

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CONCENTRACIÓN POR FLOTACIÓN DE FELDESPATO, MICA Y CUARZO A PARTIR DE LOS GNEISES DEL ÁREA DE BEJUMA. ESTADO CARABOBO

**Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por Brs. Aleida Arévalo y Ángel R. Contreras.
Para optar al título de Ingeniero de Minas**

Caracas, Febrero de 2006

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CONCENTRACIÓN POR FLOTACIÓN DE FELDESPATO, MICA Y CUARZO A PARTIR DE LOS GNEISES DEL ÁREA DE BEJUMA. ESTADO CARABOBO

Tutor Académico

Prof. Mónica Martiz

Tutor Industrial

Prof. Simón Rodríguez

Presentado Ante la Ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por Brs. Aleida Arévalo y Ángel R. Contreras.

Para optar al título de Ingeniero de Minas

Caracas, Febrero de 2006

INDICE

| | |
|--|------------|
| AGRADECIMIENTO | VII |
| DEDICATORIA..... | IX |
| DEDICATORIA..... | X |
| RESUMEN..... | XI |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPITULO I..... | 3 |
| 1 GENERALIDADES..... | 3 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 3 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.2.1 Objetivo General..... | 4 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos..... | 4 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN..... | 4 |
| 1.4 LOCALIZACIÓN DE LA MENA..... | 5 |
| 1.4.1 Localización y acceso | 5 |
| 1.5 GEOLOGÍA | 6 |
| 1.5.1 Geología Regional..... | 6 |
| 1.5.2 Geología Local..... | 9 |
| 1.6 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN..... | 10 |
| CAPITULO II | 11 |
| 2 MARCO TEÓRICO..... | 11 |
| 2.1 EL FELDESPATO | 11 |
| 2.1.1 Clasificación del Feldespato | 11 |
| 2.1.2 Uso y especificaciones del feldespato..... | 12 |
| 2.1.3 Feldespato en Venezuela..... | 15 |
| 2.1.4 Depósitos de feldespato en Venezuela | 17 |
| 2.2 LA MICA..... | 17 |
| 2.2.1 Clasificación de la Mica..... | 18 |
| 2.2.2 Uso de la mica..... | 21 |
| 2.2.2.1 Pintura..... | 21 |
| 2.2.2.2 Petróleo..... | 22 |
| 2.2.3 Especificaciones de la mica | 23 |

| | | |
|--------------------------|--|-----------|
| 2.2.4 | Depósitos de mica en Venezuela..... | 24 |
| 2.3 | EL CUARZO..... | 25 |
| 2.3.1 | Clasificación del cuarzo | 26 |
| 2.3.1.1 | Variedades macrocristalinas..... | 26 |
| 2.3.1.2 | Variedades criptocristalinas | 27 |
| 2.3.2 | Uso del cuarzo..... | 27 |
| 2.3.3 | Especificaciones técnicas para el cuarzo..... | 28 |
| 2.3.4 | Depósitos de cuarzo en Venezuela..... | 29 |
| CAPITULO III..... | | 30 |
| 3 | BENEFICIO DE MINERAL..... | 30 |
| 3.1 | PREPARACIÓN DE LOS MINERALES..... | 30 |
| 3.1.1 | Operaciones de fragmentación..... | 30 |
| 3.1.1.1 | Trituración..... | 31 |
| 3.1.2 | Separación..... | 39 |
| 3.1.2.1 | Operaciones de clasificación..... | 39 |
| 3.1.2.2 | Concentración mineral | 42 |
| CAPITULO IV | | 64 |
| 4 | DESARROLLO EXPERIMENTAL..... | 64 |
| 4.1 | CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA | 64 |
| 4.1.1 | Descripción macroscópica | 66 |
| 4.1.2 | Estudio petrográfico..... | 66 |
| 4.1.3 | Análisis de difracción de Rayos X..... | 70 |
| 4.1.4 | Análisis de fluorescencia de Rayos X..... | 72 |
| 4.1.5 | Trituración y análisis granulométrico | 73 |
| 4.1.6 | Análisis químico. | 81 |
| 4.1.7 | Análisis de liberación..... | 82 |
| 4.1.8 | Estudio de Moliendabilidad | 87 |
| 4.2 | PROCESO DE CONCENTRACIÓN MINERAL..... | 93 |
| 4.2.1 | Ensayos exploratorios de concentración | 95 |
| 4.2.1.1 | Ensayos exploratorios de la primera etapa de flotación | 103 |
| 4.2.1.2 | Ensayos exploratorios de la segunda etapa de flotación..... | 105 |
| 4.2.1.3 | Resultados preliminares de los ensayos exploratorios..... | 107 |
| 4.2.2 | Experimentos de concentración definitivos. | 111 |
| 4.2.3 | Resultados de ensayos experimentales de flotación..... | 119 |
| 4.2.3.1 | Resultados de análisis químico primera etapa..... | 122 |

| | | |
|---------|--|------------|
| 4.2.3.2 | Resultados de análisis químico segunda etapa de flotación..... | 124 |
| 4.2.4 | Cálculos para la Recuperación | 126 |
| 4.2.4.1 | Recuperación de C1 de la primera etapa de flotación | 128 |
| 4.2.4.2 | Recuperación de C2 de la segunda etapa de flotación..... | 128 |
| 4.2.4.3 | Recuperación de C3 de la segunda etapa de flotación..... | 129 |
| 4.2.5 | Efecto de parámetros, primera etapa de flotación | 130 |
| 4.2.6 | Efecto de parámetros, segunda etapa de flotación..... | 134 |
| 4.2.7 | Análisis de resultados..... | 139 |
| | CONCLUSIONES..... | 144 |
| | RECOMENDACIONES..... | 147 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 148 |

INDICE DE TABLA

| | |
|--|-----|
| TABLA 1. TIPO DE PLAGIOCLASA. | 12 |
| TABLA 2. ESPECIFICACIONES QUÍMICAS DEL FELDESPATO PARA VIDRIO. | 13 |
| TABLA 3. ESPECIFICACIONES QUÍMICAS DEL FELDESPATO. | 15 |
| TABLA 4. PRODUCCIÓN DE FELDESPATO REGISTRADA 1999 – 2003. | 16 |
| TABLA 5. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE FELDESPATO. | 16 |
| TABLA 6. ESPECIFICACIONES QUÍMICAS DE LA MICA. | 23 |
| TABLA 7. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MICA. | 24 |
| TABLA 8. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE LA MICA. | 25 |
| TABLA 9. ESPECIFICACIONES PARA LA INDUSTRIA METALÚRGICA. | 28 |
| TABLA 10. ESPECIFICACIONES PARA LA INDUSTRIA DEL VIDRIO. | 28 |
| TABLA 11. ESPECIFICACIONES PARA LA INDUSTRIA DE DERIVADOS QUÍMICOS. | 28 |
| TABLA 12. TAMAÑOS DE TRITURACIÓN. | 32 |
| TABLA 13. SERIE TYLER Y A.S.T.M. | 41 |
| TABLA 14. RESULTADO DEL ANÁLISIS PETROGRÁFICO (MUESTRA A) | 67 |
| TABLA 15. RESULTADO DEL ANÁLISIS PETROGRÁFICO (MUESTRA B). | 69 |
| TABLA 16. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE MUESTRAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X. | 71 |
| TABLA 17. CARACTERÍSTICAS DE LOS MINERALES ENCONTRADOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X. | 71 |
| TABLA 18. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE MUESTRAS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X. | 73 |
| TABLA 19. FLUORESCENCIA DE RAYOS X (ELEMENTOS TRAZA). | 73 |
| TABLA 20. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA TRITURACIÓN PRIMARIA. | 75 |
| TABLA 21. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS DE LA TRITURACIÓN SECUNDARIA. | 76 |
| TABLA 22. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS DE LA TRITURACIÓN TERCIARIA. | 78 |
| TABLA 23. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA TRITURACIÓN CUATERNARIA. | 80 |
| TABLA 24. RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO. | 81 |
| TABLA 25. ANÁLISIS DE LIBERACIÓN DEL FELDESPATO. | 85 |
| TABLA 26. ANÁLISIS DE LIBERACIÓN DE LA MICA. | 86 |
| TABLA 27. PORCENTAJE DE PASANTE PARA LOS TIEMPOS DE MOLIENDA. | 87 |
| TABLA 28. GRANULOMETRÍA DE LA MOLIENDA 1 HORA 37 MINUTOS. | 93 |
| TABLA 29. PROGRAMACIÓN DE LOS ENSAYOS EXPLORATORIOS PRIMERA ETAPA. | 104 |
| TABLA 30. PROGRAMACIÓN DE LOS ENSAYOS EXPLORATORIOS SEGUNDA ETAPA. | 106 |
| TABLA 31. CONDICIONES DE LAS MUESTRAS. | 109 |
| TABLA 32. RESULTADO DE LABORATORIO. ENSAYOS EXPLORATORIOS. | 110 |
| TABLA 33. PARÁMETROS Y DOSIS INICIALES DE ENSAYOS EXPERIMENTALES (PRIMERA ETAPA). | 114 |
| TABLA 34. PRIMERA SERIE, VARIACIÓN DEL PH (PRIMERA ETAPA). | 114 |

