



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“OBTENCIÓN DE ESPODUMENA A PARTIR DE PEGMATITAS
MEXICANAS MEDIANTE FLOTACIÓN”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

JOSÉ ARMANDO MOLINA FLORES

MÉXICO, CDMX. 2024





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado Asignado:

Presidente: Prof. Huerta Cerdán Antonio
Vocal: Prof. Juárez Sánchez Faustino
Secretario: Prof. De la Rosa Canales Juan Manuel
1er. Suplente: Prof. Vela Avitua Andrés
2do. Suplente: Prof. Barrera Godínez José Antonio

Sitio en donde se desarrolló el tema:

- Laboratorio L-6D, Beneficio de Minerales, Edificio D, Facultad de Química, U.N.A.M.
- Instituto de Geología , U.N.A.M.

Asesor: _____

Dr. Juárez Sánchez Faustino

Sustentante: _____

José Armando Molina Flores

RESUMEN

La minería extractiva se caracteriza por emplear varios procesos para el beneficio de minerales y materiales de valor económico. En la industria de la concentración la flotación es notablemente usada, para la separación de lo deseado y de valor. Todo esto dependiendo de la naturaleza en la que se encuentran los minerales (de acuerdo con su composición química y estructura interna) o los materiales (siendo estos subproductos de un proceso y/o reciclaje); ya que de esto se precisa la forma y manera de trabajarlos para su obtención.

En este trabajo se presenta un estudio de la roca pegmatita, con la finalidad de obtener el mineral espodumena, realizando procedimientos de conminución, beneficio, concentración y análisis químico; para lo cual se propuso un diseño de experimento usando variables tales como: temperaturas de trabajo, espumantes, pH y reactivos químicos para poder obtener la espodumena mediante el proceso de la flotación.

Todas las muestras fueron sometidas a pruebas de trituración, molienda, siguiendo con la flotación de estas. Posteriormente fueron analizadas vía espectroscopia de absorción atómica (EAA).

Además se observó la influencia que tuvo cada uno de los activadores usados, respecto a las variables propuestas durante la experimentación.

ÍNDICE	
Resumen.....	ii
Índice de Figuras.....	v
Índice de Tablas.....	vii
Introducción.....	1
<i>Hipótesis</i>	2
<i>Objetivos</i>	2
Capítulo 1. Antecedentes.....	3
1.1 Marco Histórico.....	3
1.2 Litio, consideraciones generales y tendencias de grupo.....	4
1.3 Metalurgia extractiva; yacimientos de litio.....	5
1.4 Yacimientos minerales en México.....	6
1.5 Marco nacional y sector industrial.....	8
1.6 Roca.....	9
1.6.1 Pegmatita.....	10
1.7 Mineral.....	11
1.7.1 Espodumena:.....	12
Caracterización de las partículas.....	14
1.8 Trituración.....	15
1.9 Molienda.....	16
1.10 Flotación.....	18
Principios de flotación.....	19
Modificación y acondicionamiento (Angulo de contacto; Mojabilidad y Flotabilidad).....	20
1.11 Agentes de Flotación.....	22
1.11.1 Colectores.....	22
1.11.2 Espumantes.....	25
1.11.3 Depresores.....	28
1.11.4 pH.....	29
1.11.5 Activadores.....	30
1.12 Espectroscopia de Absorción Atomica.....	30
1.13 Espectroscopia de Emisión Atomica.....	32
Capítulo 2. Desarrollo Experimental.....	34
2.1 Metodología.....	35

2.1.1. Caracterización mineralógica, química y física de la Pegmatita.....	35
2.1.2 Trituración.....	36
2.1.3 Molienda	37
2.1.4 Flotación	38
2.1.5 Espectrometría de absorción atómica EAA	46
Capítulo 3. Resultados	48
3.1 Caracterización mineralógica, química y física de la Pegmatita.....	48
3.2 Trituración.....	51
3.3 Molienda	55
3.4 Flotación	57
3.5 Espectroscopia de absorción atómica EAA	59
3.6 Balance metalúrgico.....	61
3.7 Efecto de la temperatura en los porcentajes de recuperación y ley de Li	63
Capítulo 4. Discusión de resultados.....	64
4.2 Trituración.....	64
4.3 Molienda	64
4.4 Flotación	65
4.5 Espectroscopia de absorción atómica EAA	67
4.6 Balance metalúrgico.....	68
Capítulo 5. Conclusiones	69
Bibliografía	70
Apendice I. Calculos.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proyectos de litio en México ^[11]	7
Figura 2. Clases de rocas, suelos y potenciales yacimientos de litio ^[3]	10
Figura 3. Pegmatita “El muerto” estado de Oaxaca.....	11
Figura 4. Estructuras cristalinas de la espodumena; (a) α - espodumena, (b) β - espodumena, (c) γ - espodumena. Rojo: oxígeno. Amarillo: silicio. Azul: aluminio. Verde: litio ^[12]	12
Figura 5. Transiciones existentes dentro del sistema espodumena (por encima de 900 °C, siendo irreversibles) ^[12]	14
Figura 6. Esquema de una celda de flotación ^[15]	18
Figura 7. Principios de la flotación ^[8]	19
Figura 8. Sistema de flotación diferencial o selectiva ^[15]	20
Figuras 9A, 9B. Ángulo de contacto entre las burbujas y la partícula. ^[6]	21
Figura 10. Representación esquemática de un tensoactivo y una micela ^[15]	22
Figura 11. Mecanismos de colección ^[15]	23
Figura 12. Colectores; donde R representa una cadena hidrocarbonada de longitud o configuración espacial variable ^[8]	24
Figura 13A, 13B. Formación de burbuja (A); Efecto Marangoni (B).....	27
Figura 14. Schulze; procesos involucrados en la formación del agregado mineral y burbuja.....	28
Figura 15. Transición energética del átomo.....	31
Figura 16. Diagrama de nivel de energía de concha de valencia para sodio. Con las longitudes de onda correspondientes a varias transiciones.....	32
Figura 17. Diagrama de desarrollo experimental.....	34
Figura 18. Determinación del tamaño de partícula por cribado.....	37

Figura 19. Equipo de conminución, trituradora primaria, molinos.....	38
Figura 20. Preparación de los reactivos para la flotación.....	41
Figura 21. Secuencia de flotación temperatura 25°C (A, B, C, D)	43
Figura 22. Secuencia de flotación temperatura 86°C (A, B, C, D)	45
Figura 23. Proceso de espectroscopia de absorción atómica (EAA).....	46
Figura 24. Determinación experimental de la densidad de la pegmatita.....	48
Figura 25. Prueba de raya a la pegmatita.....	49
Figura 26. Prueba de dureza a la pegmatita (escala de mohs)	49
Figura 27. Prueba de reactividad a la pegmatita.....	50
Figura 28. Prueba de flama a la pegmatita.....	50
Figura 29. Pegmatita en resina, nícoles paralelos, sin polarizador, campo claro 40X.....	51
Figura 30. Trituración primaria muestra 1 %Ac (-) vs Tamaño (ηm).....	52
Figura 31. Trituración primaria muestra 2 %Ac (-) vs Tamaño (ηm).....	53
Figura 32. Trituración primaria muestra 3 %Ac (-) vs Tamaño (ηm).....	54
Figura 33. Porcentaje acumulados negativos relacionados al tamaño de liberación 280 (ηm).....	56
Figura 34. Determinación del tiempo óptimo de molienda a 280 (ηm).....	56
Figura 35. Curva de calibración de (EAA).....	59
Figura 36. Efecto de la temperatura (25°C) en el porcentaje de ley Li y porcentaje de recuperación obtenidos en la experimentación.....	63
Figura 37. Efecto de la temperatura (86°C) en el porcentaje de ley Li y porcentaje de recuperación obtenidos en la experimentación.....	63
Figura 38. Tamaño de liberación observado de la pegmatita (molienda).....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables usadas en las flotaciones.....	40
Tabla 2. Modelo de flotación a temperatura 25°C.....	42
Tabla 3. Modelo de flotación a temperatura 86°C.....	44
Tabla 4. Muestras de trituración.....	51
Tabla 5. Análisis granulométrico muestra 1.....	52
Tabla 6. Análisis granulométrico muestra 2.....	53
Tabla 7. Análisis granulométrico muestra 3.....	54
Tabla 8. Valores de work index.....	55
Tabla 9. Análisis granulométricos de molienda a 4 minutos.....	55
Tabla 10. Análisis granulométricos de molienda a 8 minutos.....	55
Tabla 11. Material recolectado vía flotación con el activador NaOH.....	57
Tabla 12. Material recolectado vía flotación con el activador Na ₂ S.....	58
Tabla 13. Balance metalúrgico vía flotación temperatura 25°C.....	60
Tabla 14. Balance metalúrgico vía flotación temperatura 86°C.....	60
Tabla 15. Concentraciones obtenidas para el activador NaOH.....	61
Tabla 16. Concentraciones obtenidas para el activador Na ₂ S.....	62

INTRODUCCIÓN

El término pegmatita fue creado por Haüy en 1801 para designar una roca, en la cual el feldespatos alcalino tiene intercrecimientos de cuarzo con el aspecto de los granitos gráficos. Sin embargo, en la actualidad se designa por pegmatita a una roca de grano muy grueso, de origen ígneo o metamórfico y de cualquier composición como es: ultramáfica, gabroica, sinítica o granítica, siendo esta última la más común [19].

En la actualidad México cuenta con un considerable potencial de reservas minerales, uno de estos es el complejo Oaxaqueño, donde se encuentran diferentes pegmatitas, que contienen elementos radioactivos, entre ellas está la pegmatita “El Muerto”. Esta pegmatita se localiza al noroeste de la ciudad de Oaxaca.

En la corteza terrestre hay minerales de valor económico en bajas proporciones formando yacimientos, y dadas esas condiciones no es viable pretender extraerlos directamente del yacimiento; en el caso de los materiales, ser subproductos de un proceso o material de reciclaje, pudiendo ser recuperados de manera más económica, si se lograsen separar los minerales o materiales de valor de los que son ganga, mediante procesos físicos de concentración haciendo posibles y costeables los posteriores procesos de extracción [6].

En la actualidad la minería del litio se ha convertido en una actividad extractiva importante y en aumento a nivel mundial, dado por un cambio progresivo y una sustitución de combustibles fósiles, aunado a la creciente demanda tecnológica para lo que es usado. Esta demanda se atribuye a las distintas necesidades humanas, ya que estas determinan las fluctuaciones de los precios a nivel internacional y hacen que el valor agregado del litio aumente [11].

No sería exagerado afirmar que se están dando pasos decisivos y considerables para la utilización; y las posibles aplicaciones del litio que se verán reflejados en los intereses más importantes de la economía, la industria y la política a nivel mundial. Ya que el litio seguirá posicionándose cada vez más en el mercado.

HIPÓTESIS

La composición química de las pegmatitas indica que existe una diferencia en propiedades físicas como la densidad y la mineralogía, dentro de su composición química contiene litio, sin embargo, la génesis de estos minerales produce composiciones diferentes dependiendo de su ubicación geológica, entonces realizando un procesamiento de separación y concentración mediante flotación a temperatura controlada del mineral espodumena contenido en la pegmatita se sabrá si es posible obtener concentrados de litio y por lo tanto considerar a este tipo de pegmatitas como una fuente probable de litio.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Determinar mediante análisis químico y metalúrgico la factibilidad de considerar a la pegmatita de Oaxaca como una fuente de Litio.

Objetivos particulares:

Aplicar la temperatura en el proceso de flotación como una variable que permita obtener concentrados de litio.

Determinar la influencia de los colectores de alto peso molecular en la flotabilidad de litio.

Determinar la influencia de los activadores en la separación de la espodumena a partir de las fracciones de pegmatita.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 MARCO HISTÓRICO

El químico sueco Johan August Arfwedson en 1817, descubrió el litio, lo individualizó para así señalar que dicho elemento provenía de un mineral; aunque el litio fue descubierto en 1817, debido a su analogía con dos de su grupo (sodio y potasio) fue sólo hasta 1818 que Humphry Davy y William Thomas Brande consiguieron aislar el elemento mediante electrólisis del óxido de litio. Hacia 1855, Robert Bunsen y Augustus Matthiessen consiguieron obtener litio en grandes cantidades, mediante la electrólisis del cloruro de litio, en un pequeño crisol de porcelana, usando para ello un fino hilo de hierro como cátodo y una varilla de carbón como ánodo. Ya en 1898, en Estados Unidos se inició la producción comercial de minerales de litio con el envío de 30 toneladas de espodumena proveniente de la mina Etta localizada en Dakota del Sur, y en 1923, en Alemania, comenzó la producción comercial de litio para la fabricación de lubricantes [10].

El litio surge como un recurso estratégico en la industria militar, sin embargo; fue en los años ochenta cuando se logró el avance significativo con el desarrollo de las primeras baterías recargables de iones de litio. Este hito marcó un cambio en la dirección de la investigación, alejándose de la aplicación militar y abriéndose a otras; dando como resultado nuevos productos y dejando obsoletos otros con el paso del tiempo. Entre los productos innovadores se encuentran reproductores MP3, cámaras digitales, celulares y computadoras portátiles con procesadores más potentes entre otros. Para 2017 el uso de litio era participe en varios sectores; en medicina representaba 3%; en polímeros, 3%; para el aire acondicionado, 4%; para la metalurgia, 17%, para grasas lubricantes, 13%; para cerámicas y vidrios, 20%; y especialmente en baterías con un 40% [10].

1.2 LITIO, CONSIDERACIONES GENERALES Y TENDENCIAS DE GRUPO

El átomo de litio posee un solo electrón de valencia, siendo este el primer miembro del grupo I, los cuales se caracterizan por tener un solo electrón en un orbital *s* más allá de la capa central electrónica tipo gas noble; su bajo potencial de ionización del litio (5.39 electro voltios) indica que la formación del ion Li^+ es un proceso relativamente fácil; este ion existe como tal en sales cristalinas, mientras que en solución se encuentra altamente solvatado representándolo en agua como $\text{Li}^+_{(\text{aq})}$. También puede formar uniones covalentes, debido a este tipo de comportamiento covalente, algunos compuestos son volátiles y solubles en solventes no polares. Su poder polarizante del Li^+ es mayor que el de todos los iones alcalinos y hace que el ion posea una tendencia particularmente grande a solvatare y formar uniones covalentes [7].

Debido a su alto potencial de reducción resulta imposible aislar el metal mediante la electrólisis de soluciones acuosas de sus sales. En cambio, se puede obtener por electrólisis de una sal fundida, generalmente LiCl o por electrólisis en piridina, etanol o acetona.

El litio metálico cuenta con ciertas características: blando, blanco plateado, y mucho menos reactivo que otros metales alcalinos. Siendo su densidad de 0.53 g/cm^3 y posee el mayor de los puntos de fusión y ebullición, 179° y 1317° de todos los metales alcalinos; también se puede mencionar que posee un calor específico extraordinariamente alto ($0.784 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ a 0°). Se disuelve en amoníaco líquido y en otras aminas, verbigracia, etilamina para dar soluciones azules conductoras de corriente. El mineral de litio más importante es la lepidolita y la espodumena; en la naturaleza se encuentran dos isótopos del Li: ${}^6\text{Li}$, 7.30% y ${}^7\text{Li}$, 92.7% [7].

1.3 METALURGÍA EXTRACTIVA; YACIMIENTOS DE LITIO

“La metalurgia extractiva es la rama de la metalurgia que se puede definir como el área de conocimiento de la metalurgia que estudia los métodos físicos y químicos necesarios para tratar una mena mineral o un material que se va a procesar de tal forma que se pueda obtener, a partir de cualquiera de ellos, el metal más o menos puro, o algunos de sus compuestos” [2].

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (2017), el litio puede encontrarse en más de 145 minerales diferentes y se presenta en la naturaleza de tres formas: en lagos de salmueras y salares, en sedimentos arcillas, limos y como rocas sedimentarias. Habiendo tres tipos de depósitos por su facilidad y porque son los que tienen mayor concentración de minerales [3]:

Salmueras

- Continentales
- Geotérmicas
- Campos petrolíferos

Sedimentos

- Depósitos de arcilla
- Evaporitas lacustres

Rocas sedimentarias

- Pegmatitas
- Lepidolitas
- Petalita
- Ambligonita

El U.S Geological Survey, Mineral Commodity, Summaries, señala que la producción mundial de litio en 2022 aumentó un 21% (de 107,000 a 130,000 toneladas). Australia con seis explotaciones mineras (mediante procesos de concentración, transformación, lixiviación, purificación, precipitación, y electroquímica) China con tres explotaciones de minerales y dos de salmueras; Argentina y Chile con dos explotaciones de salmuera respectivamente (mediante procesos de concentración por evaporación, transformación, precipitación o formación de un hidróxido mediante agua, y electroquímica) y Brasil una explotación de relaves mineros. Las fuentes de litio a base de salmuera importantes que se encuentran en diversas fases de desarrollo o exploración están en Argentina, Bolivia, Chile, China. Las fuentes de litio mineral que se encuentran en fase de desarrollo o exploración importantes se encuentran en Australia, Bolivia, Chile, China, Brasil, Congo, Nigeria, Zimbabue, México entre otros; siendo estos datos procedentes de informes de empresas y gobiernos [1].

1.4 YACIMIENTOS MINERALES EN MÉXICO

La República Mexicana tiene concentraciones y alineaciones de cuerpos mineralizados. En una correlación de los depósitos metálicos en México se pueden distinguir cinco cinturones metalogénicos. Tres de ellos tienen un rumbo general NW-SE (noroeste – sureste) y han sido denominados: Cinturón Occidental, Cinturón Central y Cinturón Oriental; y los dos tienen una orientación E-W (este – oeste), se les llama Cinturón de Parras y Cinturón Volcánico [3].

En México se reconocen depósitos de tipo

- Epitermal
- Skarn
- Pórfidos
- Sulfuros Masivos Vulcanogénicos:
- Depósitos sedimentario-exhalativos:
- IOCG
- Mississippi Valley
- Capas rojas o Red-beds

- Depósitos de estaño en placeres o asociados a vetas estanníferas en riolitas.
- Depósitos de topacio en Domos riolíticos
- *Pegmatitas de elementos raros: Huitzi y Telixtlahuaca (Oaxaca).*

El Servicio Geológico Mexicano (2017), refiere que desde el año 1979 hasta la fecha se han descubierto al menos 57 ubicaciones con presencia de litio en todo el país. Sin embargo, en su mayoría éstos carecen de capacidad para desarrollarse en el largo plazo por sus bajas concentraciones productivas. Actualmente solo hay 11 yacimientos que presentan viabilidad extractiva a futuro. Si bien en la actualidad no existen esfuerzos notables por el gobierno para llevar a cabo su aprovechamiento ya que ninguno se encuentra en fase de explotación activa [3].

