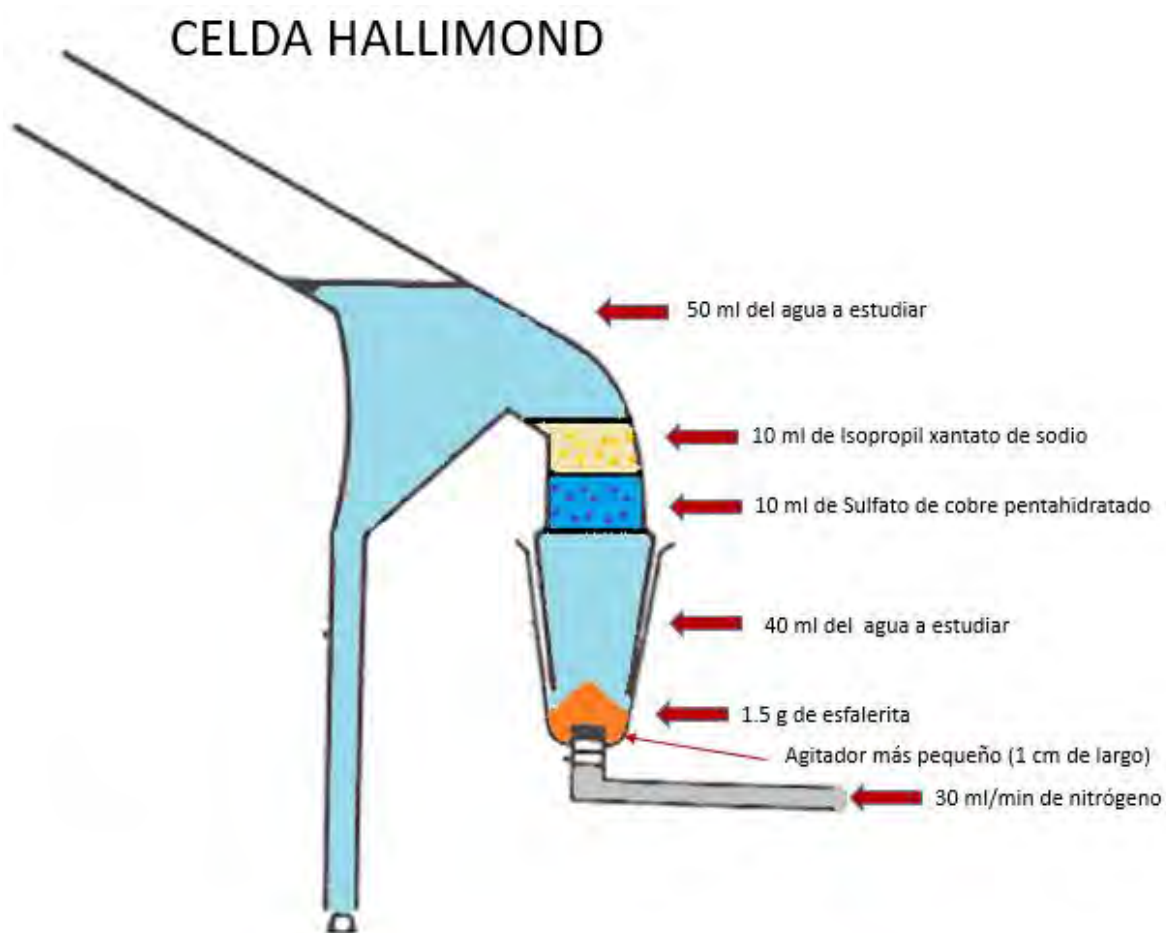


Figura 3.20 Esquema General de la Celda Hallimond para microflotación.

Continuando con el proceso, una vez que se obtuvo el concentrado de cada lapso de tiempo se necesita saber cuál es su peso, puesto que ese dato se requiere para calcular la recuperación y se lleva a cabo el siguiente procedimiento:

1. Se pesa en la balanza un papel filtro de poro fino en forma de círculo y se anota su peso en la bitácora.
2. Se filtra el concentrado obtenido de la microflotación en el papel filtro ya pesado anteriormente con ayuda de una bomba de vacío.
3. El papel filtro con partículas retenidas en él está húmedo y se necesita secar para ser pesado, por lo que se mete en el Horno y se deja secando durante 1 día a una temperatura de 25°C , (ver Fig. 3.22).
4. Después de que el papel filtro con mineral está totalmente seco se saca del horno, se pesa y se anota el peso en la bitácora.
5. Se realiza una diferencia entre el valor del peso del papel filtro que se pesó al comienzo del proceso y el valor del peso del papel filtro con partículas de mineral, el resultado será únicamente el peso real del concentrado.

Para obtener el peso de las colas se hace lo mismo que se realizó anteriormente con el peso del concentrado, sólo que ahora se realizará con los residuos que quedaron en el interior de la celda Hallimond.

La siguiente figura muestra un esquema donde se encuentran el mineral flotado, concentrado y colas en la celda Hallimond.

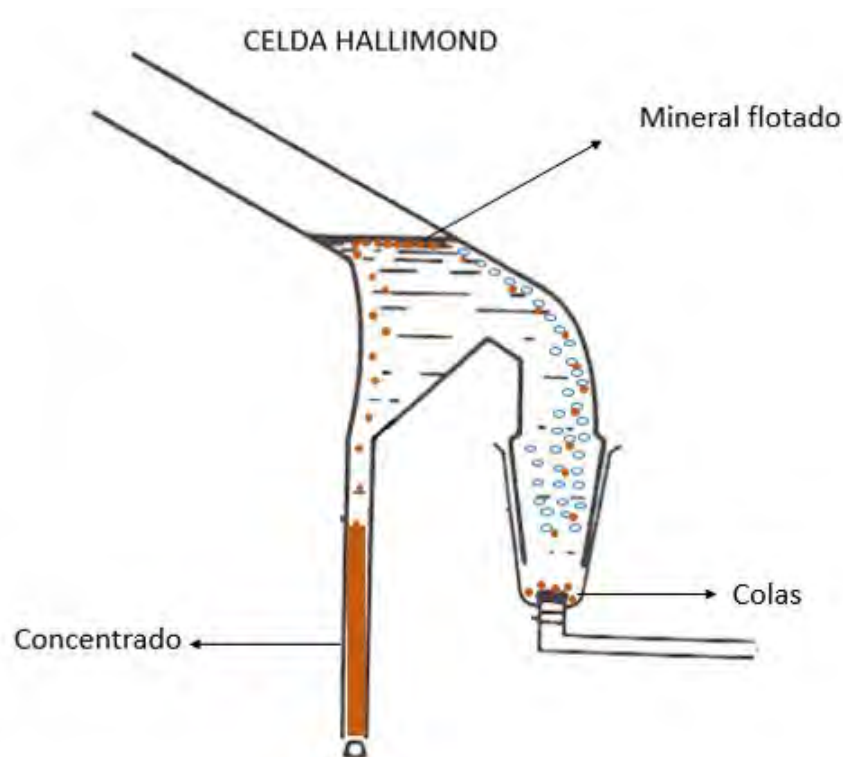


Figura 3.21 Esquema de mineral flotado, concentrado y colas dentro de la celda Hallimond.

Posteriormente se calcula el porcentaje de recuperación de cada muestra obtenida a diferentes lapsos de tiempo, esto quiere decir que se saca la recuperación de un concentrado de 1 min hasta 5 min. Finalmente se suman todas las recuperaciones para obtener una recuperación final a los 5 min. Para obtener la recuperación se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{\text{Peso de concentrado de mineral}}{\text{Peso de la colas} + \text{Peso total de concentrado de mineral}} * 100\% \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde el peso de concentrado de mineral es la cantidad de partículas de mineral flotado en un lapso de tiempo, las colas se refieren a las partículas del mineral que no flotan en todo el transcurso del proceso de la microflotación, estas se quedan en el fondo de la celda y el peso total de concentrado de mineral es la sumatoria de los pesos de concentrado de mineral en sus respectivos tiempos de flotación.

Después de haber calculado la recuperación, como dato adicional se calcula el porcentaje de mineral que no floto, esto se refiere al porcentaje de colas y se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Colas} = 100\% - \% \text{ Recuperación} \quad \text{Ec. 3.2}$$

3.7 Espectroscopía Infrarroja posterior al proceso de microflotación de Esfalerita.

Para identificar las bandas principales de los grupos funcionales formados después del proceso de microflotación de la Esfalerita se empleó el Espectrofotómetro de Infrarrojo Medio con Transformada de Fourier ya mencionado anteriormente. Se realizaron 22 pastillas correspondientes a las diferentes microflotaciones de la Esfalerita. Las condiciones de operación y la forma de preparar la muestra para ingresar al equipo se realizan de la misma manera que como se hizo anteriormente en el proceso de caracterización de la muestra.



Figura 3.22 Muestras de Esfalerita posteriores al proceso de microflotación.

3.8 Espectroscopía de Emisión Atómica por Plasma.

Para obtener el estudio de la composición química del agua de mar y reciclada así como las proporciones en partes por millón (ppm) de dichos elementos se utilizó el Espectrómetro de Emisión Atómica por plasma. Se realizaron diluciones de 1/100, 1/1000 y 1/10000 de agua de mar y agua reciclada de planta minera, así como los patrones de 10 ppm de los cationes que podrían estar presentes en dichas aguas, estos patrones fueron: Na, K, Ca, Mg, Pb, Zn y Cu.

Para calcular la densidad de adsorción del Cobre sobre la superficie de Esfalerita, la muestra se preparó de la siguiente manera; en un vaso de precipitado se introdujeron 45 ml de algún tipo de agua a estudiar (destilada a diferentes pH, sintética de mar, sintética reciclada, de mar y reciclada a diferentes pH), posteriormente se agregaron 0.45g de Esfalerita (con diámetro de partícula de 53µm a 90µm) y se agitó por 1 min (tiempo de acondicionamiento del mineral en el agua destilada) ó 30 min (tiempo de acondicionamiento del mineral en el agua de mar, agua sintética de mar, agua reciclada o agua sintética reciclada). Enseguida se introdujeron 5ml de Sulfato de Cobre Pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) con una concentración de 1×10^{-3} mol/l y se mezcló por 5 min. Se utilizó un agitador de 1.5 cm de largo y la velocidad del mezclador fue de 1000 RPM. Después se realizó una filtración para separar el agua del mineral. El agua filtrada contiene iones de Cobre que no fueron adsorbidos por la Esfalerita, por lo que se convierten en las nuevas muestras de análisis para ingresar al Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma. Este experimento se realizó para agua destilada (pH de 5 a 12), agua sintética de mar, agua sintética reciclada (únicamente concentraciones más altas, por lo que sólo se trabajó con agua tipo 1-3, tipo 2-3 y tipo 3-3), agua de mar y agua reciclada de planta minera (pH 5, 7, 8 y 12).

Posteriormente se calcula la densidad de adsorción mediante la siguiente fórmula [57]:

$$Q = \frac{(C_0 - C_f) * (vol\ total.)}{gramos\ de\ mineral} \quad Ec. 3.3$$

Donde:

Q= densidad de Adsorción

C_0 = concentración de cobre inicial

C_f = concentración de Cobre no adsorbida en la Esfalerita o concentración de Cobre en muestra.

Vol. Total= 45 ml de diferente tipo de agua + 5 ml de ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) = 50ml

Gramos de mineral = 0.45 gramos de Esfalerita.

3.9 Espectroscopía UV/VIS.

Para calcular la densidad de adsorción del SIPX sobre la nueva superficie de Esfalerita cubierta con Cobre se realizó el mismo procedimiento que se utilizó para obtener la adsorción del Cobre, sólo que después de que se agregó el Sulfato de Cobre Pentahidratado se agregaron 5 ml de SIPX con una concentración de 5.443×10^{-4} mol/l y también se mezcló por 5 min. Después se realizó una filtración para separar el agua del mineral. El agua filtrada contiene una cantidad de Xantato que no fue adsorbida por la superficie de Esfalerita cubierta con Cobre, por lo que se convierten en las nuevas muestras de análisis para ingresar al espectrómetro UV/VIS.

Pero antes de ingresar las muestras mencionadas anteriormente, se realizó la curva de calibración en el espectrómetro UV/VIS con patrones de 1, 2, 5, 10, 15 y 20 ppm de SIPX y se metió una muestra de agua destilada a pH 7 para corroborar si entraba dentro de la curva de calibración.

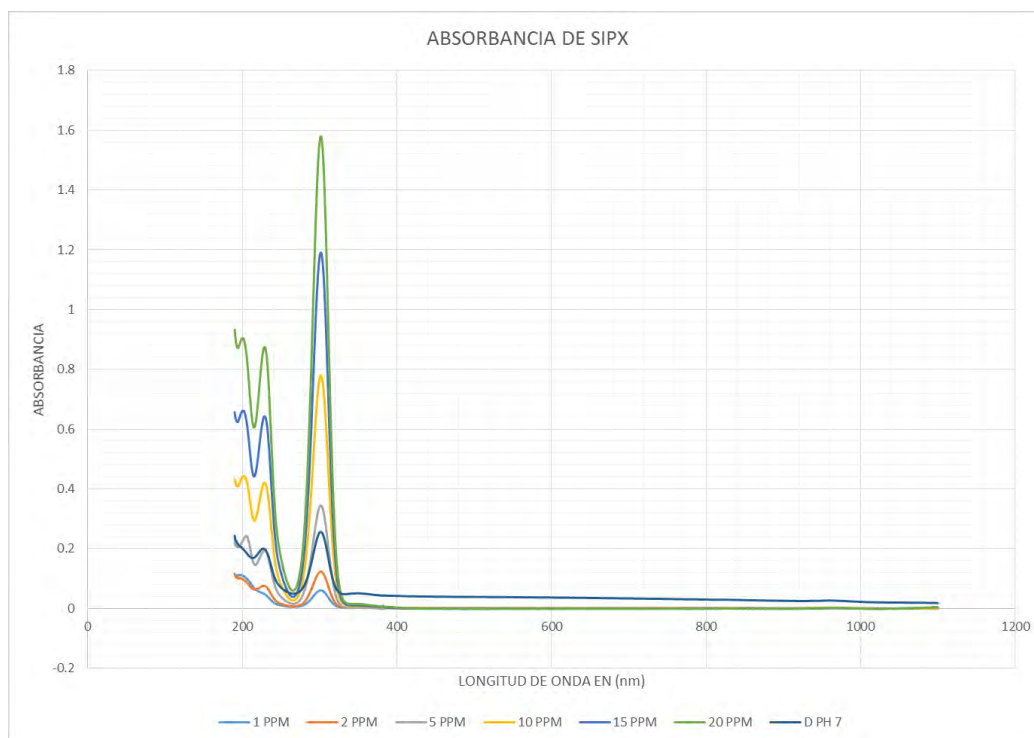


Figura 3.23. Patrones de absorción para diferentes concentraciones de SIPX

Después se concluyó que los picos más altos se encuentran en una longitud de onda de 301 nm, lo cual se corroboró con la literatura y se prosiguió con la construcción de la siguiente gráfica, la cual se construye con los patrones utilizados y el valor máximo de absorbancia en la longitud de onda de 301 nm.

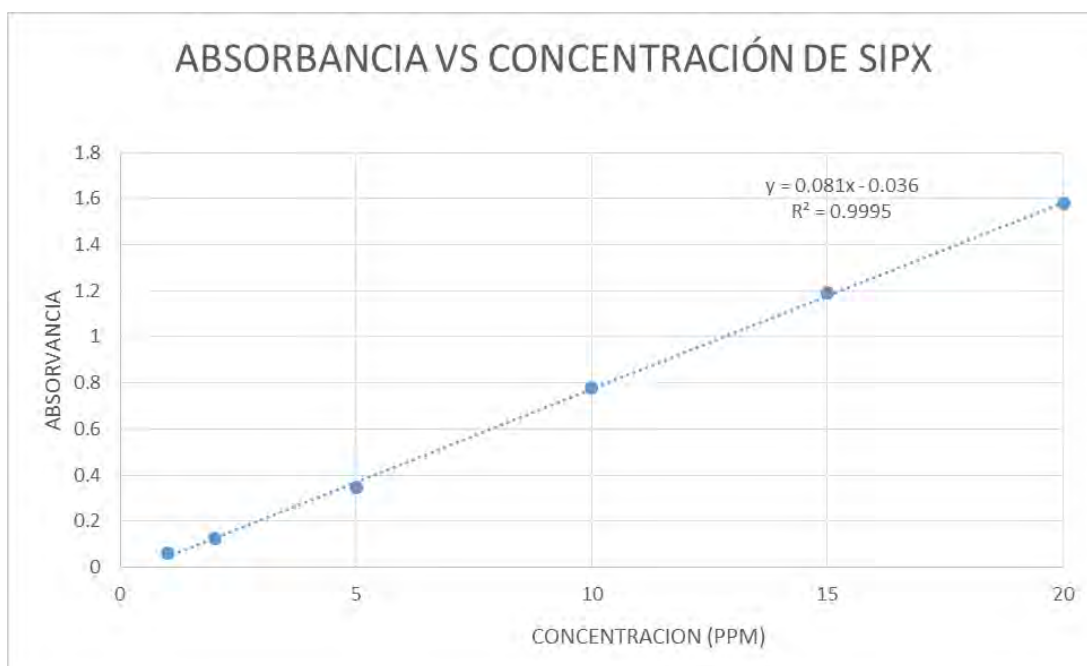


Figura 3.24 Valores máximos de absorbancia para diferentes concentraciones de SIPX

La figura 3.24 proporciona la fórmula de la pendiente, por lo que es necesario despejar la X, ya que el equipo nos da la absorbancia y con la X despejada se podrá obtener la concentración de Xantato que no se adsorbió en el mineral. La X despejada queda de la siguiente forma:

$$X = \frac{Y + 0.036}{0.081} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Los valores de Y son la absorbancia del Xantato que está presente en el agua obtenida de la filtración de la muestra y que no fue adsorbido en la superficie del mineral.

Posteriormente se ingresan las muestras al espectrómetro UV/VIS para determinar la cantidad de Xantato en el agua de la muestra y posteriormente calcular la densidad de adsorción con la misma fórmula que se utilizó para determinar la densidad de adsorción del Cobre, únicamente cambia el volumen total de la siguiente manera:

Vol. Total= 45 ml de diferente tipo de agua + 5 ml de $(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ + 5 ml de Xantato = 55ml.

3.10 Potencial Z.

Se realizaron mediciones de Potencial Z para determinar la distribución de la carga superficial de la Esfalerita en los diferentes tipos de agua mediante el equipo NanoBrook 90 Plus Z. Las muestras se prepararon de la siguiente manera: en un vaso de precipitado se introdujeron primeramente 45 ml de agua a estudiar (agua desionizada a pH de 2 hasta 12, agua destilada a pH de 3 hasta 12, agua de mar a pH de 7.5, agua sintética de mar a las concentraciones más altas de sales con un pH de 7, agua reciclada a pH de 5, 7, 8 y 12 o agua sintética reciclada a la concentración más alta con un pH de 7), con 0.45g de Esfalerita (con diámetro de partícula menor a 32 μm) y se mezclaron durante 1 min (tiempo de acondicionamiento del mineral en el agua desionizada o agua destilada) ó 30 min (tiempo de acondicionamiento del mineral en el agua de mar, agua sintética de mar, agua reciclada o agua sintética reciclada). Se utilizó un agitador de 1.5 cm de largo y la velocidad del mezclador fue de 1000 RPM. Posteriormente se introducen las muestras al equipo mediante una celda rectangular de plástico.

Se desea determinar la distribución de la carga superficial de la Esfalerita con Cobre, así también la carga superficial de la Esfalerita con Cobre y Xantato. Para el caso de Esfalerita con Cobre se realizó el mismo procedimiento anterior sólo que ahora se agregaron 5ml de Sulfato de Cobre Pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) con una concentración de 1×10^{-3} mol/l y se mezcló por 5 min. Y para el caso de Esfalerita con cobre y Xantato, posteriormente de haber agregado el Sulfato de Cobre, se agregaron 5 ml de SIPX a una concentración de 5.443×10^{-4} mol/l y también se mezcló por 5 min.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 Resultados de la caracterización de la muestra.

4.1.1 Difracción de Rayos X (XRD).

Los resultados obtenidos a través de la Difracción de Rayos X muestran que los principales picos corresponden a los de Esfalerita como se muestra en la gráfica 4.1. En la gráfica se aprecia como las líneas de color rojo correspondientes al patrón de difracción de Esfalerita coinciden con los picos principales de la muestra.