| | |
|--|-----|
| TABLA 35. SEGUNDA SERIE, VARIACIÓN EN LA DOSIS DE AMINA (PRIMERA ETAPA)..... | 115 |
| TABLA 36. TERCERA SERIE, VARIACIÓN DE LA DOSIS DEL DEPRESOR (PRIMERA ETAPA). | 115 |
| TABLA 37. CUARTA SERIE, VARIACIÓN DEL ESPUMANTE (PRIMERA ETAPA)..... | 116 |
| TABLA 38. QUINTA SERIE, VARIACIÓN EN EL TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO DEL DEPRESOR (PRIMERA ETAPA) | 116 |
| TABLA 39. PARÁMETROS Y DOSIS INICIALES DE ENSAYOS EXPERIMENTALES (SEGUNDA ETAPA) | 117 |
| TABLA 40. PRIMERA SERIE, VARIACIÓN DE PH (SEGUNDA ETAPA) | 118 |
| TABLA 41. SEGUNDA SERIE, VARIACIÓN DE LA DOSIS DE AMINA (SEGUNDA ETAPA)..... | 118 |
| TABLA 42. TERCERA SERIE, VARIACIÓN DEL DEPRESOR (SEGUNDA ETAPA). | 118 |
| TABLA 43. CUARTA SERIE, VARIACIÓN DE LA DOSIS DE ESPUMANTE (SEGUNDA ETAPA)..... | 119 |
| TABLA 44. QUINTA SERIE VARIACIÓN DEL TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO DEL DEPRESOR (SEGUNDA ETAPA) | 119 |
| TABLA 45. MASAS OBTENIDAS ENSAYOS EXPERIMENTALES, 1ERA ETAPA. | 120 |
| TABLA 46. MASAS OBTENIDAS EN ENSAYOS EXPERIMENTALES 2DA ETAPA. | 121 |
| TABLA 47. RESULTADOS DE LABORATORIO. 1 ^{ERA} ETAPA DE FLOTACIÓN..... | 123 |
| TABLA 48. ANÁLISIS QUÍMICO DE LA ALIMENTACIÓN (CABEZA) 2DA ETAPA. | 124 |
| TABLA 49. RESULTADOS DE LABORATORIO: CONCENTRADO DE MICA C2. 2 ^{DA} FLOTACIÓN. | 125 |
| TABLA 50. RESULTADOS DE LABORATORIO. CONCENTRADO DE FELDESPATO C3. 2 ^{DA} FLOTACIÓN. | 125 |
| TABLA 51. BALANCE DE MASA DE CUARZO MUESTRA DE 1ERA ETAPA FLOTACIÓN. (CÁLCULO TIPO).. | 126 |
| TABLA 52. PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN, CONCENTRADO C1 1 ^{ERA} ETAPA | 128 |
| TABLA 53. PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN, 2 ^{DA} C2 MICA..... | 129 |
| TABLA 54. PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN, 2 ^{DA} C3 FELDESPATO..... | 130 |
| TABLA 55. EFECTO DEL PH EN LA RECUPERACIÓN DE CUARZO | 131 |
| TABLA 56. EFECTO DE AMINA EN LA RECUPERACIÓN DE CUARZO. | 131 |
| TABLA 57. EFECTO DEL DEPRESOR EN LA RECUPERACIÓN DE CUARZO..... | 132 |
| TABLA 58. EFECTO DEL TIEMPO DE ACONDICIONAMIENTO DEL DEPRESOR EN LA RECUPERACIÓN DE CUARZO. | 133 |
| TABLA 59. EFECTO DEL DEPRESOR EN LA MASA DE CUARZO..... | 133 |
| TABLA 60. EFECTO DEL PH EN LA RECUPERACIÓN DE MICA. | 134 |
| TABLA 61. EFECTO DE LA AMINA EN LA RECUPERACIÓN DE MICA. | 135 |
| TABLA 62. EFECTO DEL DEPRESOR EN LA RECUPERACIÓN DE MICA..... | 135 |
| TABLA 63. EFECTO DEL DEPRESOR EN LA MASA DE MICA. | 136 |
| TABLA 64. EFECTO DEL PH EN LA RECUPERACIÓN DE FELDESPATO..... | 137 |
| TABLA 65. EFECTO DE LA AMINA EN LA RECUPERACIÓN DE FELDESPATO..... | 137 |
| TABLA 66. EFECTO DEL DEPRESOR EN LA RECUPERACIÓN DE FELDESPATO..... | 138 |
| TABLA 67. EFECTO DEL DEPRESOR EN LA MASA DEL FELDESPATO..... | 139 |