Mapa 1. Proyectos de litio en México

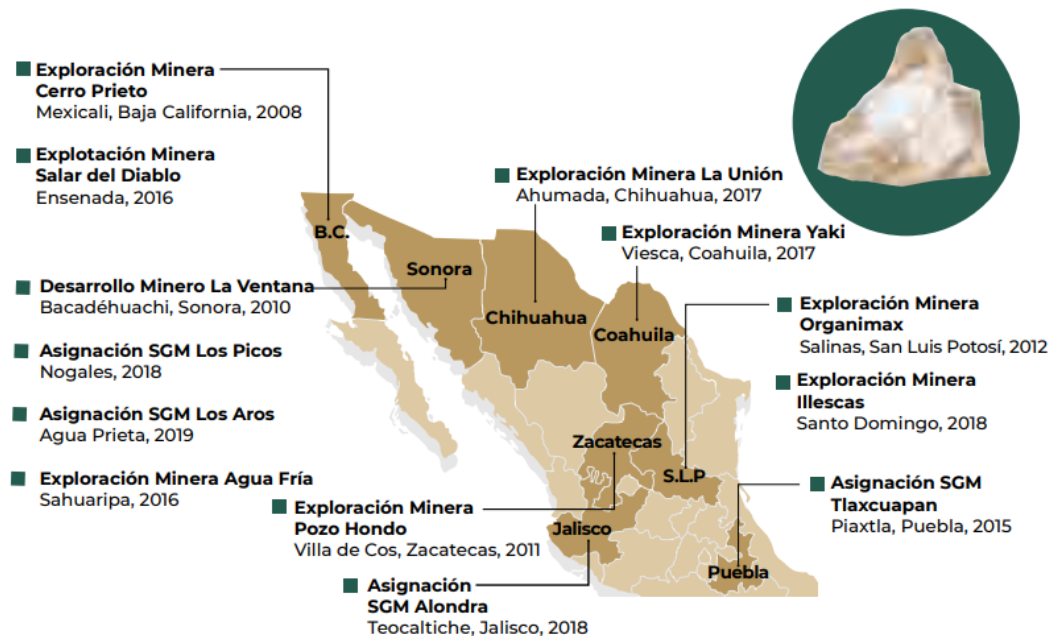


FIGURA 1. PROYECTOS DE LITIO EN MÉXICO [11].

En México hay varios proyectos de aprovechamiento de este recurso que se encuentran en fase de exploración casi en su totalidad por empresas extranjeras (véase Figura 1).

De acuerdo con información disponible del gobierno de México (Secretaría de Economía (SE) y Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2020) y de la Cámara Minera Mexicana (Camimex, 2020) no existe de momento un yacimiento en proceso de explotación, pero de los 11 mencionados hay al menos tres sitios que oficialmente se encuentran en situación de exploración: 1) Salinas en San Luis Potosí, 2) Villa de Cos en Zacatecas y 3) Bacadéhuachi en Sonora. Estos tres lugares representan interés empresarial por su mayor volumen productivo, pero adicionalmente existen otros más pequeños como los son: 1) Alondra en Jalisco, 2) Aros y 3) Picos, estos dos últimos ubicados en Sonora [3] [16].

Otras áreas de depósito no mencionadas previamente también son significativas, y es importante reconocer que aún queda mucho por descubrir, México continúa mostrando un considerable potencial en la industria minera; en gran parte a los avances en la comprensión de los depósitos minerales y su entorno geológico, así como a las metodologías de investigación utilizadas para descubrir nuevos yacimientos.

1.5 MARCO NACIONAL Y SECTOR INDUSTRIAL

En la actualidad existe un interés empresarial en la explotación de estos espacios; notable por las numerosas solicitudes para ampliar las concesiones, así como para acumular otras tantas. Si bien el potencial productivo es evidente, lo cierto es que no se espera ninguna operación importante (dependiendo de las políticas gubernamentales ejercidas por el actual gobierno).

Bacadéhuachi es la reserva más importante y la que genera mayor expectativa por los supuestos de tener una de las mayores concentraciones de este recurso en el mundo; cabe la pena aclarar que hasta el momento no se puede determinar con exactitud si los datos mencionados sobre el tamaño de la reserva de Bacadéhuachi son ciertos o cercanos a la realidad, ya que uno de los depósitos menos productivos de litio es el de arcillas y esa es precisamente la característica de Bacadéhuachi en Sonora [11].

Este depósito no solamente es de baja calidad, superado por otros en América Latina. De acuerdo, a las características de la mina en Bacadéhuachi dificultarían el desarrollo y potencial de este proyecto. El Sistema Geológico Mexicano (SGM) se ha mostrado cauto al adicionar comentarios

ya que existen muchos riesgos, no solamente en la extracción, también en el proceso de obtención del mineral desde la roca, ya que es una cuestión que no se ha podido lograr a nivel comercial en ninguna otra parte del mundo [3].

Lo cierto es que la información disponible sobre la cantidad y calidad de los yacimientos descubiertos y en proceso de exploración siguen siendo insuficientes, debido tanto a los procesos de concesión como a la debilidad estadística que México siempre ha tenido para las actividades extractivas [11].

1.6 ROCA

La roca es un agregado de minerales de varios granos y rara vez es vidrio natural (obsidiana). Formado por minerales y de manera inusual de un solo mineral; el agregado de los minerales de las rocas depende de su composición química y las condiciones distintas que dominaron durante su génesis [6].

La roca es heterogénea, está compuesta de las siguientes formas:

- Compuesta de un solo tipo de mineral: monominerálica, por ejemplo: la piedra caliza compuesta de calcita y la arenisca pura compuesta de cuarzo.
- Compuesta de varios tipos de minerales: poliminerálica, por ejemplo, el granito compuesto principalmente de cuarzo, feldespato, mica y otros minerales en menor cantidad como anfíbol, apatito y circón.

Las rocas pueden presentar varias formas, de las cuales la mayoría son vetiformes o lenticulares, alargados y sin raíces profundas.

Cabe mencionar que en el país se tiene una gran variedad de clases de rocas, así como potenciales yacimientos de litio como se muestra en la Figura 2.

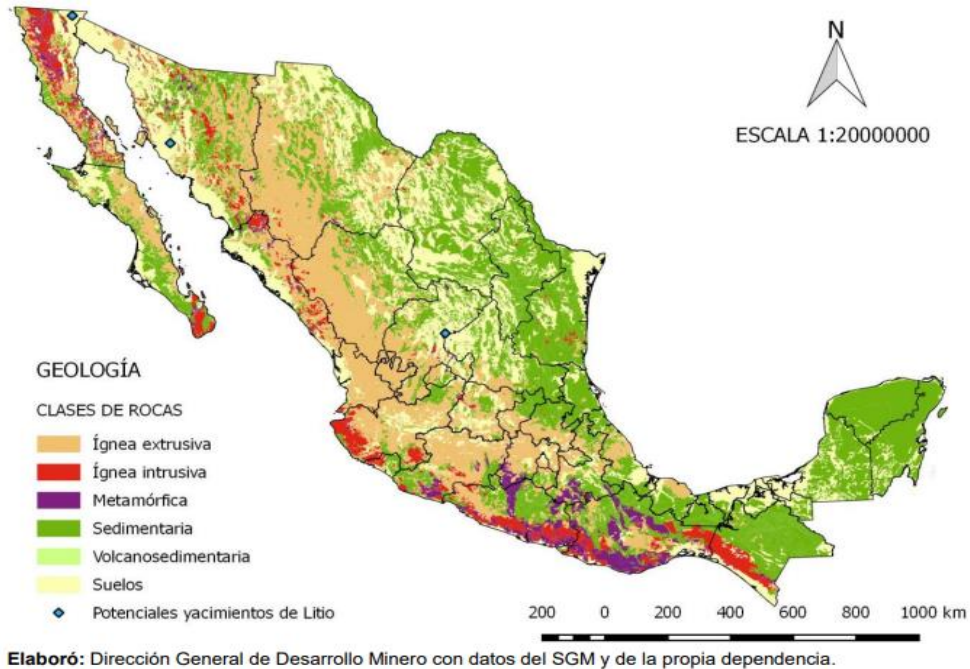


FIGURA 2. CLASES DE ROCAS, SUELOS Y POTENCIALES YACIMIENTOS DE LITIO [3].

1.6.1 PEGMATITA

La formación de la pegmatita es originada por el proceso de cristalización fraccionada, ya que, durante la cristalización del magma en el interior de la corteza terrestre, se producen cambios en la composición química, los cuales se dan de tal manera que no permite el equilibrio entre los cristales formados en las etapas iniciales y el residuo formándose así en la etapa final de la cristalización [5].

Puede contener cantidades extraíbles de un número de elementos, incluyendo litio, estaño, tántalo y niobio, etc. Esta forma de depósito representa el 26 por ciento de los recursos mundiales conocidos de litio; se extrae a través de la explotación de minas a cielo abierto o subterránea, usando las técnicas mineras.

Las pegmatitas son relativamente pequeñas y sus dimensiones pueden variar desde unos pocos metros hasta cientos de metros en longitud y desde 1 cm a 200 m en amplitud [5].



FIGURA 3. PEGMATITA “EL MUERTO” ESTADO DE OAXACA

Existen dos tipos de pegmatitas: (a) graníticas y (b) no graníticas, siendo la espodumena una pegmatita granítica.

Una fuente de litio es la espodumena (grupo piroxeno) que se encuentra contenida en la roca pegmatita (véase Figura 3).

1.7 MINERAL

Son componentes naturales y materialmente individuales de la corteza. Se podría definir que un mineral es un compuesto inorgánico, posee una composición química definida son materialmente homogéneos, pueden ser cristalinos (con estructura atómica ordenada) o amorfos (sin estructura cristalina, por ejemplo, los vidrios naturales). Cabe mencionar que la mayoría de los minerales son cristales.

Los minerales se pueden formar por procesos inorgánicos o mediante la ayuda de organismos por ejemplo azufre elemental, pirita y otros sulfuros pueden ser formado por reducción con la colaboración de bacterias; a veces los minerales forman parte de organismos como la calcita, aragonita, etc [6].

Aunque existen numerosos minerales de tipo lítico, se restringe principalmente a ciertos tipos de rocas como pegmatitas y greisen (rocas ígneas de alteración zonal), así como en arcillas y pizarras donde se ha concentrado debido a procesos de meteorización, el cual es responsable de la presencia de litio en lagos desérticos, salmueras subterráneas y salares de lagos que han quedado desecados.

1.7.1 ESPODUMENA:

La espodumena, ($\text{Li}_2\text{O Al}_2\text{O}_3 4\text{SiO}_2$), estructuralmente es un piroxeno (grupo de silicatos que forman parte de muchas rocas ígneas y metamórficas que consisten en estructuras de cadenas simples de tetraedros de sílice); dentro de su estructura polidráulica de óxido de silicio y óxido de aluminio. Este es el mineral de litio más importante para producir compuestos de litio a partir de la roca pegmatita debido a su contenido significativo de Li_2O ; el mineral se asocia principalmente con cuarzo, albita y trazas de berilio.

Se conocen tres fases conocidas de la espodumena: α , β , γ .; como se puede observar a continuación en la Figura 4.

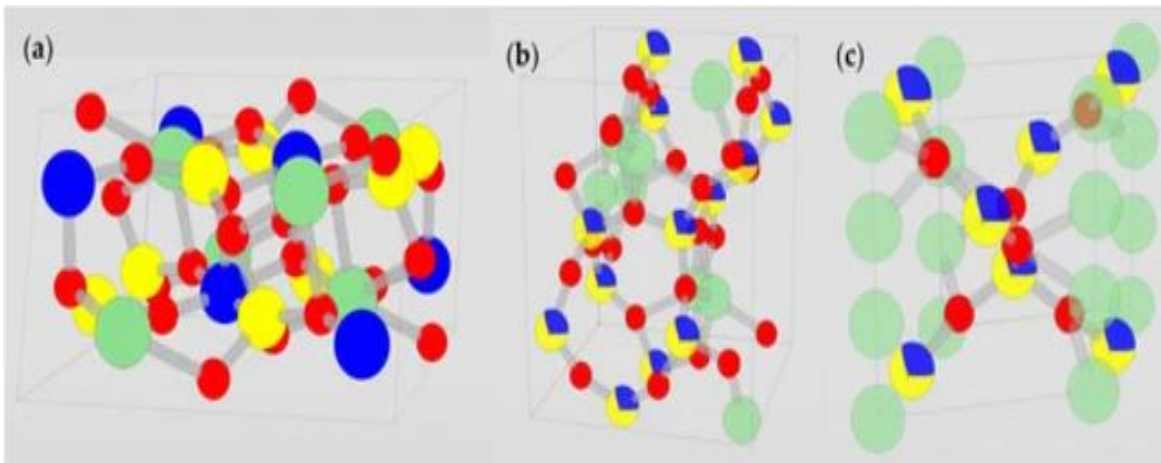


FIGURA 4. ESTRUCTURAS CRISTALINAS DE LA ESPODUMENA; (A) ALFA-ESPODUMENA, (B) BETA-ESPODUMENA, (C) GAMMA-ESPODUMENA. ROJO: OXÍGENO. AMARILLO: SILICIO. AZUL: ALUMINIO. VERDE: LITIO [12].

El α -espodumena natural se asocia con cuarzo y feldespato; tiene la mayor densidad ($3,27 \text{ g/cm}^3$) debido a su estructura cristalina monoclinica, siendo este débilmente reactivo en presencia de ácidos fuertes y, por lo tanto, una práctica común es convertir α en β (que es un alótropo tetragonal menos denso de la espodumena) a través de un tratamiento térmico.

Al fenómeno de transición de fase activada térmicamente se conoce como calcinación o decrepitación ($950\text{--}1100 \text{ }^\circ\text{C}$), lo que da lugar a una red cristalina expansión de β -espodumena (para la energía esta transición es endotérmica) [13].

Las transformaciones de fase que tienen lugar a esta calcinación, muestran que la dislocación de Al^{+3} durante el proceso térmico es responsable de la expansión volimétrica de la estructura cristalina de la espodumena, lo que hace que las especies de litio sean móviles y reactivas con ácidos que están completamente o casi ionizados. A su vez estos estudios han mostrado que la temperatura y el tiempo de residencia son los factores principales para definir la transformación de una fase durante la calcinación de la espodumena [13].

La fase β -espodumena es un alótropo tetragonal menos densamente empaquetado (a través del tratamiento térmico) que el α ; siendo la fase más conocida del sistema, debido a su reactividad hacia la extracción con una densidad (2.374 g/cm^3). Tiene la particularidad de estar presente en el sistema de equilibrio ternario.

La tercera fase es menos conocida y tiene varios nombres diferentes. Se conoce como virgilita o γ -espodumena. Tiene una estructura hexagonal y una densidad (2.399 g/cm^3). Aún no se ha informado de la formación de una muestra de γ -espodumena puro. Dado que el γ -espodumena nunca es puro por el cambio de fase de la que es participe.

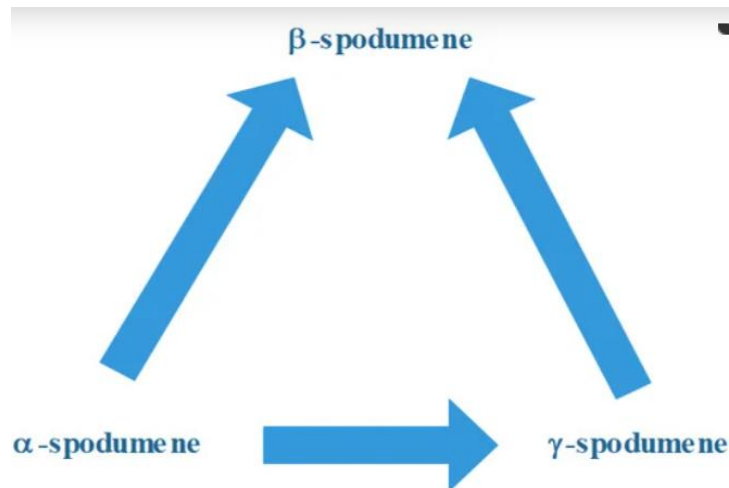


FIGURA 5. TRANSICIONES EXISTENTES DENTRO DEL SISTEMA ESPODUMENA (POR ENCIMA DE 900°C, SIENDO IRREVERSIBLES) [12].

Las transiciones existentes (véase Figura 5) dentro del sistema de espodumena pueden resumirse como: una transición de α -espodumena a β -espodumena ocurre por encima de los 950 °C y es endotérmica. La red cristalina se expande masivamente, durante la transición de fase. Se sabe que el γ -espodumena aparece antes que el β -espodumena, pero es metaestable y pasa a β -espodumena a temperaturas más altas [12].

Si bien la obtención de metales y minerales implica una serie de operaciones dentro de las actividades mineras y metalúrgicas tales como la extracción, la trituración, molienda, flotación; (preparación de mineral), fundición y refinado etc. Todas estas variedades de operaciones lo determinan la naturaleza del mineral y la forma en que se desea o requiere obtener la sustancia mineral, elemento o compuesto.

CARACTERIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS

La evaluación de las características de las partículas es un aspecto vital del procesamiento de minerales. Siendo de suma importancia el uso del tamaño de partícula como una medida de control para los procesos de reducción de tamaño; generalmente la reducción de tamaño se realiza para aumentar el grado de liberación entre las especies minerales contenidas en las rocas. A su vez, la

importancia de la fragmentación también radica en el proceso metalúrgico que prevalece, estrictamente ligado al proceso de beneficio.

Durante la fase de separación, se utiliza el análisis de tamaño de los productos procesados para determinar un rango de tamaño en el que se originan las pérdidas que ocurren en la planta; con el objetivo de establecer un tamaño ideal del proceso que permita alcanzar mayor eficiencia.

El tamaño de partícula se emplea comúnmente para medir el grado de liberación por la relativa facilidad con que se toma la medida. Sin embargo, es importante tener en consideración que las partículas procedentes de cualquier operación de reducción de tamaño tienen una gama de características; que incluyen tamaño individual, así como un tamaño promedio de todas ellas, su forma, la distribución de tamaños, los minerales presentes en las partículas y la agrupación de minerales.

1.8 TRITURACIÓN

Los métodos de reducción de tamaño pueden agruparse de varias maneras, pero como la reducción ocurre en etapas, el tamaño de partículas sería el método primario de agrupamiento; ya que si el cuerpo del mineral es de carácter másivo, el minado o extracción sería considerada la primer etapa de reducción de tamaño.