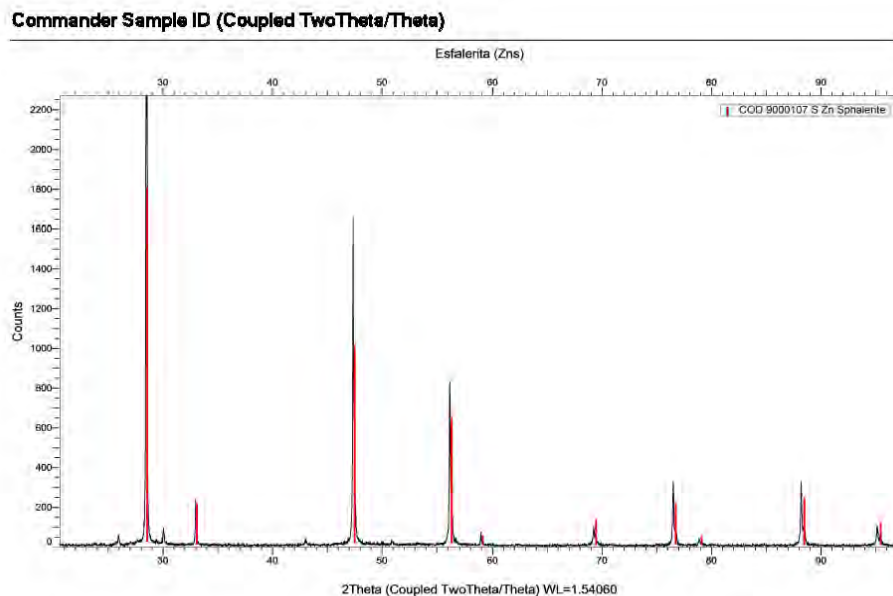


Figura 4.1 Difracción de Rayos X de Esfalerita.

4.1.2 Espectroscopía Infrarroja Media por Transformada de Fourier (FTIR).

Con el estudio de FTIR se observó que las bandas principales obtenidas en la muestra corresponden a la Esfalerita. La literatura nos indica que las bandas principales de la esfalerita son las siguientes: 708, 608, 539, 496, 469, 422 cm^{-1} y las que se obtuvieron en el estudio fueron: 757.72, 700.64 y 437.53 cm^{-1} (ver figura 4.2).

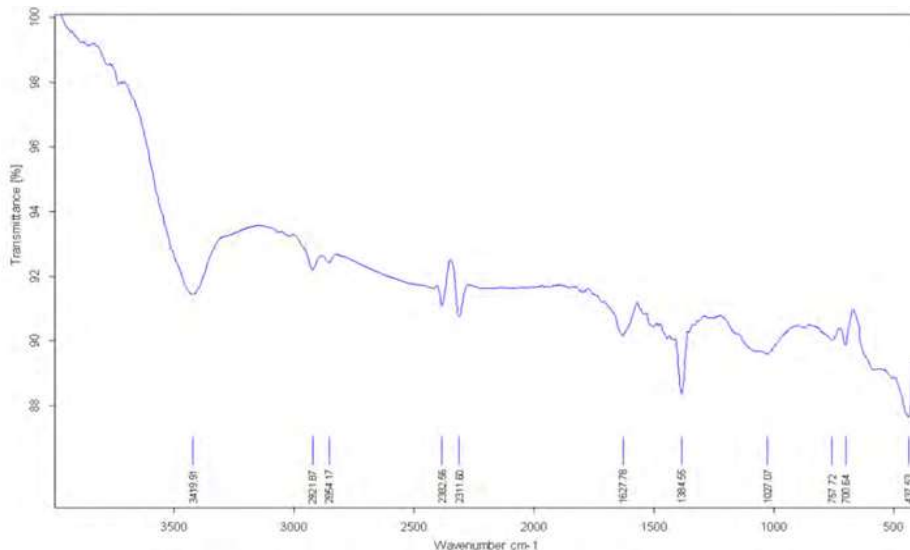


Figura 4.2 Espectroscopía Infrarroja de Esfalerita.

4.1.3 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

En el estudio de MEB primeramente se obtuvieron algunas imágenes a diferentes aumentos. En la Figura 4.3A a 100X se observa la forma física que tienen los granos de esfalerita y en la Figura 4.3B a 250X se observan partículas más finas encima de la superficie de la Esfalerita.

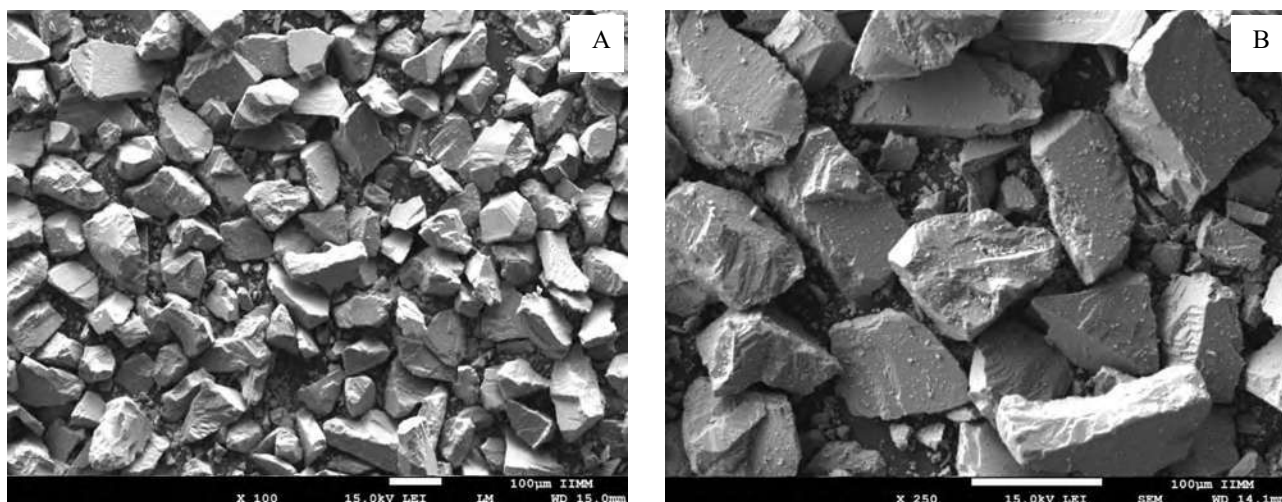


Figura 4.3 A) MEB de Esfalerita a 100X, B) MEB de Esfalerita a 250X

Posteriormente se seleccionó un grano de Esfalerita para realizar el análisis químico, en la figura 4.4 se observa el grano seleccionado. La figura 4.5 muestra el análisis químico del grano seleccionado, la información de la gráfica nos arroja que los picos principales son de Zn y S que corresponden a la Esfalerita y el Cu detectado corresponde al recubrimiento de Cobre que se le dió a la muestra para su análisis en MEB.

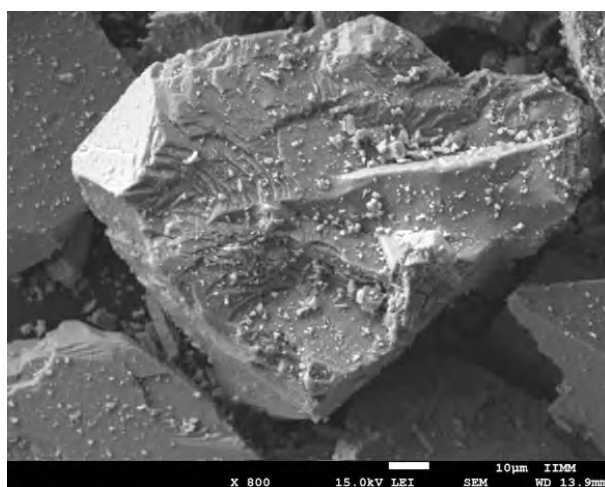


Figura 4.4 Muestra de grano de Esfalerita a 800X para Análisis Químico.

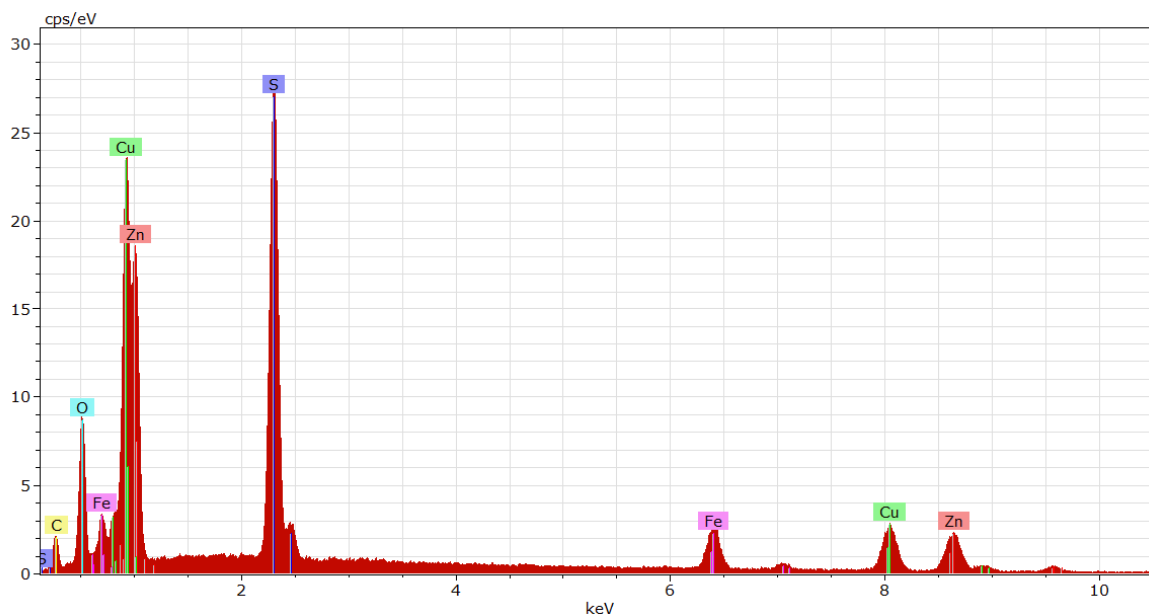


Figura 4.5. Elementos químicos presentes en la muestra seleccionada de Esfalerita

Para comprobar si las partículas finas por encima de la superficie de la Esfalerita son impurezas u otro tipo de minerales, se seleccionaron 2 partículas finas al azar para comprobar su naturaleza. En la figura 4.6 se indican con 1 y 2 las dos partículas finas seleccionadas al azar con un aumento de 2500X.

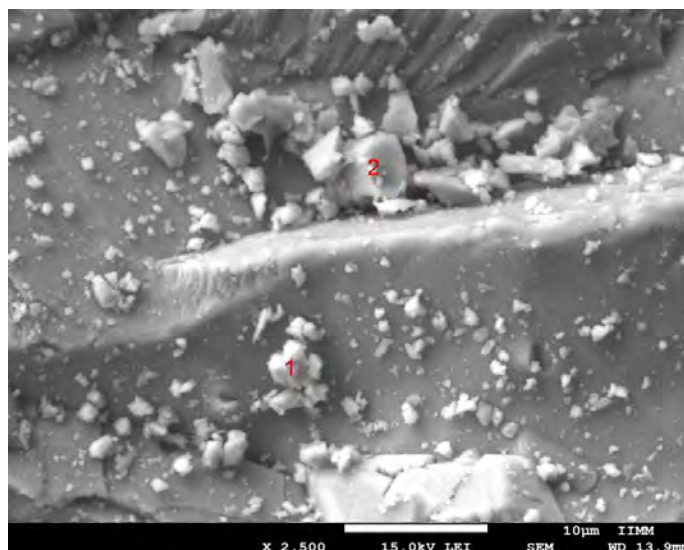


Figura 4.6 Partículas finas 1 y 2 encima de un grano de Esfalerita a 2500X.

A partir de las dos partículas finas se realizó el análisis químico de cada una de ellas y en las figura 4.7A y 4.7B se muestra que las partículas finas que se encuentran encima de los granos de Esfalerita están compuestas principalmente de Esfalerita y mínimas impurezas de Fierro y Carbón. Por lo tanto se concluye que la Esfalerita utilizada presenta un alto grado de pureza.

Las figuras 4.7A y 4.7B corresponden a las partículas seleccionadas al azar 1 y 2 respectivamente, se observa que los picos más altos son de Zn y S componentes de la Esfalerita, el Cu presente es del recubrimiento del proceso como se mencionó anteriormente.

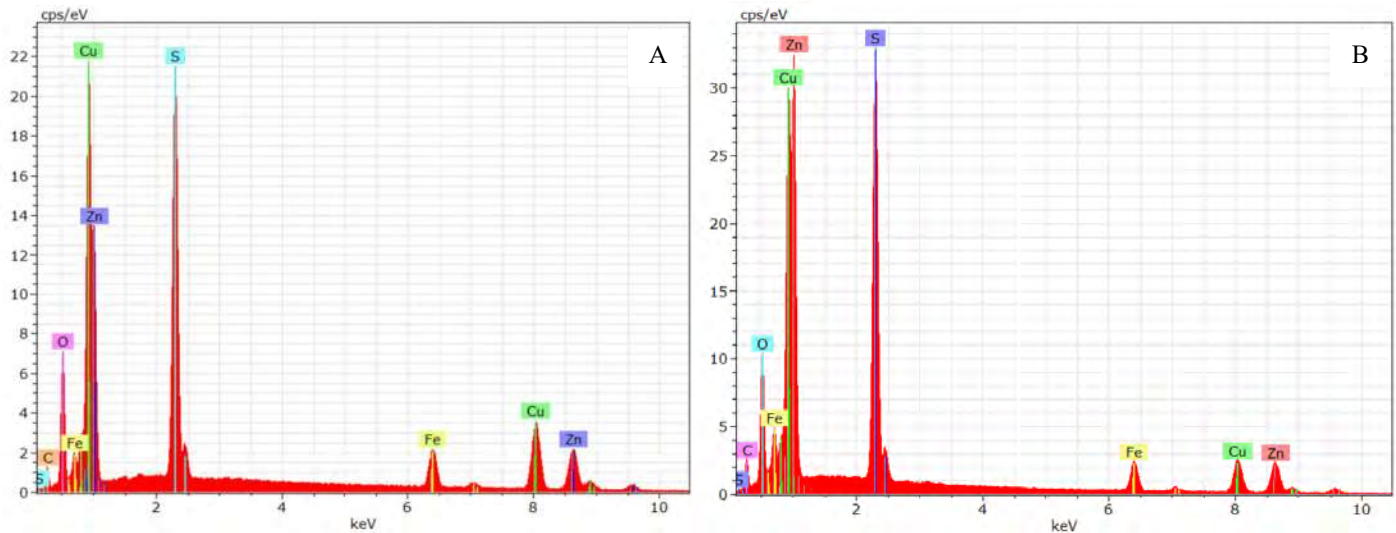


Figura 4.7 A) Elementos Químicos Presentes de la partícula 1, B) Elementos Químicos Presentes de la partícula 2

Se conoce como heterocoagulación a la adición de partículas finas sobre la superficie de los minerales. Este fenómeno pudiera ocasionar efectos negativos como la depresión de minerales valiosos. En este caso no habrá heterocoagulación en el proceso de microflotación ya que todas las partículas son de alta pureza y provienen de un solo tipo de mineral, en este caso de Esfalerita.

4.2 Resultados de la microflotación de Esfalerita.

4.2.1 Microflotación en celda Hallimond con agua destilada.

A continuación se muestran en la tabla 4.1 y figura 4.8 los resultados obtenidos en la microflotación de Esfalerita en agua destilada, la información corresponde a porcentajes de recuperación calculado de 1 minuto hasta 5 minutos a los diferentes pH. Se observa al final de los 5 minutos que hay que hay mayor recuperación de Esfalerita a un pH de 5, 6 y 7, siendo a un pH de 7 donde se obtiene el porcentaje máximo de recuperación de 95%. Después del pH de 7 la recuperación baja. El mínimo porcentaje de recuperación se obtuvo aun pH 12 con 84%.

Tabla 4.1. Recuperación de Esfalerita a diferentes pH en agua destilada

RECUPERACIÓN DE ESFALERITA EN AGUA DESTILADA (%)								
TIEMPO (MIN)	pH=5	pH=6	pH=7	pH=8	pH=9	pH=10	pH=11	pH=12
1	40.58	53.74	56.5	39.57	42.36	33.16	33.325	35.12
2	64.75	72.71	77.45	63.83	65.25	48.02	54.17	56.11
3	79.46	83.24	87.69	78.14	78.4	65.85	69.31	69.8
4	85.13	89.37	92.2	84.82	86.19	76.69	78.59	80.49
5	91.15	92.59	95.06	89.36	90.5	87.46	85.96	84.3
COLAS	8.85	7.41	4.94	10.64	9.5	12.54	14.04	15.7

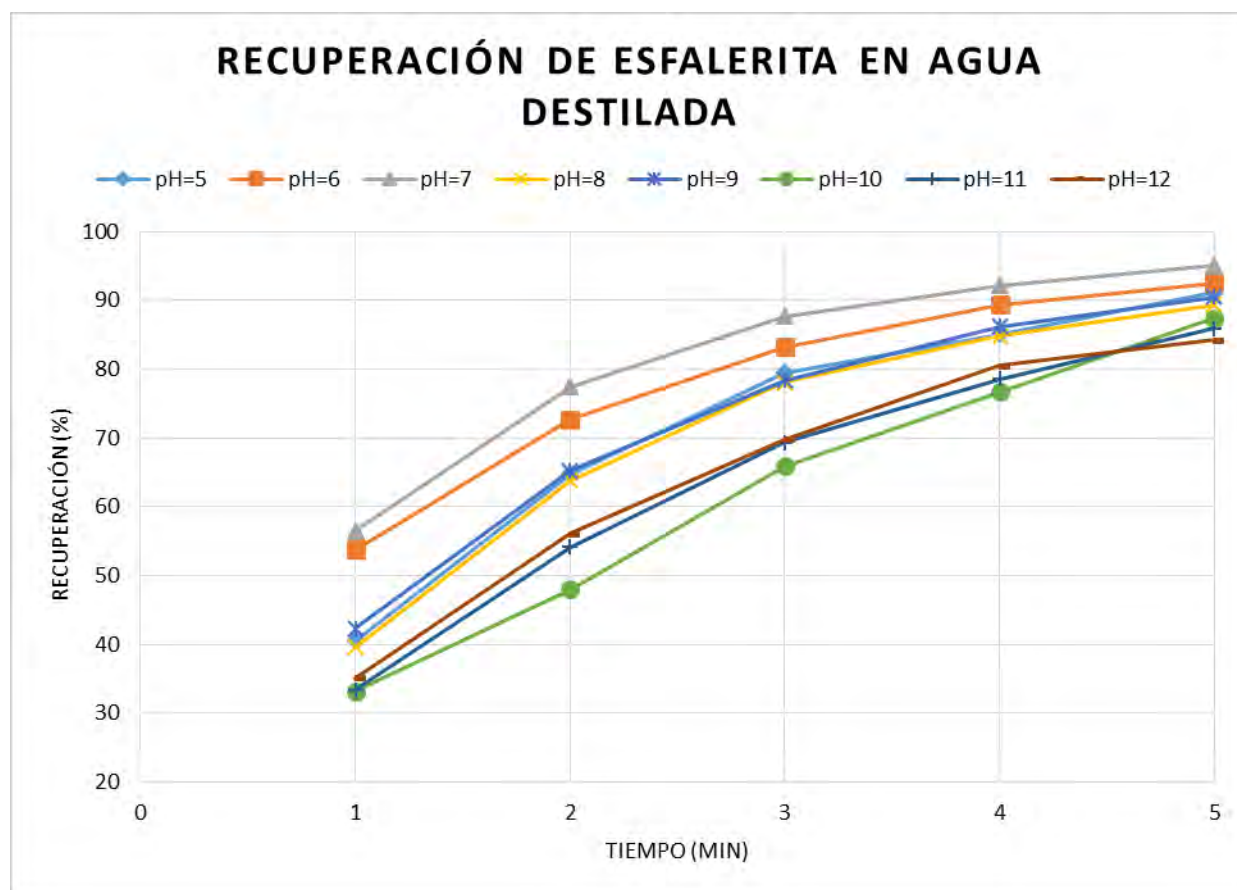


Figura 4.8. Recuperación de Esfalerita vs tiempo a diferentes pH en agua destilada.