INDICE DE FIGURA

| | |
|---|-----|
| FIGURA 1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE TOMA DE MUESTRAS. GEOLOGÍA REGIONAL..... | 6 |
| FIGURA 2. CLASIFICACIÓN DE LA MICA (FUENTE: REVISTA INDUSTRIAL MINERALS). | 19 |
| FIGURA 3. MACHACADORA DE MANDÍBULAS TIPO BLAKE (FUENTE PELÁEZ 1980). | 34 |
| FIGURA 4. CILINDROS TRITURADORES (FUENTE PELÁEZ 1980). | 36 |
| FIGURA 5. MOVIMIENTO CARGA EN LOS MOLINOS (FUENTE: WILLS, B. 1997)..... | 38 |
| FIGURA 6. PROCESO DE FLOTACIÓN (FUENTE: PELÁEZ, EDUARDO 1980) | 45 |
| FIGURA 7. POTENCIAL ELECTROQUÍMICO Y DOBLE CAPA ELÉCTRICA. FUENTE: KELLY & SPOTTISWOO | 50 |
| FIGURA 8. EFECTO DE LA ACTIVIDAD DEL IÓN DETERMINANTE..... | 52 |
| FIGURA 9. CLASIFICACIÓN DE LOS REACTIVOS COLECTORES. | 54 |
| FIGURA 10. CLASIFICACIÓN DE LA AMINA: FUENTE: PELÁEZ, 1980. | 55 |
| FIGURA 11. ESQUEMA GENERAL DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).65 | |
| FIGURA 12. MINERAL DE PLAGIOCLASA TIPO ALBITA CON SU MACLADO CARACTERÍSTICO | 68 |
| FIGURA 13. MICROCLINO CON SUS CARACTERÍSTICAS MACLAS ENREJADAS | 68 |
| FIGURA 14. CRISTALES DE MUSCOVITA VISTOS BAJO NÍCOLES PARALELOS..... | 69 |
| FIGURA 15. ASPECTO GENERAL DE LA SECCIÓN PETROGRÁFICA B DONDE SE APRECIAN CRISTALES DE CUARZO, PLAGIOCLASA, MICROCLINO Y MOSCOVITA. | 70 |
| FIGURA 16. PUNTOS DE CARGA CERO DE LA MOSCOVITA, FELDESPATO Y CUARZO | 96 |
| FIGURA 17. EFECTO DEL DEPRESOR EN EL POTENCIAL ZETA | 96 |
| FIGURA 18. ESQUEMA PARA LOS ENSAYOS EXPLORATORIOS..... | 99 |
| FIGURA 19. MÁQUINA DE FLOTACIÓN (DENVER, D-12). | 100 |
| FIGURA 20. ESQUEMA EXPERIMENTAL DE FLOTACIÓN DEFINITIVO | 112 |

AGRADECIMIENTO

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a la Ilustre Universidad Central de Venezuela y a todos los profesores del Departamento de Minas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, por su aporte en la formación como profesionales de la minería; especialmente a la Ing. Alba Castillo, por su confianza y su valiosa ayuda incondicional.

Al Ingeniero y profesor, Pregitzer por su amistad y apoyo durante todo el proceso de ejecución del trabajo.

Al Ingeniero y profesor, Omar Márquez por su amistad y su apoyo.

Al Ingeniero Manuel García por su amistad y apoyo durante todo el proceso de ejecución del trabajo.

A Omar Goddeliet por su amistad y apoyo durante todo el proceso de ejecución del trabajo.

Al Ingeniero Juan Carlos Almeida por su amistad y apoyo durante todo el proceso de ejecución del trabajo.

Al profesor Carlos Di Yodorio por su respaldo y valiosa colaboración en la realización del presente trabajo.

Al Ingeniero y profesor, Alex Villanueva por sus conocimientos y dedicación a la enseñanza y quien siempre nos brindó su amistad.

Al Ing. Ricardo Alezones, por su aporte en los análisis mineralógicos y acertadas recomendaciones.

A María Teresa Y Eunices por el apoyo brindado y a todos nuestros compañeros y amigos del Departamento de Minas en especial a Iván, Hildemaro, Rimsky, Miguel, a Juan y a Tania, quienes compartieron todas nuestras flaquezas y fortalezas durante nuestra carrera y, más aún, en la última etapa de ésta; así como nuestros amigos Adriana, Ramón, Donald cuya amistad fuera de la escuela estuvo siempre presente.

Y al resto de las personas que, de alguna u otra forma, nos prestaron su ayuda para la realización y culminación del presente trabajo.

DEDICATORIA

En estos momentos de profunda emotividad quisiera expresar todo lo que llevo dentro, sin que me quede nada, reír, llorar, cantar, soñar... ¿Qué puedo decir de la gran satisfacción por el deber cumplido? ¡Tantas cosas!.

Dedico este largo capítulo de mi existencia con mucho amor a quienes convivieron en silencio por tan largo tiempo y sufrieron tantas travesías para ayudarme a terminar mi carrera, primeramente a mi Dios Cristo Jesús ya que fue con su ayuda y apoyo que hoy en día soy Ingeniero de Minas para la Gloria de él.

A:

Mis padres:

Amada Contreras, mi dulce madre que nunca se separo de mí y me dio su apoyo, confianza y me enseñó a creer en Cristo Jesús.

Mi padre Marcos Malavé que estuvo pendiente de este momento tan crucial para mí. Se que me quieres como yo te quiero padre mió.

Y a mis hermanos: Nelson Jesús Contreras, Wilfredo Contreras, Henry Contreras, Jesús Atanyu Contreras, Marquito y Mauro Malave. Y muy especialmente a mis bellas hermanas Mariela Contreras, Leydis Contreras, Maricarmen Malave, Maria Malave, Marilin Malave, a mi sobrinos, bueno en fin a toda mi familia que merecen todo lo mejor de este mundo QUE CRISTO JESUS LES DE TODAS LAS BENDICIONES Y LES CUIDE SON MIS MEJORES DESEOS LOS QUIERO A TODOS.

“Mejor es el fin del negocio que su principio; mejor es el sufrido de espíritu que el altivo de espíritu.” Palabras del rey, predicador y sabio Salomón, hijo del rey David. (Eclesiastés 7:8).

Ángel R. Contreras

DEDICATORIA

Con mucho amor

A mi madre por ser este uno de sus sueños y a mis hermanos

*A Nelson por la confianza y apoyo que siempre me brindo y por el tiempo que
no le podía dedicar*

A mis niñas lindas Patricia y Samanta el cual es mi mayor tesoro

ARÉVALO ALEIDA y CONTRERAS ÁNGEL

**CONCENTRACIÓN POR FLOTACIÓN DE FELDESPATO, MICA Y
CUARZO DE LOS GNEISES DEL ÁREA DE BEJUMA. ESTADO
CARABOBO.**

Tutor Académico: Prof. Mónica Martiz. Tutor industrial: Prof. Simón Rodríguez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2006, 162 pp.

Palabras Claves: Flotación, Minerales no metálicos, Feldespato, Mica y Cuarzo, Beneficio de mineral.

RESUMEN

Con el fin de obtener materia prima como feldespato, mica y cuarzo de uso industrial, de la cantera MINERA MINORCA MONTALBAN C.A., estado Carabobo, se inició el estudio de factibilidad de beneficio mineral fundamentado en las teorías del proceso de preparación y concentración de menas, utilizando el método de concentración por flotación. A partir de la caracterización de la mena (difracción y fluorescencia de rayos x, petrografía, análisis químico, análisis de liberación, granulometría), luego se sometió a un proceso de cuatro trituraciones y molienda. Los análisis antes mencionados arrojaron los siguientes resultados: la roca es gnéisica cuarzo-feldespática-micácea, con un tenor promedio de 50% de cuarzo, 45% de feldespato y 5% de mica. La mena contiene dos tipos de feldespato, el sódico y el potásico, además de la moscovita. Antes de iniciar el proceso de flotación, el material proveniente de la molienda se sometió a un lavado con el fin de eliminar partículas menores a la malla 325; las cuales que perjudican tal proceso. Este proceso se llevó a cabo en dos etapas; una flotación en medio ácido, para obtener un concentrado de cuarzo y un concentrado de feldespato y mica. La segunda flotación se llevó a cabo en medio básico para separar la mica del feldespato. Para el proceso de concentración se tomó como referencia al SiO_2 como indicador de cuarzo, Na_2O para el feldespato y K_2O para la mica. Se obtuvo una recuperación de 90% de cuarzo con pH 3; para la mica la recuperación fue de 85,87% con un pH 9 y un 90% de feldespato para un pH 10.

En general, se estima ineludible realizar estudios más detallados, con un mayor número de pruebas en el laboratorio como en planta piloto, para valorar el procedimiento de la mena al tratamiento continuo, con la finalidad de tener la certeza de que el yacimiento brinde mayores perspectivas de interés económico

INTRODUCCIÓN.