El grado de reducción de tamaño que se logra por medio de cualquier máquina, se le describe por la relación de reducción, la cual puede definirse en sentido amplio como el tamaño de la alimentación dividido entre el tamaño de producto; siendo la más usada la del 80% del tamaño que pasa de la distribución acumulativa de los mismos [9].

El término trituración se aplica a las reducciones subsecuentes de tamaño hasta alrededor de 25mm, considerándose las reducciones a tamaños más finos como molienda.

Juarez señala que las fuerzas utilizadas en la reducción de tamaño son: la compresión, el cizallamiento, la percusión o impacto y la atricción o abrasión. Si bien la trituración de minerales se efectúa normalmente por compresión simple, ocurriendo su fractura de ellos al llegar a su límite elástico transfiriendo a la superficie de los minerales una fuerza de tal intensidad que permite

traspasar el límite mencionado. Bajo estas condiciones cada que un mineral se tritura hay un consumo de energía proporcional a la nueva superficie producida [6].

Los aparatos utilizados de trituración deben disponer de mecanismos o técnicas para hacer frente a problemas tales:

- Un sistema o técnica antidesgaste.
- Un sistema de regulación de la granulometría del producto.
- Un mecanismo anti-instriturables que garantice la integridad de la máquina.

Para la trituración primaria, su principal objetivo es el reducir el tamaño del mineral que viene de la voladura haciendolo más adecuado para las trituraciones subsecuentes; el tamaño se reduce hasta aproximadamente 100 mm y puede efectuarse en trituradoras de quijada, trituradoras giratorias.

Para la trituración secundaria y terciaria de 100 mm hasta menos de 10 mm puede efectuarse en trituradoras de cono, trituradoras de rodillo.

Tanto la trituración como la molienda pueden subdividirse aún más en etapas primarias, secundarias, y terciarias.

1.9 MOLIENDA

La molienda es la última etapa en el proceso de conminución de las partículas minerales; en esta etapa se reduce el tamaño de las partículas por una combinación de mecanismos de quebrado de impacto y abrasión, ya sea en seco o suspensión en agua. Esto se realiza en recipientes cilíndricos rotatorios de acero que se conocen como molinos de rodamiento de carga, los que contiene una carga suelta de cuerpos de trituración.

Los factores que intervienen en el proceso de la molienda son:

- Tamaño de alimentación (partículas a moler y medio de molienda).
- Movimiento de la carga dentro del molino (mecanismos de molienda).
- Espacios vacíos existentes entre la carga del molino.

El medio de molienda puede ser: bolas o barras de acero, roca dura y en algunos casos, la misma mena (molienda autógena).

En el proceso de molienda, las partículas entre 5 y 250 μm se reducen de tamaño entre 10 y 300 μm . La sobre molienda innecesaria reduce el tamaño de partícula del constituyente mayor sustancialmente liberado (generalmente la ganga) y puede reducir el tamaño de partícula del constituyente menor (generalmente el mineral valioso) por abajo del tamaño necesario para la separación más eficiente.

De esta manera se desperdicia mucha energía costosa en el proceso. Es importante considerar que la molienda es la operación que requiere mayor energía en el procesamiento de minerales [8].

La molienda se puede efectuar en medio húmedo o seco ya que esto depende de circunstancias en la industria; para moverse dentro del molino y pulverizar así las partículas de mena. A continuación, se muestran distintos puntos de la operación:

- Disponibilidad del agua
- La molienda húmeda precisa menos energía por tonelada de mineral tratado (la humedad disminuye la resistencia de los fragmentos).
- La clasificación en medio húmedo exige menos espacio que la clasificación en seco.
- La molienda por vía húmeda no necesita captosres de polvo y existe menos calentamiento de los equipos.
- La molienda por vía húmeda tiene mayor desgaste de cuerpos moledores y blindajes que la molienda por vía seca (debido a la corrosión y oxidación).
- Existen sustancias que reaccionan con el agua, produciéndose cambios físico- químicos.

1.10 FLOTACIÓN

La flotación es un proceso selectivo que se usa para llevar a cabo separaciones específicas de minerales complejos (como por ejemplo, en sulfuros complejos que contienen cobre, plomo y zinc); puede aplicarse a minerales de baja ley y minerales que requieren molienda fina para lograr la liberación. La flotación se ha extendido para incluir los minerales óxidados y los no metálicos, incluyendo el carbón fino [8].

Aunque la flotación es el principal proceso de concentración basado en la química interfacial de las partículas minerales en solución, utiliza las diferencias en las propiedades fisicoquímicas de las superficies de las partículas a separar, específicamente las diferencias en hidrofobicidad [9].

Para ejemplificar lo anterior en la Figura 6 se presenta un esquema de una celda de flotación donde se puede ver a grandes rasgos las partes que interactúan durante este proceso.

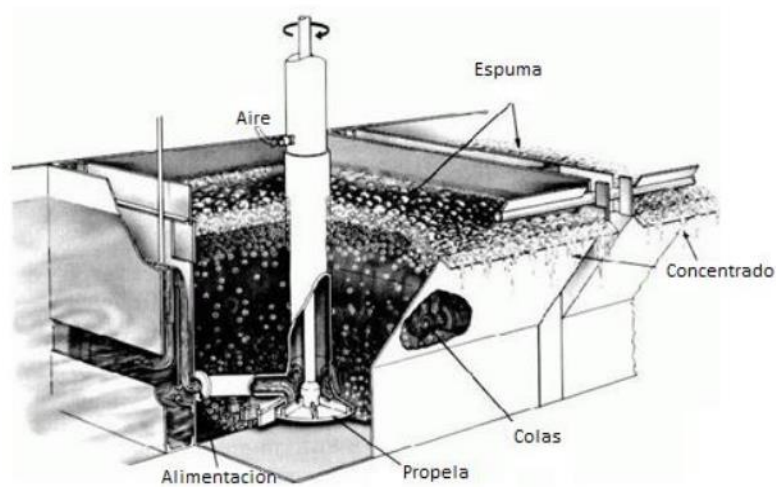


FIGURA 6. ESQUEMA DE UNA CELDA DE FLOTACIÓN [15].

En la flotación se puede fomentar la formación de flujos de material, con diversa composición mineralógica o ley:

- Una alimentación compuesto de ganga y mineral de valor sin separar.
- Un concentrado que presenta un alto contenido de mineral de valor y baja ganga.

- Colas, donde quedan atrapados los residuos del proceso, ganga y especies minerales deprimidas o con alta afinidad por el agua.

PRINCIPIOS DE FLOTACIÓN

La flotación es un proceso de separación físico-químico de tensión superficial que separa los minerales haciendo uso de las propiedades superficiales de los minerales valiosos y los no deseados. La teoría de la flotación por espuma intervienen tres fases (sólidos, líquida y gaseosa) con muchos subprocesos e interacciones [6].

El proceso de recuperación de material por flotación a partir de la pulpa comprende los siguientes mecanismos:

- Adhesión selectiva a burbujas de aire (o "flotación verdadera")
- Arrastre en el agua que pasa a través de la espuma.
- Atrapamiento físico entre las partículas de la espuma adheridas a burbujas de aire (a menudo denominado como "agregación").

Como se observa en la Figura 7 los mecanismos ejemplificados interactúan:

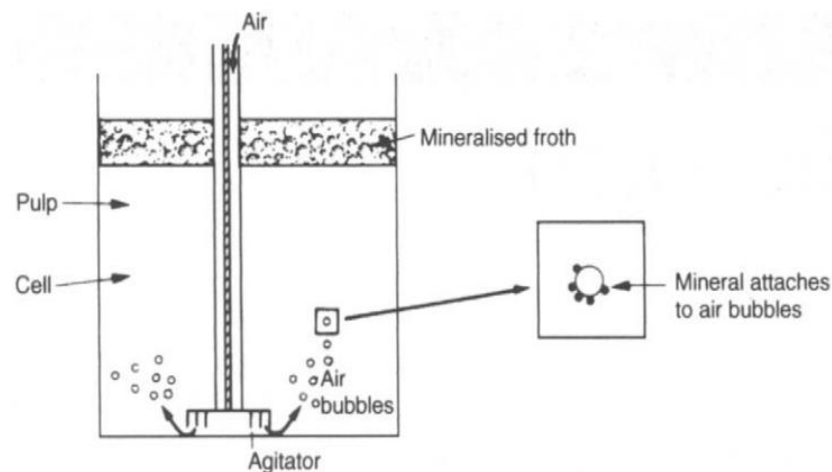


FIGURA 7. PRINCIPIOS DE LA FLOTACIÓN [8].

Los principios de estos mecanismos son apoyados por reactivos químicos que confieren hidrofobicidad o hidrofiliidad a las especies minerales de interés; las diferencias en las propiedades superficiales de los minerales que contiene la pulpa de la flotación son aparentes y para que pueda haber flotación, una burbuja de aire se debe unir a una partícula de mineral y elevarla hasta la superficie del agua [15] . Todo esto se puede visualizar en la Figura 8.

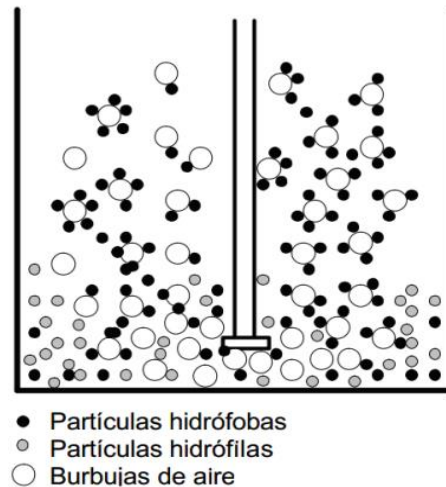


FIGURA 8. SISTEMA DE FLOTACIÓN DIFERENCIAL O SELECTIVA [15].

La adhesión de minerales valiosos a burbujas de aire es el mecanismo más importante y representa la mayor parte de las partículas que se recuperan en el concentrado; todo esto con ayuda de un agitador que proporciona la suficiente turbulencia en la fase pulpa, favoreciendo la colisión de partículas y burbujas provocando la adhesión de partículas valiosas y las burbujas haciendo posible el transporte a la fase espuma para su recolección. Todo esto aplicado a partículas relativamente finas, ya que si son demasiado grandes; la misma adhesión entre partícula y burbuja será menor que el peso de la partícula y esta caera de la burbuja.

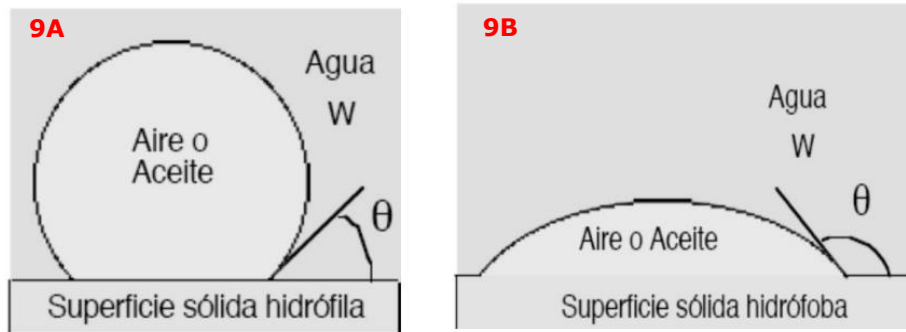
MODIFICACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO (ANGULO DE CONTACTO; MOJABILIDAD Y FLOTABILIDAD)

La modificación de las superficies minerales o el cambio en la composición de la fase acuosa del sistema tiene el propósito de favorecer o inhibir la acción de los colectores sobre la superficie de los minerales. Cuando la adsorción de colector se favorece, el proceso se define como activación y si la adsorción se inhibe se deprime.

La modificación es un pre-requisito para la flotación de complejos mineral- colector, ya que se debe promover sólo la flotación de las especies minerales de interés y no de cualquier especie. También incluye el ajuste del pH y la conservación de complejos mineral- colector o protección. Y en específico como se hizo en este trabajo la adhesión de otras variables como temperatura; pudiendo agregar otras durante el proceso de flotación.

En esta etapa se involucra reacciones químicas selectivas al mineral e interacciones físicas y químicas con el colector, permitiendo un control de los sitios de adhesión del colector sobre el mineral. Pudiendo determinar el estado de la superficie de la partícula y el contenido de iones en la pulpa, para maximizar la selectividad de recuperación, ahorrar tiempo de proceso y disminuir costos.

Cabe mencionar que la actividad de la superficie del mineral en relación a los reactivos de flotación en el agua depende de las fuerzas que operan sobre esa superficie. Ya que cuando una burbuja de aire entra en contacto con una superficie limpia de mineral no se adhiere a la superficie, pero con la ayuda de un reactivo adecuado, el mineral adquiere una cubierta hidrofóbica (antes ya mencionada), y que así la burbuja de aire se puede adherir. Este fenómeno es ilustrado en las siguientes Figuras 9a y 9b (representadas por la ecuación de Young Ec. 1.1).



FIGURAS 9A, 9B. ÁNGULO DE CONTACTO ENTRE LAS BURBUJAS Y LA PARTÍCULA [6].

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde $\gamma_{SG} = \gamma_{SL}$ y γ_{LG} representan las tensiones interfaciales sólido- aire, sólido-líquido y líquido aire θ ángulo de contacto. Definiendo la interfacial como la resistencia que se opone al agrandamiento de una superficie.

Cuanto mayor sea el ángulo de contacto más grande será el trabajo de adhesión entre partícula y la burbuja, siendo el sistema más elástico ante una fuerza de rompimiento. Como resultado la flotabilidad de un mineral aumenta con el ángulo de contacto. Se dice que un mineral con alto ángulo de contacto son aerofílicos, es decir que tienen mayor afinidad por el aire que por el agua.

1.11 AGENTES DE FLOTACIÓN

1.11.1 COLECTORES

A los colectores se les conoce como compuestos orgánicos, moléculas anfifílicas que contienen una región hidrófila (afin al agua), solventes polares y superficies electrónicamente cargadas; solidofílica; con región hidrófoba repelente al agua y afin por los solventes no polares.

Para tener una idea más precisa de cómo funcionan los colectores hay que mencionar a los tensoactivos, en la Figura 10 se muestra una representación de estos:

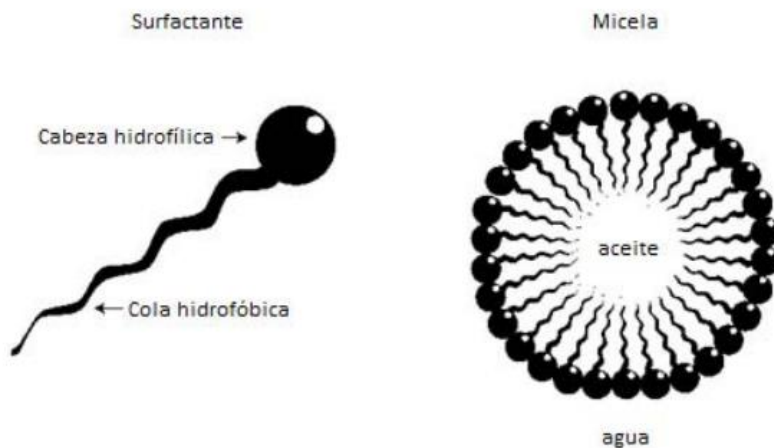


FIGURA 10. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN TENSOACTIVO Y UNA MICELA [15].

Estos agentes tensoactivos convierten a los minerales seleccionados en repelentes al agua por la adsorción de moléculas o iones sobre la superficie mineral, reduciendo la estabilidad de la capa hidratada que separa la superficie mineral de la burbuja de aire, (favorecen la condición hidrofóbica y aerofílica).

Adsorción de colectores se define con el cambio selectivo de la superficie de un mineral resultado de la formación de una capa hidrófoba o repelente al agua sobre la misma. La adsorción crea un recubrimiento hidrófobo sobre la partícula mineral que desea ser separada de la pulpa; para permitir la adhesión de las burbujas a dichas partículas.

Durante este proceso compuestos orgánicos surfactantes, tensoactivos o agentes colectores, son introducidos en pequeñas cantidades al sistema bajo una constante agitación y tiempo de acondicionamiento para favorecer su adsorción y reacción química sobre las partículas minerales a flotar.

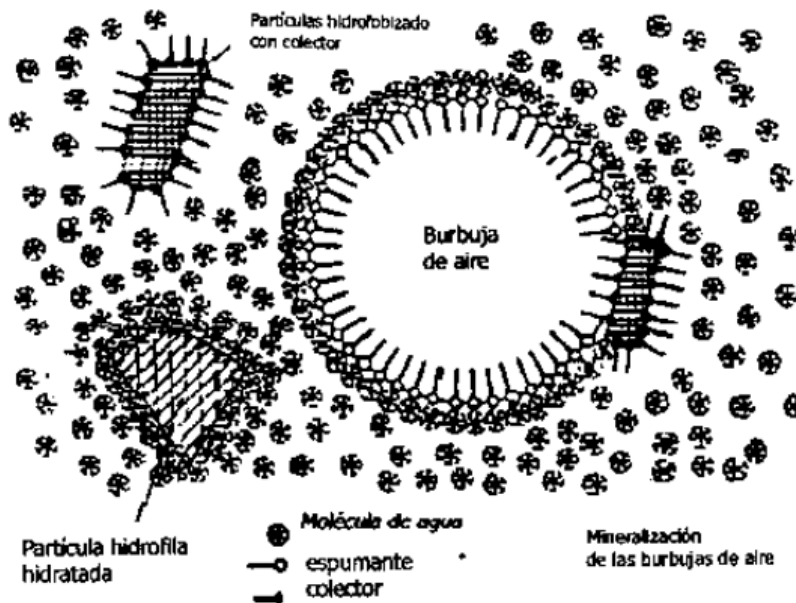


FIGURA 11. MECANISMOS DE COLECCIÓN [15].

Las moléculas colectoras pueden ser compuestos ionizantes, que se disocian en iones en el agua, o compuestos no ionizantes.

- Los colectores no ionizantes son prácticamente insolubles y repelen el agua mineral cubriendo su superficie con una fina película.
- Los colectores ionizantes tienen moléculas complejas que tienen una estructura asimétrica y son heteropolares, es decir, que la molécula contiene un grupo hidrocarburo no polar y un grupo polar que puede ser de varios tipos. El radical hidrocarbonado apolar tiene propiedades hidrofóbicas, mientras que el grupo polar reacciona con el agua.
- Los colectores anfóteros poseen una función catiónica y otra función aniónica, dependiendo del pH de trabajo.