Para que exista una buena recuperación de la Esfalerita debe de haber primeramente una buena adsorción de iones de Cobre sobre la Esfalerita para posteriormente tener una buena adsorción de Xantato. La buena adsorción de Xantato provocará que el mineral sea muy hidrofóbico y flote bien. Las especies formadas al adicionar el activador nos darán información útil para saber por qué hay una buena o mala adsorción del colector.

El siguiente diagrama de distribución de especies (ver Fig. 4.9) muestra las especies de Sulfato de Cobre que se forman al variar el pH y que podrían activar la Esfalerita. De pH ácidos a pH neutro la especie que predomina es el Cu^{2+} . De pH neutro a pH alcalinos la especie que predomina es el Hidróxido de cobre ($\text{Cu}(\text{OH})_2$). La primera especie formada mejora la velocidad de activación de la Esfalerita, mientras que la segunda especie formada reduce la velocidad de activación de Esfalerita. Esto se puede apreciar en los resultados de la microflotación obtenidos durante el primer minuto.

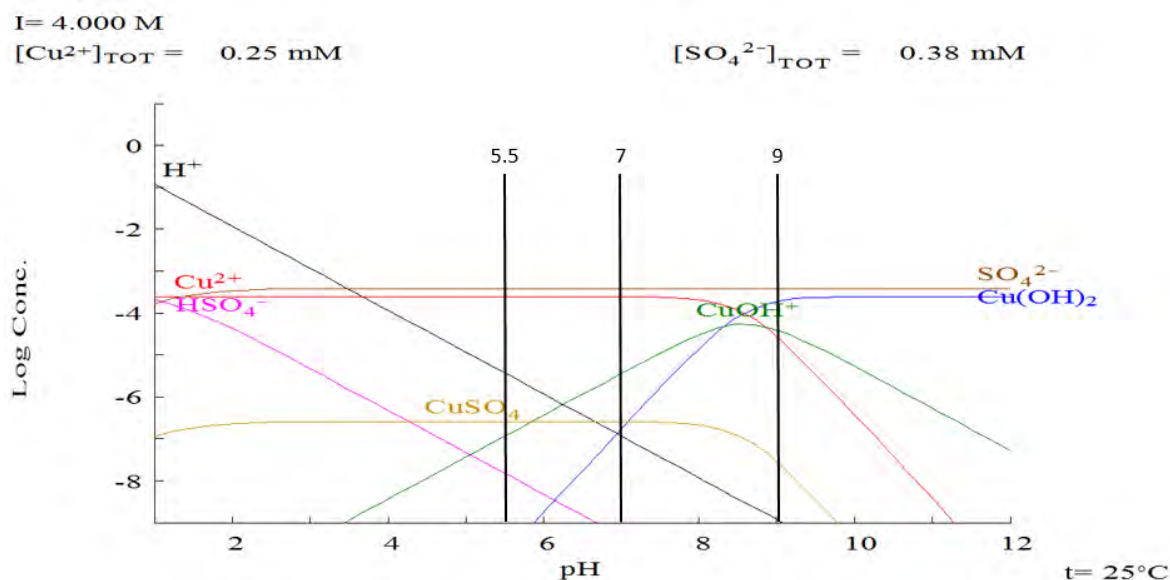


Figura 4.9 Diagrama de distribución de especies del Sulfato de Cobre (CuSO_4) mediante el programa de MEDUSA.

El siguiente diagrama de distribución de especies de la activación de la Esfalerita mediante el Cobre II (ver Fig. 4.10) lo publicó Dávila en el 2012. El diagrama muestra las especies formadas a los diferentes pH. Se observa que a pH de 5 a 7 la adsorción de $\text{Cu}(\text{II})$ en la Esfalerita provoca una reacción de óxido-reducción en la que el $\text{Cu}(\text{II})$ se reduce a $\text{Cu}(\text{I})$, dando como productos finales a la Covelita (CuS), la Calcocita (Cu_2S) y Azufre elemental, de naturaleza hidrofóbica. Estas especies mencionadas promueven una mejor adsorción del Xantato a la superficie de la Esfalerita. Por otra parte en pH alcalinos hay menos especies formadas de $\text{Cu}(\text{II})$ y predomina el ion hidroxilo (OH^-). También hay un intercambio iónico entre el Cu^{+2} y el Zn^{+2} resultando Hidróxido de Zinc ($\text{Zn}(\text{OH})_2$), lo que finalmente también se refleja en un incremento de sitios hidrofílicos, una disminución de la interacción entre el Cobre y el Xantato, y por lo tanto menor recuperación del mineral. Esto se aprecia en los resultados de microflotación de pH mayores a 9.

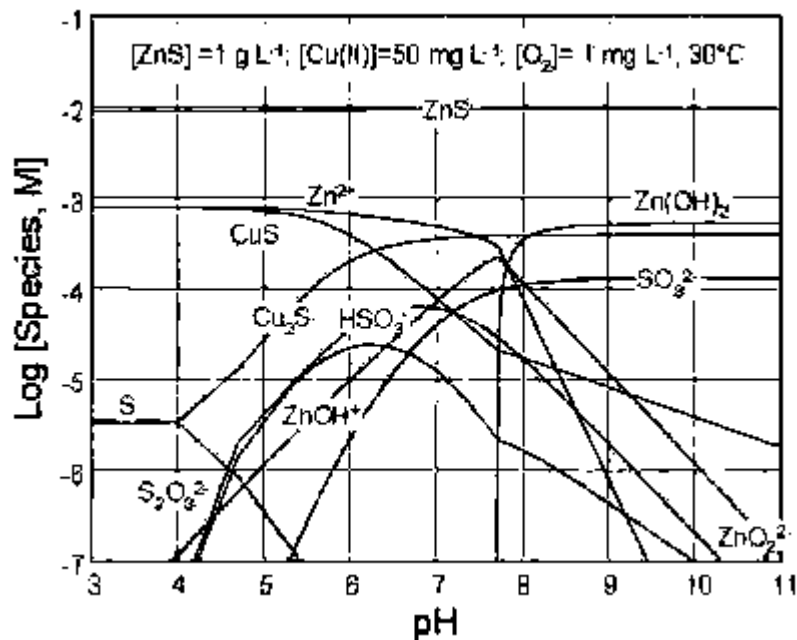


Figura 4.10 Diagrama de distribución de especies de la activación de ZnS con Cu (II) mediante el programa de HSC Chemistry.

4.2.2 Microflotación en celda Hallimond con agua de mar.

La tabla 4.2 y figura 4.11 muestran los resultados obtenidos en la microflotación de Esfalerita en agua autentica de mar, la información corresponde a porcentajes de recuperación de 1 minuto hasta 5 minutos a un pH original de 7.5. Se observa que el rendimiento de flotación aumenta con respecto al del agua destilada a un pH de 7.

Tabla 4.2 Recuperación de Esfalerita a pH 7.5 en agua de mar.

RECUPERACIÓN (%) DE ESFALERITA EN AGUA DE MAR	
TIEMPO (MIN)	PH=7.5
1	62.42
2	79.98
3	88.88
4	93.61
5	96.52
COLAS	3.48

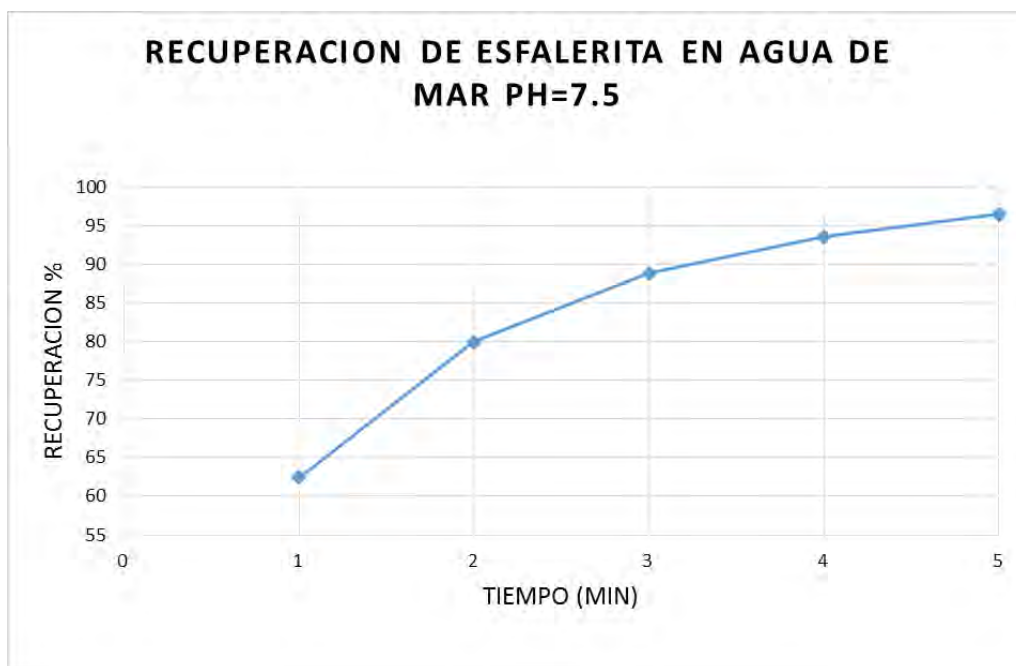


Figura 4.11 Recuperación de Esfalerita vs tiempo a pH original de 7.5 en agua de mar mediante microflotación.

4.2.3 Microflotación en celda Hallimond con agua sintética de mar.

4.2.3.1 Microflotación en celda Hallimond con agua sintética de mar Tipo 1 (NaCl, KCl).

A continuación se muestran en la tabla 4.3 y figura 4.12 los resultados obtenidos en la microflotación de Esfalerita en agua tipo 1, la información corresponde a porcentajes de recuperación de 1 minuto hasta 5 minutos a un pH neutro. Se observa que el rendimiento de flotación aumento con respecto al del agua destilada a un pH de 7 y un poco por encima del agua de mar, pero la recuperación entre agua tipo 1-1, agua tipo 1-2 y agua tipo 1-3 es similar, por lo que las variaciones en concentración de NaCl y KCl no tuvo diferencias significativas en cuanto al % de recuperación de Esfalerita.

Tabla 4.3 Recuperación de Esfalerita a pH neutro en agua tipo 1.

RECUPERACIÓN (%) DE ESFALERITA EN AGUA SINTÉTICA DE MAR TIPO 1			
TIEMPO(MIN)	AGUA TIPO 1-1	AGUA TIPO 1-2	AGUA TIPO1-3
1	61.83	65.57	63.85
2	82.6	83.47	83.27
3	90.86	90.97	90.87
4	95.19	94.67	94.8
5	97.74	97.15	97.35
COLAS	2.26	2.85	2.7

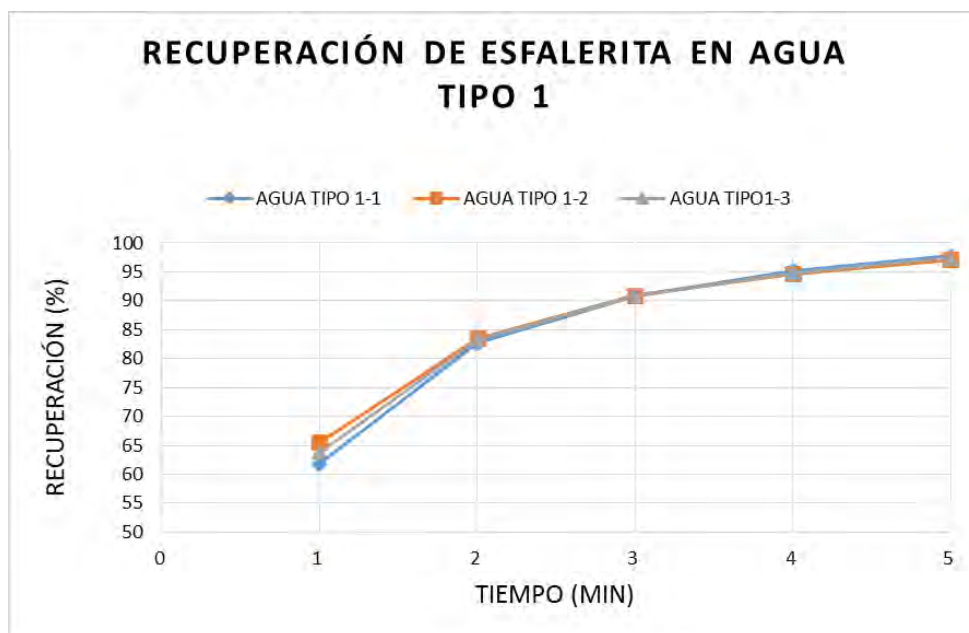


Figura 4.12 Recuperación de Esfalerita vs tiempo a pH neutro en agua sintética de mar tipo 1 empleando microflotación.

4.2.3.2 Microflotación en celda Hallimond con agua sintética de mar Tipo 2 (CaCl_2).

Se muestran en la tabla 4.4 y figura 4.13 los resultados obtenidos en la microflotación de Esfalerita en agua tipo 2, la información corresponde a porcentajes de recuperación de 1 minuto hasta 5 minutos a un pH neutro. Se observa que el rendimiento de flotación es menor con respecto al del agua destilada a un pH de 7, al agua de mar y al agua tipo 1, pero la recuperación entre agua tipo 2-1, agua tipo 2-2 y agua tipo 2-3 aumenta muy poco cuando se aumenta la concentración de CaCl_2 .

Tabla 4.4. Recuperación de Esfalerita a pH neutro en agua tipo 2.

RECUPERACIÓN (%) DE ESFALERITA EN AGUA SINTÉTICA DE MAR TIPO 2			
TIEMPO (MIN)	AGUA TIPO 2-1	AGUA TIPO 2-2	AGUA TIPO 2-3
1	49.29	49.49	53.08
2	67.25	67.39	72.27
3	77.15	78.79	81.62
4	84.6	86.89	87.96
5	90.36	91.96	92.5
COLAS	9.64	8.04	7.5

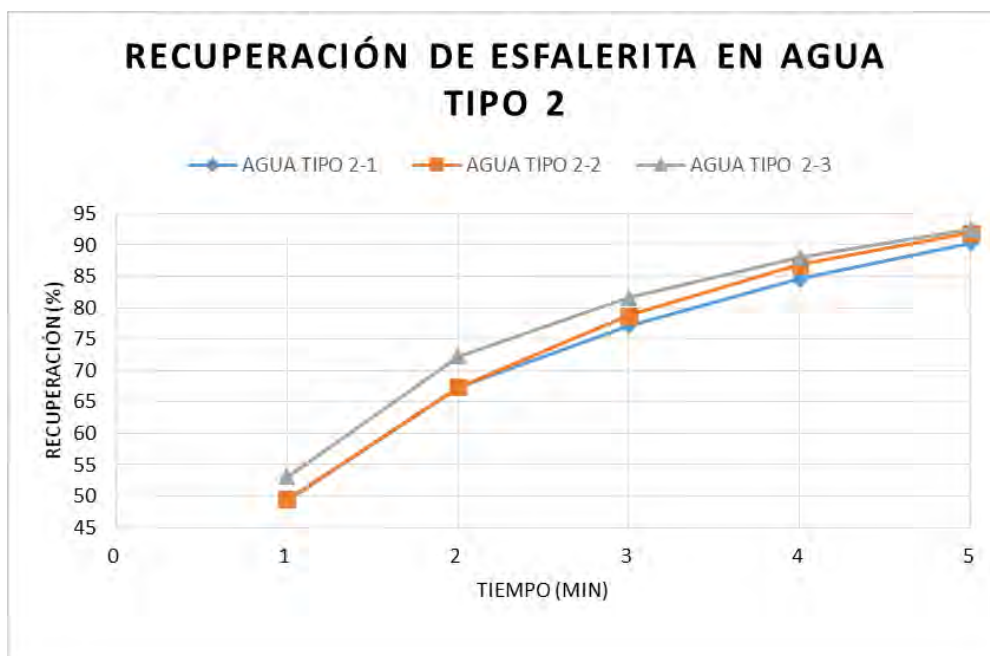


Figura 4.13 Recuperación de Esfalerita vs tiempo a pH neutro en agua sintética de mar tipo 2 empleando microflotación.

Entre el agua de mar y el agua sintética de mar, se observa que hay mayor recuperación de Esfalerita en el agua sintética de mar con sales de NaCl y KCl. También se observa que la recuperación en agua de mar es muy aceptable puesto que el agua se utilizó sin modificarle nada, caso contrario con el agua sintética de mar tipo 2 la cual obtuvo la menor recuperación. Se sabe que los iones de calcio inhiben la activación de la Esfalerita ya que compiten con el cobre al momento de adsorberse en la superficie, es por esa razón que el agua tipo 2 obtiene una menor recuperación [52].

Las sales disueltas en el agua de mar y el agua sintética de mar aumentan la densidad y la viscosidad del agua, pero también disminuye la tensión superficial, lo que provoca que las burbujas sean más pequeñas, que coalescan menos entre ellas y que permanezcan más tiempo en la pulpa de flotación favoreciendo la adhesión de partículas de mineral a las burbujas y por consecuente la obtención de una mayor recuperación de mineral.

4.2.4 Microflotación en celda Hallimond con agua reciclada de una planta minera.

A continuación se muestran en la tabla 4.5 y Figura 4.14 los resultados obtenidos en la microflotación de Esfalerita en agua reciclada, la información corresponde a porcentajes de recuperación de 1 minuto hasta 5 minutos a diferentes pH (5, 7, 8 y 12). Se observa que la recuperación es menor con respecto al del agua destilada a un pH de 7, al agua de mar y al agua sintética de mar. Sin embargo la recuperación entre agua reciclada a diferentes pH va en aumento cuando el pH va disminuyendo. También se observa que al minuto 1 la velocidad de recuperación es mucho mayor a pH de 5 que a pH de 12.

Tabla 4.5 Recuperación de Esfalerita a diferentes pH en agua reciclada.

RECUPERACIÓN (%) DE ESFALERITA EN AGUA RECICLADA				
TIEMPO (MIN)	PH=5	PH=7	PH=8	PH=12
1	52.14	36.4	34.19	13.45
2	65.37	53.32	50.45	29.15
3	76	64.66	60.79	39.57
4	81.9	71.74	68.29	45.7
5	86.41	76.65	73.13	49.58
COLAS	13.59	23.35	26.87	50.42

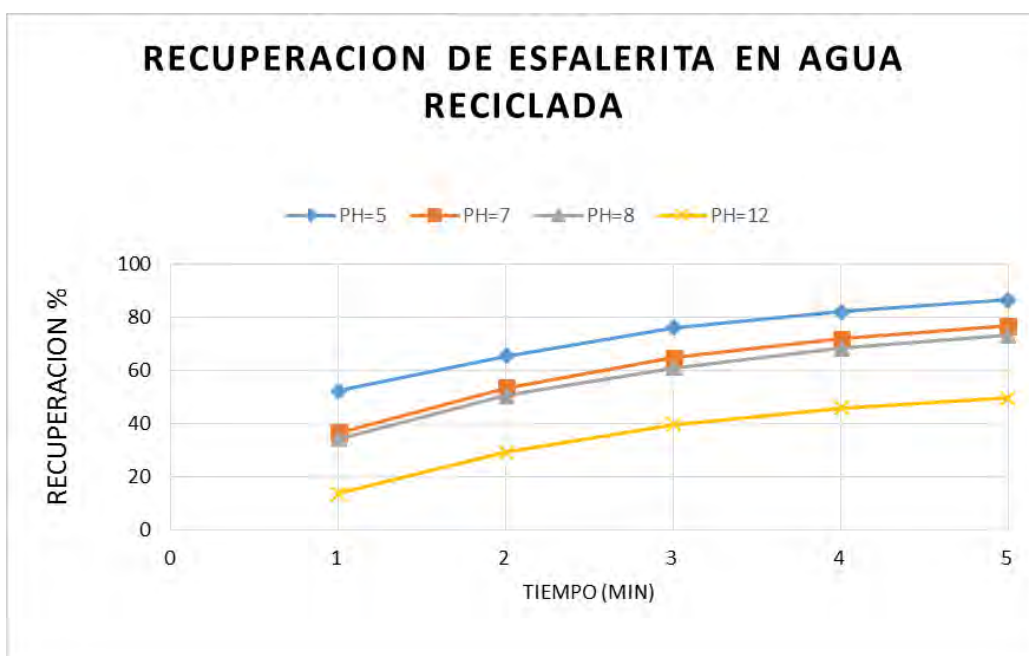


Figura 4.14 Recuperación de Esfalerita vs tiempo a diferentes pH en agua reciclada empleando microflotación.