En la actualidad Venezuela es un importador de considerables volúmenes de minerales industriales, entre los que se encuentra el feldespato con 229 mil TM en el 2002, la mica con 168 mil TM y cuarzo con 226 mil TM, constituyéndose estos en materia prima básica para amplios sectores de la industria de la región central, como son las del vidrio, pinturas y cerámicas, entre otras. Estos volúmenes pueden ser en gran parte o totalmente sustituidos por producción nacional. En el área de Bejuma, estado Carabobo, existen depósitos que contienen grandes reservas de gneises; los cuales son rocas metamórficas ricas en cuarzo, feldespato y mica, que pueden ser preparados para uso industrial a través de concentración de mena.

Aún cuando hasta el momento no se han efectuado estudios evaluativos detallados, estos depósitos parecen constituir una importante reserva de materia prima en vista de su excelente calidad, en base a este hecho se plantea el estudio de recuperación por flotación al gneis del área de Bejuma. La concentración de mineral por flotación consiste en separar el mineral útil de la ganga, esto después de una reducción de tamaño hasta una cierta liberación y aprovechando las propiedades que tienen algunos minerales de adherirse a las burbujas de aire existentes en una emulsión o pulpa, recogiendo en una espuma mineralizada, mientras que los otros minerales se hunden en el líquido.

La investigación busca plantear un esquema de beneficio mineral bajo un circuito de concentración por flotación, así como también determinar el grado de recuperación de los tres minerales, determinando así, la posibilidad de emplearlo como materia prima para la industria del vidrio, pintura, abrasivo entre otras, ya que éstas son las principales industrias que emplean feldespato, mica y cuarzo.

Esta investigación se realiza bajo una estructura metodológica para el desarrollo del Trabajo Especial de Grado. Inicialmente se determinó el planteamiento del problema, objetivos y justificación, el cual es la base del inicio para el desarrollo de éste, quedando finalmente constituido por 4 capítulos, el primero lo constituyen las generalidades, el segundo los compone el marco teórico, el tercero describe de la preparación mecánica y el cuarto el desarrollo experimental y por último las conclusiones, recomendaciones y bibliografía.

CAPITULO I

1 GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Venezuela es uno de los países suramericanos que posee un importante número de yacimientos de minerales no metálicos que albergan grandes depósitos de feldespato, mica, caliza, grava, talco, etc, concentrados en el centro del país, particularmente en los estados Aragua, Carabobo y Cojedes. Sin embargo, estos yacimientos no han sido ampliamente explotados. Las limitaciones en el aprovechamiento estos recursos que se encuentran en el territorio nacional ha contribuido a que la producción nacional no sea autosuficiente, y en consecuencia, la importación de estos insumos ha aumentado últimamente.

De acuerdo a estudios realizados por CORPOCENTRO en el estado Carabobo, particularmente la zona de Bejuma, ésta alberga desde el punto de vista volumétrico, cualitativo y geográfico, importantes afloramientos de gneises que contienen feldespato, mica y cuarzo. Tales reservas permiten al país la oportunidad económica de avanzar en la investigación al detalle acerca de la factibilidad de producir estos insumos y conlleven a sustituir las importaciones. Por su parte, CORPOCENTRO propone estudios de beneficio de mineral y otros análisis de yacimientos para alcanzar un aprovechamiento óptimo de estos recursos en el área de Bejuma.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

- Concentrar por flotación el feldespato, mica y el cuarzo contenidos en los gneises del área de Bejuma, estado Carabobo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar las características de los gneises objeto de estudio, composición química, mineralogía, granulometría y grado de liberación.
- Efectuar pruebas de reducción de tamaño por trituración y molienda de minerales, con fines de liberación.
- Realizar pruebas de concentración mineral por flotación, de feldespato, mica y cuarzo.
- Establecer la recuperación y calidad de los productos de la concentración por flotación.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Toda explotación minera va asociada a los requerimientos que se tienen de los minerales en el mercado económico nacional y mundial, por supuesto siempre tratando de obtener la mejor calidad del producto para hacerlo competitivo en el mercado y para ello se demanda unos bajos costos de producción que permitan obtener un beneficio económico del mineral.

La concentración mineral por flotación es uno de los métodos más importantes utilizados en la industria minera, ya que permite incrementar los porcentajes de recuperación y concentración de mineral a bajo costo.

La Corporación de Desarrollo de la Región Central (CORPOCENTRO) desarrolla programas mineros como por ejemplo beneficio mineral del feldespato, mica y cuarzo presente en los gneises del área de Bejuma, estado Carabobo, con miras a lograr el autofinanciamiento a mediano y largo plazo, a los fines de generar recursos propios suficientes que permitan al organismo tener progresivamente mayor

desarrollo social económico. Este estudio generará la información necesaria que se requiere para determinar el máximo aprovechamiento de los recursos minerales presentes en los gneises del área de Bejuma, lo que permitirá establecer un margen de rentabilidad en los productos de comercialización y abrir la posibilidad de que Venezuela se autoabastezca totalmente de estos minerales, feldespato, mica y cuarzo utilizados por la industria venezolana en la fabricación de productos en los que estos se emplean como materia prima.

La instalación de una nueva planta minera para la explotación del feldespato, mica y cuarzo por la empresa MINERA MINORCA MONTALBAN C.A., en dicha zona, aportará desarrollo de la economía del Estado Carabobo y por ende al país. Se incrementará el empleo, tanto directo como indirecto, en las poblaciones aledañas como consecuencia de la mano de obra y los insumos requeridos por la empresa, promoviendo la mejora de los servicios públicos, educativos, de salud, y en general mejorando la calidad de vida de los pobladores de la zona.

1.4 LOCALIZACIÓN DE LA MENA.

1.4.1 Localización y acceso

La zona en la cual se tomaron las muestras del gneis se encuentra ubicada en la propiedad Finca León perteneciente a la empresa MINERA MINORCA MONTALBAN C.A., la cual, a su vez, se ubica en Bejuma estado Carabobo. El área se ubica a menos de doscientos metros de la carretera asfaltada de primer orden Aguirre-Bejuma

La ubicación en coordenadas UTM es Norte 0.579338 y Este 1.152.662 con una elevación (cota) de 667 metros y una declinación magnética de 10,2° W

La zona se encuentra ubicada entre los meridianos 67°40' y 67°50' de longitud oeste y los paralelos 10°10' y 10°20' de latitud norte. El principal acceso a la zona se realiza mediante la autopista Caracas - Valencia, así como por la Carretera Nacional Valencia Nirgua, ambas ubicadas en la parte meridional de la zona con dirección aproximada este-oeste. Ver figura 1.