Cabe mencionar que los colectores ionizantes o ionizados a su vez se clasifican en iónicos y catiónicos, en la Figura 12 se puede visualizar como se dividen y se clasifican.

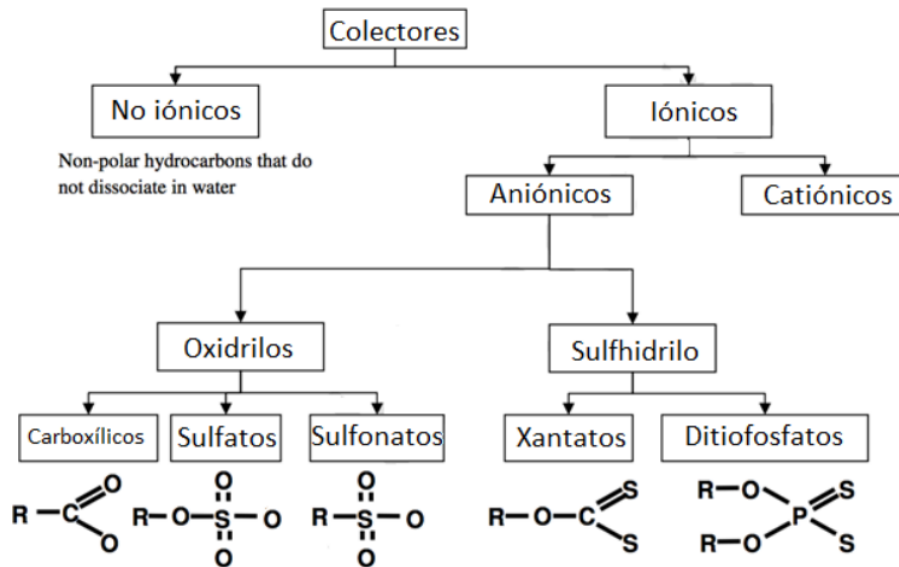


FIGURA 12. COLECTORES; DONDE R REPRESENTA UNA CADENA HIDROCARBONADA DE LONGITUD O CONFIGURACIÓN ESPACIAL VARIABLE [8].

IÓNICOS

Los colectores iónicos se clasifican en dos tipos según la estructura del grupo polar (oxidrídicos y sulfhidrilo). Los colectores oxidrídicos tienen aniones orgánicos y sulfamidas como grupos polares, como en todos los colectores aniónicos, el catión no interviene en la reacción reactivomineral.

Los colectores sulfhidrilo el grupo polar contiene azufre bivalente (compuestos tio). Son muy potentes y selectivos en la flotación de minerales sulfurados.

CATIÓNICOS

La propiedad característica de este grupo es que el catión produce la repulsión al agua cuando el grupo polar se basa en nitrógeno pentavalente, las aminas son las más comunes. Los aniones de tales colectores en general son los haluros y rara vez los hidróxidos, los que no toman parte activa en la reacción con los minerales.

Se considera que las aminas se adsorben sobre la superficie mineral principalmente debido a la atracción electrostática entre la cabeza polar del colector y la doble capa cargada eléctricamente sobre la superficie mineral. Estas fuerzas no son tan fuertes o irreversibles como las fuerzas químicas características de los colectores aniónicos que tienden a ser relativamente débiles en poder colector.

Los colectores catiónicos son muy sensitivos al pH del medio, son más activos en las soluciones ligeramente ácidas e inactivos en medio fuertemente alcalino y ácido. Se emplean para flotación de óxidos, carbonatos y metales de las tierras alcalinas, tales como barita, carnalita y silvita.

1.11.2 ESPUMANTES

El término espuma o froth se refiere a la adhesión de burbujas sobre partículas minerales. En el proceso (flotación), se busca prolongar la vida de las burbujas, desde su formación y su transporte vertical y horizontal hasta la superficie del sistema hidrodinámico turbulento.

Los espumantes (generalmente son reactivos orgánicos de superficie activa heteropolar), alteran la tensión superficial de líquidos. Su estructura les permite agruparse hasta formar otra fase distinta del resto del fluido, formando una espuma que separa el mineral del resto de la ganga. Su función es producir burbujas resistentes de modo que se adhiera el mineral de interés.

Formación de espumas

Si bien el agua pura no hace espuma, por lo que es necesario el uso de agentes externos como cresol, aceite de pino, MIBC (metil isobutil carbinol) entre otros tensoactivos que promuevan la formación de burbujas de aire o espuma con elevada resistencia mecánica.

La espuma se define como una capa de líquido globular enclaustrando vapor o gas. Siendo un sistema análogo a las emulsiones, al formar capas de adsorción que rodea la fase dispersa, resaltando en este caso que, la fase dispersa en las espumas es un gas, mientras que en las emulsiones es un líquido [16].

Los líquidos tienen propiedades que promueven la formación de capas de adsorción que rodea la fase dispersa, en este caso aire, son la viscosidad y la tensión superficial.

Los agentes espumantes o frothers no afectan la viscosidad del agua, pero se concentran en las interfaces entre el agua y los cuerpos de gas introducidos, disminuyendo la tensión superficial del agua y generando un gradiente de tensión que permite la transferencia de masa en la interfase de ambos fluidos, dando lugar a la formación de una esfera hueca o burbuja estable. Éste fenómeno lo representa la ecuación de Gibbs, (Ec. 1.2)

$$\frac{d\sigma}{dc} = -RT \frac{U}{c} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde σ es la tensión superficial, C la concentración, U la cantidad de reactivo adsorbida, R la constante de los gases ideales y T la temperatura absoluta [17].

Esto se ejemplifica con el efecto Gibbs- Marangoni donde:

- (a) Hay una generación de un gradiente de tensión superficial suficiente para formar la burbuja en presencia de tensoactivos; Fig.13 a y b. Estabilización de la burbuja. Estiramiento de la película de espumante, disminución de la concentración y aumento de la tensión superficial en el interior de la burbuja (13 b-arriba); refuerzo selectivo de espumante en zonas débiles de la burbuja, reducción de la evaporación e incremento de la resistencia a las tensiones externas. (13 b-abajo)

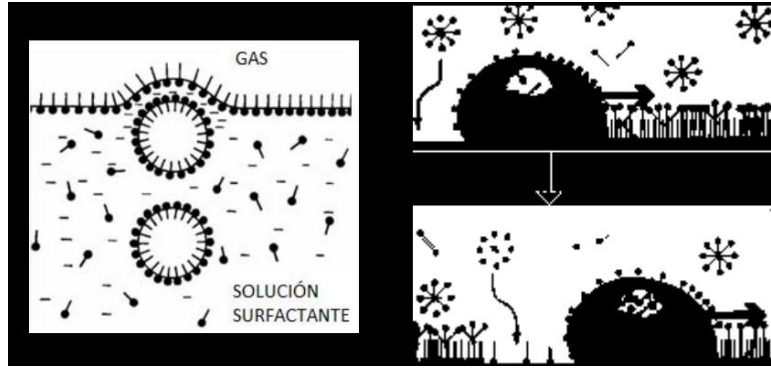


FIGURA 13A, 13B. FORMACIÓN DE BURBUJA (A); EFECTO MARANGONI (B)

Después de la formación de espumas, viene la adhesión de la burbuja a la partícula mineral.

El mecanismo de adhesión de burbuja a la partícula y la espuma (burbujas), está asociada en principio a la hidrofobicidad de la partícula mineral y a un gran número de factores físicos, químicos y mecánicos que rigen dicho fenómeno. Esta adhesión, misma que constituye los criterios para definir la afinidad entre dos fases está representada con la Ec. 1.3

$$\Delta G = W_a = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Donde γ_{LV} representa la energía libre en la interfase vapor/líquido, γ_{SV} es la energía superficial de la interfase sólido/vapor, γ_{SL} la energía superficial sólido/líquido y W_a el trabajo de adhesión.

Existen dos teorías para la adhesión de la burbuja:

- La colisión de las partículas minerales hidrófobas con las burbujas de aire, donde el sólido se une a una partícula de aire.
- La formación o nucleación de burbujas sobre las partículas minerales, resultado de la precipitación del aire disuelto en el agua.

Una teoría más actual, donde se plantea un mecanismo combinado donde [18]:

1. La aproximación de las partículas sólidas a la interfase sólido- líquido crea una película delgada entre la superficie sólida y la superficie del fluido debido a las fuerzas electrostáticas de Van der Waals.

2. Se forma una TPC (three phase contact) entre las fases líquido, sólido y gas con un ángulo de contacto i , misma que se propaga sobre toda la superficie sólida a gran velocidad para establecer una partícula en la interfase gas líquido.
3. La TPC se rompe en la interfase, aplicando un trabajo.

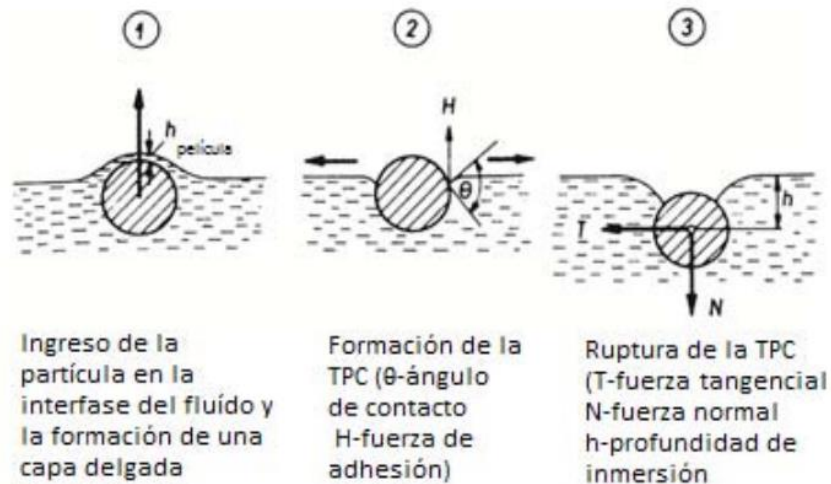


FIGURA 14. SCHULZE PROCESOS INVOLUCRADOS EN LA FORMACIÓN DEL AGREGADO MINERAL Y BURBUJA [18].

1.11.3 DEPRESORES

Los depresores se utilizan para provocar el efecto inverso al de los reactivos colectores (volviendo hidrofílicos a ciertos minerales, evitando la recolección de otras especies minerales no deseadas en el producto que se quiere concentrar y que no son sulfuros. Ejemplos de estos son los iones cromato, cianuro e hidrosulfuro los cuales deprimen distintos sulfuros metálicos.

Hay varias formas de conseguirlo:

- Introduciendo en la pulpa un ion que compita con el colector por alcanzar la superficie del mineral.
- Neutralización química y eliminación del colector.
- Añadiendo sustancias que generan grupo hidrofílicos que una vez que alcanzan la superficie mineral orientan la parte polar hacia el agua.

1.11.4 pH

El control del pH es uno de los métodos más extensamente aplicados para la modulación de la flotación de minerales; se usa para modificar el medio (ácido o básico) de la pulpa para que el proceso de flotación se desarrolle con eficiencia. Ya que los iones H^+ y OH^- compiten con otros iones en alcanzar las superficies de los minerales, y, además, su concentración influye en la disociación de las sales y en los intercambios iónicos.

Es importante mencionar que este pH depende de la naturaleza del mineral, de las sustancias disueltas en el agua y de la composición o cantidad de reactivo utilizadas. Además, tener en cuenta los efectos de hidrólisis que pueden sufrir algunos reactivos en función de la acidez del medio, por ejemplo, los xantatos pierden efectividad en circuitos ácidos.

Las aminas dan los mejores resultados en circuitos medianamente alcalinos y en circuitos de alta alcalinidad su poder colector disminuye. En caso de los ácidos grasos, su actividad se favorece en pulpas alcalinas ya que de este modo se favorece a una saponificación en las superficies minerales.

De forma general se reconoce que el circuito alcalino es más empleado que el ácido, ya que los reactivos suelen ser más estables y las sales de los iones pesados precipitan eliminándose de la pulpa.

Durante la flotación se puede modificar el pH de la pulpa alcalinizando o acidificando mediante uso de reactivos químicos (cal, carbonato de sodio, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico etc). Para flotar minerales sulfurados por lo general se utiliza un medio básico, porque permite la estabilidad de los reactivos, purifica la pulpa precipitando los iones de algunas sales, así como evitando la corrosión de los equipos. Para los minerales óxidos se ocupa un medio ácido dependiendo (ya que se pueden realizar métodos para tratarlos como minerales sulfurados).

Si bien el pH es un factor importante en aumentar o disminuir la flotabilidad de los minerales.

1.11.5 ACTIVADORES

Estos alteran la naturaleza química de las superficies del mineral convirtiéndolas en hidrofóbicas debido a la acción futura del colector. Los activadores generalmente son sales solubles que se ionizan en solución y los iones reaccionan entonces con la superficie mineral.

Los activadores actúan de distintas maneras sobre la superficie:

- Renovando o limpiando la superficie del mineral afectada por un proceso secundario como es la oxidación o la adhesión de lamas
- Formando en la superficie una capa particularmente favorable para la adsorción del colector.
- Reemplazando en la red cristalina algunos iones metálicos por otros que forman uniones más firmes con los colectores.

1.12 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Los principios teóricos de esta fueron establecidos en 1840 por Kirchhoff y Bunsen en sus estudios del fenómeno de autoabsorción en el espectro de los metales alcalinos y alcalinotérreos.

Fundamento Teórico

El átomo consiste en un núcleo y de un número determinado de electrones que llenan ciertos niveles cuánticos. La configuración electrónica más estable de un átomo corresponde a la de menor contenido energético conocido como “estado fundamental”. Si un átomo que se encuentra en un estado fundamental absorbe una determinada energía este experimenta una transición hacia un estado particular de mayor energía. Como este nuevo estado es inestable, el átomo regresa a su configuración inicial, emitiendo una radiación de una determinada frecuencia.

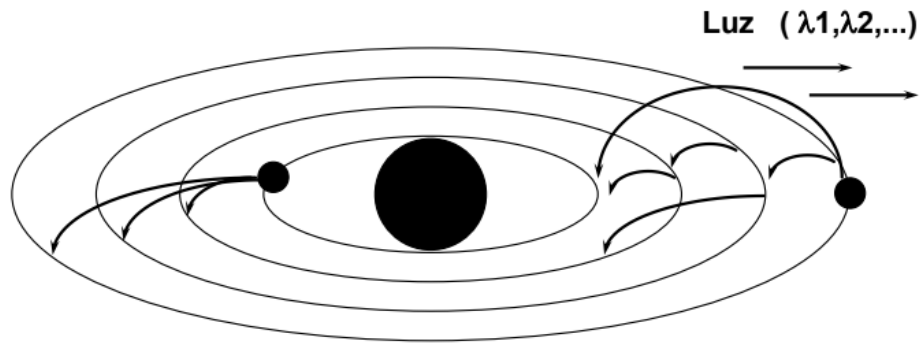


FIGURA 15. TRANSICIÓN ENERGÉTICA DEL ÁTOMO

La frecuencia de la energía radiante emitida corresponde a la diferencia de energía entre el estado “excitado” (E_1) y el estado fundamental (E_0) como se encuentra descrito en la ecuación de Planck. (Ec. 1.4)

$$E = E_1 - E_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Donde:

$h = \text{constante de Planck}$

$\nu = \text{frecuencia}$

$c = \text{velocidad luz}$

$\lambda = \text{longitud de onda}$

Según la teoría atómica, el átomo puede alcanzar diferentes estados (E_1, E_2, E_3, \dots) y de cada uno de ellos emitir una radiación ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$) característica, obteniéndose así un espectro atómico; en la absorción atómica es relevante solamente aquella longitud de onda correspondiente a una transición entre el estado fundamental de un átomo y el primer estado excitado y se conoce como longitud de onda de resonancia.

De la ecuación de Planck, se tiene que un átomo podrá absorber solamente radiación de una longitud de onda (frecuencia) específica. Para la absorción es de interés medir la absorción de esta radiación de resonancia al hacerla pasar a través de una población de átomos libres en estado fundamental; ya que estos absorberán parte de la radiación en forma proporcional a su

concentración atómica. La relación entre absorción y concentración se encuentra definida en la ley Lambert- Beer; cuando un rayo de luz monocromática pasa a través de un medio absorbente, su intensidad disminuye exponencialmente a medida que aumenta la concentración de la sustancia absorbente del medio.

1.13 ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ATÓMICA

Técnica de análisis multi elemental capaz de determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica con su excepción de C, N, O, H, F, gases nobles, algunas tierras raras y otros elementos poco frecuentes, en concentraciones que van desde % hasta ppb ($\mu\text{g/L}$).

La emisión atómica ocurre cuando un electrón de valencia en un orbital atómico de mayor energía regresa a un orbital atómico de menor energía como se observa en la Figura 16.

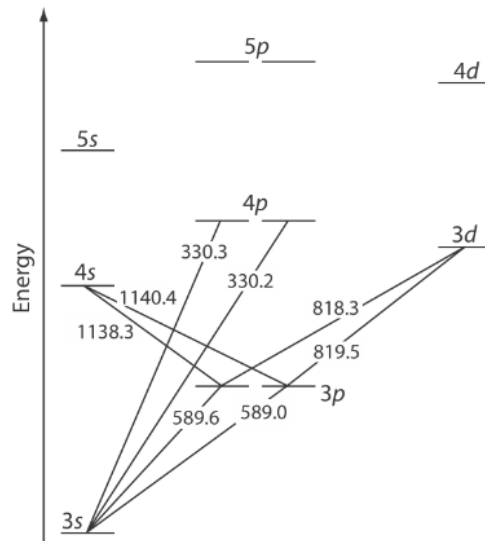


FIGURA 16. DIAGRAMA DE NIVEL DE ENERGÍA DE CONCHA DE VALENCIA PARA SODIO. CON LAS LONGITUDES DE ONDA CORRESPONDIENTES A VARIAS TRANSICIONES.

En esta se muestra una porción del diagrama de niveles de energía para el sodio, fungiendo esta como ejemplo; donde se visualizan una serie de líneas discretas a longitudes de onda que corresponden a la diferencia de energía entre dos orbitales atómicos.