4.2.5 Microflotación en celda Hallimond con agua sintética reciclada tipo 3 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

En la tabla 4.6 y figura 4.15 se muestran los resultados obtenidos en la microflotación de Esfalerita en agua tipo 3, la información corresponde a porcentajes de recuperación de 1 minuto hasta 5 minutos a un pH neutro. Se observa que el rendimiento de flotación es menor con respecto al de todos los demás tipos de agua utilizadas anteriormente a pH neutro. El agua tipo 3-1 es la que menor concentración tiene de Sulfato de Calcio y como ya se mencionó, el Calcio provoca una competencia con el cobre por ocupar la superficie de la Esfalerita por lo que a menor concentración de calcio mayor recuperación de Esfalerita tendremos.

Tabla 4.6 Recuperación de Esfalerita a pH neutro en agua sintética reciclada tipo 3.

RECUPERACION (%) DE ESFALERITA EN AGUA SINTETICA RECICALDA TIPO 3			
TIEMPO (MIN)	AGUA TIPO 3-1	AGUA TIPO 3-2	AGUA TIPO 3-3
1	40.68	39.35	34.44
2	58.23	55.71	53.21
3	69.99	67.38	65.62
4	79.17	77.7	75.35
5	86.46	85.61	83.06
COLAS	13.54	14.34	16.94

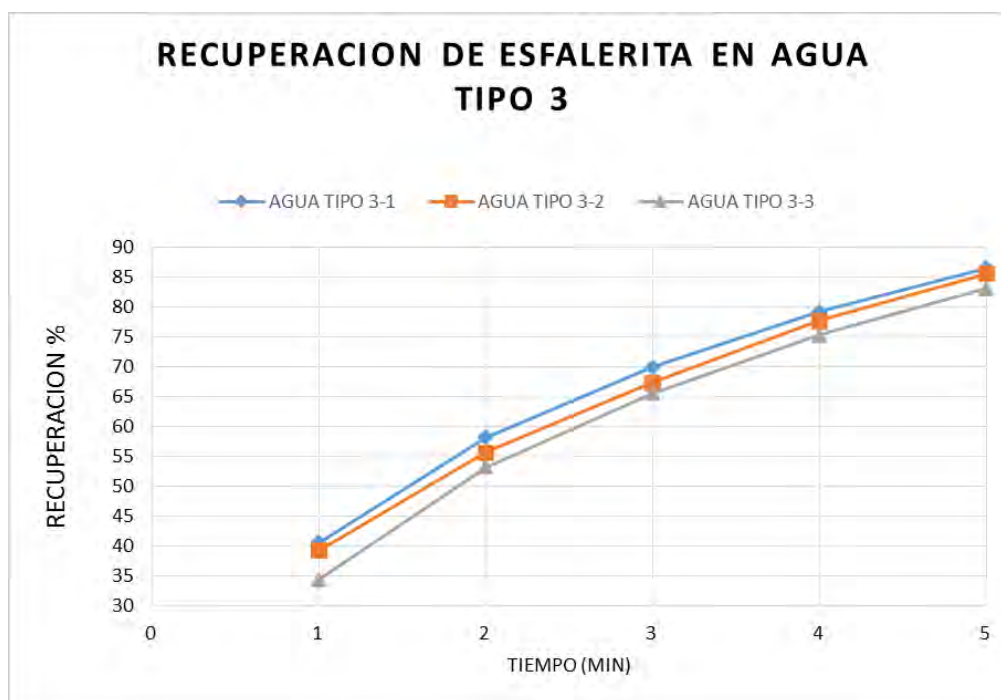


Figura 4.15 Recuperación de Esfalerita vs tiempo a pH neutro en agua sintética reciclada empleando microflotación.

La siguiente figura 4.16 muestra una comparación de los valores de recuperación del proceso de las microflotaciones de la Esfalerita a pH neutro. Se observa que el agua sintética de mar tipo 1 y el agua de mar son las que mejor recuperación presentan, por otra parte las aguas que contienen Calcio tienen recuperaciones menores debido al fenómeno ya mencionado de la adsorción de Calcio. También se observa que el agua reciclada es la que presenta la menor recuperación debido a que está más contaminada de iones y reactivos del proceso de flotación.

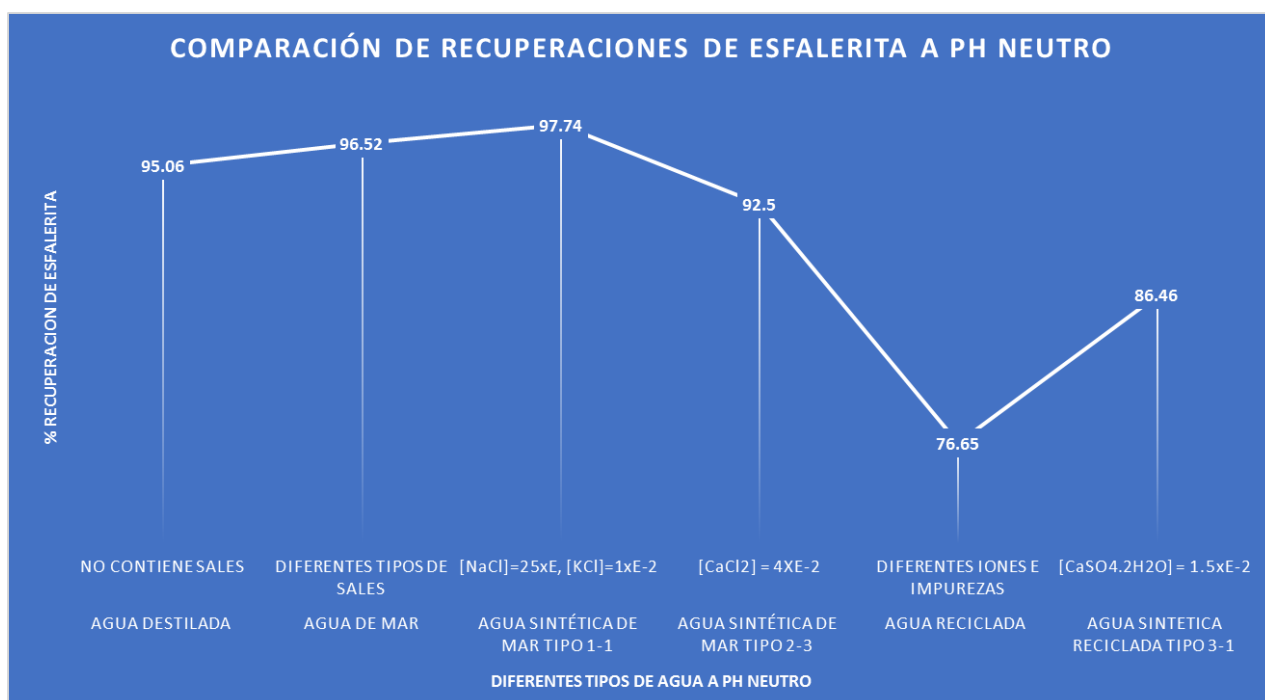


Figura 4.16. Comparación de recuperaciones de Esfalerita a pH neutro empleando microflotación.

4.2.6 Tamaño de burbuja en el proceso de microflotación.

Para la microflotación se escogió el agitador más pequeño (1cm de longitud), ya que se observó que con ese tamaño de agitador se producían las burbujas más pequeñas con la velocidad de mezclado máxima de 1200 RPM. Esto favoreció el rendimiento de concentrado de la Esfalerita, ya que las burbujas más pequeñas permanecen mayor tiempo en la pulpa de flotación y colectan más mineral. También al mezclarse más rápido hay mayor probabilidad de que las partículas de mineral se adhieran a la burbuja al incrementarse las colisiones entre partícula y burbuja.

Sucedió lo contrario con los 2 agitadores restantes disponibles (1.5cm y 2cm), permitiendo mayor coalescencia entre burbujas, se formaban burbujas grandes de aproximadamente 5 ml, ascendían demasiado rápido y no recolectaban el suficiente mineral.

La figura 4.17 muestra los efectos del tamaño de burbuja ocasionado por los diferentes tamaños de agitadores y con la velocidad que deben mantener para que la mezcla de mineral no rebase la curva de la celda Hallimond en la zona de mezclado. Si se rebasa el nivel, el mineral se va a la etapa de concentrado sin necesidad de ser flotado por nitrógeno y este efecto no arrojaría información confiable del proceso de flotación.

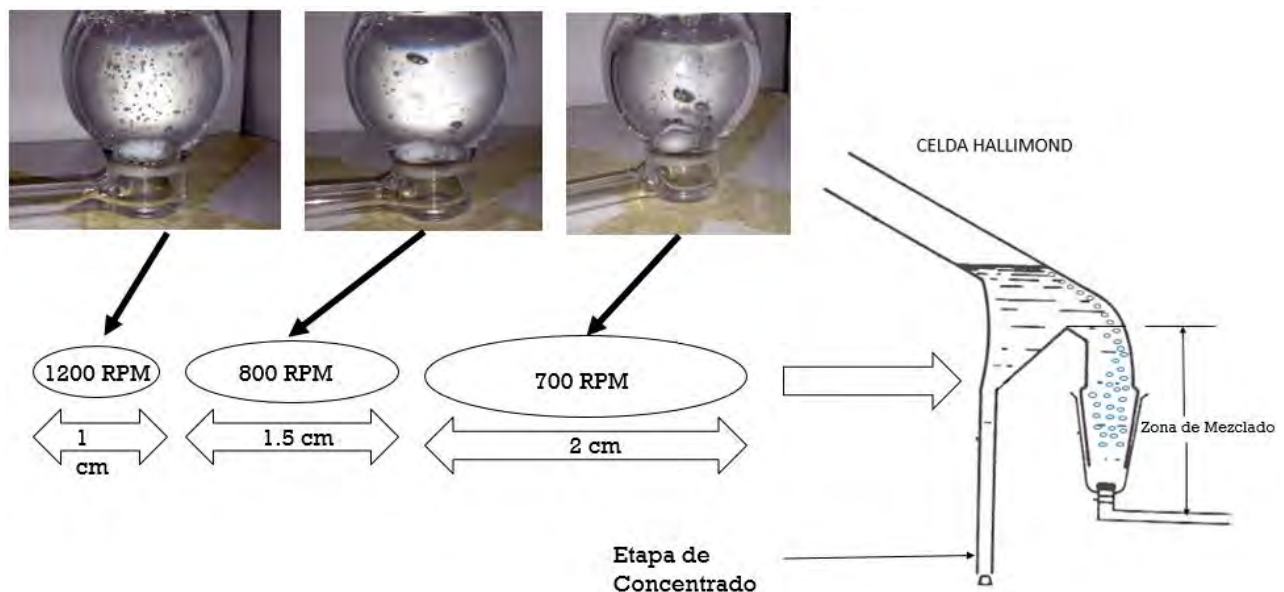


Figura 4.17 Relación de tamaño de agitadores con sus respectivas velocidades de mezclado para no rebasar la zona de mezclado en de la celda Hallimond.

4.3 Resultados de Espectroscopía Infrarroja posterior al proceso de microflotación de Esfalerita.

4.3.1 Espectroscopía Infrarroja del Sulfato de Cobre e Isopropil Xantato de Sodio en su forma original.

En la siguiente figura 4.18 se muestran los grupos funcionales característicos del SIPX y Sulfato de Cobre Pentahidratado. La curva de color violeta corresponde al Xantato y la de color rojo corresponde al Sulfato de Cobre Pentahidratado. La huella dactilar se presenta en un rango de longitud de onda de 400 cm^{-1} a 1500 cm^{-1} y es donde se definen los grupos funcionales de las moléculas. En este caso se encuentran bandas principales de 507 cm^{-1} (C-Br) que corresponde a la pastilla de Bromuro de Potasio, 612 cm^{-1} (C-Cl) corresponde al Cloruro, 1034 y 1090 cm^{-1} (C-O) proveniente de la molécula del Xantato, 1140 y 1190 cm^{-1} (S=O) corresponde a los Sulfatos, 1090 cm^{-1} (-CH₃) corresponde a la estructura del Xantato y 1034 cm^{-1} (-CH₂) también correspondiente a la estructura del Xantato.

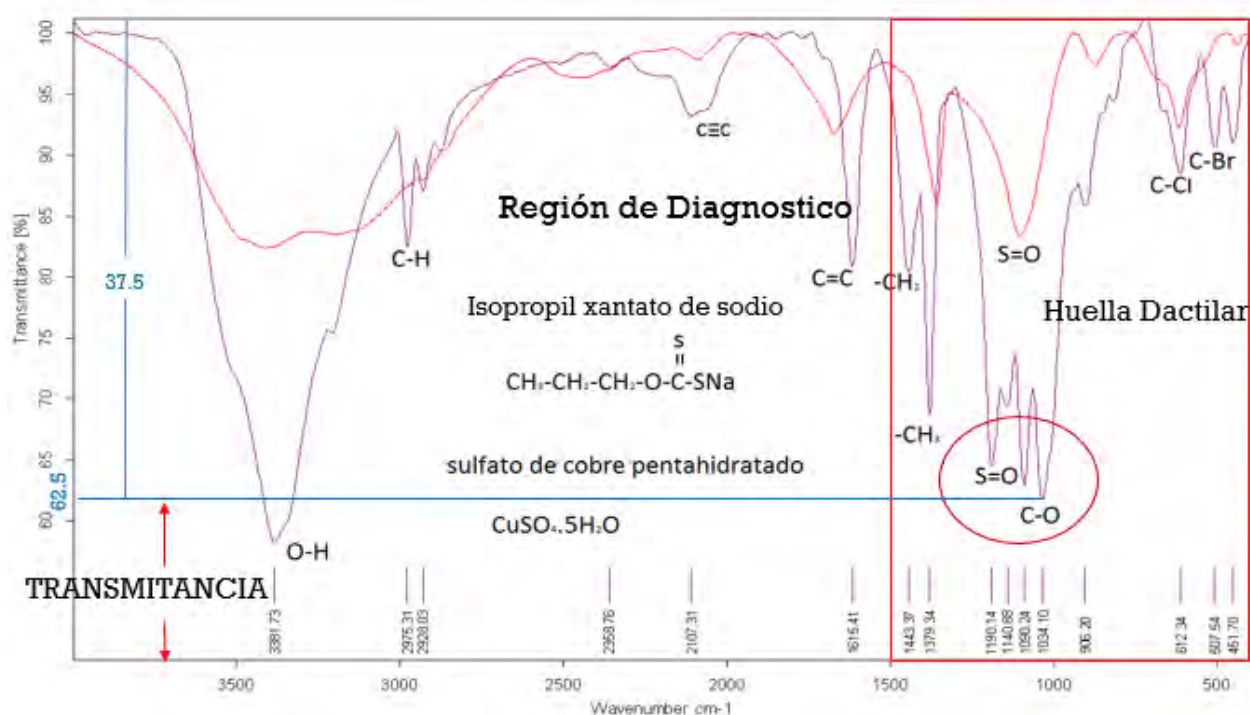


Figura 4.18 Diferentes grupos funcionales del Isopropil Xantato de Sodio y del Sulfato de Cobre Pentahidratado.

4.3.2 Espectroscopía Infrarroja posterior al proceso de microflotación de Esfalerita en los diferentes tipos de agua.

Las siguientes figuras (de la 4.19 a la 4.24) muestran los grupos funcionales encontrados en las muestras con agua destilada a diferentes pH, agua de mar, agua sintética de mar (tipo 1 y tipo 2), agua reciclada y agua sintética reciclada (agua tipo 3). Puede observarse a simple vista que todas presentan las mismas bandas características y también se observa que presentan los grupos funcionales característicos del SIPX y Sulfato de Cobre Pentahidratado. Por lo tanto la superficie de la Esfalerita adsorbió en todos los casos estudiados al Sulfato de Cobre y al SIPX, pero no en la misma proporción.

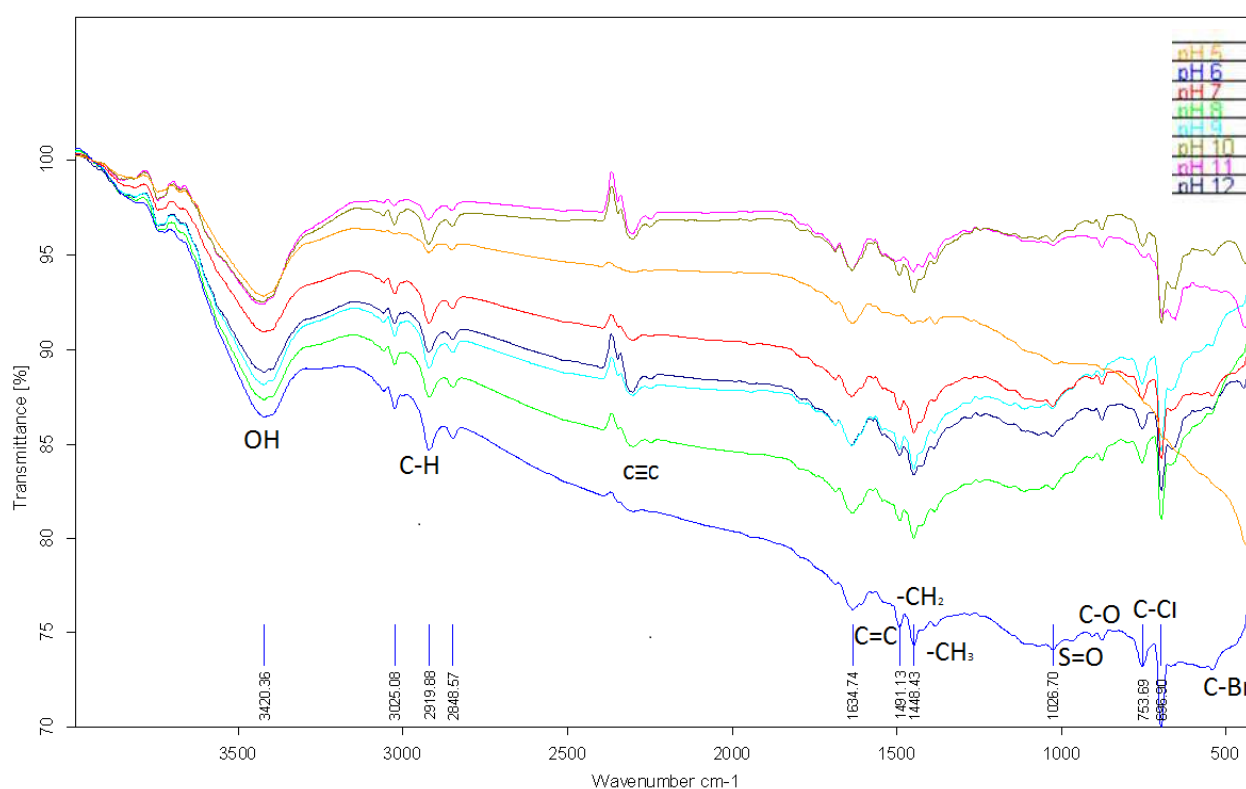


Figura 4.19 Diferentes grupos funcionales presentes después del proceso de microflotación de Esfalerita en agua destilada a diferentes pH.