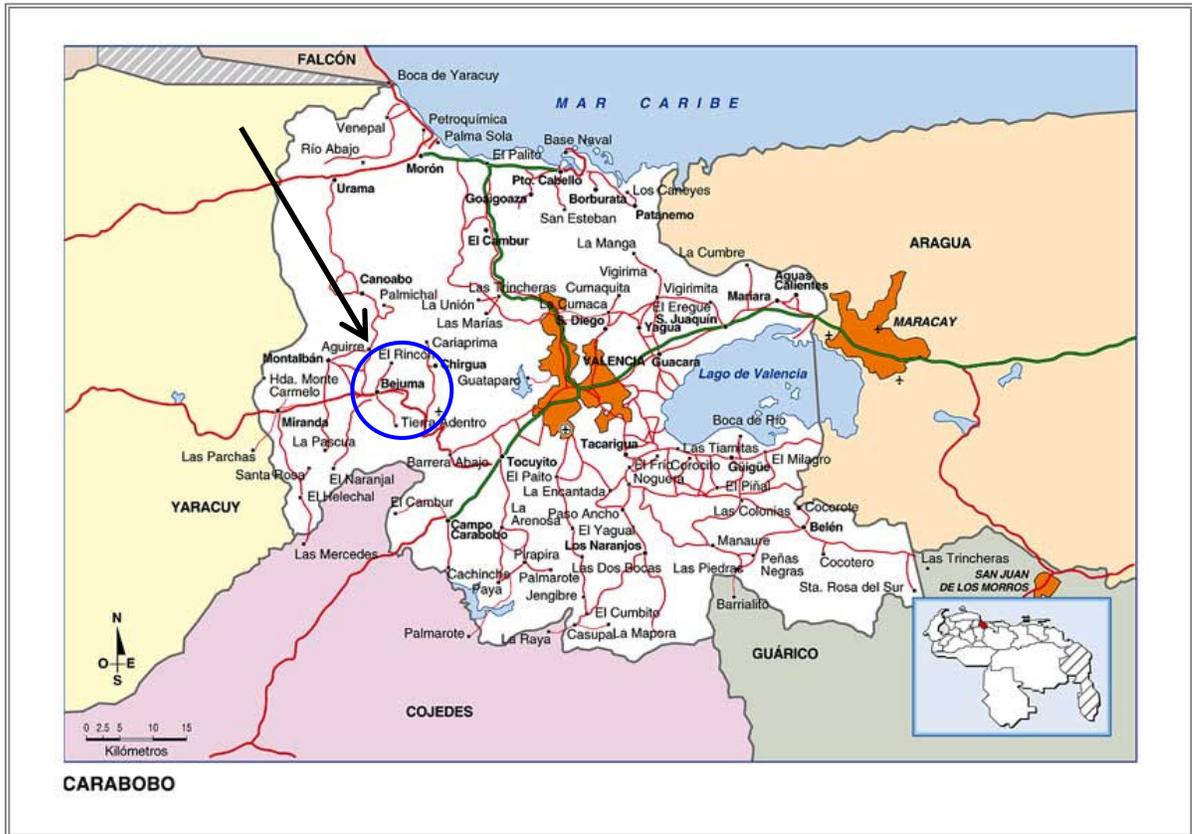


Figura 1. Ubicación Geográfica de la Zona de Toma de Muestras. Geología regional.

1.5 GEOLOGÍA

1.5.1 Geología Regional

La zona occidental del estado Carabobo, donde se localizan los niveles de los gnéises feldespáticos económicos se ubican en plena provincia metamórfica de las formaciones Las Brisas y Nirgua, ambas conformando el Grupo Caracas, el cual atraviesa toda la cordillera de la Costa.

Estas formaciones se caracterizan por la presencia de gruesos espesores de gnéises esquistosos cuarzo-sercítico-feldespáticos en el caso de la Formación Las Brisas y por anfibolitas, calizas esquistosas y esquistos cuarzo- micáceos- grafitosos en el caso de la Formación Nirgua.

El contacto entre ambas formaciones es totalmente transicional y se coloca normalmente donde comienzan a aparecer los niveles grafitosos y las rocas anfibolíticas. La Formación Las Brisas se caracteriza esencialmente por la riqueza de gnéises cuarzo-feldespáticos-micáceos que meteorizan muy rápidamente a un nivel blanco incoherente conformado por cuarzo, moscovita y plagioclasa.

La zona de Bejuma, donde se ubican los principales depósitos de gnéises cuarzo feldespáticos, se caracteriza por una compleja tectónica, consecuencia directa de los esfuerzos compresionales norte-sur sufridos por el grueso espesor de rocas metamórficas, los cuales han transformado a la columna geológica en un mosaico de bloques estructurales, delimitado normalmente por fallamientos con rumbos preferenciales aproximadamente casi norte sur. Uno de estos cizallamientos corre a lo largo de la carretera Bejuma-Canoabo, delimitado por una zona occidental con rumbo generalizado aproximadamente este-oeste y un bloque oriental, donde se ubican las secuencias de gnéises feldespáticos, caracterizados por un rumbo casi norte-sur y un buzamiento de 30 a 45 grados hacia el este.

La Formación Las Brisas, con tiempo geológico mesozoico (jurásico tardío), localizado en el km 10 de la antigua carretera Caracas-Ocumare del Tuy, cerca de la represa de la Mariposa (Hoja 6847, esc. 1:100.000, fuente: Cartografía Nacional). Aguerrevere y Zuloaga (op. cit.), en la descripción litológica original menciona, un conglomerado basal arkósico, con cantos rodados derivados de la roca basal de Sebastopol, redondeados a subangulares, hasta de 30 cm de diámetro, cantos de cuarzo y cemento principalmente silícico. Esta litología dista de ser la principal, ni mucho menos la única componente de la formación.

Dengo (op. cit.) observa que la mayor parte de la formación está constituida por esquisto cuarzo-micáceo, en el que se incluye gneis microclínico, esquistos granatíferos, cuarcitas y calizas. Smith divide la formación en dos miembros: uno inferior, constituido por gnéises y esquistos microclínicos conglomeráticos y otro superior, formado casi enteramente por esquistos sericíticos. Este autor opina que los grupos litológicos de los miembros inferior y superior se originan de conglomerados

y lutitas respectivamente, y que las calizas son de origen biotermal. Wehrmann afirma que la Formación Las Brisas está constituida en un 90% de esquistos cuarzo-feldespático-moscovíticos; el 10% restante lo constituyen, en orden de abundancia, esquistos cuarzo-feldespáticos, epidóticos o cloríticos, calizas, cuarcitas y metaconglomerados. Menciona, igualmente, mineralizaciones pobres de cobre en algunas calizas, en forma de sulfuros y sulfatos. Este autor no menciona el gneis microclínico descrito por Dengo, pero hace referencia a conglomerados y areniscas intraformacionales, ricas en microclino (15%), sin hacer referencia a su relación con los gneises del mismo género.

Desde el punto de vista del ambiente tectónico y petrogénesis, prácticamente todos los autores que se han referido a esta formación, han coincidido en afirmar que en su origen las rocas que la componen fueron sedimentos pelíticos y psammíticos, depositados en la plataforma y el talud continental. La extensión geográfica se encuentra a todo lo largo del macizo central de la cordillera de la Costa, entre el cabo Codera y el graben del río Yaracuy. Los afloramientos de la Formación Las Brisas, alcanzan dimensiones decakilométricas en sentido N-S, y hectokilométricas en su extensión longitudinal, E-W.

La primera correlación de esta unidad fue establecida tentativamente por Aguerrevere y Zuloaga, quienes sugieren una equivalencia de la Formación Las Brisas con la Formación Río Negro. Sin embargo, la diferencia de edades invalida dicha correlación, repetida sucesivamente por autores posteriores. No se ha establecido una correlación precisa con unidades del macizo oriental de la cordillera de la Costa.

La Formación Nirgua, con tiempo geológico, Mesozoico, ubicada en el estado Yaracuy, Bellizzia y Rodríguez (1967, 1968) introducen este nombre con una descripción somera. Posteriormente fue estudiada y cartografiada por González (1972) y Bellizzia y Rodríguez (1976). Navarro *et al.* (1988) redefinen estas rocas como Fase Nirgua, formando parte de su unidad litodémica de corrimiento que denominan como Complejo La Costa, que reúne adicionalmente a las fases Antímamo

y Tacagua. Este criterio fue aceptado por Urbani y Ostos (1989) y Urbani *et al.* (1989-a, b), quienes utilizan este nombre en los mapas geológicos de la zona de Puerto Cruz a Caraballeda y Oritapo a La Sabana, Distrito Federal, y El Palito - Morón - Valencia, estado Carabobo.