Si bien la intensidad de una línea de emisión atómica, I_e , es proporcional al número de átomos, N^* , que pueblan el estado excitado;

$$I_e = k N^* \quad (\text{E.c. 1.5})$$

donde k es una constante que da la eficiencia de la transición. Si un sistema de átomos está en equilibrio térmico, la población de estado excitado i se relaciona con la concentración total de átomos, N , por la distribución de Boltzmann; para muchos elementos a temperaturas inferiores a 5000K la distribución de Boltzmann se aproxima como

$$N^* = N \left(\frac{g_i}{g_0} \right) e^{-E_i/kT} \quad (\text{E.c. 1.6})$$

Donde g_i y g_0 son factores estadísticos que dan cuenta del número de niveles de energía equivalentes para el estado excitado y el estado fundamental, E_i es la energía del estado excitado en relación con un suelo energía del estado, E_0 , k es la constante de Boltzmann (1.307×10^{-23} J/K), y T es la temperatura en kelvin. Esto da como resultado que los estados excitados con energías más bajas tengan poblaciones más grandes y líneas de emisión más intensas. Siendo la temperatura un factor importante para que la emisión aumente.

Atomización y Excitación

La emisión atómica requiere de un medio para convertir en un átomo o iones, gaseoso libere un analito que esté presente en una muestra sólida, líquida o en solución. La misma fuente de energía térmica utilizada para la atomización suele servir como fuente de excitación. Usando métodos con llamas y plasmas, los cuales son útiles para muestras líquidas o en solución.

CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la Figura 17 se presenta la síntesis llevada a cabo en el desarrollo experimental:

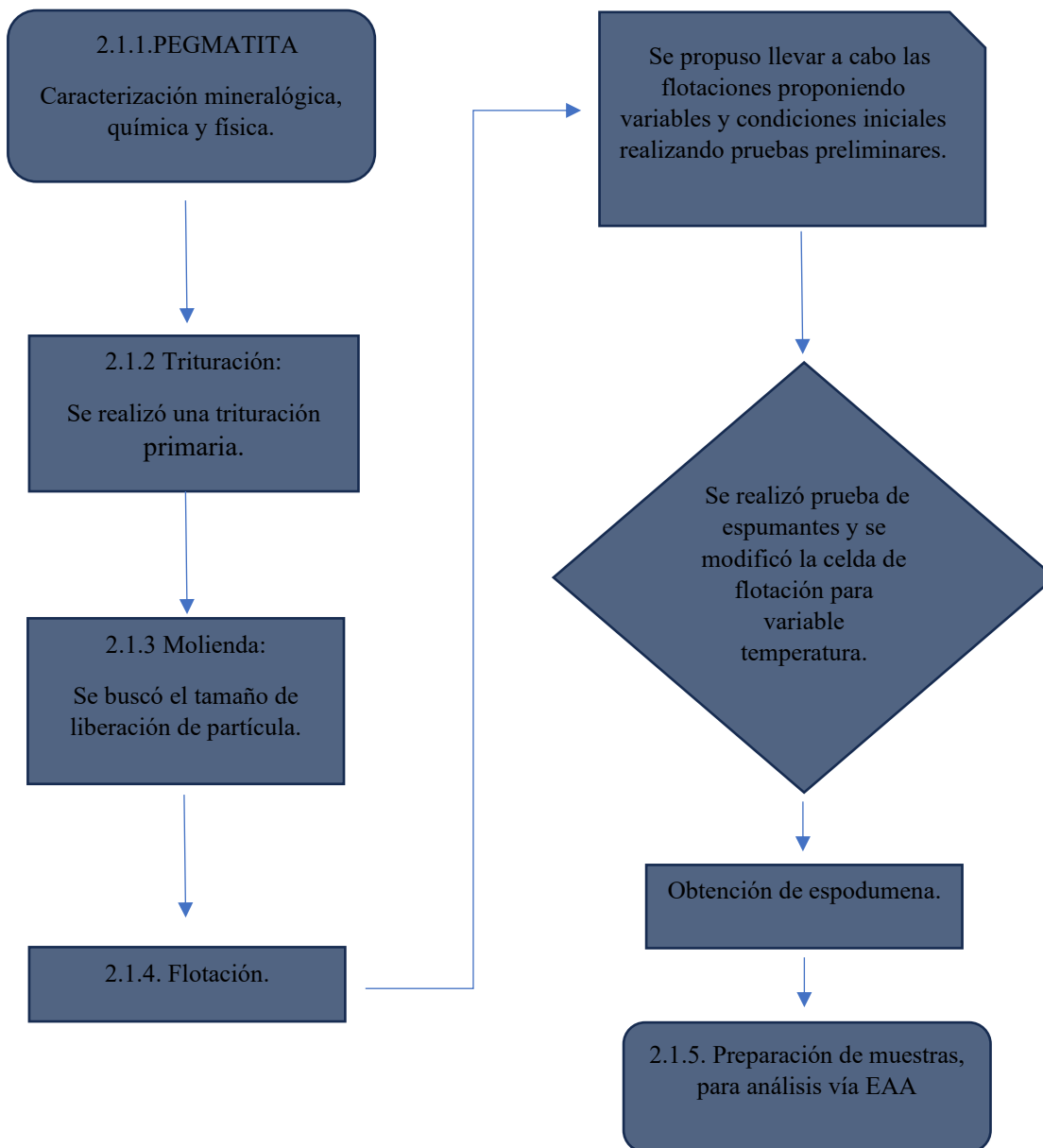


FIGURA 17. DIAGRAMA DE DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 METODOLOGÍA

2.1.1. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA, QUÍMICA Y FÍSICA DE LA PEGMATITA

El Dr. Juárez Sánchez Faustino coordinó y llevó a cabo la búsqueda, ubicación y recolección de muestras de pegmatitas en la zona conocida como “El Muerto”, ubicada en el estado de Oaxaca.

El estudio de la pegmatita partió de la caracterización química, física y mineralógica de las muestras obtenidas, realizando lo siguiente:

a) Determinación de densidad experimental de la pegmatita.

Se determinó con el método clásico de Arquímedes, usando una balanza, una probeta y agua para ver el líquido desplazado por la pegmatita. Se pesó una muestra determinada de la pegmatita y se llenó de agua la probeta con un volumen determinado, para introducir así la pegmatita esperando un momento para que el agua entrara en los poros de la pegmatita y poder hacer la lectura del líquido desplazado. Y se realizaron los cálculos de la relación que hay entre la masa obtenida con el volumen desplazado para obtener la densidad.

b) Prueba de raya.

Esta se llevó a cabo con una superficie cerámica rayando la pegmatita para así poder observar el tipo de color de raya.

c) Prueba de dureza (escala de Mohs).

Para esta prueba se usó un identador determinado con cierta dureza, ya que la dureza de la pegmatita será la fuerza que opone a ser penetrado o marcada por el identador.

d) Prueba de reactividad con HCl al 2%.

Usando una solución de HCl, se colocó 2 gotas sobre la superficie de la pegmatita para así poder observar alguna reacción sobre esta.

e) Prueba de análisis de flama.

Siendo este un análisis cualitativo, donde se le acercó la flama a la pegmatita para poder así observar un posible cambio en la tonalidad de la flama.

f) Muestra de Pegmatita en resina.

Se montó una muestra de pegmatita en una resina de colada en frío, mezclando la resina con el catalizador para que la muestra de pegmatita se integrara con ellos dentro de un molde. Se observó en el microscopio menagráfico. Todo esto como parte de la caracterización de la pegmatita pudiendo observar sus texturas y así poder aportar más información a la experimentación. Ya que se sabe que teóricamente es un mineral de origen óxido, pero su aspecto es opaco como si fuese un sulfuro.

2.1.2 TRITURACIÓN

La pegmatita de llegada recolectada en Oaxaca provenía de un afloramiento rocosos referida a una exposición de la roca madre en la superficie del suelo. Por esta razón las porciones recolectadas provenían de tamaños no definidos con respecto a una medida en específico, si no que fueron obtenidas de porciones extraídas aleatoriamente con herramientas mecánicas en proporción para su transporte.

Para trabajar la pegmatita en el laboratorio se tuvo que disminuir el tamaño de acuerdo con las dimensiones de las maquinas que se encuentran en este. Se procedió a disminuir el tamaño con el uso de una maceta (mazo) posteriormente se usó el cuarteador y cono separador para así obtener una muestra representativa del total de la pegmatita; seleccionando una porción de esta para elegir la primer criba y conformar el set de cribado, como se muestra en la Figura 18.



FIGURA 18. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA POR CRIBADO

Se optó por obtener datos y cálculos correspondientes al workindex, con las respectivas mediciones desarrolladas por las trituradoras en vacío y con carga que se encuentran en el laboratorio; así como la cantidad de trabajo y su capacidad. Todo esto como parte de la trazabilidad del experimento y para la obtención de información de la pegmatita. Se llevó a cabo con muestras iniciales de 500 g. respectivamente.

Se realizó la trituración primaria para llevar a cabo la disminución del tamaño de partícula de la pegmatita y hacer los respectivos análisis granulométricos.

2.1.3 MOLIENDA

En el caso de la molienda se determinaron las condiciones del medio molurante, calculando la densidad promedio de las bolas de acero de molienda, se midieron las dimensiones del molino, siendo estos datos usados para determinar la carga de bolas para el proceso. (todos los cálculos correspondientes realizados para el procesamiento se encuentran en el Apéndice I.)

Se ocupó el equipo conminución (trituradora primaria, molinos,) como se puede observar en la Figura 19.



FIGURA 19. EQUIPO DE CONMINUCIÓN, TRITURADORA PRIMARIA, MOLINOS.

Se trabajó con muestras de 100 g. siendo la molienda en seco. Sus tiempos de molienda de 4 y 8 minutos respectivamente, para obtener una buena liberación de la pegmatita de interés, incrementando la superficie específica de las partículas en un tamaño y forma definidos. Una vez observado se realizaron sus análisis granulométricos, con el propósito de obtener el tiempo óptimo de molienda con la ayuda de la visualización de la pegmatita vista en el microscopio observando desde que malla la liberación del mineral.

2.1.4 FLOTACIÓN

Una vez determinada la conminución se llevó a cabo la flotación con variables propuestas para el experimento; se tuvo que preparar la celda de flotación con los respectivos reactivos y en el caso del uso de temperatura se hizo la adaptación de esta para controlar y mantener la temperatura.

Las dos primeras flotaciones de las 10 que se llevaron a cabo tuvieron contempladas condiciones iniciales con el objetivo ajustar la metodología o detalles que surgieran durante el proceso; como, por ejemplo: la homogenización de la temperatura (para aumentarla y mantenerla) y el lugar

adecuado para colocar la resistencia dentro de la celda, escoger espumantes, modificar la celda de flotación y en general revisar y afinar los pasos a realizar durante las subsecuentes flotaciones.

Ya que las primeras flotaciones fueron consideradas simulacro debido a que se equipó la celda de flotación para los casos posteriores donde se usó la variable de temperatura.

Se verificaron los diferentes componentes de la celda; la perilla de control de velocidad, así como el tacómetro de la celda, la entrada del aire, la base soporte de la celda y que la manivela de elevación del vástago funcionará correctamente en el total de su movimiento descendente y ascendente.

Se verificó e investigó acerca de los agentes para realizar la flotación, activadores, espumantes y el colector de acuerdo con lo que se tenía en el laboratorio de beneficio de minerales.

En un principio se planteó usar el ácido oléico como colector, usar Na_2S como activador con la consigna de sulfidizar el medio y tratar a la pegmatita como si se tratase de un sulfuro. Trabajar a dos pH (6 – 9), no tan agresivo esto dado por las características químicas de los espumantes y el tiempo que estos tienen de antigüedad; así como un tiempo de pretratamiento de la pulpa con el activador; con cálculos de muestras sobre 1 tonelada para el activador y el colector; de acuerdo con Bulatovic [14].

De manera general las dos primeras flotaciones fueron fijadas con variables iguales de muestras de 100 g, un volumen de 1.2 L, tiempos de pretratamiento con el activador de 25 min adicionando el activador previamente dividido en dos porciones; la primer cantidad fue agregada desde el comienzo, (dejándolos interactuar los primeros 10 minutos y subsecuentemente se agregó la segunda porción a los 20 minutos). Para luego adicionar colector y finalmente el espumante; con la única variable diferente pH 6 y 9.

Después de la primera flotación se optó cambiar el espumante ya que en el transcurso de la primer flotación se logró percibir que la espuma no era homogénea, no continua y muy escasa.

Se decidió realizar una prueba de espumantes (que se encuentran dentro del laboratorio) en la celda con pura agua, partiendo de la cantidad ocupada (2 ml. empleados para las prácticas de las asignaturas de beneficio de minerales y flotación respectivamente).

Se hicieron las pruebas de espuma con Aerofroth 77, Hercomin A-06 y MIBC (metil isobutil carbinol). Y de acuerdo con lo visto en las dos flotaciones base se propuso hacer el cambio del nuevo espumante (aumentando de 2ml a 3 ml).

También se propuso un nuevo modelo global aumentando variables y fijando un tiempo total de flotación; se agregó otro activador (NaOH), el trabajo del motor se usó a 1200 RPM para obtener un tamaño de burbuja más pequeña, así como homogénea, para así ayudar a favorecer la flotación. Todas estas variables se pueden apreciar en la Tabla 1.

TABLA 1. VARIABLES USADAS EN LAS FLOTACIONES.

Material	Activador	pH	pH	Tiempo total(min)	T(°C)	T(°C)	RPM
Pegmatita	Na ₂ S	6	9	15	25	86	1200
Pegmatita	NaOH	6	9	15	25	86	1200

Una vez con estas variables se planteó junto con el tiempo total de flotación, la forma y el orden de adición de los agentes involucrados, así como las cantidades que se usaron de activador, colector, espumante, modificadores de pH en cada una de las flotaciones llevadas a cabo. Que fueron calculadas de acuerdo con la literatura. *Apéndice 1.*

En la Figura 20 se puede observar la preparación de los agentes colectores, activadores para su uso durante la flotación.

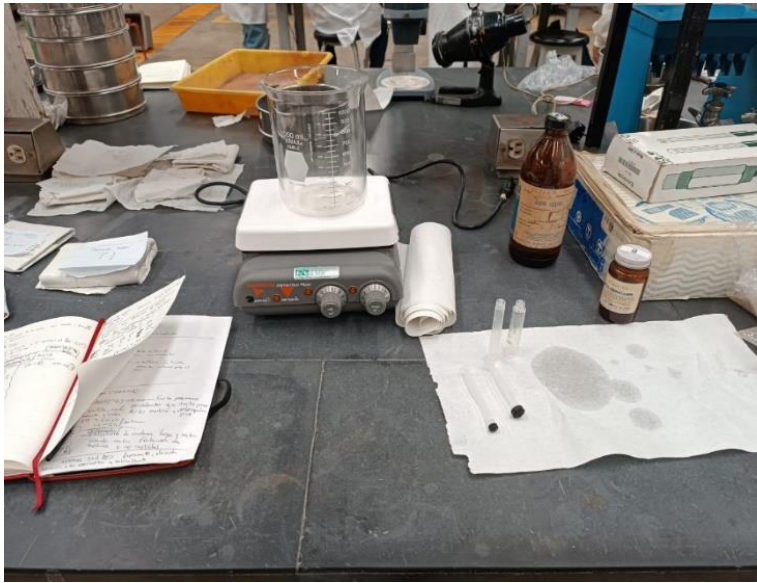


FIGURA 20. PREPARACIÓN DE LOS REACTIVOS PARA LA FLOTACIÓN

De acuerdo con Bulatovic en los laboratorios de investigación de Cyttec y en South Dakota Ore (US), se usó el NaOH en el pretratamiento y un rango de pH más agresivo en el sentido ácido (2.5-3). Esto en consideración al tipo de pegmatita que usaron en el proceso. Ya que a lo largo del mundo estas tienden a variar en composición y componentes minerales diferentes, siendo estas no únicas para cada región del globo.

Se tomó la decisión de trabajar con pH de 6 y 9 (siendo estos no tan agresivos para que no se viera modificado el uso de los colectores y espumantes en el proceso) como se puede observar en la Tabla 1.

En el modelo de flotación a temperatura 25°C desde el comienzo y hasta los primeros 6 minutos interactuaron solamente el agua, mineral y activador para luego ir agregando al paso del tiempo total de flotación los demás agentes de flotación usados como se propuso en el modelo. Véase Tabla 2.

TABLA 2. MODELO DE FLOTACIÓN A TEMPERATURA 25°C

Tiempo transcurrido (min)	Interacción
Primeros 6'	Agua, mineral, activador
Segundos 4'	Agua, mineral, activador, colector (ajuste previo y constante de pH deseado desde el minuto 5:30 hasta el final de la flotación)
Tercer 1'	Agua, mineral, activador, colector, espumante (tiempo de interacción de espumante 1 min)
Cuartos 4'	Recolección

En la Figura 21 se presenta una secuencia esquemática que ilustra el arreglo experimental montado para llevar a cabo en su totalidad el proceso de flotación; en las Figuras 21; *A* y *B* se observa la preparación de la celda con agua, la adición de la pegmatita para la flotación, activación del sistema de agitación adición los agentes activadores, colectores y espumantes, el ajuste de pH.

A su vez en las Figuras 21; *C* y *D* se puede observar desde la inyección de aire a la celda para fomentar la formación de espuma, la recolección de la espuma sobre la superficie de la celda y su almacenamiento en las tinas para su posterior filtrado, secado y pesado.

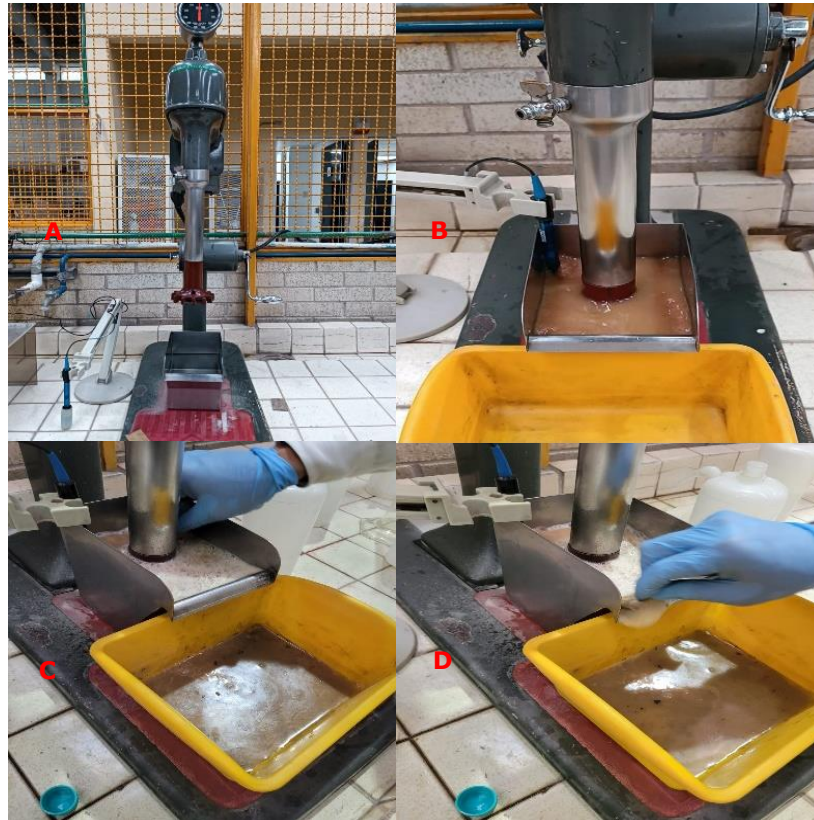


FIGURA 21. SECUENCIA DE FLOTACIÓN A TEMPERATURA 25°C (A,B,C,D)

Para las flotaciones con variable temperatura 86°C el ajuste de esta se realizó desde la interacción del agua, mineral y activador, ya que todo esto se realizó durante los primeros 6 minutos; como se visualiza en el modelo propuesto en la Tabla 3.