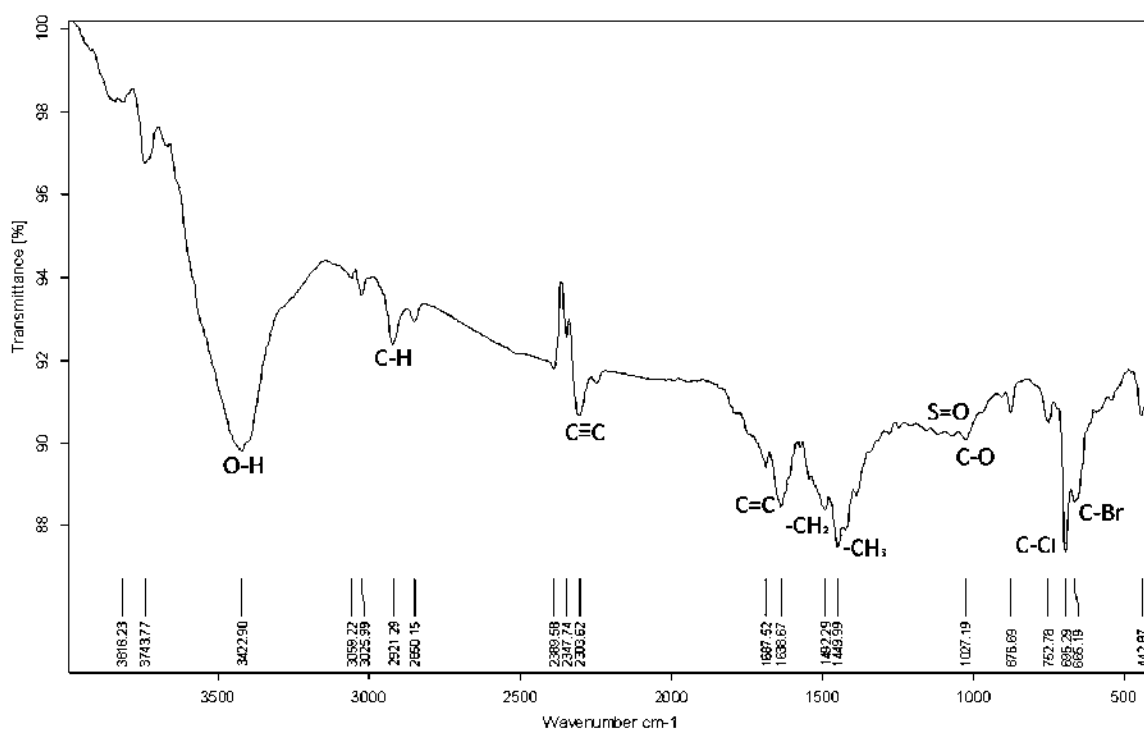


Figura 4.20 Diferentes grupos funcionales presentes después del proceso de microflotación de Esfalerita en agua de mar.

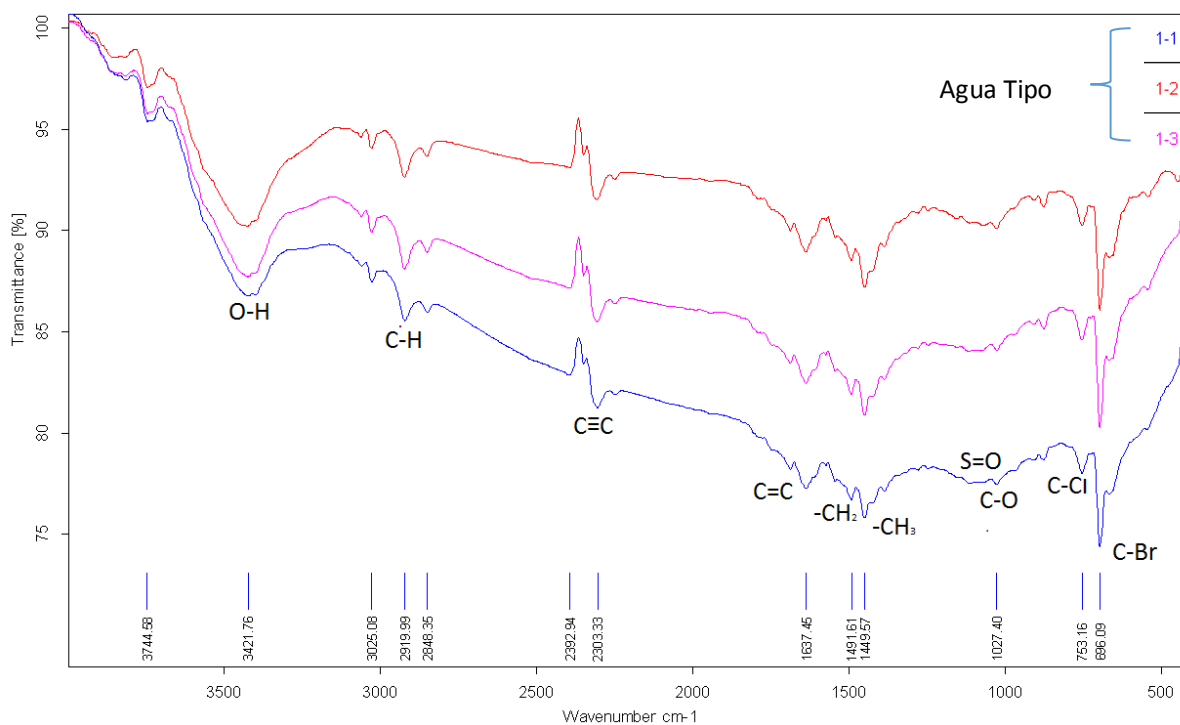


Figura 4.21 Diferentes grupos funcionales presentes después del proceso de microflotación de Esfalerita en agua sintética de mar tipo 1 a diferentes concentraciones.

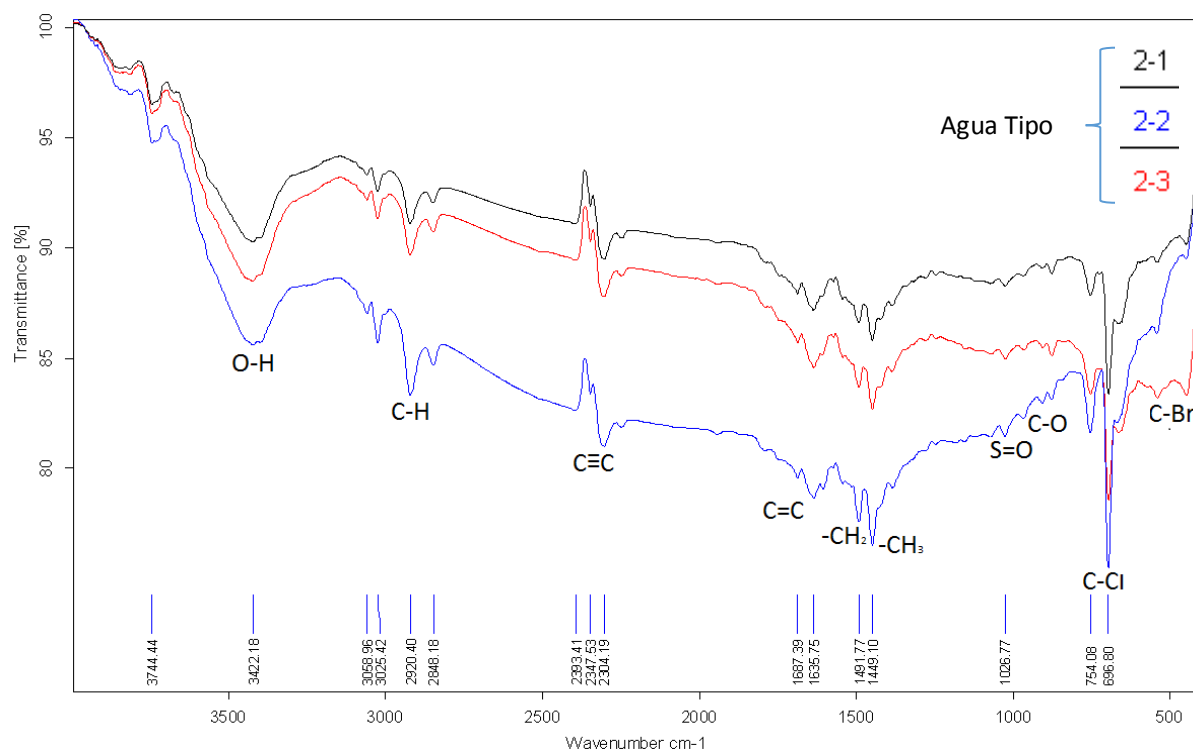


Figura 4.22 Diferentes grupos funcionales presentes después del proceso de microflotación de Esfalerita en agua sintética de mar tipo 2 a diferentes concentraciones.

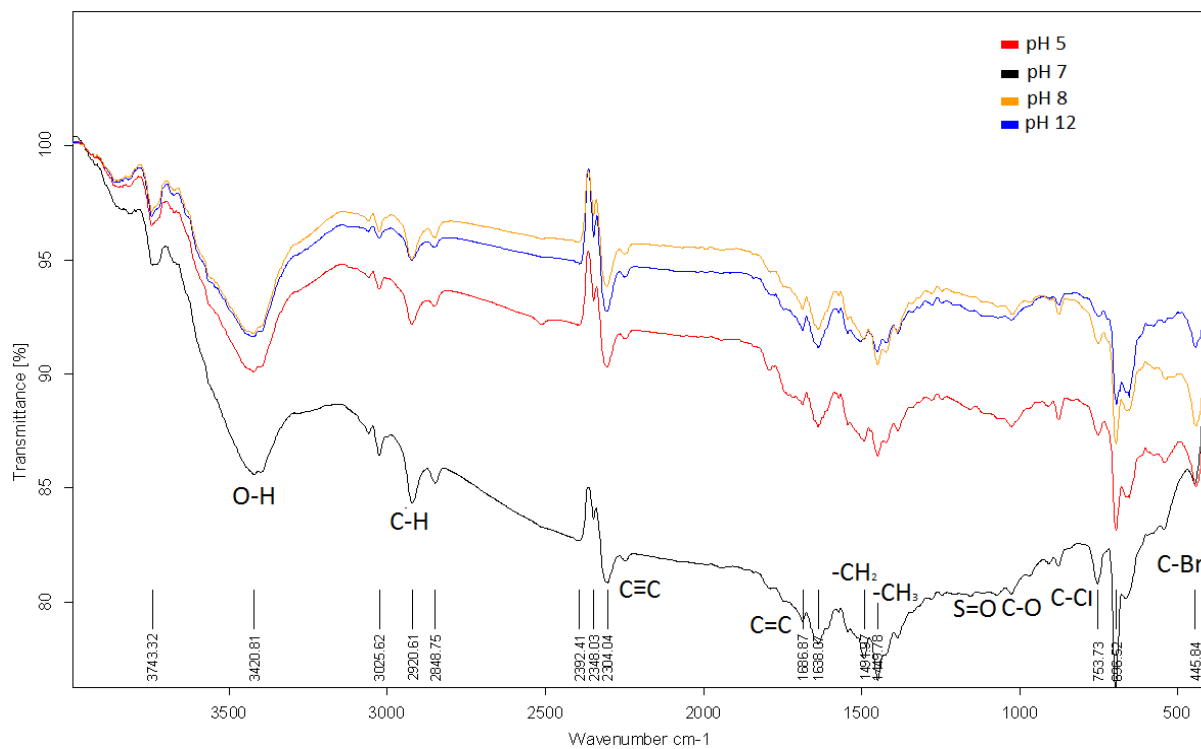


Figura 4.23 Diferentes grupos funcionales presentes después del proceso de microflotación de Esfalerita en agua reciclada a diferentes pH.

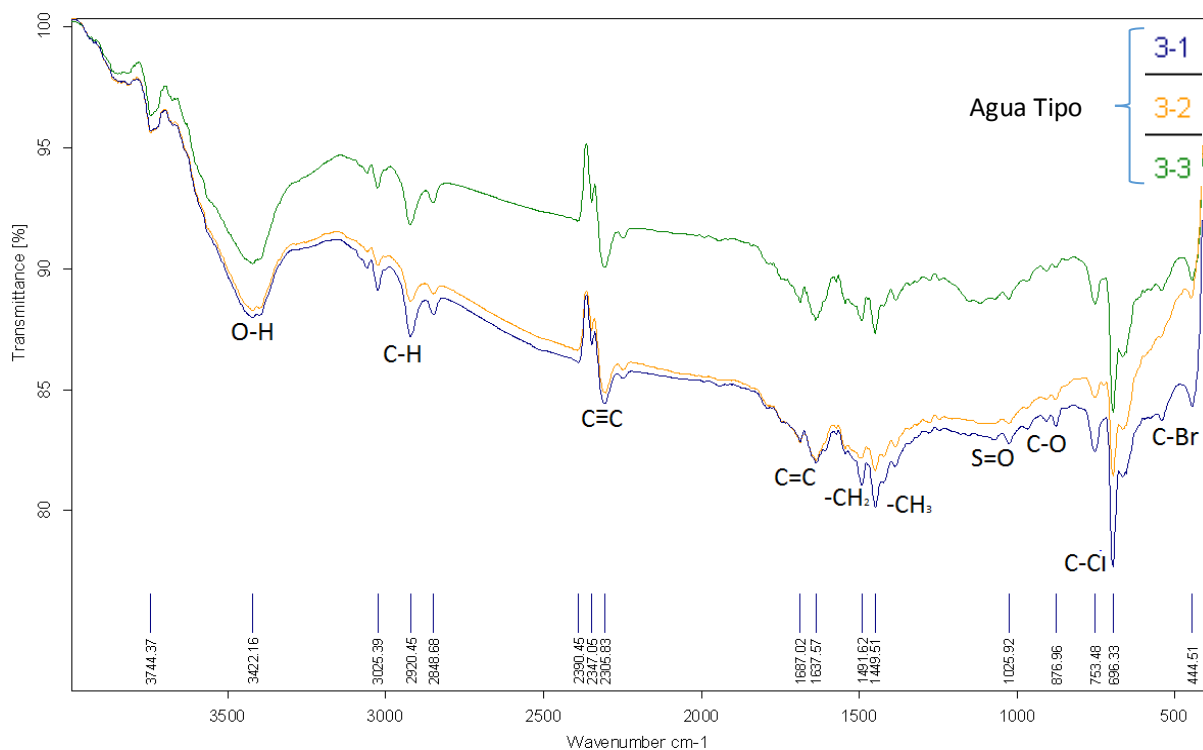


Figura 4.24 Diferentes grupos funcionales presentes después del proceso de microflotación de Esfalerita en agua sintética reciclada a diferentes concentraciones.

Es de vital importancia mencionar que la proporción de SIPX y Sulfato de Cobre adsorbidos sobre la superficie de la Esfalerita es diferente entre los tipos de agua. Mediante la ley de Lambert-Beer (ver Fig. 4.25) nos podemos dar una idea cualitativa de la adsorción de Xantato y Sulfato de Cobre, la cual indica que cuando disminuye la transmitancia la concentración va aumentando, es decir que a menor % de transmitancia de luz mayor es la concentración de Sulfato de Cobre y Xantato. La siguiente ecuación muestra la ley de Lambert-Beer [58]:

$$A = -\text{Log } T = -\text{Log } \frac{I}{I_0} = \text{Log } \frac{I_0}{I} = \varepsilon \cdot b \cdot c \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

A = la absorbancia.

T= la transmitancia.

ε = coeficiente de absorción molar.

b = espesor de la celda.

c = concentración molar.

I = intensidad de luz que no se absorbió en la muestra y que es transmitida.

I_0 = intensidad de luz que incide en la muestra

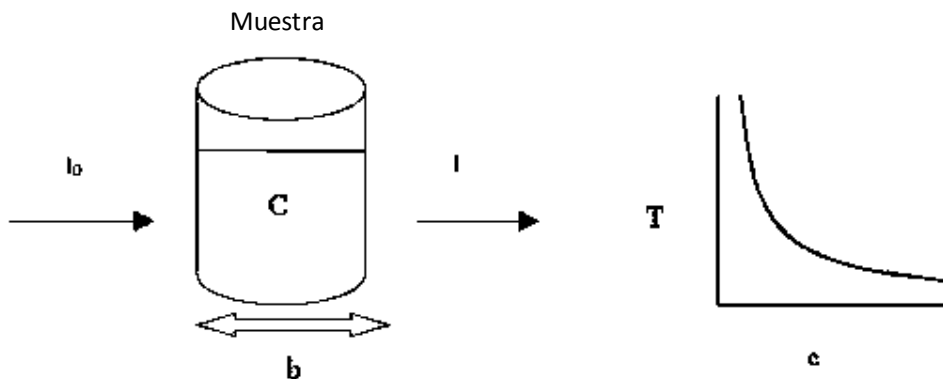


Figura 4.25 Representación gráfica de la ley de Lambert-Beer.

La tabla 4.7 y la figura 4.26 muestran los resultados de la adsorción de Cobre y Xantato provenientes de las muestras de microflotación a pH 7 (en caso del agua sintética de mar y agua sintética reciclada se tomaron los valores de mayor % de recuperación, también están a pH 7). Hay mayor adsorción de Sulfato de Cobre y de Xantato en el agua sintética de mar tipo 1, lo cual corresponde a los resultados de las microflotaciones. Sabemos que el Calcio inhibe la adsorción de Cobre, y referente a los tipos de agua que contienen calcio (agua de mar, agua sintética de mar tipo 2, agua reciclada y agua sintética reciclada tipo 3) donde menor hubo adsorción de Cobre y Xantato fue en el agua reciclada a pH 5, esto también se relaciona con los resultados de las microflotaciones.

Tabla 4.7 A menor % de Transmitancia de luz mayor es la adsorción de Cobre y SIPX

Muestras a pH neutro	% Transmitancia de luz
Agua destilada	87
Agua de Mar	90
Agua sintética de mar (TIPO 1-1)	78
Agua sintética de mar (TIPO 2-3)	85
Agua reciclada	80
Agua sintética reciclada (TIPO 3-1)	83

Es necesario comentar que estos resultados no muestran los valores finales de transmitancia, ya que las muestras que se metieron al equipo provienen del primer concentrado que se recaudó al primer minuto en el proceso de las microflotaciones. Los resultados de adsorción de Cobre y de Xantato que se muestran más adelante en los estudios de Espectroscopía de

Emisión Atómica y Rayos UV/VIS cuantifican mejor la adsorción de Cobre y Xantato en la Esfalerita, puesto que las pruebas se obtienen en un tiempo de 5 y 10 minutos.

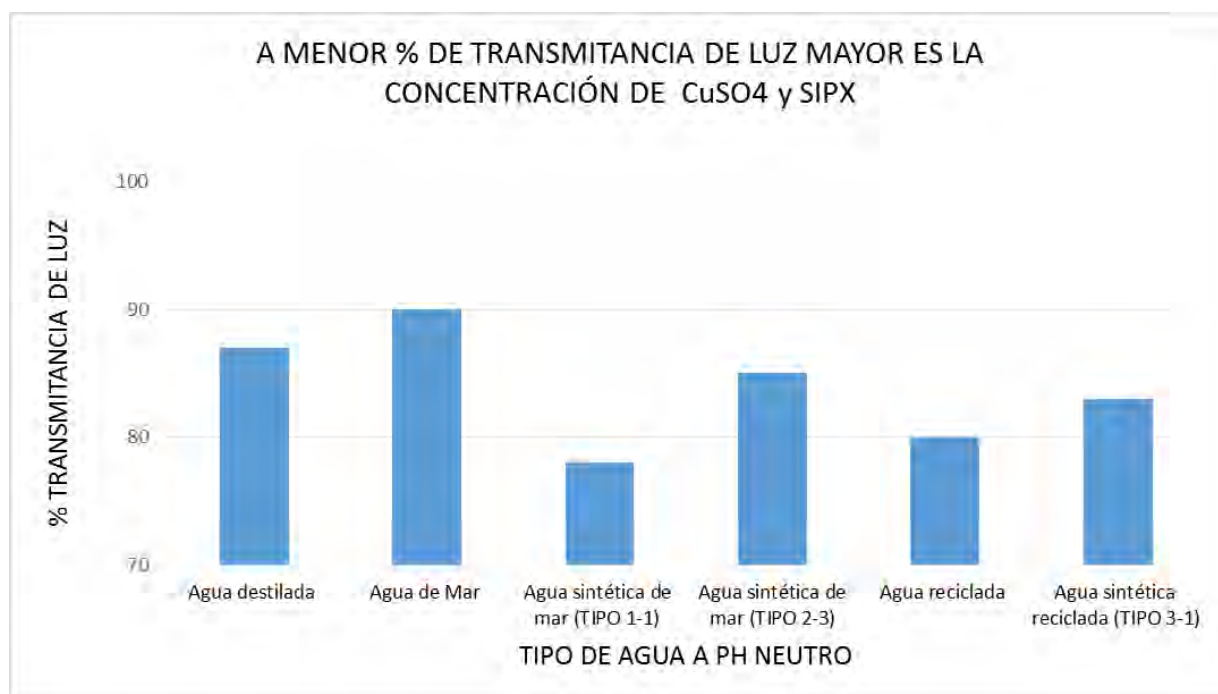


Figura 4.26 A menor % de Transmitancia de luz mayor es la adsorción de Cobre y SIPX.