1.5.2 Geología Local

La geología local está constituida por la Formación Las Brisas, la cual está compuesta en un 90% de esquistos cuarzo-feldespático-moscovíticos; el 10% restante lo constituyen, en orden de abundancia, esquistos cuarzo-feldespáticos, epidóticos o cloríticos, calizas, cuarcitas y metaconglomerados, mineralizaciones pobres de cobre en algunas calizas, en forma de sulfuros y sulfatos. (Simón Rodríguez)

Macroscópicamente la roca aflora en la zona del norte de Bejuma. Se presenta como un material de color blanco grisáceo, muy uniforme en coloración, bien orientado, con una alta diaclasidad, un gran nivel de meteorización, aún cuando se mantienen los materiales originales y una ausencia en rocas ferromagnesianas intercaladas, ver foto 1. Posee una dirección (rumbo) preferencial aproximadamente norte sur y su inclinación (buzamiento) es de 30 a 50 grados hacia el este. El espesor de los gnéises feldespáticos es muy alto, superando los 50 metros.

Foto 1. Frente de explotación (yacimiento de Bejuma).



1.6 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Todos los trabajos que se mencionan a continuación fueron utilizados como antecedentes para la realización del trabajo de concentración por flotación de feldespatos, mica y cuarzo de los gneises del área de Bejuma.

Bello Héctor e Ichaso Aitor (1999) llevaron a cabo el estudio geológico y de factibilidad de material a ser usado como agregado grueso para concreto. Hacienda El Cedro Bejuma, distrito Montalbán. Estado Carabobo.

Dityubet Estrada R (2001) ejecutó Beneficio mineral de la mica presente en la cantera Cura, san Joaquín, estado Carabobo Tesis UCV., Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

Forte Salvatore (1989) realizó Recuperación de feldespatos por el método de flotación a partir de la mena de Tinaquillo - Edo. Cojedes. Tesis UCV Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

Miguel González (1970) llevó a cabo la concentración del feldespato y mica del Páramo de Piedras Blancas. Estado Mérida. Departamento de Minas. Tesis UCV Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

Mónica Martiz (1989) Estudios exploratorios y semi-industriales para la recuperación del talco de Cabimba, Estado Yaracuy, por el método de concentración mineral de Flotación. Trabajo de Ascenso U.C.V. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

José L, Contreras (2004) Flotación de mica contenida en la laguna de sedimento de la planta de tratamiento de la Arenera El Torito, Municipio Libertador, estado Carabobo. Tesis UCV, Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

Paulo Roberto de Magallanes Viana (2004) Absorción de colectores aniónicos en silicatos. Escuela de Ingeniería de la Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil.

CAPITULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 EL FELDESPATO

Los feldespatos son los aluminosilicatos más importantes que resultan de la sustitución parcial del silicio por el aluminio en el armazón de los tectosilicatos. Los feldespatos forman unos de los grupos más importantes de los minerales. Pueden pertenecer al sistema monoclinico y al triclinico, pero los cristales de diferentes sistemas poseen un gran parecido, tanto por los ángulos como por el hábito. Poseen buena exfoliación en dos direcciones que forman un ángulo de 90°. La dureza es cercana a 6 y tienen un peso específico aproximado de 2,55 a 2,76 gr/cm³.

2.1.1 Clasificación del Feldespato

Importantes grupos de minerales petrogénicos componen sesenta por ciento de la corteza terrestre. Los feldespatos constituyen un grupo natural de gran importancia por el papel que desempeñan en las rocas eruptivas, tales como el granito, la sienita, el pórfido y la traquita, y en las rocas metamórficas como el gneis. Los feldespatos se dividen en dos grandes grupos: el grupo de la ortosa, o feldespatos potásicos, y el grupo de las plagioclasas, o feldespatos sódico-cálcicos.

Entre los minerales formados a partir de rocas, los feldespatos deben su importancia al hecho de que constituyen más de cincuenta por ciento de todas las rocas ígneas. Los feldespatos simples son la ortoclasa, la albita y la anortita, que pueden clasificarse como comerciales. Los feldespatos de importancia comercial se encuentran en las pegmatitas, que son emanaciones de magma granítico que han solidificado en forma. Las pegmatitas se encuentran frecuentemente en gneises, dioritas y otras rocas, pero a veces aparecen en calizas y otras rocas sedimentarias.

Por su composición química se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Feldespatos Potásicos
- Feldespatos Calco – Sódico
- Feldespatos Bóricos

Los feldespatos más comunes pueden ser soluciones sólidas de los tres componentes:

- Feldespato Potásico (KAlSi_3O_8)
- Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)
- Anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)

Los minerales mixtos con una composición entre el feldespato potásico y la albita se denominan feldespatos alcalinos, los minerales mixtos de composición entre albita y anortita forman el grupo de las plagioclasas, presentándose estos en la tabla 1.

Tabla 1. Tipo de Plagioclasa.

| Tipo de plagioclasa | Albita en % | Anortita en % |
|---------------------|-------------|---------------|
| Albita | 100 – 90 | 0 – 10 |
| Oligoclasa | 90 – 70 | 10 – 30 |
| Andesina | 70 – 50 | 30 – 50 |
| Labradorita | 50 – 30 | 50 – 70 |
| Bytownita | 30 – 10 | 70 – 90 |
| Anortita | 10 – 0 | 90 – 100 |

Fuente: www.segemar.gov.ar.

2.1.2 Uso y especificaciones del feldespato

El feldespato es materia prima fundamental en las industrias de la cerámica, sanitarios, vidrio y porcelana. Se utiliza principalmente en la industria de la cerámica y del vidrio tanto en la elaboración de la masa tanto para vidriados y esmaltados, porque promueve la fusión durante el fuego e imparte esfuerzo, dureza y durabilidad a los productos terminados. En el vidrio mejora la trabajabilidad y retarda la

devitrificación. También puede usarse como abrasivo medio. Una diferencia esencial entre las características de los tipos de feldespatos que utiliza cada una de las industrias ya mencionadas, está en la granulometría y en el contenido de alúmina.

El feldespato potásico (ortosa) y el feldespato sódico (albita) tienen valor comercial, siendo el primero uno de los más importantes. La ortosa contiene algo de sodio proveniente de la albita incluida; hierro, manganeso y sericita (producto de alteración de los feldespatos) son siempre nocivos puesto que colorean el esmalte y vidriado de las piezas cerámicas.

Dentro de las características químicas, la más importante es el contenido de alúmina (Al_2O_3). Es indispensable que el feldespato destinado a la industria del vidrio contenga 18% de Al_2O_3 como mínimo, mientras que el destinado a la cerámica puede tener un valor inferior. La compañía estadounidense Feldspar Corp., ubicada en Spruce Pine, Carolina de Norte, y principal proveedor de feldespato a las industrias nacionales que importan este material, ofrece varios tipos de feldespato, cuyos análisis químicos se muestran a continuación en la tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones químicas del feldespato para vidrio.

| Tipo | Malla | %SiO ₂ | %Al ₂ O ₃ | %Fe ₂ O ₃ | %CaO | %MgO | %K ₂ O | %Na ₂ O |
|------|-------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|------|--------|-------------------|--------------------|
| F-20 | 20 | 67,54 | 19,40 | 0,05 | 1,94 | trazas | 4,05 | 6,76 |
| C-20 | 20 | 67,21 | 19,30 | 0,06 | 0,86 | trazas | 5,52 | 6,63 |
| G-40 | 40 | 65,60 | 19,26 | 0,06 | 1,06 | trazas | 10,16 | 3,32 |

Fuente: www.segemar.gov.ar.