TABLA 3. MODELO DE FLOTACIÓN CON TEMPERATURA VARIABLE 86 °C

Tiempo transcurrido (min)	Interacción
Primeros 6'	Agua, mineral, ajuste de temperatura y monitoreó constante hasta el término de la flotación, activador (hasta alcanzar el rango de temperatura)
Segundos 4'	Agua, mineral, activador, colector (ajuste previo y constante de pH deseado desde el minuto 5:30 hasta el final de la flotación)
Tercero 1'	Agua, mineral, activador, colector, espumante (tiempo de interacción de espumante 1 min)
Cuartos 4'	Recolección

En el caso de las flotaciones con variable temperatura se buscó la forma de mantener la temperatura durante la flotación, para esto la celda tuvo que ser adecuada con unícel en sus paredes exteriores para que se mantuviera estable la temperatura mientras que con uso auxiliar de un termómetro se monitoreo y se calentó la pulpa con una resistencia durante la flotación.

En la Figura 22 se puede observar la modificación de la celda en la secuencia esquemática que ilustra el arreglo experimental montado para llevar a cabo la flotación; en las Figuras 22; A y B se puede observar la preparación de la celda para medir, cortar y pegar el unícel en las paredes exteriores para así dejar lista la celda para la flotación.

En las Figuras 22; C y D se realizó la preparación de la celda con agua, calentamiento, ajuste de la temperatura, la adición de la pegmatita en su tamaño adecuado para la flotación, activación del sistema de agitación, el ajuste de pH, los agentes activadores, colectores, espumantes.



FIGURA 22. SECUENCIA DE FLOTACIÓN CON VARIABLE TEMPERATURA 86°C (A, B, C, D)

La inyección de aire a la celda para fomentar la formación de espuma, la recolección de la espuma sobre la superficie de la celda y su almacenamiento en las tinas para su posterior filtrado, secado y pesado. En general la preparación de las flotaciones realizadas se podría resumir en la siguiente secuencia de pasos (contemplando lo detalles observados en cada uno de los pasos ya mencionados con anterioridad):

- 1) Preparación de la celda de flotación, y en el caso requerido la instrumentación de celda para la flotación con temperatura (instalación de termómetro y resistencia)
- 2) Realización de los cálculos para cantidades de agentes activadores y colectores. Así como la preparación de estos con los demás reactivos. (NaOH, HCL, espumante). Como se observa en la Figura 20. Cálculos anexados en el Apéndice I
- 3) Carga de la celda. La secuencia fue la siguiente: agua, pegmatita, activador, ajuste de pH (NaOH o HCL según sea el caso), colector, espumante.
- 4) * Mantener dentro de los rangos las variables de pH y temperatura según se requiera.

- 5) Una vez que se añade el espumante, deja que actúe para poder así abrir la llave de aire.
- 6) Recolectar la espuma producida del proceso.
- 7) Detener la recolección, vaciar, filtrar, secar, pesar y etiquetar muestras obtenidas del concentrado y colas.

2.1.5 ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA EAA

Después del proceso de flotación se llevó a cabo esta técnica analítica; etiquetando todas las muestras (tanto de concentrado y colas). Se llevaron al laboratorio para su tratamiento.

De los concentrados obtenidos en el proceso de concentración (flotación) se realizaron digestiones para cada una de las muestras con ayuda de ácido HF, para así poder analizar las trazas de nuestro elemento a estudio Li^+ .

La secuencia de pasos que se siguió para el análisis de EAA se podría bosquejar en la secuencia de imágenes de la Figura 23.



FIGURA 23. PROCESO DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

La preparación de las digestiones y análisis de espectroscopia se hizo en el laboratorio del instituto siguiendo una serie de pasos que se podría resumir de la siguiente manera:

- 1) En cada uno de los vasos de precipitados de teflón se agregó el producto de las muestras de concentrado de las flotaciones más la incorporación de 1ml de H₂O y 10 ml HF.
- 2) *Los cuales fueron dejados reaccionando en una parrilla con extracción totalmente sellada por 24 horas.
- 3) Después de la primera reacción se volvió a agregar 1ml de H₂O, seguido de 3ml de HNO₃ y 2ml de HCL.
- 4) Se dejó esta reacción en una parrilla activa alrededor de 1 hora.
- 5) El resultado de estas reacciones se filtró y se llevaron al aforo (100 ml). Una vez preparado las muestras, se preparó el equipo de absorción.
- 6) Se introdujeron los blancos para armar la respectiva curva de calibración.
- 7) Se prosiguió a hacer la lectura de cada una de las muestras aforadas de las respectivas flotaciones en el equipo de espectroscopia de absorción atómica.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA, QUÍMICA Y FÍSICA DE LA PEGMATITA

- En la Figura 24 se observa la experimentación para calcular la densidad de la pegmatita obteniendo.

$$\rho_{\text{pegmatita}} = 2.71 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



FIGURA 24. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA DENSIDAD DE LA PEGMATITA

$$108.5 \text{ gr} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \right) = 0.1084 \text{ kg}$$

$$40 \text{ ml} \left(\frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} \right) = 0.04 \text{ L}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$E = \rho_{\text{liq}} * V_{\text{desplazado}} * g$$

$$\rho_{\text{mineral}} = \frac{W_{\text{mineral}} \rho_{\text{fluido}}}{E}$$

$$\rho_{\text{mineral}} = \frac{(0.1084 \text{ kg})(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3})}{392.4 \text{ N}}$$

- Se realizó la prueba de raya:



FIGURA 25. PRUEBA DE RAYA A LA PEGMATITA

Se deslizó, ejerciendo fuerza un pico de la pegmatita sobre el cerámico dejando ver una línea marcada de color marrón igual a la pegmatita; se observó que el mineral no se rompió al momento de hacer el rayado.

- La prueba de dureza:



FIGURA 26. PRUEBA DE DUREZA A LA PEGMATITA (ESCALA DE MOHS)

Con ayuda de un indentador de acero se realizó la prueba de dureza con respecto a la escala Mohs, se hizo una marca ejerciendo fuerza a lo largo de la superficie y se observa que solo se hizo una línea, no hubo una alteración notable sobre la pegmatita. La escala se refirió a 6 Mohs.

- Prueba de reactividad con de reactividad química con HCl al 2%.



FIGURA 27. PRUEBA DE REACTIVIDAD A LA PEGMATITA

Se aplico 2 gotas del ácido sobre la pegmatita y se observó que no hubo efervescencia.

- Análisis de flama



FIGURA28. PRUEBA DE FLAMA A LA PEGMATITA

Se aplicó la prueba de flamabilidad dando como resultado una nula reacción con la flama.

Se monto la pegmatita en resina de colada en frío y con ayuda del microscopio menagráfico se hicieron un par de barridos obteniendo las imágenes de la Figura 29.

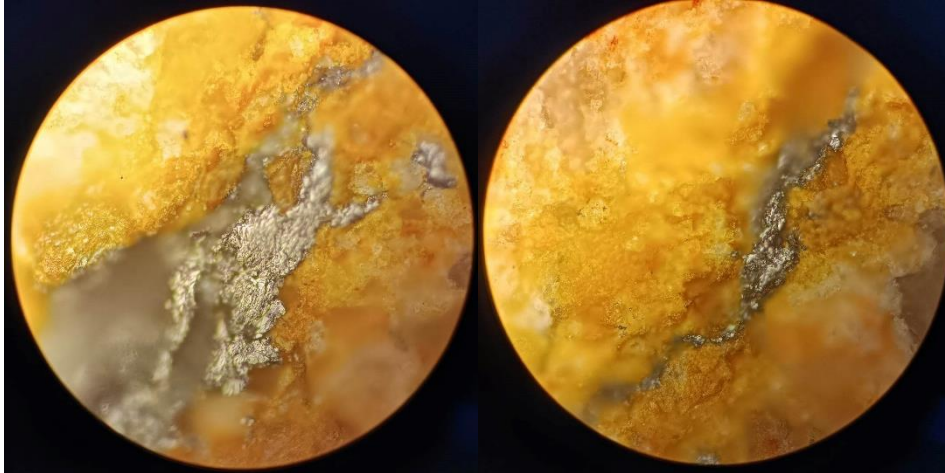


FIGURA 29. PEGMATITA EN RESINA, NÍCOLES PARALELOS, SIN POLARIZADOR, CAMPO CLARO 40X

Se observó 2 fases viendo las coloraciones diferentes; dos de ellas de color amarillo, una de ellas más dorada que la otra. En la zona central en una figura de tipo anhedral se tiene la fase de color gris rodeada de la fase amarilla más intensa; de una textura equigranular.

3.2 TRITURACIÓN

Se inició trabajando con una muestra inicial 2 kg.

Y se trabajó con 3 muestras obteniendo los siguientes pesos de la trituration primaria:

TABLA 4. MUESTRAS DE TRITURACIÓN

Muestra	Peso (g)
1	618.6
2	601.6
3	503.2

Análisis granulométricos Trituración

TABLA 5. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MUESTRA I

Numero de malla	Tamaño (µm)	Masa (g)	% Retenido	% Ac (+)	% Ac (-)
0.75	19050	9.7	1.59	1.59	98.40
0.50	12700	96.6	15.84	17.44	82.55
0.25	6350	230.6	37.83	55.27	44.72
4.00	4699	43.7	7.16	62.44	37.55
6.00	3327	52.1	8.54	70.99	29.00
8.00	2379	35.5	5.82	76.81	23.18
10.00	1678	33.8	5.54	82.36	17.63
14.00	1250	28.7	4.70	87.07	12.92
20.00	800	25.8	4.23	91.30	8.69
30.00	560	20.5	3.36	94.66	5.33
50.00	280	16.5	2.70	97.37	2.62
70.00	200	5.9	0.96	98.34	1.65
100.00	140	4.1	0.67	99.01	0.98
140.00	100	1.8	0.29	99.31	0.68
200.00	71	2.9	0.47	99.78	0.21
325.00	40	1.3	0.21	100	0
-325.00	Pan	9.1			
	Tamices	609.5			
	Total	618.6			

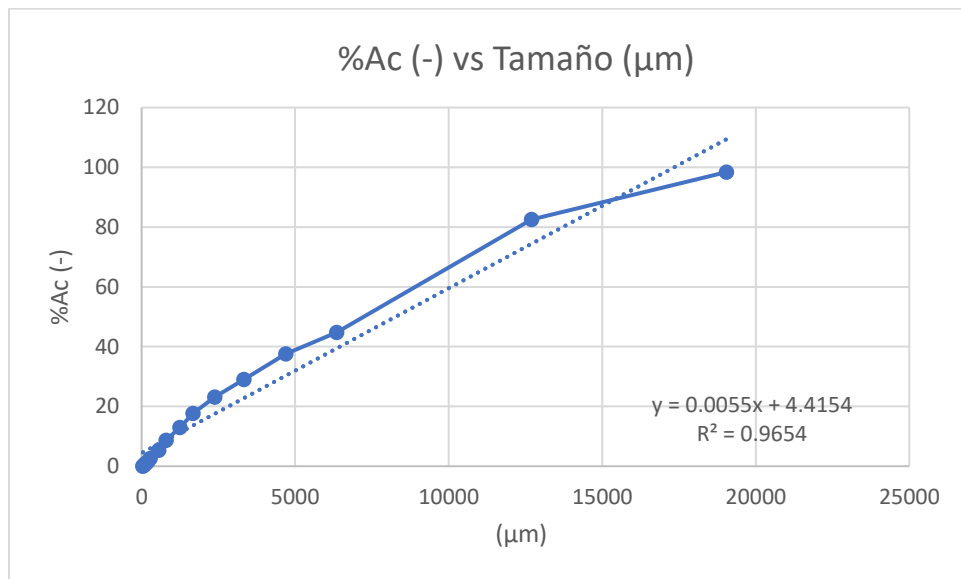


FIGURA 30. TRITURACIÓN PRIMARIA MUESTRA I; %AC (-) VS TAMAÑO

TABLA 6. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MUESTRA 2

Numero de malla	Tamaño (µm)	Masa (g)	% Retenido	% Ac (+)	% Ac (-)
0.75	19050	19.4	3.27	3.27	96.72
0.50	12700	94.6	15.97	19.25	80.74
0.25	6350	213.8	36.10	55.36	44.63
4.00	4699	46	7.76	63.13	36.86
6.00	3327	51.8	8.74	71.87	28.12
8.00	2379	34.6	5.84	77.72	22.27
10.00	1678	30.2	5.10	82.82	17.17
14.00	1250	25.8	4.35	87.18	12.81
20.00	800	23.3	3.93	91.11	8.88
30.00	560	19.3	3.25	94.37	5.62
50.00	280	16	2.70	97.07	2.92
70.00	200	5.9	0.99	98.07	1.92
100.00	140	4.5	0.76	98.83	1.16
140.00	100	3.2	0.54	99.37	0.62
200.00	71	2.2	0.37	99.74	0.25
325.00	40	1.5	0.25	100	0
-325.00	Pan	9.5			
	Tamices	592.1			
	Total	601.6			

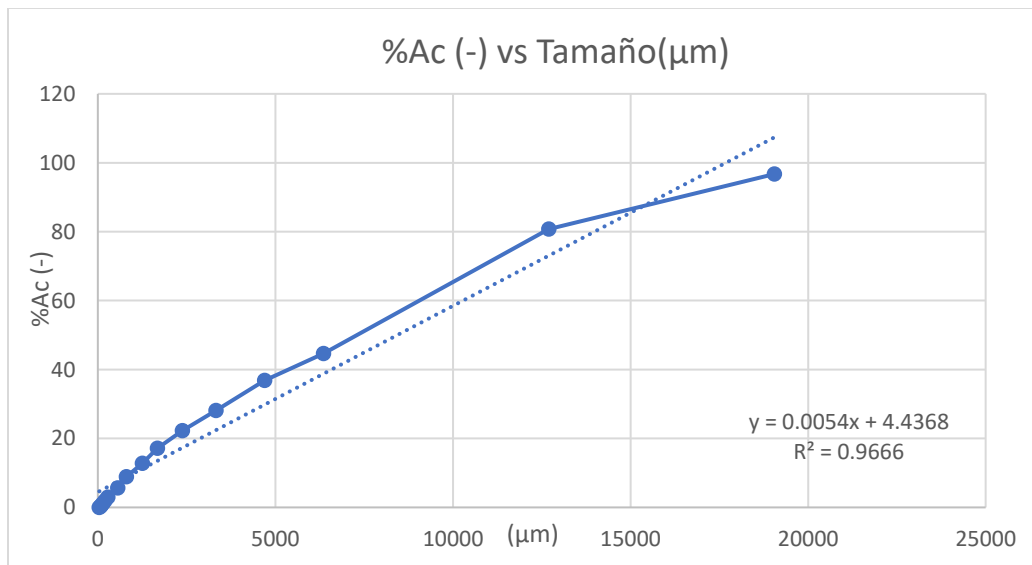


FIGURA31. TRITURACIÓN PRIMARIA MUESTRA 2; %AC (-) VS TAMAÑO

TABLA 7. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MUESTRA 3

Numero de malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	% Retenido	% Ac (+)	% Ac (-)
0.75	19050	8.6	1.73	1.73	98.26
0.50	12700	51.4	10.34	12.07	87.92
0.25	6350	153.3	30.84	42.91	57.08
4.0	4699	45.9	9.23	52.15	47.84
6.0	3327	56.1	11.28	63.44	36.55
8.0	2379	38.6	7.76	71.20	28.79
10.0	1678	36.2	7.28	78.49	21.50
14.0	1250	31.4	6.31	84.80	15.19
20.0	800	27.5	5.53	90.34	9.65
30.0	560	20.7	4.16	94.50	5.49
50.0	280	15.1	3.03	97.54	2.45
70.0	200	4.6	0.92	98.47	1.52
100.0	140	3.1	0.62	99.09	0.90
140.0	100	2.1	0.42	99.51	0.48
200.0	71	1.6	0.32	99.83	0.16
325.0	40	0.8	0.16	100	0
-325.0	Pan	6.2			
	Tamices	497			
	Total	503.2			

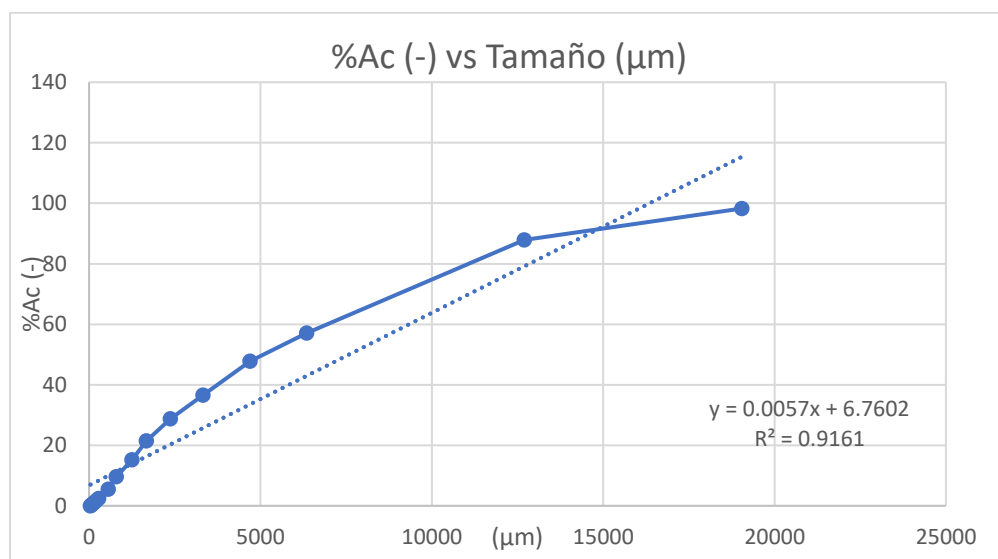


FIGURA32. TRITURACIÓN PRIMARIA MUESTRA 3; %AC (-) VS TAMAÑO

TABLA 8. VALORES DE WORK INDEX

Muestra	Wi (kWh/ston)
1	9.4438
2	6.7824
3	8.3235
Promedio	8.1832

3.3 MOLIENDA

TABLA 9. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE MOLIENDA A 4 MINUTOS