4.4 Resultados de Espectroscopía de Emisión Atómica por Plasma.

4.4.1 Estudio de composición química del agua de mar y agua reciclada.

Las siguientes tablas 4.8 y 4.9 muestran los elementos y proporciones en ppm encontrados en agua de mar y agua reciclada de una planta minera. Los valores encontrados son muy cercanos a los de la literatura en el caso del agua de mar y son variables en caso del agua reciclada ya que esos valores dependen de los diversos factores que hay en la planta minera. La tabla muestra que efectivamente hay Calcio en ambas aguas, pero de mayor proporción en agua reciclada. Por tal razón la recuperación de Esfalerita es menor en el agua reciclada. Por otra parte los niveles de Sodio y de Potasio son muy elevados en el agua de mar en comparación con el agua reciclada.

Tabla 4.8 Composición química del agua de mar empleada en este estudio.

AGUA DE MAR								
ELEMENTO	Na	K	Ca	Mg	Fe	Pb	Zn	Cu
CONCENTRACION EN PPM	12730	860.13	563.24	1527.08	0	0.88	0.01	0

Tabla 4.9 Composición química del agua reciclada obtenida de una planta minera.

AGUA RECLADA								
ELEMENTO	Na	K	Ca	Mg	Fe	Pb	Zn	Cu
CONCENTRACION EN PPM	3296.54	66.13	2202.79	38.18	0	48.65	0.22	4.65

4.4.2 Densidad de adsorción de Cobre en la Esfalerita.

En la siguiente tabla 4.10 y figura 4.27 se muestran los valores del cobre no adsorbido por la Esfalerita (C_f) obtenidos mediante el estudio de Espectroscopía de Emisión Atómica por Plasma y las densidades de adsorción de cobre calculadas en los diferentes tipos de aguas. En este caso para el agua sintética de mar y agua sintética reciclada los experimentos se realizaron utilizando las aguas con las concentraciones más altas, es decir se utilizaron agua 1-3, agua 2-3 y agua 3-3.

Tabla 4.10 Densidad de adsorción de Cobre en la Esfalerita.

DESCRIPCIÓN	MUESTRA	CONCENTRACIÓN DE COBRE NO ADSORBIDO (C_f) EN PPM	DENSIDAD DE ADSORCIÓN DEL MINERAL (Q) EN ($\mu\text{mol/gr}$)
AGUA DESTILADA	PH 5	0.82	9.67
	PH 6	1.04	9.29
	PH 7	0.95	9.45
	PH 8	0.89	9.55
	PH 9	0.93	9.48
	PH 10	0.24	10.69
	PH 11	0.07	10.99
	PH 12	0.14	10.86
AGUA DE MAR	PH DE 7.5	0.03	11.05
AGUA SINTÉTICA DE MAR	[NaCl]=75XE-02, [KCl]=1XE-02(TIPO 1-3)	0.11	10.92
	[CaCl ₂]=4XE-02 (TIPO 2-3)	1.08	9.22
AGUA RECICLADA	PH 5	1.05	9.27
	PH 7	0.87	9.59
	PH 8	0.45	10.32
	PH 12	0.2	10.76
AGUA SINTÉTICA RECICLADA	[CaSO ₄ .2H ₂ O]=6XE-02 (TIPO 3-3)	0.95	9.45

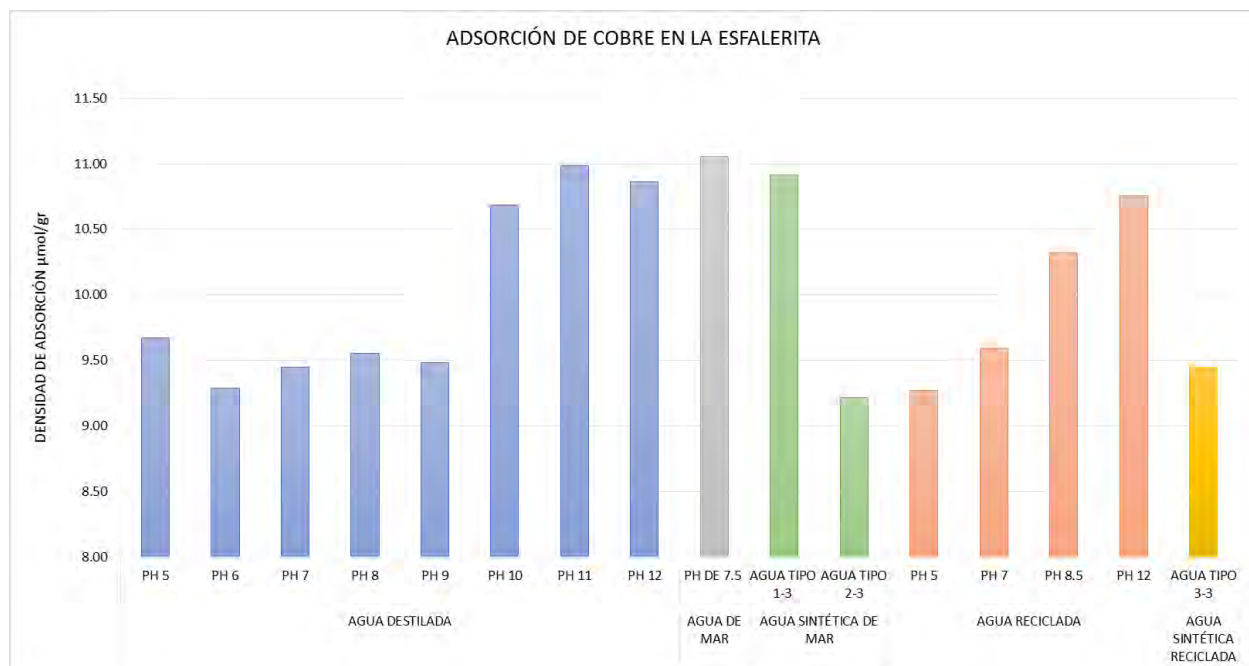


Figura 4.27 Densidad de adsorción de Cobre en la Esfalerita

Se observa de la gráfica anterior que donde se obtuvo mayor adsorción de Cobre sobre la superficie de la Esfalerita es en el agua de mar y agua sintética de mar (tipo 1-3) a pH neutros. Por otra parte también se obtuvieron buenas adsorciones de cobre a pH muy alcalinos en el agua destilada y el agua reciclada. Pero sabemos que a pH alcalinos se forman precipitados de cobre $\text{Cu}(\text{OH})_2$, los cuales no son de beneficio para la adsorción del Xantato y por lo tanto influyen en una mala recuperación de la Esfalerita. Caso contrario con el agua de mar y agua sintética de mar a pH neutro, donde la adsorción de Cobre tiene efectos positivos para una posterior adsorción de Xantato y por lo tanto una mejor recuperación de mineral.

Las sales disueltas en el agua de mar y el agua sintética de mar favorecen la adsorción de Cobre sobre la superficie de la Esfalerita, lo que significa que hay una mayor concentración de iones de cobre sobre la superficie de la Esfalerita y por lo tanto se provoca un mayor intercambio iónico. Al incorporarse los iones de Cu^{2+} a la superficie de la Esfalerita sufren una reacción de óxido-reducción dando como productos finales a la covelita (CuS), la calcocita (Cu_2S) y azufre elemental, de naturaleza hidrofóbica beneficiosa para el proceso de flotación.

4.5 Resultados de Espectroscopía UV/VIS para la densidad de adsorción de Isopropil xantato de sodio (SIPX) en la Esfalerita.

La siguiente tabla 4.11 y figura 4.28 muestran la absorbancia obtenida mediante el estudio de Espectroscopía UV/VIS, las concentraciones de SIPX que no fueron adsorbidas en la Esfalerita (C_f) determinadas mediante la ecuación 3.4 y las densidades de adsorción del SIPX calculadas, obtenidas en los diferentes tipos de agua. Para el agua sintética de mar y agua sintética reciclada, los experimentos se realizaron utilizaron las aguas con las concentraciones más altas, es decir se utilizaron agua tipo 1-3, agua tipo 2-3 y agua tipo 3-3.

Tabla 4.11 Densidad de adsorción de SIPX en la Esfalerita.

DESCRIPCIÓN	MUESTRA	ABSORBANCIA	CONCENTRACIÓN DE SIPX NO ADSORBIDO (C_f) EN PPM	DENSIDAD DE ADSORCIÓN DEL MINERAL (Q) EN ($\mu\text{mol/gr}$)
AGUA DESTILADA	PH 5	0.09	1.54	4.86
	PH 6	0.16	2.41	4.19
	PH 7	0.15	2.27	4.29
	PH 8	0.15	2.28	4.29
	PH 9	0.16	2.43	4.16
	PH 10	0.16	2.38	4.21
	PH 11	0.42	5.57	1.74
	PH 12	0.69	8.94	0.00
AGUA DE MAR	PH DE 7.5	0.17	2.49	4.12
AGUA SINTÉTICA DE MAR	[NaCl]=75XE-02, [KCl]=1XE-02 (TIPO 1-3)	0.18	2.72	3.94
	[CaCl ₂]=4XE-02 (TIPO 2-3)	0.16	2.45	4.15
AGUA REICLADA	PH 5	0.14	2.14	4.39
	PH 7	0.10	1.71	4.72
	PH 8	0.16	2.40	4.19
	PH 12	0.69	8.97	0.00
AGUA SINTÉTICA REICLADA	[CaSO ₄ .2H ₂ O]=6XE-02 (TIPO 3-3)	0.14	2.12	4.40

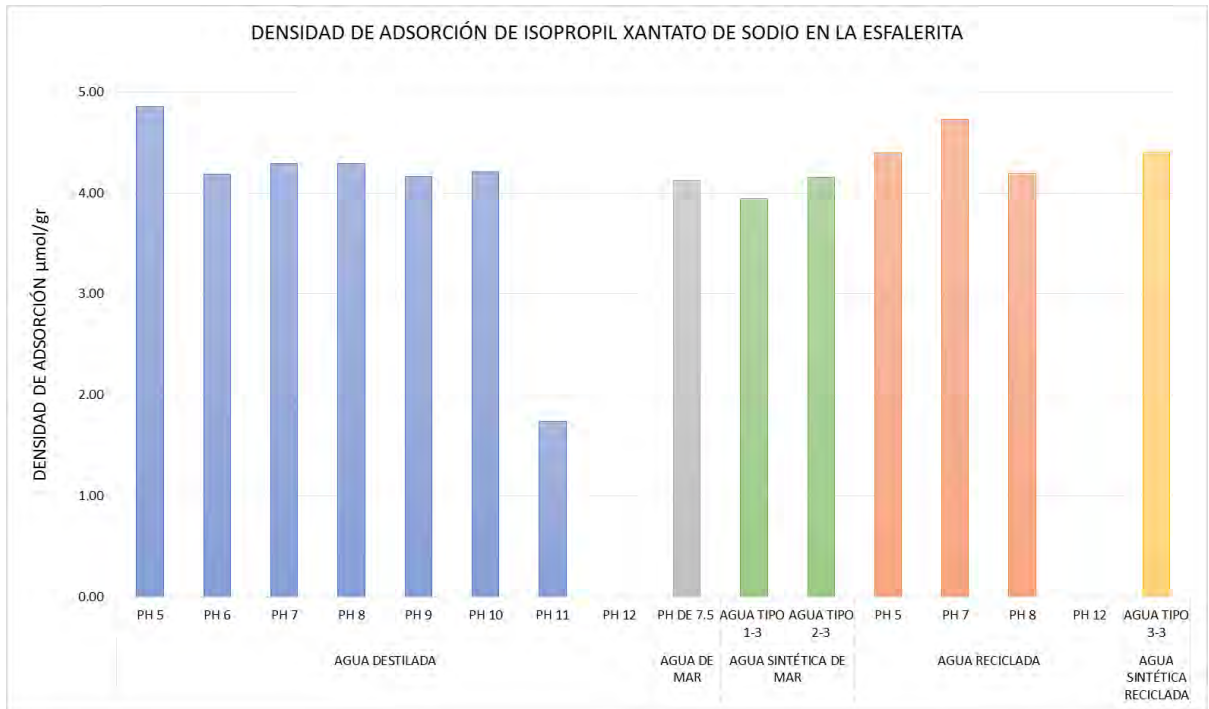


Figura 4.28 Densidad de adsorción de SIPX en la Esfalerita

En la gráfica anterior se observa que la adsorción de Xantato sobre la superficie de mineral con Cobre es muy similar en los diferentes tipos de agua, con la excepción de los pH muy alcalinos, en donde no se detectó adsorción de Xantato a pH 12 en agua destilada y agua sintética reciclada.

4.6 Resultados de Potencial Z.

4.6.1 Medición de Potencial Z en agua desionizada y agua destilada a diferentes pH.

Las siguientes tablas 4.12, 4.13 y figuras 4.29 y 4.30 muestran los resultados de las mediciones de Potencial Z en el agua desionizada y agua destilada a diferentes pH. Es de vital importancia encontrar el punto isoelectrico (carga neta cero) de la Esfalerita ya que nos indica a partir de que pH cambia de signo la carga en la superficie del mineral. El punto isoelectrico de la Esfalerita en el agua desionizada es cercano al valor de pH 3, y en el agua destilada su punto isoelectrico está cercano al pH de 7.

Tabla 4.12 Valores de Potencial Z de Esfalerita en agua desionizada a diferentes pH.

AGUA DESIONIZADA	POTENCIAL Z (mV)
pH 2	36.32
pH 3	-0.13
pH 4	-3.42
pH 5	-7.61
pH 6	-9.79
pH 7	-11.52
pH 8	-17.61
pH 9	-20.49
pH 10	-27.63
pH 11	-48.13
pH 12	-56.31



Figura 4.29 Potencial Z de Esfalerita en agua desionizada.

Tabla 4.13 Valores de Potencial Z de Esfalerita en agua destilada a diferentes pH.

ESFALERITA EN AGUA DESTILADA	POTENCIAL Z (mV)
pH 3	3.38
pH 4	3.20
pH 5	2.16
pH 6	1.09
pH 7	-0.42
pH 8	-1.31
pH 9	-8.65
pH 10	-16.41
pH 11	-43.76
pH 12	-56.75



Figura 4.30 Potencial Z de Esfalerita en agua destilada.

Los iones e impurezas disueltas en el agua destilada elevan el punto isoelectrónico con respecto al agua desionizada. El pH original del agua desionizada y agua destilada es de 6 y 5.5 respectivamente. Al agregar Ácido Clorhídrico (HCl) estamos bajando el pH y agregando protones de Hidrogeno (H^+) esto hace positiva la superficie de la Esfalerita. Caso contrario

cuando se eleva el pH con Hidróxido de Sodio (NaOH), estamos agregando iones Hidroxilo (OH^-) esto provoca que la superficie se vuelva negativa.

A continuación se muestran en la siguiente tabla 4.14 y figura 4.31 los valores de las mediciones del Potencial Z de Esfalerita en agua destilada, Esfalerita en agua destilada más sulfato de cobre pentahidratado y Esfalerita en agua destilada más sulfato de cobre más SIPX.

Tabla 4.14 Valores de Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua destilada a diferentes pH.

MUESTRA	POTENCIAL Z (mV)		
	ESFALERITA	ESFALERITA + COBRE	ESFALERITA + COBRE + SIPX
5	2.16	4.38	-16.61
6	1.09	2.52	-19.51
7	-0.42	2.15	-14.54
8	-2.35	-1.31	-10.61
9	-8.65	-5.41	-17.14
10	-16.41	-10.33	-23.55
11	-43.76	-30.21	-32.71
12	-56.75	-53.65	-54.00

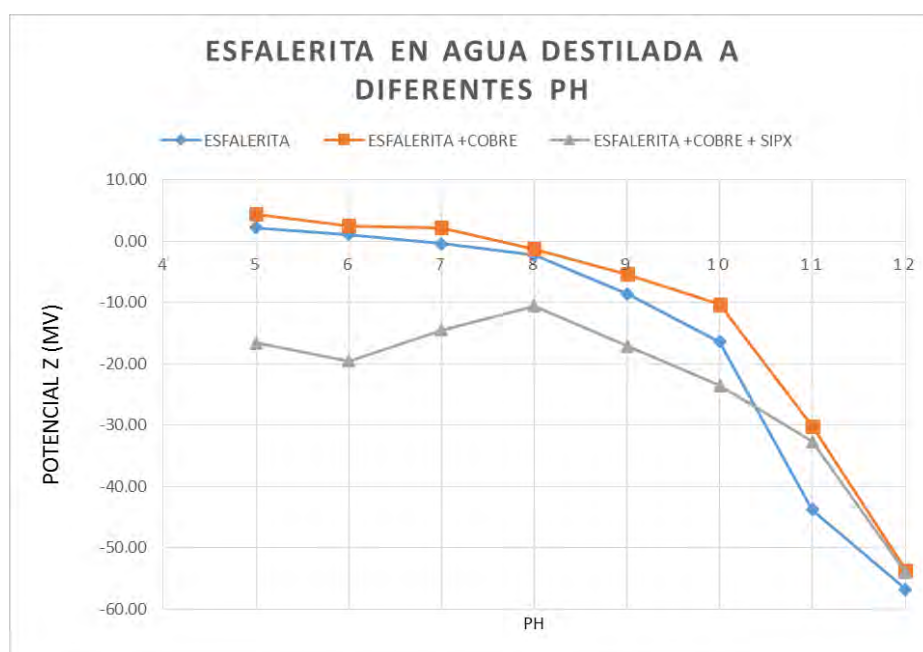


Figura 4.31 Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua destilada a diferentes pH.

Se aprecia que en el caso de la Esfalerita más cobre se presenta una adsorción de iones de Cu^{+2} en el rango de pH de 5 a 12, ya que los valores de Potencial Z son más positivos en

comparación con los obtenidos en el caso de las mediciones de Potencial Z de Esfalerita en agua destilada. Por otro lado, los valores de Potencial Z en el caso de Esfalerita más Cobre más SIPX son más negativos en comparación con los obtenidos en el caso de las mediciones de Potencial Z de Esfalerita más Cobre, lo cual indica que hay una adsorción de SIPX. El caso de Esfalerita más Cobre más SIPX se muestra que hay una buena adsorción de SIPX en el rango de pH de 5 a 10 y con respecto a los pH de 11 y 12 la adsorción de SIPX se reduce bastante. Esta información se corrobora con los resultados obtenidos de la densidad de adsorción del SIPX, los cuales indican que también a pH de 11 y 12 hay muy poca adsorción de SIPX en la Esfalerita.

4.6.2 Medición de Potencial Z en agua de mar.

La siguiente tabla 4.15 y la siguiente figura 4.32 muestran las mediciones de Potencial Z de Esfalerita en agua de mar a pH 7.5.

Tabla 4.15. Valores de Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua de mar a pH de 7.5.

ESFALERITA EN AGUA DE MAR A PH 7.5	POTENCIAL Z (mV)
ESFALERITA EN AGUA DE MAR	-32.31
ESFALERITA EN AGUA DE MAR CON SULFATO DE COBRE	-9.03
ESFALERITA EN AGUA DE MAR CON SULFATO DE COBRE Y SIPX	-22.7

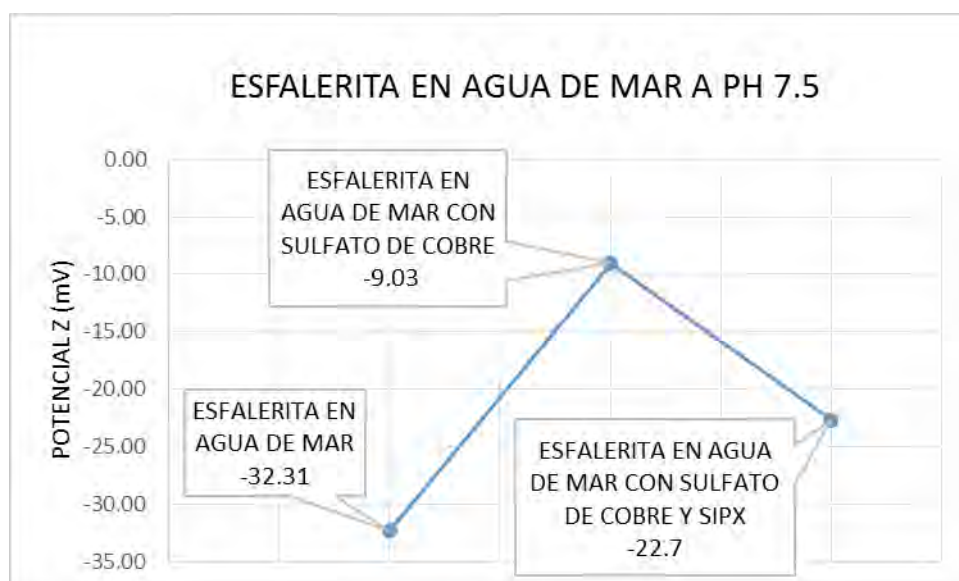


Figura 4.32 Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + cobre + SIPX en agua de mar a pH de 7.5.