En la fabricación de cerámica, el feldespato utilizado como fundente se integra a la pasta arcillosa. Hay que evitar que éste contenga impurezas que puedan alterar el color del producto. El feldespato importado por Vencerámica y Sanitarios Maracay proviene de la compañía estadounidense International Mineral Chemical Co., con sede en Skokie, estado de Illinois.

El feldespato para vidrio debe tener la misma distribución granulométrica que la arena con la cual es mezclado. Porque, al igual que corren con la arena, un

producto demasiado fino se volatilizaría en los hornos. Este fenómeno se conoce como pérdida por voltaje y se debe al hecho de que la llama del fuego es dirigida directamente sobre el material, lo cual repercute en el rendimiento del horno y en la composición del producto acabado, que resulta distinta de la calculada inicialmente.

Los términos comerciales más comunes del feldespato son:

- 20 mallas (Glass Spar). Producido para la industria de contenedores de vidrio (botellas, jarras, etc)
- 40 mallas (Glass Spar). Producido para la fabricación de vidrio plano o estirado.
- Alfarería (Pottery Spar). A 200 mallas para la fabricación de porcelanas, sanitarios, cerámica, esmaltes, aislantes y ruedas vitrificadas de molienda.
- Feldespato sódico (Soda Spar). Contiene más de 10% de Na_2O .
- Feldespato potásico (Potash Spar). Contiene más de 10% de K_2O .
- Pertita. Un intercrecimiento de feldespato sódico y feldespato potásico.
- Feldespato de bloques (Block spar). Sólo requiere apartado manual, molienda, cribado y magnetismo para prepararlo para el mercado.
- Alaskita. Pegmatita que contiene feldespatos de sodio y potasio, cuarzo, mica y minerales accesorios, y requiere flotación para su beneficio.

El concentrado de feldespato que ha de obtenerse para que pueda usarse en las industrias mencionadas, debe estar dentro de las siguientes especificaciones generales mostradas en la tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones químicas del feldespato

| Elemento | Contenido % |
|--------------------------------|-------------|
| SiO ₂ | 70,55 |
| Al ₂ O ₃ | 18,90 |
| Na ₂ O | 4,60 |
| K ₂ O | 4,25 |

Fuente: www.segemar.gov.ar.

2.1.3 Feldespato en Venezuela

La producción nacional se destina para abastecer el consumo de las industrias de cerámicas, baldosas, vidrio y de aisladores de porcelana; considerándose al feldespato como un bien de consumo intermedio ya que es utilizado como insumo en la producción de otros bienes.

En el año 2003, se estimó una producción nacional del mineral de 150.000 toneladas, mientras que en el año 2000 el volumen producido se ubicó en 130.000 toneladas. La comparación de ambos años, muestra un aumento de 20.000 toneladas. En la información reportada por las empresas productoras ante el Ministerio de Energía y Minas, MEM, actual MIBAM por las siglas de Ministerio de Industrias Básicas y Minería, se observa que el periodo 1999 a 2003, la producción nacional de mineral registró en el año 2003 el mayor volumen, el cual fue de 150.000 toneladas como se muestra en la tabla 4. La producción de feldespato a nivel mundial se muestra en la tabla 5, el cual ha venido incrementando en este último quinquenio

Tabla 4. Producción de feldespato registrada 1999 – 2003.

| Producción de feldespato registrada 1999 – 2003 (Miles de Toneladas Métricas) | |
|--|---------|
| Año | Volumen |
| 1999 | 125 |
| 2000 | 130 |
| 2001 | 142 |
| 2002 | 147 |
| 2003 | 150 |

Fuente: Anuario al Ministerio de Energía y Minas

Tabla 5. Producción mundial de feldespato.

| Producción mundial de feldespato. Tonelada métrica (Países más importante) entre 1999 y 2003 | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| País | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 |
| Italia | 2.700.000 | 2.500.000 | 2.600.000 | 2.500.000 | 250.000 |
| Portugal | 1.14.688 | 11.9837 | 120.000 | 10.000 | 12.000 |
| Turquía | 1.369.655 | 1.147.716 | 15.102.93 | 1766887 | 1.800.000 |
| Japón | 52.000 | 52.000 | 5.000 | 50.000 | 50.000 |
| USA | 875.000 | 790.000 | 800.000 | 790.000 | 800.000 |
| Tailandia | 6.415 | 542.991 | 710.543 | 783.733 | 80.000 |
| Francia | 638.000 | 642.000 | 650.000 | 650.000 | 650.000 |
| España | 450.000 | 460.000 | 450.000 | 450.000 | 45.000 |
| Corea | 409.334 | 330.417 | 389361 | 415.580 | 400.000 |
| Venezuela | 125.000 | 130.000 | 142.000 | 147.000 | 150.000 |
| Total | 7.360.092 | 6.714.961 | 7.422.197 | 7.673.200 | 4.237.000 |

Fuente: World Mineral Statistics, 1995-1999. Datos estimados.

2.1.4 Depósitos de feldespatos en Venezuela

Venezuela posee importantes zonas pegmatíticas en los estados Cojedes, Barinas, Táchira, Mérida, Trujillo y Nueva Esparta y en el estado Amazonas. En la actualidad la producción comercial se centra sólo en los estados Cojedes y Barinas. Los depósitos de feldespatos de Cojedes se asocian con micropegmatitas del complejo granítico de El Tinaco. La roca está constituida por cristales de microclino con grandes inclusiones de cuarzo. En la actualidad la minería es a cielo abierto y la zafra se envía a El Tinaco, donde es triturada, molida, lavada y flotada para la industria cerámica, porcelana y de sanitarios.

Los depósitos de Barinas se asocian con pegmatitas y aplitas presente en el gneis bandeado de la Mitisús. La roca está constituida por cuarzo (30–50%), microclino (30–45%) y plagioclasa (hasta 30%). Es loza de excelente mena y está en amplia minería. El yacimiento de Mérida constituye una de las reservas más importantes de pegmatitas blancas del país, pero su ubicación geográfica las hace no competitivas por ahora.

2.2 LA MICA

Mica es un término genérico que se aplica a un grupo de minerales complejos de silicatos hidratados de aluminio y potasio siendo los más comunes: la muscovita, la lepidolita, la biotita y la flogopita. Las diferencias entre las cuatro radican en la proporción de hierro, magnesio y aluminio contenidos dentro de su estructura cristalina. La muscovita, rica en aluminio y la flogopita, rica en magnesio, son las variedades más comunes usadas industrialmente.

La muscovita, cuya fórmula típica es $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, se llama “mica blanca” para distinguirla de la flogopita $(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{KMg}_3(\text{OH})_2$ o “mica ambarina”. Sin embargo, los colores de la muscovita, en láminas gruesas y en cristales, fluctúan entre diversos matices del rojo y del verde. Por el color se clasifica industrialmente la muscovita en blanca (incluyendo en ella la amarilla), encarnada (ambarina, roja, parda) y verde; pero todas las micas son transparentes e incoloras en hojas delgadas.

Las manchas, que igualmente afectan a la clasificación industrial, son producidas por tenues películas de óxido férrico que se extienden entre las laminillas.

En general, la característica más resaltante de todas las micas es su alta estructura en placas, lo que las hace únicas. Su dureza es de 2 a 3 en la escala de Mohs; su clivaje es perfecto y su peso específico es de 2,76 – 3,10. Además, poseen una de las más sobresalientes combinaciones de propiedades químicas, físicas, eléctricas, térmicas y mecánicas, las cuales no son encontradas en ningún otro producto.