Numero de malla	Tamaño (µm)	Masa (g)	%Ret	%Ac(+)	%Ac(-)
40	320	12.71	12.71	12.71	87.29
50	280	12.8	12.8	25.51	74.49
70	200	25.6	25.6	51.11	48.89
100	140	19.2	19.2	70.31	29.69
140	100	12.8	12.8	83.11	16.89
200	71	9.28	9.28	92.39	7.61
-200	Pan	7.61	7.61	100	0
	Total	100			

TABLA 10. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE MOLIENDA A 8 MINUTOS

Numero de malla	Tamaño (µm)	Masa (g)	%Ret	%Ac(+)	%Ac(-)
40	320	0	0	0	0
50	280	3.65	3.65	3.65	96.35
70	200	24.8	24.8	28.45	71.55
100	140	18.6	18.6	47.05	52.95
140	100	12.4	12.4	59.45	40.55
200	71	8.99	8.99	68.44	31.56
325	40	9.61	9.61	78.05	21.95
-325	Pan	21.95	21.95	100	0
	Total	100			

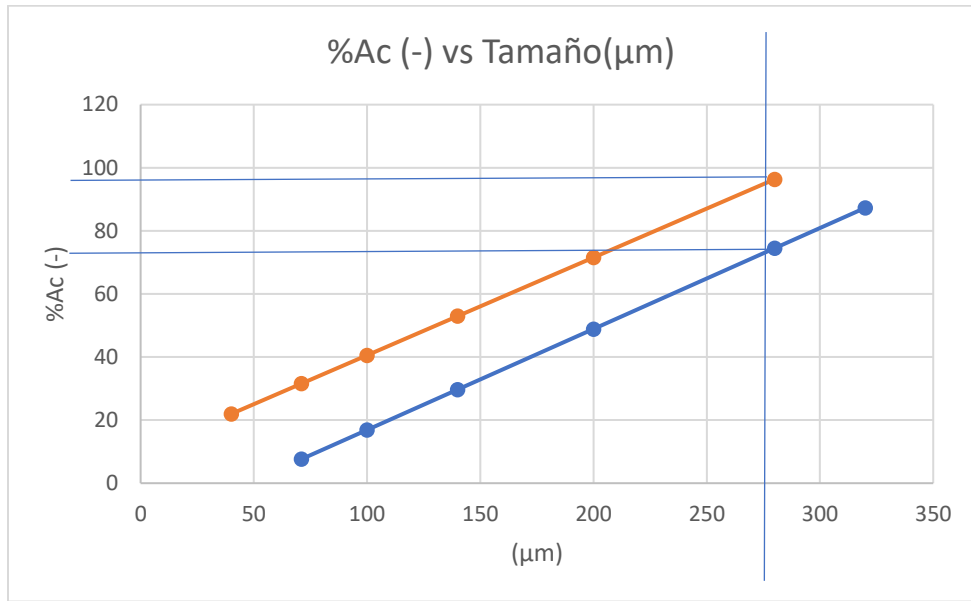


FIGURA 33. PORCENTAJES ACUMULADOS NEGATIVOS RELACIONADOS AL TAMAÑO DE LIBERACIÓN 280 MICRÓMETROS

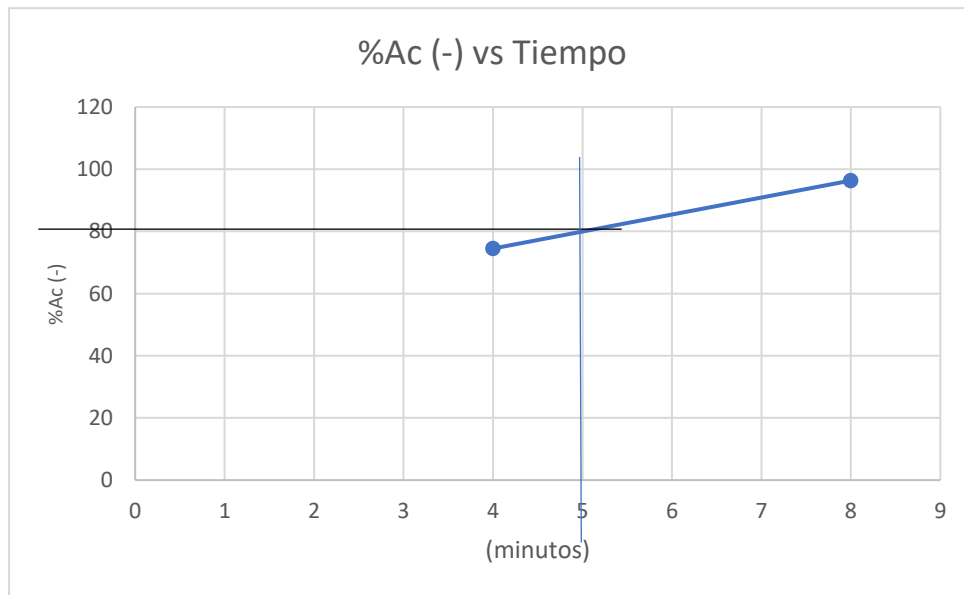


FIGURA 34. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO ÓPTIMO DE MOLIENDA A 280 MICRÓMETROS

3.4 FLOTACIÓN

De acuerdo con la literatura citada por tonelada de mineral que se usaba de 500 g a 1 kg de activador dependiendo de la celdas o contenedores donde se trabajaba como activador (Na_2S y NaOH) en las flotaciones realizadas en el laboratorio se ocuparon 0.075 g por cada flotación de 100 g de pegmatita. Para el uso del colector de la misma manera se calculó de acuerdo con la literatura 400 g a 600 g por tonelada dando la cantidad de 0.05g de ácido oleico para cada flotación. También se realizaron los cálculos de la concentración para ambos activadores. Así como la relación líquido sólido-usada. *Apéndice 1*

De acuerdo con lo obtenido en las respectivas flotaciones se ordenó en las siguientes tablas de acuerdo con el activador utilizado.

TABLA 11. MATERIAL RECOLECTADO VÍA FLOTACIÓN CON EL ACTIVADOR HIDRÓXIDO DE SODIO

Muestra	Activador	pH	T°(C)	Masa (g)	Tiempo total (min)	RPM
1[]	NaOH	9	25	Concentrado 2.4	15	1200
1C				Colas 92.7		
2[]		6		Concentrado 3.5		
2C				Colas 95.7		
1'[]		9	86	Concentrado 3.0		
1'C				Colas 93.8		
2'[]		6		Concentrado 3.2		
2'C				Colas 94.1		

TABLA 12. MATERIAL RECOLECTADO VÍA FLOTACIÓN CON EL ACTIVADOR SULFATO DE SODIO

Muestra	Activador	pH	T°(C)	Masa (g)	Tiempo total (min)	RPM
3[]	Na ₂ S	9	25	Concentrado 2.2	15	1200
3C				Colas 96.9		
4[]		6		Concentrado 3.2		
4C				Colas 93.2		
3'[]		9	86	Concentrado 3.9		
3'C				Colas 93.5		
4'[]		6		Concentrado 3.2		
4'C				Colas 94.7		

Como se mencionó en la parte experimental acerca del cambio de los espumantes de los 3 espumantes se decidió ocupar el Hercomin A-06; que consiste en alcoholes alifáticos secundarios de cadena abierta y ramificada, con 6 y 8 átomos de carbono algunas veces de alcoholes primarios y secundarios mezclados. Con características físicas y químicas tales como; líquido incoloro, de olor picante, soluble en disolventes orgánicos, poco miscible en agua. (información tomada de las hojas técnicas de los espumantes del laboratorio de beneficio de minerales). Y de acuerdo con lo visto en las dos flotaciones base se propuso hacer el cambio del nuevo espumante (aumentando de 2ml a 3 ml).

Algo que es importante mencionar fue que se observó (en ambas flotaciones, con y sin temperatura), fue el cambio de pH al momento de adicionar el espumante. Ya que en medio ácido el pH tendía a desplazarse al medio básico y cuando se trabaja en el medio básico este se desplazaba hacia un pH ácido. Este cambio no era tan drástico ya que con el uso de los modificadores de pH se hacía la corrección durante el proceso de flotación tratando que el pH fuese constante.

3.5 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA EAA

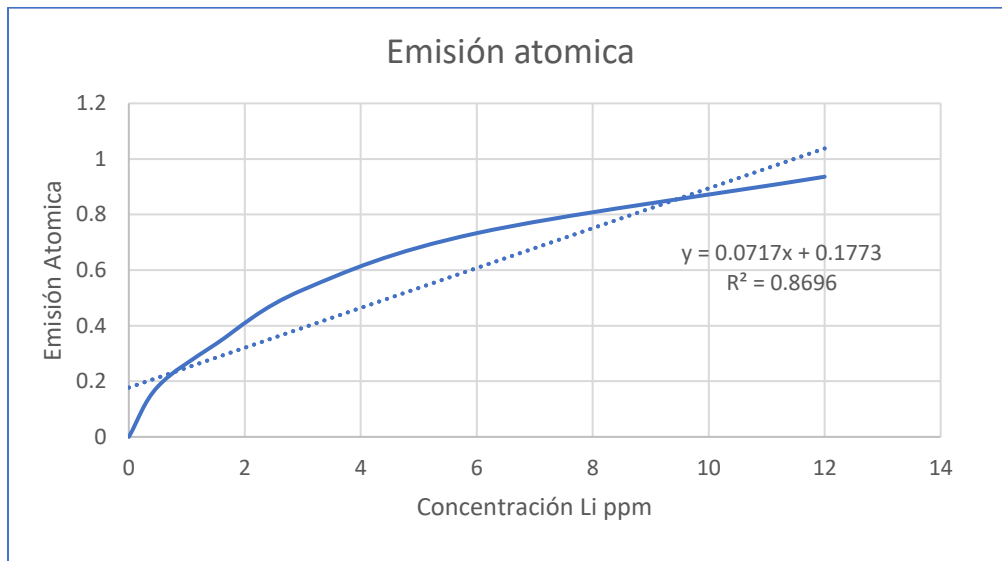


FIGURA 35. CURVA DE CALIBRACIÓN (EAA)

TABLA 13. CONCENTRACIONES OBTENIDAS PARA EL ACTIVADOR HIDRÓXIDO DE SODIO

Muestra	Activador	pH	T°(C)	Elemento	ppm
1[]	NaOH	9	25	Li	0.006966
2[]		6			0.008923
1' []		6	86		0.009911
2' []		9			0.006808

TABLA 14..CONCENTRACIONES OBTENIDAS PARA EL ACTIVADOR SULFATO DE SODIO

Muestra	Activador	pH	T°(C)	Elemento	ppm
3[]	Na ₂ S	9	25	Li	0.006964
4[]		6			0.007979
3' []		6	86		0.006918
4' []		9			0.007977

3.6 BALANCE METALÚRGICO

Partiendo de una %Ley teórica de la espodumena

$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ con Masa molar de 186.08 g/mol

Li 3.7299% Al 14.4992% Si 30.1849% O 51.586%

Se presenta el balance metalúrgico para cada muestra mostrando la %Ley (Li) obtenido.

TABLA 15. BALANCE METALÚRGICO VÍA FLOTACIÓN TEMPERATURA 25°C

Muestra	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Li	Contenido metálico (g)	% Rec
1 []	Concentrado	2.4	2.4	0.693	0.016	33.267
pH	Colas	92.7	92.7	0.036	0.033	66.732
9	Alimentación	100	95.1	0.050	0.050	100
Activador NaOH						
Muestra	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Li	Contenido metálico (g)	% Rec
2 []	Concentrado	3.5	3.5	0.693	0.024	48.425
pH	Colas	95.7	95.7	0.027	0.025	51.574
6	Alimentación	100	99.2	0.050	0.050	100
Activador NaOH						
Muestra	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Li	Contenido metálico (g)	% Rec
3 []	Concentrado	2.2	2.2	0.693	0.015	30.418
pH	Colas	96.9	96.9	0.036	0.034	69.581
9	Alimentación	100	99.1	0.050	0.050	100
Activador Na ₂ S						
Muestra	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Li	Contenido metálico (g)	% Rec
4 []	Concentrado	3.2	3.2	0.795	0.025	51.242
pH	Colas	93.2	93.2	0.026	0.024	48.757
6	Alimentación	100	96.4	0.0496	0.049	100
Activador Na ₂ S						

TABLA 16. BALANCE METALÚRGICO VÍA FLOTACIÓN TEMPERATURA 86 °C

Muestra	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Li	Contenido metálico (g)	% Rec
1' []	Concentrado	3	3	0.982	0.029	58.813
pH	Colas	93.8	93.8	0.022	0.020	41.186
6	Alimentación	100	96.8	0.050	0.050	100
Activador NaOH						
Muestra	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Li	Contenido metálico (g)	% Rec
2' []	Concentrado	3.2	3.2	0.662	0.021	42.875
pH	Colas	94.1	94.1	0.03	0.028	57.124
9	Alimentación	100	97.3	0.049	0.049	100
Activador NaOH						
Muestra	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Li	Contenido metálico (g)	% Rec
3' []	Concentrado	3.9	3.9	0.683	0.026	53.284
pH	Colas	93.5	93.5	0.025	0.023	46.715
6	Alimentación	100	97.4	0.050	0.050	100
Activador Na ₂ S						
Muestra	Producto	Peso (g)	%Peso	%Ley Li	Contenido metálico (g)	% Rec
4' []	Concentrado	3.2	3.2	0.795	0.025	50.828
pH	Colas	94.7	94.7	0.026	0.024	49.171
9	Alimentación	100	97.9	0.050	0.0500	100
Activador Na ₂ S						

3.7 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LOS PORCENTAJES DE RECUPERACIÓN Y LEY DE LI

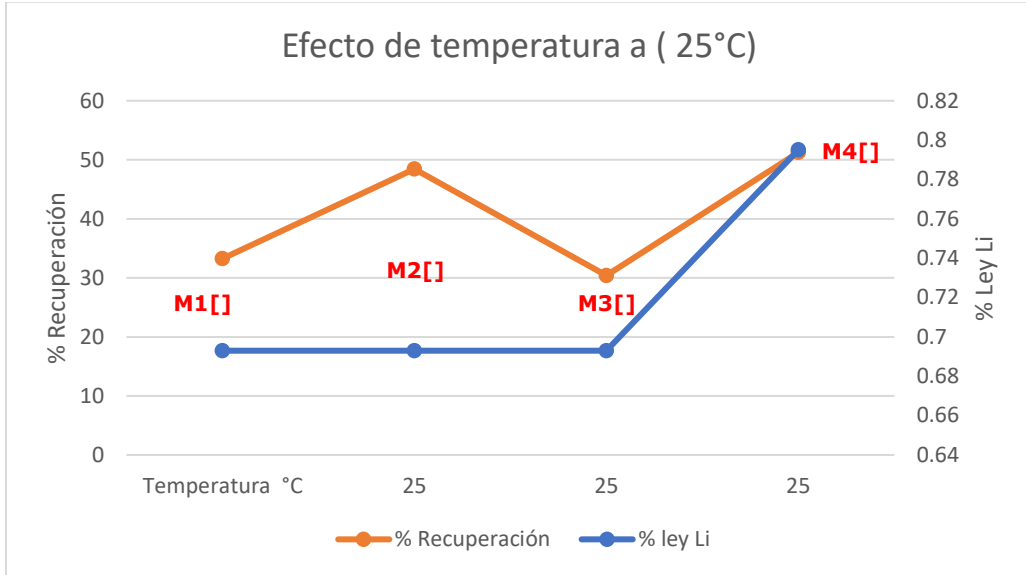


FIGURA 36. EFECTO DE LA TEMPERATURA (25°C) EN EL PORCENTAJE DE LEY LI Y PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN OBTENIDOS

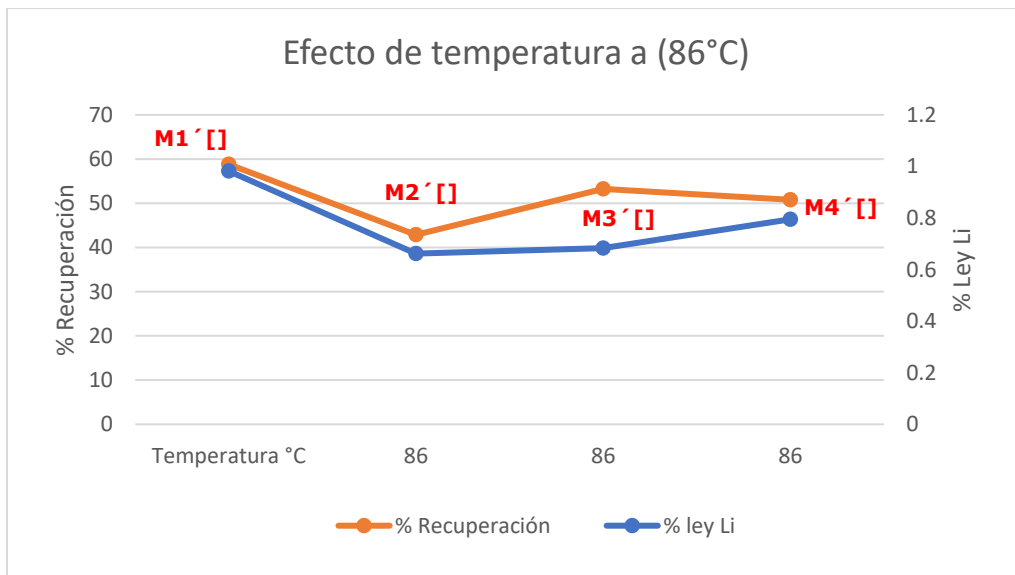


FIGURA 37. EFECTO DE LA TEMPERATURA (86°C) EN EL PORCENTAJE DE LEY LI Y PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN OBTENIDOS

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.2 TRITURACIÓN

Se trabajó la trituration con 3 muestras en función de su tamaño por su apariencia visual después de reducir su tamaño original, como se observa en la Tabla 4 donde se observa el peso de cada una de ellas. Haciendo un análisis granulométrico de cada una de las muestras reportado en las Tablas 5, 6, 7. Donde se observa que en las 3 tablas el % 80 Ac (-) se retenía en su mayoría en la malla 0.50 (tamaño 12700 μm). Dados los resultados obtenidos se podía leer adecuadamente y no se optó por ocupar una escala diferente.