Primeramente la Esfalerita en el agua de mar tiene un Potencial Z muy negativo, después de agregar el Cobre se vuelve menos negativo lo que significa que hay una buena adsorción de Cobre y en el último caso, donde a la Esfalerita se le agrega el Cobre y el SIPX se hace más negativo, esto quiere decir que el Xantato también se adsorbió bien a la superficie de la Esfalerita con Cobre. Esta información corresponde de buena manera a los experimentos anteriores donde se utiliza agua de mar.

4.6.3 Medición de Potencial Z en agua sintética de mar.

4.6.3.1 Medición de Potencial Z en agua sintética de mar tipo 1 (NaCl, KCl).

Los resultados de las mediciones de potencial Z de Esfalerita en agua sintética de mar tipo 1-3 a pH 7 se muestran en la siguiente tabla 4.16 y figura 4.33.

Tabla 4.16 Valores de Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua sintética de mar (tipo 1-3) a pH de 7.

ESFALERITA EN AGUA SINTETICA DE MAR A PH 7	POTENCIAL Z (mV)
ESFALERITA EN AGUA TIPO 1-3	17.98
ESFALERITA EN AGUA TIPO 1-3 CON SULFATO DE COBRE	42.31
ESFALERITA EN AGUA TIPO 1-3 CON SULFATO DE COBRE Y SIPX	-30.49

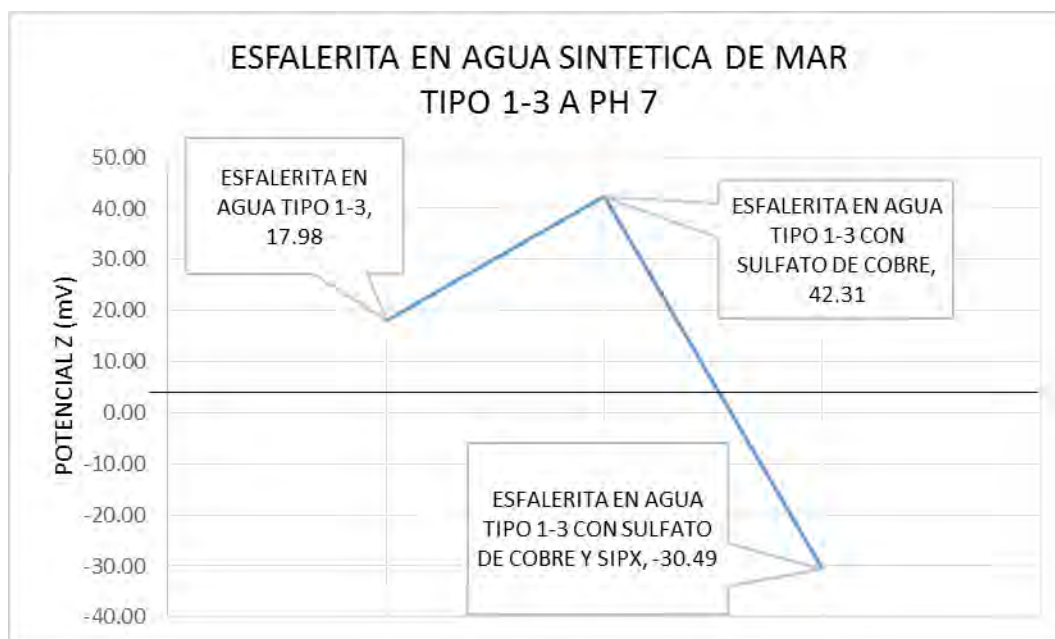


Figura 4.33 Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua sintética de mar tipo 1-3 a pH de 7.

Los resultados muestran que hay una buena adsorción de Cobre y de SIPX. Primero el Potencial Z es positivo cuando la Esfalerita está en el agua tipo 1-3, después se le agrega el

Cobre y se hace más positivo y finalmente cuando a la Esfalerita se le agrega el cobre y el SIPX su Potencial Z es negativo, esto quiere decir que el xantato se adsorbió de manera satisfactoria.

4.6.3.2 Medición de Potencial Z en agua sintética de mar tipo 2 (CaCl_2).

A continuación se muestran en la tabla 4.17 y figura 4.34 los resultados obtenidos durante las mediciones de Potencial Z de Esfalerita en agua sintética de mar tipo 2-3 a pH de 7.

Tabla 4.17 Valores de Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua sintética de mar (tipo 2-3) a pH de 7.

MUESTRA	POTENCIAL Z (mV)
ESFALERITA EN AGUA SINTETICA DE MAR TIPO 2 A PH 7	MEDICIÓN
ESFALERITA EN AGUA TIPO 2-3	15.08
ESFALERITA EN AGUA TIPO 2-3 CON SULFATO DE COBRE	-10.10
ESFALERITA EN AGUA TIPO 2-3 CON SULFATO DE COBRE Y SIPX	-3.16



Figura 4.34 Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua sintética de mar tipo 2-3 a pH de 7.

En la gráfica anterior se aprecia que la Esfalerita en agua sintética de mar tipo 2 muestra un Potencial Z positivo. Pero al agregar el cobre a la Esfalerita en agua tipo 2-3 se vuelve muy negativo su potencial, lo cual indica una mala adsorción de cobre sobre la superficie de la Esfalerita. Y por lo tanto, cuando la Esfalerita se encuentra en agua sintética de mar tipo 2 con Cobre más el SIPX, no hace más negativo el Potencial Z de la solución indicando con ello una baja adsorción de Xantato en la superficie de la Esfalerita.

4.6.4 Medición de Potencial Z en agua reciclada a diferentes pH.

En la tabla 4.18 y en la figura 4.35 se muestran los resultados de las mediciones de Potencial Z de Esfalerita en agua reciclada de una planta minera a diferentes pH.

Tabla 4.18 Valores de Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua reciclada a diferentes pH.

MUESTRA	POTENCIAL Z (mV)		
	ESFALERITA	ESFALERITA +COBRE	ESFALERITA +COBRE + SIPX
5	-12.21	-14.54	-16.39
7	-18.98	-5.39	-21.27
8	-10.44	-16.76	-9.93
12	8.87	9.23	9.21

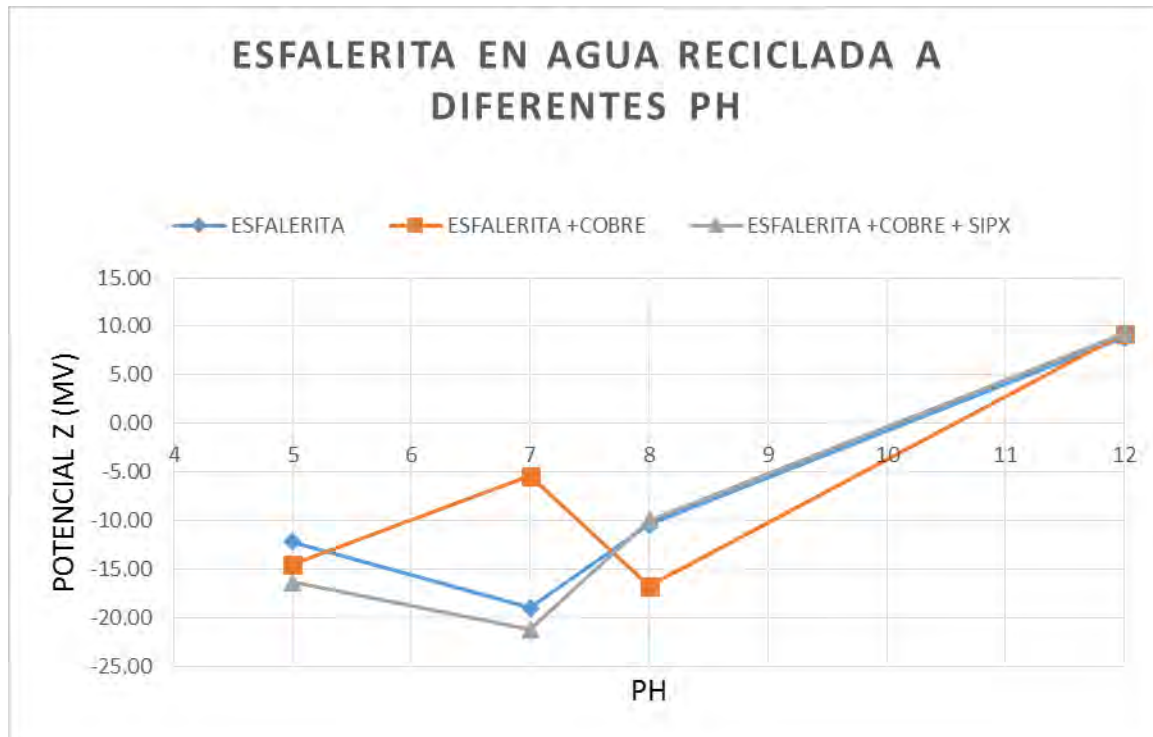


Figura 4.35 Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua reciclada a diferentes pH.

Los resultados muestran que el punto isoeléctrico de la Esfalerita en agua reciclada se encuentra a un valor de pH cercano a 10. Se observa que los resultados de Potencial Z de la Esfalerita más Cobre en agua reciclada se hace menos negativo en comparación con la Esfalerita sola en agua reciclada, indicando que hubo en el rango de pH de 5.5 a 7.5 adsorción de Cobre siendo el pH 7 el punto donde mayor adsorción de cobre hubo. También hay adsorción de SIPX en el rango de pH de 5.5 a 7.5 y al pH 7 también se presenta la mayor adsorción de SIPX. Finalmente a pH muy alcalinos no hay adsorción de SIPX ya que el Potencial Z se eleva a un valor muy positivo, esto se comprueba con los resultados de las microflotaciones en agua reciclada y con el estudio de la densidad de adsorción de SIPX el cual indica que a pH de 12 no se percibe adsorción del mismo.

4.6.5 Medición de Potencial Z en agua sintética reciclada tipo 3 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Los resultados correspondientes a las mediciones de Potencial Z de Esfalerita en agua sintética reciclada tipo 3-3 a pH de 7 se muestran en la siguiente tabla 4.19 y figura 4.36.

Tabla 4.19 Valores de Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua sintética reciclada tipo 3-3 a pH de 7.

MUESTRA	POTENCIAL Z (mV)
ESFALERITA EN AGUA SINTETICA RECICLADA TIPO 3 A PH 7	MEDICIÓN
ESFALERITA EN AGUA TIPO 3-3	-18.80
ESFALERITA EN AGUA TIPO 3-3 CON SULFATO DE COBRE	-11.10
ESFALERITA EN AGUA TIPO 3-3 CON SULFATO DE COBRE Y SIPX	-5.89

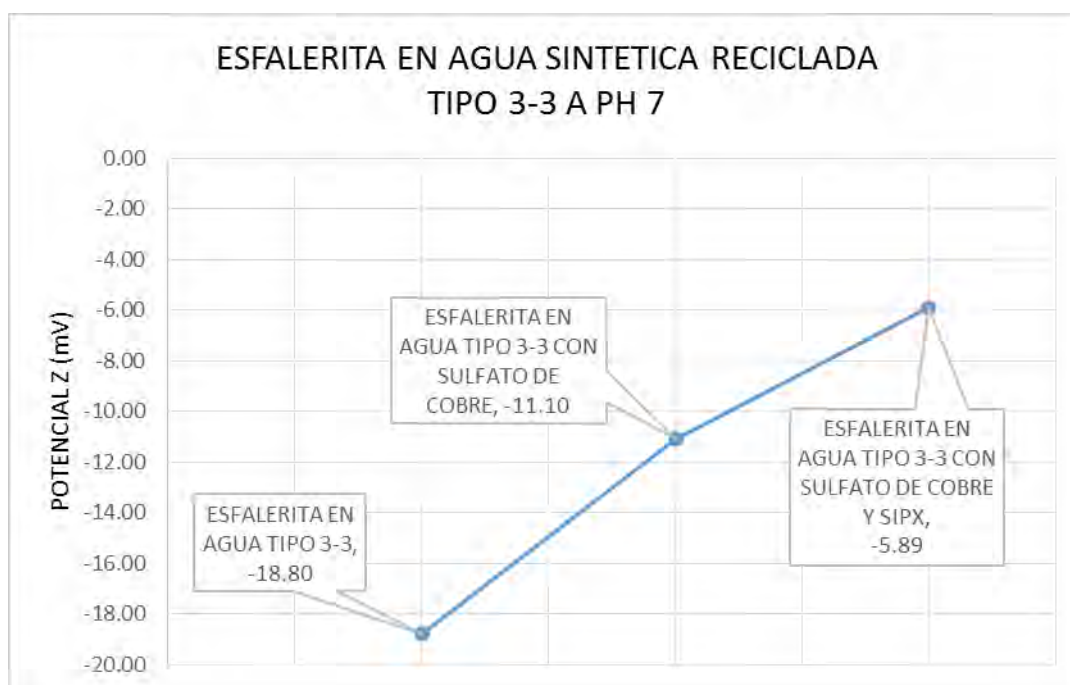


Figura 4.36 Potencial Z de Esfalerita, Esfalerita + Cobre y Esfalerita + Cobre + SIPX en agua sintética reciclada tipo 3-3 a pH de 7.

Los resultados muestran que hay adsorción de Cobre porque el valor del Potencial Z de la Esfalerita más Cobre en agua sintética reciclada es menos negativo que el valor del Potencial Z de la Esfalerita en agua sintética reciclada. Por otro lado se observa que hay muy poca adsorción de SIPX ya que el valor del Potencial Z es aún menos negativo que el de la Esfalerita en agua reciclada más cobre.

4.6.6 Tamaño de partícula en equipo de Potencial Z.

Se sabía que el tamaño de partícula de Esfalerita era menor de $32\mu\text{m}$ de acuerdo al tamaño de malla empleado durante su separación, pero se redujo más su tamaño por medio de un mortero para realizar las pruebas de Potencial Z y el equipo registró tamaños de partículas desde $0.5\mu\text{m}$ hasta $10\mu\text{m}$, con un valor promedio de tamaño de partícula que registro el equipo es de 2215.79 nm ó $2.21\mu\text{m}$. La siguiente figura 4.37 muestra los resultados obtenidos en el equipo de Potencial Z para tamaño de partícula.

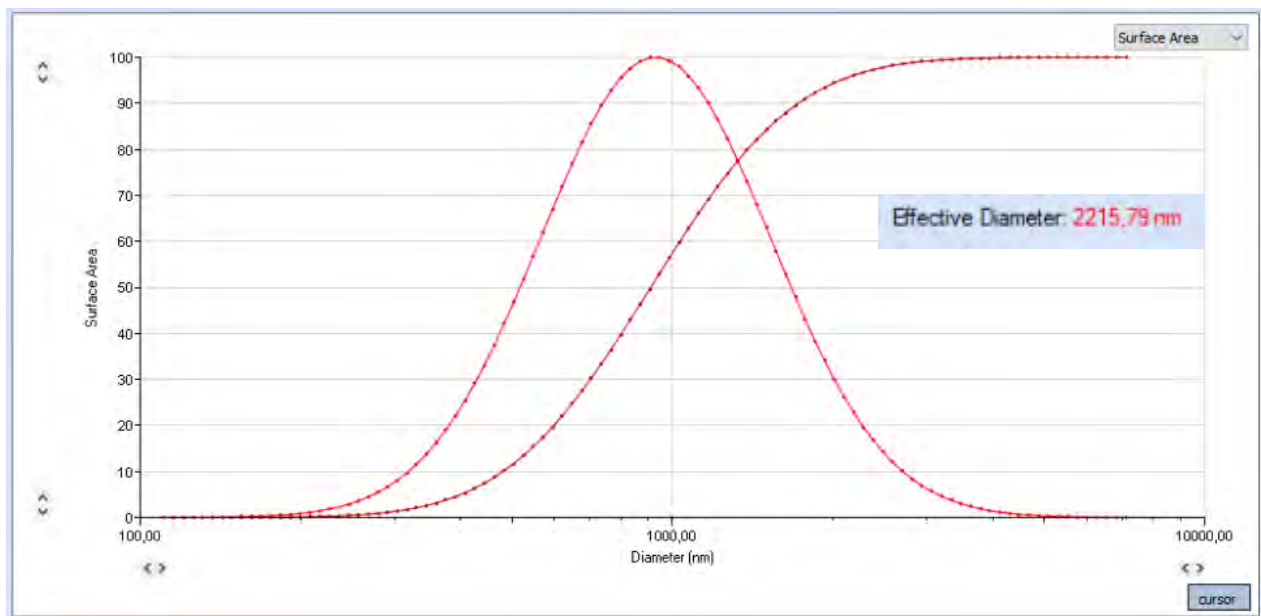


Figura 4.37 Intensidad vs diámetro de partícula.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.

Antes de resumir los diversos efectos que se producen al usar los diferentes tipos de agua utilizados en esta investigación, es fundamental mencionar que el presente trabajo se realizó en una celda a nivel laboratorio, con un sólo mineral, un activador, un colector y nitrógeno como gas de flotación. También es importante mencionar los efectos que produce el pH para la posterior activación de la Esfalerita (ZnS) mediante el Sulfato de Cobre y la adsorción del colector SIPX sobre la superficie activada.

La hidrofobización de la Esfalerita debido a la activación con Cu(II) se favorece cuando se efectúa a pH ligeramente ácido o neutro (pH de 6-7), debido a la mayor actividad de la especie Cu^{2+} que se adsorbe sobre la Esfalerita y se intercambia por los iones Zinc de las capas exteriores del mineral, en comparación con la activación a pH mayores de 9, en el que la especie predominante es el $\text{Cu}(\text{OH})_2$. Por otra parte, entre mayor sea la adsorción de especies cúpricas sobre la superficie de la Esfalerita mayor será la probabilidad de adsorción química del xantato sobre la superficie activada. Como consecuencia de la adsorción de Xantato se tiene un incremento en la hidrofobicidad de la Esfalerita y por lo tanto una mayor recuperación de este mineral durante la flotación.

La calidad del agua toma un papel fundamental en el proceso de flotación de minerales, en general, cuanto mejor sea la calidad del agua, más eficiente será la flotación. A continuación se mencionan las conclusiones de cada tipo de agua utilizadas en la investigación:

Se puede concluir que la alta concentración de iones e impurezas de sales solubles en el agua de mar no tienen efectos negativos en la flotación de Esfalerita por lo que dicha agua podría reemplazar el uso de agua dulce y convertirse en una opción sustentable para el procesamiento de minerales en regiones áridas y lugares cercanos al mar. Se tiene que tener muy presente que este tipo de agua se utilizó sin modificarle nada, o en otras palabras, se utilizó tal y como se extrajo del mar, eso le da una ventaja para su uso en la industria minera.

Por otra parte las altas concentraciones de iones provenientes de las sales en el agua de mar y el agua sintética de mar tipo 1 (NaCl, KCl), reducen la barrera de energía entre las partículas hidrofóbicas de mineral y las burbujas favoreciendo la adhesión de las partículas de mineral en las burbujas. También se tiene un efecto sobre el tamaño de la burbuja, ésta disminuye de tamaño y su probabilidad de coalescencia es menor. Además la viscosidad y la densidad aumentan provocando que las burbujas con mineral tarden más tiempo en ascender a la superficie aumentando así el concentrado de mineral y por lo tanto se obtiene un porcentaje

mayor de recuperación. Se obtuvo una mejor adsorción de Cobre sobre la Esfalerita a pH neutros en el agua de mar y en agua sintética de mar tipo 1.