Se obtuvieron 3 valores de W_i (work index) y se realizó un promedio de ellos, que están registrados en la Tabla 8. Siendo el de la muestra dos el más lejano y se podría decir que el conglomerado de esa parte de la pegmatita tenía una distinta proporción de componentes y el valor fue algo cambiante a los demás.

4.3 MOLIENDA

Para la molienda se trabajó vía seco, se usaron dos tiempos de trabajo 4 y 8 minutos. En las dos moliendas el tamaño de liberación se comenzó a visualizar encontró en la malla #50 (tamaño en μm 280), como se observa en la *Figura 38*.



FIGURA38. TAMAÑO DE LIBERACIÓN OBSERVADO DE LA PEGMATITA (MOLIENDA)

En la Tabla 9 se puede observar el análisis granulométrico donde se encontró el 74.49 %Ac (-) en la malla #50; no se encontró el 80%, ya que desde mallas anteriores a vista con el microscopio se podía observar como comenzaba a verse más heterogénea la muestra dando más separación a lo que se esperaba fuera la espodumena y hubo un evento con un pedazo de pegmatita atorado.

En la Tabla 10 se puede observar 96.35 %Ac (-) en la malla de 1; se puede decir que en la molienda de 8 minutos se alcanzó a tener mayor cantidad de mineral en un tamaño menor al tamaño de liberación.

Esto se puede visualizar de mejor manera en la *Figura 33*, donde se relaciona los porcentajes acumulados negativos relacionados al tamaño de liberación obtenido de la pegmatita en ambas moliendas con un comportamiento lineal.

Habría que mencionar que el efecto visual de la pendiente de la *Figura 33*, con respecto a la molienda de 8 minutos, no se ve continua, ya que al momento de hacer el análisis granulométrico en la malla se atoro un pedazo de pegmatita y en el cribado con la agitación la o las partículas cayeron a la siguiente malla como ya se había mencionado. Y es donde se aprecia lo referido en las Tablas de los análisis donde se observa aproximadamente ese 75% de % Ac (-) para la molienda de 4 minutos y 96% de % Ac (-) para la molienda de 8 minutos respectivamente.

En la Gráfica 5 tenemos como resultado el tiempo óptimo de molienda dónde se buscaba el 80% de Ac.

4.4 FLOTACIÓN

Como se mencionó en la metodología del trabajo se hicieron 8 flotaciones de las cuales se logró obtener concentrado y colas. Donde se ocuparon dos activadores (NaOH y Na₂S) que interactuaron con la pulpa. Si bien se puede mencionar que el fundamento para ocupar estos activadores se podría decir que tiene que ver con la influencia de los cationes del Na⁺ con la interacción de los grupos funcionales del ácido oleico que fungió como colector en el proceso de flotación de la espodumena.

El mineral recolectado se dividió en dos Tablas, cada una de ellas con el activador que se ocupó.

En la Tabla 11 se trabajó con el activador NaOH, fijando el tiempo total desde el inicio hasta el fin de la flotación, así como las RPM; siendo estos 15 minutos totales y 1200 RPM (constantes)

Los resultados obtenidos en mayor cantidad (g) fueron en pH ácido, (independientemente de la temperatura); con 3.5 y 3.2 g. Respecto a los concentrados obtenidos en pH básico, siendo menores en cantidad (g).

Es de reconocer que el pH ácido fue el mayor recolector de cantidad de concentrado (g). Pero con respecto a la variable temperatura (86) °C se puede observar que se obtuvo mayor cantidad (g) tanto en pH ácido y básico con (3.2 y 3.0) g con respecto a lo obtenido en las flotaciones a temperatura ambiente pH ácido y básico (3.5 y 2.4) g.

Siendo el pH ácido a temperatura ambiente donde se recolectó la mayor parte de concentrado en cantidad (g) con 3.5 g

En la Tabla 12 se usó de activador el Na_2S ; usando fijas las variables ya mencionadas como en la anterior Tabla 11.

Donde los resultados obtenidos en mayor cantidad (g) fueron en pH ácido; (independientemente de la temperatura); con 3.2 y 3.2 g. Respecto a los obtenidos en el pH básico con un total de 6.1 g; siendo menos que en el total de lo obtenido en el pH ácido.

Para el Na_2S la variable temperatura 86 °C fue determinante en la mayor cantidad de concentrado recolectado con un 3.9 g ya que a temperatura 25°C solo se pudo recolectar un 2.2 g.

Algo que también se puede analizar y mencionar de acuerdo con el CAPÍTULO 2.3 Preparación de la flotación con la literatura es el comportamiento que tuvo el medio al hacer ese cambio de pH, durante la flotación, teniendo en cuenta que el espumante Hercomin A-06, pertenece a un alcohol alifático y tienden a ser ácidos aunque no tanto como los aromáticos, la introducción del espumante al medio pudo tener la función de un anfótero y esto dar pie al cambio del pH dando como resultado ese desplazamiento a un medio más ácido o más básico como se observó experimentalmente.

4.5 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA EAA

Después de la recolección se llevó a analizar al laboratorio el producto de las flotaciones obteniendo los resultados pertinentes vía espectrometría absorción atómica.

Se trabajo con una curva de calibración para el equipo con una serie de estándares a concentraciones de 0.5, 1.5,3, 6, y 12 ppm cada una; para poder armar así nuestra curva como se observa en la Gráfica 6.

En la Tabla 15 se colocaron las concentraciones obtenidas con el activador NaOH; se visualiza que en los pH ácidos una mayor concentración, siendo la concentración mayor la que tuvo interacción con temperatura. A temperatura ambiente se obtuvo 0.008923ppm y con el rango de temperatura se obtuvo 0.00991 ppm. Se obtuvo mayor concentración a pH ácidos con el activador NaOH y un mejor concentrado con temperatura.

En la Tabla 16 se colocaron las concentraciones obtenidas con el activador Na₂S, pudiéndose observar que a temperatura ambiente el pH acido tuvo más concentración (0.007979 ppm) con respecto al pH=9, donde se encuentra la mayor concentración; esto tal vez influya que en este pH hubo mayor peso de recolectado de la flotación con respecto al concentrado del pH=6 con temperatura.

Partiendo de la %Ley teórica calculada de la espodumena

Donde la cantidad máxima de %Li=3.7299

Se puede observar en la Tabla 13 el balance metalúrgico para %Ley obtenido a temperatura ambiente, donde se observa que con el activador Na₂S se obtuvo una mejor más alta ley siendo la muestra 3 [] y la muestra 4[] con mayor porcentaje (0.6931901 y 0.795856)

En la Tabla 14. Se visualiza el balance metalúrgico para %Ley obtenido con rango de temperatura; para la muestra 1' [] con activador NaOH a pH=9 se obtuvo un mayor %de ley y con el activador Na₂S a pH=6

En la Figura 36 se observa lo que se pudo obtener en cuanto a cantidad en % de Ley (Li) y % de Recuperación; se puede observar etiquetadas la muestras trabajadas en la experimentación.

4.6 BALANCE METALÚRGICO

Para el balance metalúrgico se realizaron dos tablas tomando el efecto de la temperatura como una variable crítica para el experimento. A su vez observando los resultados por activador usado, muestra y pH usado durante el experimento

Temperatura 25°C

En la Tabla 15 para el activador NaOH a pH 9 en la muestra 1[] se obtuvo en %Ley Li= 0.693 con un porcentaje de recuperación de 33.267. Para la muestra 2[] a pH 6 se obtuvo en %Ley Li=0.693 con un porcentaje de recuperación mayor 48.425 pero la diferencia entre estos es que el peso de muestra es mayor a la muestra 1[] diferenciados por un peso mayor 0.9 g

Para el activador Na₂S a pH 9 en la muestra 3 [] se obtuvo en %Ley Li= 0.693 con un porcentaje de recuperación de 30.418 Para la muestra 4[] a pH 6 se obtuvo en %Ley Li=0.795 con un porcentaje de recuperación mayor 51.242 pero la diferencia entre estos es que el peso de muestra es mayor muestra 4 [] a la muestra diferenciados por un peso mayor 1 g

Temperatura 86°C

En la Tabla 16 para el activador NaOH a pH 6 en la muestra 1'[] se obtuvo en %Ley Li= 0.982 con un porcentaje de recuperación de 58.813. Para la muestra 2'[] a pH 9 se obtuvo en %Ley Li=0.662 con un porcentaje de recuperación mayor 48.875 pero la diferencia entre estos es que el peso de muestra 1'[] es 3g y la 2'[] es de 3.2. Dando un resultado más sobresaliente en un pH ácido con la influencia de temperatura ya que la diferencia de peso no es tanta comparada con las muestras que se trabajaron a Temperatura 25°C.

Para el activador Na₂S a pH 6 en la muestra 3' [] se obtuvo en %Ley Li= 0.683 con un porcentaje de recuperación de 53.284 Para la muestra 4'[] a pH 9 se obtuvo en %Ley Li=0.795 con un porcentaje de recuperación mayor 50.828 pero la diferencia entre estos es que el peso de muestra 3' [] con 3.9 g y 4'[] con 3.2 g

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

- Se logró desarrollar un modelo de flotación a temperatura ambiente y con variable temperatura capaz de recuperar espodumena modificando ciertas variables del proceso.
- El pH ácido es un medio importante para la recolección de espodumena.
- El activador NaOH obtuvo un mejor desempeño en la obtención de concentraciones mayores a pH ácidos.
- Para el activador NaOH el factor temperatura ambiente solo aumenta la cantidad de concentración obtenida de la espodumena a pH ácido.
- El activador Na₂S obtuvo un mejor desempeño global en el pH ácido; y con la variable de temperatura.
- Para el activador Na₂S la temperatura y el pH fue un factor para conseguir mayor concentración en un medio ácido.

BIBLIOGRAFÍA

1. Jaskula W. B., (2023) U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January,(22/02/2023) <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2023>
2. Ballester A. , Verdeja L.F., Sancho J., (2000), Metalurgia Extractiva Fundamentos volumen 1, Primer edición, España, Síntesis S.A. (pag.20)
3. Servicio Geológico Mexicano, (2017), Yacimientos Minerales en México,(08/03/2023), https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Yacimientos-minerales-en-Mexico.html
4. Rioyo J., Tuset S., Grau R. (2020), Lithium Extraction from Spodumene by the Traditional Sulfuric Acid Process: A Review, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1798234>
5. Alvarado Morales Mercedes, (1999), Caracterización geoquímica de la pegamatita el muerto, Oaxaca México; Tesis para obtener el grado de maestra en Ciencias de la Tierra Geoquímica; Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
6. Sánchez Juárez Faustino, (2010), Apuntes para el laboratorio de beneficio de minerales; Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México Ciudad Universitaria México D.F.
7. Cotton F. A.; Wilkinson G.; (1969), Advanced Inorganic Chemistry; second edition (a division of John Wiley & Sons, Inc, N.Y.) Editorial Limusa-Wiley, S.A. México
8. Wills B. A.,Napier-Munn T.J., (2006), Mineral Processing Technology, an Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery; Seventh Edition, Elsevier Science & Technology Books
9. Errol G. Kelly, (1990), Introducción al procesamiento de minerales, Primer edición, Editorial Limusa, S.A. de C.V. (pag.153)(331-333)
10. Witker Velásquez Jorge, (2021), Derecho Minero, Solar Servicio Editoriales, S.A. de C.V.; Instituto de Investigaciones Jurídicas, Universidad Nacional Autónoma de México; Ciudad Universitaria Ciudad de México.
11. Azamar Alonso Aleida, (2022), Minería en México: panorama, ambiental y económico; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Universidad Autónoma Metropolitana

www.casadelibrosabiertos.uam.mx/index.php/libroelectronico/

www.gob.mx/semarnat/educacionambiental.

12. Dessemond C¹., Lajoie-Leroux F. ¹, Soucy G¹., Laroche N², Magnan J.F²; (2019)
Spodumene: The lithium Market, Resources and Processes, ¹Département de génie chimique et de génie biotechnologique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1K 2R1, Canada ;²Nemaska Lithium Inc., Quebec, QC G1K 3X2, Canada
<https://doi.org/10.3390/min9060334>
13. Nazir Kashif M., Dyer L., Tadesse B., Albinjanic B., Kashif N., Influence of calcination temperatures on lithium deportment by screening hard rock lithium, Heliyon, Volume 9, Issue 3, 2023, e13712, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13712>.
14. Bulatovic M. Srdjan, Handbook of Flotation Reagents, Chemistry, Theory and Practice, Flotation of Industrial Minerals, Chapter 28 Beneficiation of Lithium Ores.
15. Paniagua Gutiérrez Héctor Omar, (2015), Síntesis de surfactantes aniónicos de cadena larga y su aplicación en flotación de minerales; Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México D.F.
16. Secretaría de Economía (2018), Perfil de Mercado del Litio; Dirección General de Desarrollo Minero
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419275/Perfil_Litio_2018__T_.pdf
17. J.W Gibb, (1928); Collected Work; Vol.1 Longmans; Green & Co; New York.
18. Shulze, H.J., (1977) “New Theoretical and Experimental Investigation on Stability of Bubble Particle Aggregates in Flotation: A Theory of Upper Particle Size on Flotability”, J. Mineral Process, 4, 241- 259
19. London, D., 1992a, The Application of Experimental Petrology to the Genesis and Crystalization of Granitic Pegmatites. Canadian Mineralogist, Vol. 30, pp 499-510

APENDICE I. CALCULOS

- *Cálculos para el Wi Muestras (1,2,3)*
Ejemplificación Muestra1

Datos:

lc	1.3
lv	1
V	220
Nf	3

P80	13742.65455
F80	25400

Para P80 de la ecuación de la recta:

$$\frac{(80-4.4154)}{0.0055} = 13742.65455$$

10P80	0.085303075
10F80	0.062745581

$$10F80 = \frac{10}{\sqrt{F80}} = 0.062745581$$

$$10P80 = \frac{10}{\sqrt{P80}} = 0.085303075$$

Conversiones:

Peso gramos	618.6
Peso toneladas	0.0006186

$$618.6gr \left(\frac{1kg}{1000gr} \right) \left(\frac{1T}{1000kg} \right) = 0.0006186$$

Tiempo segundos	4.15
Tiempo horas	0.001152778

$$4.15seg \left(\frac{1hr}{3600seg} \right) = 0.001152778$$

- *Para Kw*

$$Kw = \frac{(lc - lv)V \sqrt{NF}}{1000} = \frac{(1.3 - 1)220 \sqrt{3}}{1000}$$

$$Kw = 0.11431535$$

- *Para la CAP*

$$\frac{\text{Toneladas}}{\text{Hrs}} = \frac{0.0006186}{0.00115278}$$

$$CAP = 0.53661687 \frac{\text{sTon}}{\text{h}}$$

- *Para W*

$$W = \frac{Kw}{CAP} = \frac{0.11431535}{0.53661687} = 0.21302974$$

$$W = 0.21302974 \text{ kW-h/sTon}$$

- *Para Wi*

$$Wi = \frac{W}{\left(\frac{10}{\sqrt{P80}} - \frac{10}{\sqrt{F80}}\right)} = \frac{0.21302974}{\left(\frac{10}{\sqrt{13742.6545}} - \frac{10}{\sqrt{25400}}\right)}$$

$$Wi = 9.44385672 \text{ kW - h/ston}$$

- *Cálculos para Molienda*

$$\text{Diámetro} = 21.7 \text{ cm}$$

Volumen del molino

$$V = \pi r^2 h = (\pi)(10.85 \text{ cm})^2 (15.8 \text{ cm})$$

$$V = 5843.41 \text{ cm}^3$$

- *Para la densidad de bola:*

300 ml en probeta

$$\text{Cada línea 10 ml} \quad \delta = \frac{m}{v} = \frac{218 \text{ gr}}{30 \text{ ml}}$$

$$30 \text{ ml desplazados} \quad \delta = 7.28 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}$$

Entonces:

$$5843.41 \text{ cm}^3 \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000000 \text{ cm}^3} \right) = 0.0058 \text{ m}^3$$

Para unidades en Ton/ m³

$$7.28 \text{ gr/cm}^3 \left(\frac{10^6 \text{ cm}^3}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{1 \text{ Ton}}{1 \text{ gr}} \right) = \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}$$

- *Para la carga de bolas*

$$C_B = (V)(\delta)(0.2044) = (0.0058 \text{ m}^3)(7.28 \text{ Ton/m}^3)(0.2044)$$

$$C_B = 8.63 \times 10^{-3} \text{ Ton} \left(\frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ Ton}} \right) = 8.6 \text{ kg}$$

- *Cálculos para Flotación*

Para los activadores Na₂S y NaOH

En la literatura se ocupó (0.5 a 1) kg/ton

Se hizo los siguientes cálculos para las flotaciones con muestras de 100 gr

$$100 \text{ gr} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \right) \left(\frac{1 \text{ Ton}}{1000 \text{ kg}} \right) = 0.0001$$

$$1 \text{ Ton} \rightarrow 750 \text{ gr}$$

$$1 \times 10^{-4} \text{ Ton} \rightarrow x = 0.0075 \text{ gr}$$

Concentración del colector Na₂S P.M.= 240.18 gr/mol

$$\frac{0.075gr}{1200ml} = 6.25 \times 10^{-5} gr/ml$$

$$\left(\frac{6.25 \times 10^{-5} gr}{ml}\right) \left(240.18 \frac{gr}{ml}\right) = 0.015M \text{ [Na}_2\text{S]}$$

En la literatura se ocupó (400 a 600) gr/ton

Para el colector ácido oleico

$$100gr \left(\frac{1kg}{1000gr}\right) \left(\frac{1Ton}{1000kg}\right) = 0.0001$$

$$1Ton \rightarrow 500 gr$$

$$1 \times 10^{-4} Ton \rightarrow x=0.05 gr$$

Porcentaje solidos en peso

$$\left(\frac{100}{1200}\right)(100) = 8.33\% sol/wt$$

Relación liquido- sólido

$$RLS = \frac{100 - 8.33}{8.33} = 11$$

- Cálculos para espectroscopia de absorción atómica

$$ppm = \frac{Lect * F.D * V}{P.M}$$

Entonces:

$$ppm = mg/L$$

$$\text{Se aforó a } 100 \text{ ml} \rightarrow 0.1 \text{ L}$$

$$\text{Muestra de } 1(\pm) \text{ gr}$$