En referencia al agua sintética de mar tipo 2, el calcio proveniente de la sal de CaCl_2 tiene efectos negativos en la adsorción del cobre sobre la Esfalerita, los iones de cobre compiten junto con los iones de calcio en la capa de iones cercana a la superficie por un lugar para adsorberse. Es por ello que la recuperación de la Esfalerita disminuye al emplear agua sintética de mar tipo 2 con respecto al agua sintética de mar tipo 1.

El uso de agua reciclada y agua sintética reciclada ocasionan efectos negativos en la eficiencia del proceso de flotación de la Esfalerita. En general se presenta una baja adsorción de cobre respecto a los demás tipos de agua, las altas concentraciones del sulfato de calcio claramente reducen la activación de la Esfalerita. Sin embargo algunos iones como el caso del Pb^{2+} que contiene el agua reciclada ayudan a una mejor adsorción de Xantato. Aun así no es suficiente para alcanzar una buena recuperación de Esfalerita.

5.1 TRABAJO A FUTURO.

Se recomienda para la realización de trabajos posteriores, utilizar una celda que simule el proceso de flotación a un nivel industrial. El uso de la celda Denver podría ser una opción, ya que el consumo de agua, mineral y reactivos de flotación siguen siendo razonables. Por otra parte en este trabajo no se utilizaron reactivos como los espumantes y los depresores, los cuales son de gran importancia a nivel industrial, por lo que en el uso de la celda Denver se podrían emplear varios minerales, en este caso sulfurosos como son la Galena, Calcopirita, Esfalerita y Pirita, el uso de varios activadores, depresores, reguladores de pH, colectores y el empleo de agua de mar y agua reciclada de una planta minera.

También se recomendaría antes de realizar el proceso de flotación en la celda Denver, realizar un estudio de la composición química del agua reciclada para ver su grado de contaminación de reactivos, y si es posible remover algunas especies químicas desfavorables.

CAPÍTULO 6. ACCIONES DE DIFUSIÓN REALIZADAS.

1. Se tuvo el agrado de participar en el XXVI Tianguis de la Ciencia organizado por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, se colaboró en el taller de “La mojabilidad y sus aplicaciones”. Dicho taller consistió en las siguientes actividades:
 - Exposición de conceptos fundamentales como mojabilidad, adsorción, propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas y medición de ángulo de contacto.
 - Se expusieron experimentos de superficies hidrofóbicas (no mojables), los experimentos consistieron en modificar la superficie de arena y vidrio, por medio de reactivos como laca transparente y desodorante en aerosol para tener un resultado de superficies hidrofóbicas. El experimento de la arena se realizó primeramente rociando laca sobre arena y después se utilizó el desodorante como fijador, se dejó secar aproximadamente 1 hora. Posteriormente se introdujo en agua, en el agua se aglomero y al momento de sacar la arena del agua fue como si la arena nunca fuese mojada, estaba seca y su consistencia era normal. Para el experimento del vidrio se realizó lo mismo, se roció sólo una parte del vidrio con laca y desodorante, la otra parte se dejó intacta. Posteriormente se agregaron 2 gotas de agua, una en la parte modificada y la otra en la parte normal, sucedió lo siguiente, en la parte hidrofóbica el agua no se contrajo y se desparramo en la superficie, eso quiere decir que no mojó la superficie y en la parte normal, el agua se extendió, por lo cual la superficie era mojable.
 - Se promovió la participación del público para que realizaran algunos experimentos sencillos, como por ejemplo modificar la superficie de papel y tela por medio de cera de veladora, para posteriormente dejar caer agua sobre ellos y observar la no mojabilidad de sus superficies.



2. Se participó como ponente en el XXII Congreso de la División de Dinámica de Fluidos de la SMF, que se realizó los días del 14 al 16 de noviembre del 2016 en Uxmal Yucatán se expuso el tema de “ESTUDIO COMPARATIVO DE LA MICROFLOTACIÓN DE ESFARELITA EMPLEANDO SOLUCIONES SINTÉTICAS DE AGUA DE MAR Y AGUA RECICLADA”. A continuación se muestra el resumen presentado en el congreso:

La Esfalerita es un mineral sulfuroso de zinc (ZnS) que de manera natural no se hidrofobiza en presencia de surfactantes tipo colector Xantato para su recuperación por flotación. Por lo cual se emplean activadores como sulfato de cobre que actúan modificando la superficie mineral haciéndola afin al colector. En este trabajo se presentan resultados de microflotación empleando una celda Hallimond. Los estudios se realizaron con agua reciclada o con solución sintética de agua de mar; en este último caso se probaron tres diferentes formulaciones para el agua sintética de mar. Los resultados se analizaron de acuerdo al porcentaje de recuperación de mineral y al sistema de agitación empleado durante la microflotación.



3. Se participó como ponente en el 5º Congreso de Jóvenes Profesionales del Agua de la Asociación Internacional del Agua (International Water Association, IWA) que se realizó los días del 24 al 26 de mayo del 2017 en la ciudad de Morelia Mich., se expuso el tema de “Usage of seawater for sphalerite recovery by microflotation.” A continuación se muestra el abstract presentado en el congreso:

Due to the lack of water in the environment, the use of seawater in sulfur mineral flotation plants is essential, particularly in some areas where mineral processing plants consume large quantities of potable water from the region (Azapagic, 2004; Castro, 2012). Different factors affect the use of seawater in flotation processes such as changes in bubble size, surface tension, among others (Weissenborn & Pugh, 1995; Cho & Laskowski, 2002). An increase in flotation recovery has been observed using seawater, but on the other hand a reduction in selectivity has been obtained (Manono et al., 2013). Understanding the mechanisms affecting flotation using saline water is still insufficient (Wang & Peng, 2014). The use of seawater is limited by the high concentrations of soluble salts and organic particles that interfere in the selectivity and good recovery of minerals of interest by flotation. In this paper we present the results of a comparative study between the use of seawater, synthetic water with soluble salts of Sodium Chloride and Potassium Chloride, as well as distilled water during the processes of microflotation of sphalerite using a Hallimond cell. Among the reagents used are Sodium Isopropyl Xanthate (SIPX) as a collector and Copper Sulphate $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ as an activator of the sphalerite surface. Samples were drawn at different conditioning times in the microflotation cell to determine the agitation time required to obtain the best ore recovery percentages. In order to characterize the samples, techniques such as Infrared microscopy were used to detect the functional groups that are formed. UV VIS spectroscopy was used to study the absorption of the collector on the mineral surface. Atomic emission spectroscopy by plasma was used to determine the percentage of activator adsorbed on the surface, and Z-Potential measurements were used to determine the surface charge distribution. Table 1 shows the percentages of sphalerite recovery at different conditioning times of the system within the microflotation cell for the different types of water considered. Figure 1 shows a summary of the total percentages obtained in sphalerite recovery by microflotation for the different types of water studied. Three different salt concentrations were tested for the synthetic water type. The main results show that there is viability in the use of seawater as an alternative to recover sphalerite

by microflotation, obtaining even higher levels of recovery at different times of conditioning with respect to those obtained using distilled water. The present research shows a relevant impact in topics such as Water in the Industry because it shows a viable alternative to reduce the amount of potable water used in the mining industry.

Keywords: Seawater; saline water; flotation; sphalerite; Xanthate.



Figura 6.3 Constancia 1 de participación en el 5th Young Water Professionals Conference.

4. Se participó como expositor de poster en representación de mi compañero Ludwig Neftali Cruz Sánchez en el 5° Congreso de Jóvenes Profesionales del Agua de la Asociación Internacional del Agua (International Water Association, IWA) que se realizó los días del 24 al 26 de mayo del 2017 en la ciudad de Morelia Mich., se expuso el tema de “Wettability of seawater on a pyrite surface.” A continuación se muestra el abstract presentado en el congreso:

In the mineral recovery industry by flotation the characterization of mineral surfaces is a key step during the search for more efficient recovery process. Recent studies have shown interest in the use of seawater as an alternative to reduce the use of potable water in hydrometallurgy plants. Contact angle measurement is a standard technique to characterize solid surfaces in contact with fluids. Mainly two fluids, gas and water, are involved during flotation processes, which are in contact with the mineral to recover (Drelich, 1997; Chau et al., 2009). The contact angle was measured on a mineral surface of pyrite using an optical tensiometer. Either deionized water or seawater was used as the fluid phase. Among the reagents used are Sodium Isobutyl Xanthate (SIBX) as a collector and Methyl Isobutyl Carbinol (MIBC) as a frother. The objective of this work is to characterize the wettability of seawater in conditions close to those used by the mining industry during the flotation of minerals (Lopez-Valdivieso, 2004; Koval, 2014). The conditions of pH, concentration of the collector and the foaming agent were varied, both in the case of deionized water and seawater. The main results show a higher contact angle at a pH 5 for seawater in the presence of collector and froth. This should be reflected in a higher recovery of pyrite by flotation as it makes it more hydrophobic and thus improves its adhesion to the bubble to be recovered through the foam that is formed. The present research shows a relevant impact in topics such as Water in the Industry because it shows a viable alternative to reduce the amount of potable water used in the mining industry.

Keywords: Seawater; contact angle; pyrite; MIBC frother; Xanthate



Figura 6.4 Constancia 2 de participación en el 5th Young Water Professionals Conference.

REFERENCIAS.

- [1] Wills, B. A., *Mineral Processing Technology*. Elsevier Science & Technology, 2006.
- [2] Bravo, A. C., *Manual de flotación, Planta concentradora*, Empresa minera los Quenuales S.A., 2004. <https://es.slideshare.net/ZathexKaliz/162775688>. [Consulta: 15 de Mayo 2017].
- [3] Gaudin, A. M., *Flotation: A.M. Gaudin memorial volume*. Edited by M. AMERICAN INSTITUTE OF MINING, AND PETROLEUM ENGINEERS, 1976.
- [4] Salager, J. L. and Forgiarini, A., *Fundamentos de la flotación. Cuaderno FIRP S335-A*. Universidad de los Andes, 2007. Versión #3.
- [5] Leja, J., *Surface Chemistry of froth flotation*, 2004.
- [6] Bayron, C. C., *Estudio comparativo de la activación de piritas en flotación de minerales a nivel industrial y de laboratorio usando la técnica de espectroscopía fotoelectrónica de rayos x (XPS)*. Universidad de Chile, 2014.
- [7] Naranjo, G. D., Tesis de maestría, *Flotación directa de oro nativo grueso como sustituto de la amalgamación tradicional*, Universidad nacional de Colombia, Escuela de materiales, 2012.
- [8] Grant, F. D., *Investigation of Hallimond tube flotation of low grade phosphate material*, Minerals Research Laboratory, Book 212, 1996. p. 66-29.
- [9] Matis, K. A., Mavros, P. and Kydros, C.A., *Dissolved-air flotation microcell for floatability tests with particulate systems*. Laboratory of General and Inorganic Chemical Technology, Department of Chemistry Aristotle University, Thessaloniki, Greece, vol. 1. 1991. p. 255-258.
- [10] Fuerstenau, M. C. *Froth Flotation a century of innovation*. Edited by C.S.F.M. LITTLETON, METALLURGY, AND EXPLORATION, 2007.
- [11] Nguyen, A. V., *Colloidal Science of Flotation*. Edited by M. DEKKER., 2004.
- [12] Guerrero, G. N., Tesis de maestría, *Metodología de evaluación y remoción de xantatos en procesos de flotación*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima Perú, 2010.
- [13] Konopacka, Z., Drzymala, J. *Types of particles recovery-water recovery entrainment plots useful in flotation research*. Adsorption, 2010. p. 313-320.
- [14] Kirjavainen, V.M. *Application of a Probability Model for the Entrainment of Hydrophilic Particles in Froth Flotation*. International Journal of Mineral Processing, 1989. 27: p. 64-74.
- [15] Kirjavainen, V.M. *Review and analysis of factors controlling the mechanical flotation of gangue minerals*. International Journal of Mineral Processing, 1996. 46: p. 21-34.

- [16] Lynch, A.J., Johnson, N.W., Manlapig, E.V. and Thorne, C.G. *Mineral and Coal Flotation Circuits: Their Simulation and Control*. Elsevier Publishing, Amsterdam, 1981. p. 291.
- [18] Trahar, W.J., and Warren, L.J. *The floatability of very fine particles*, A review. *International Journal of Mineral Processing*, 1976. p. 103–131.
- [19] Scheludko, A., Toshev, B. V., and Bojadjev, D.T. *Attachment of particles to a liquid surface - Capillary theory of flotation*. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, 1976. I (12): p. 2815.
- [20] King, R.P., Hatton, T.A., and Hulbert, D.G. *Bubble loading during flotation*. *Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, Section C*, 1974. p. 112–115.
- [21] Deng, M., Thesis of Doctor, *Impact of Gypsum Supersaturated Solution on the Flotation of Sphalerite*, University of Alberta, Department of Chemical and Materials Engineering, 2013.
- [22] Levay, G., Smart, R. S. C. and Skinner, W. M., *The impact of water quality on flotation performance*. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 2001. 101: p. 69-75.
- [23] Pecina, E.T., Uribe, A., Nava, F. and Finch, J.A. *The role of copper and lead in the activation of pyrite in xanthate and non-xanthate systems*. *Minerals Engineering*, 2006. 19: p. 172-179.
- [24] Chandra, A.P., and Gerson, A.R. *A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite*. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009. 145: p. 97-110.
- [25] Laajalehto, K., Leppinen, J.O., Kartio, I. and Laiho, T. *XPS and FTIR study of the influence of electrode potential on activation of pyrite by copper or lead*. *Colloids and Surfaces*, 1999. 154: p. 193-199.
- [26] Leppinen, J.O. *FTIR and flotation investigation of the adsorption of ethyl xanthate on activated and non-activated sulfide minerals*. *International Journal of Mineral Processing*, 1990. 30: p. 245-263.
- [27] Wong, G., Lascelles, D. and Finch, J.A. *Quantifying accidental activation. Part II. Cu activation of pyrite*. *Minerals Engineering*, 2002. 15: p. 573-576.
- [28] Pecina, E.T., Uribe, S. A. and Nava, A. F., *Effect of dissolved oxygen and galvanic contact on the floatability of galena and pyrite with Aerophine 3418A*. *Minerals Engineering*, 2003. 16: p. 359-267.
- [29] Finkelstein, N.P. *The activation of sulphide minerals for flotation: a review*. *International Journal of Mineral Processing*, 1997. 52: p. 81-120.

- [30] Peng, Y., Wang, B. and Gerson, A. *The effect of electrochemical potential on the activation of pyrite by copper and lead ions during grinding*. International Journal of Mineral Processing, 2012. p. 102-103, 141-149.
- [31] Weisener, C. and Gerson, A. *An investigation of the Cu(II) adsorption mechanism on pyrite by ARXPS and SIMS*. Minerals Engineering, 2000. 13(13): p. 1329-1340.
- [32] Fornasiero, D. and Ralston, J. *Effect of surface oxide/hydroxide products on the collectorless flotation of copper activated sphalerite*. International Journal of Mineral Processing, 2006. 78: p. 231-237.
- [33] Dávila, P. G., Uribe, S. A. and Nava A. F. *Revisiting the Chemistry and Kinetics of Sphalerite Activation with Cu(II): A Contact Angle Study*. The Open Mineral Processing Journal, 2012. 5: p. 1-5.
- [34] Prestidge, C. A., Skinner, W. M., Ralston, J. and Smart, R. St. C., *Appl. Surf. Sci.*, 1997, p. 333-344.
- [35] Duarte, A. C. P. and Grano, S.R., *Miner. Eng.*, 2007. p. 766-775.
- [36] Azapagic, A. *Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry*, Journal of Cleaner Production, 2004. 12: p. 639-662.
- [37] Drelich, J. (Ed.). *Water in Mineral Processing*, SME, Englewood, Colorado, USA. 2012.
- [38] Cho, Y.S., Laskowski, J.S. *Bubble coalescence and its effect on dynamic foam stability*. Can. J. Chem. Eng., 2002. 80: p. 299-305.
- [39] Manono, M.S., Corin, K.C. and Wiese, J.G., *The effect of ionic strength of plant water on foam stability: A 2-phase flotation study*, Minerals Engineering, 2013. 40: p. 42-47
- [40] Weissenborn, P.K. and Pugh, R.J., *Surface tension and bubble coalescence phenomena of aqueous solutions of electrolytes*. Langmuir, 1995. 11: p.1422-1426.
- [41] Castro, S. and Laskowski, J.S, *Froth Flotation in Saline Water*. KONA Powder and Particle Journal, 2011. 29: p. 4-15.
- [42] Pugh, R.J., Weissenborn, P. and Paulson, O., *Flotation in inorganic electrolytes: the relationship between recovery of hydrophobic particles, surface tension, bubble coalescence and gas solubility*. Int. J. Miner, Process. 1997. 51: p. 125-138
- [43] Moreno, P.A., Cuevas, H. J., Monardes, A., Adaro, M., Norgate, T. and Bruckard, W., *The use of seawater as process water at las luces copper-molybdenum beneficiation plant in Taltal (Chile)*, Minerals Engineering, 2011. 24: p. 852-858.
- [44] Wang, B., Peng, Y., *The effect of saline water on mineral flotation-a critical review*, Minerals Engineering, DOI. 2014.

- [45] Pacheco, G. L. A. and Durán, D. B., M.C. *Uso del agua en la industria minera. Parte 1: Balances de materia en una empresa cooperante / Water reuse in the mining industry. Part 1: Mass balances in a cooperating industry.* Tecnol. Ciencia Ed.(IMIQ, México). 2006. 21: p. 96-103.
- [46] Pacheco, G. L. A. and Durán, D. B., M.C. *Uso del agua en la industria minera. Parte 2: Estudio de opciones para reciclar el agua de proceso.* Tecnol.Ciencia Ed. (IMIQ). 2007. 22: p. 15-29.
- [47] Espinosa G., R., Finch, J. A., and Laplante, A. R., *Effects of the type of water on the selective flotation of pyrochlore from niobec.* Colloids and Surfaces 1987. 26: p. 333-350.
- [48] Ikumapayi, F., Makitalo, M., Johansson, B. and Rao, K. H., *Recycling of process water in sulphide flotation: Effect of calcium and sulphate ions on flotation of galena.* Minerals Engineering 2012. 39: p. 77-88.
- [49] Rao, S.R. and Finch, J.A. *A review of water re-use in flotation.* Minerals Engineering. 1988. 2: p. 65-85.
- [50] Bernárdez, A. 2005. *El agua en cifras.* Consulta a las redes internacionales. http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones/revista/revista_5/amaya.htm. [Consulta el 15 de mayo del 2017.]
- [51] Dávila, G. I. and Uribe, S. A., *Effect of calcium, sulphate and gypsum on copper-activated and non-activated sphalerite surface properties.* Minerals Engineering, 2014, Volume 55: p. 147-153.
- [52] Deng M, Liu, Q. and Xu, Z., *Impact of Gypsum Supersaturated Water on the Uptake of Copper and Xanthate on Sphalerite,* Minerals Engineering, 2013. 49: p. 165-171.
- [53] Birkholz, M. *Principles of X-ray Diffraction. In Thin Film Analysis by X-Ray Scattering.* Wiley-VCH, 2006. p. 1, 2.
- [54] Thermo, N. C. *Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry.* <http://mmrc.caltech.edu/FTIR/FTIRintro.pdf>. [Consulta: 15 de mayo 2017].
- [55] Schweitzer, J. *Scanning Electron Microscope.* <http://www.purdue.edu/rem/rs/sem.htm>. [Consulta: 15 de Mayo 2017].
- [56] Sandoval, L. Y. and Palacios, M. L. *Potencial Z como una herramienta para determinar la aglomeración de las partículas en la reducción del volumen del lodo a disponer.* <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicon/R-0150.pdf>. [Consulta: 15 de Mayo 2017].

[57] Monge, M. O. and Guerrero, G. P. *Capacidad de adsorción del cobre utilizando un consorcio bacteriano aislado del río San Pedro, Sonora*. XXVIII Convención Mineral Internacional, AIMM GC, 2009. p. 464-470.

[58] Bárcena, R. J. A. and Fernández, R. E., *Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*, Departamento de Bioquímica y Biología Molecular, 2009.

[59] Gunnar, N. *Materiales: Propiedades Químicas y Toxicidad*. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. p. 1-76
https://www.academia.edu/30200605/METALES_PROPIEDADES_QUIMICAS_Y_TOXICIDAD. [Consulta: 15 de Mayo 2017].

[60] Bowel, R.J. Sulphate and salt minerals: *The problem of treating mine waste*. Mining environmental Management. 2000.