2.2.1 Clasificación de la Mica

La clasificación utilizada por la revista Industrial Minerals, en su edición de enero de 1997, se adapta muy bien al resto de las clasificaciones que se emplean en varios países del mundo productores de mica. La misma se encuentra en forma de esquema en la figura 2.

Comercialmente, la mica está disponible en un gran número de formas; mica en hojas, en hojuelas, desecho y micas procesadas. La mica en hojas es de la más alta calidad y se deriva de largos cristales que pueden ser cortados, perforados o estampados para aplicaciones industriales. Las hojas de muscovita, son extraídas generalmente de pegmatitas y sus cristales individuales pueden medir desde 2,5 cm hasta varios metros. Las hojas de mica flogopita, son menos comunes y principalmente, se originan en depósitos de venas con piroxenita. La mica en hoja, puede ser subdividida en cuatro principales grados: bloque, delgada, película y partida.

Las micas de desechos y en hojuelas son de menor calidad, teniendo un rango amplio de aplicaciones. La mica de desecho, inicialmente provenía del desbaste y los desechos del procesamiento de la mica de hoja; sin embargo, como la demanda de la mica fue incrementándose, se han desarrollado otros métodos para extracción de mica. Así, las de desecho y las hojuelas, son ahora extraídas de pegmatitas, esquistos y como un subproducto de la flotación de espodumena y feldespatos.

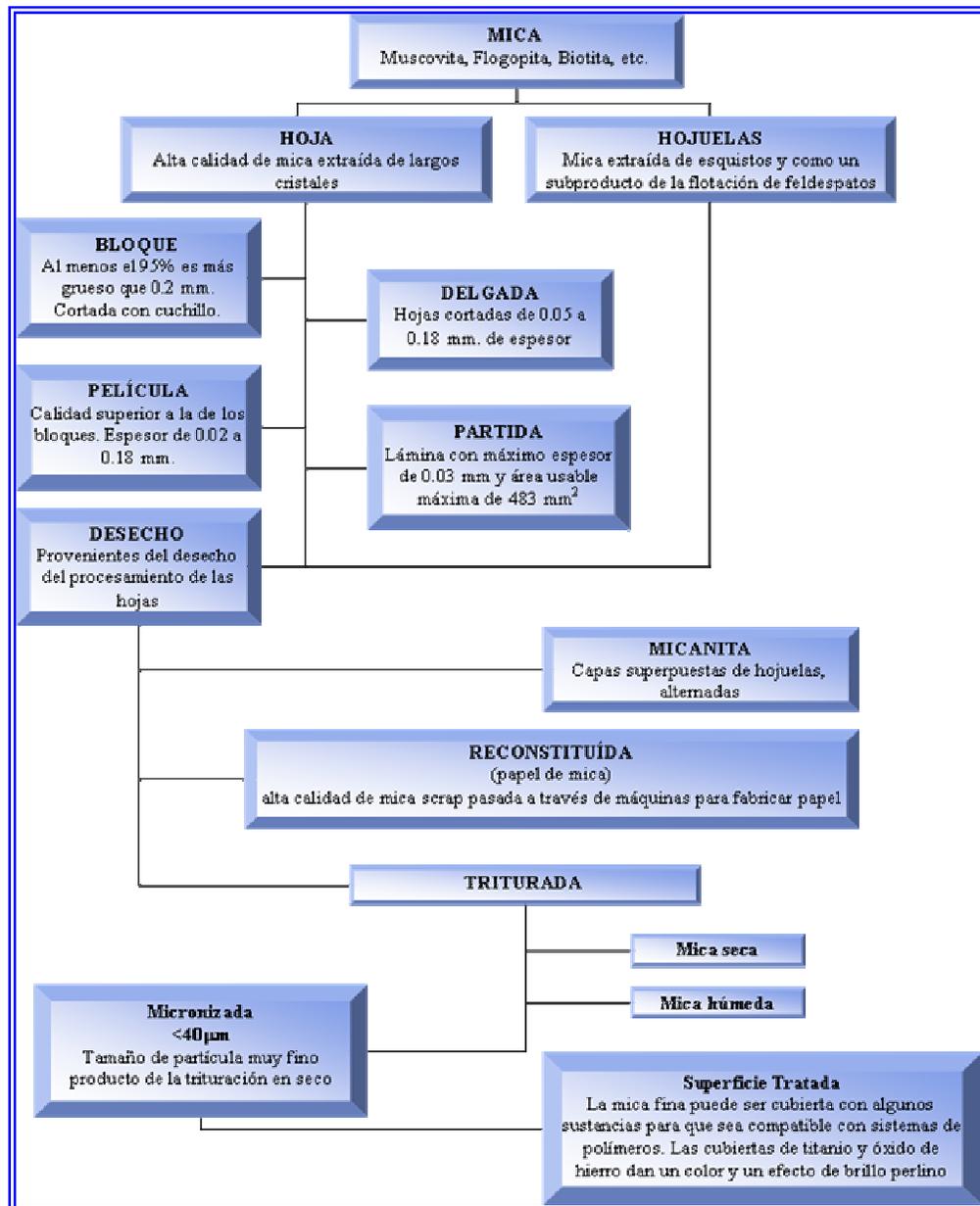


Figura 2. Clasificación de la mica (Fuente: Revista Industrial Minerals). Edición enero de 1997

Las micas de desechos y en hojuela, son procesadas en un gran número de maneras para producir una variedad de productos de mica. Estos productos finalmente pueden ser triturados para producir materiales en seco o en húmedo, así como mica micronizada. Desde 1892, la mica partida ha sido reconstituida para imitar las propiedades físicas y eléctricas de la buena calidad de las micas de hojas. La micanita es construida con pequeñas hojuelas de mica, superpuestas en capas uniformes, alternándose éstas con un agente cementante, de acuerdo a características particulares para usos específicos. Una vez logrado el espesor requerido, se secan calentándolas bajo presión. La mica reconstituida es producida por la exfoliación parcial de mica de desecho de alta calidad, la cual es entonces procesada en forma de pulpa e introducida en una máquina modificada para fabricar papel, con la finalidad de producir papel de mica.

La moscovita y la biotita son componentes esenciales de los granitos y otras rocas ígneas cristalinas y generalmente se encuentran como minerales secundarios en rocas metamórficas. En muchas rocas comunes, la mica se presenta en forma de laminillas conforman un pequeño porcentaje de la masa total; sin embargo, algunos esquistos que se utilizan como fuente comercial para producir la mica finamente pulverizada contienen 20% de mica o, a veces, porcentajes más elevados.

Las principales fuentes de mica son las pegmatitas graníticas (ácidas), únicas que proporcionan cristales de moscovita capaces de rendir hojas de más de 25 mm de longitud y anchura. La flogopita se presenta en las pegmatitas básicas o en las rocas calizas subyacentes a las ígneas básicas. La clorita es un mineral común y corriente, generalmente de origen secundario, producto de la alteración de los silicatos que contienen aluminio, hierro ferroso y magnesio; y se presentan en su mayoría, en los esquistos. (Dana, 1956).

En cuanto a las micas de desecho, su fuente principal provenía de las operaciones de tratamiento de la mica en hojas en épocas pasadas. Más tarde, como la demanda por este tipo de mica se incrementó, fueron desarrollados métodos para extraer micas de desecho y en hojuelas de los cuerpos mineralizados de pegmatitas y

alaskitas, donde éstas son encontradas en abundancia. Asimismo, se encontró que los depósitos de esquistos micáceos eran también una excelente fuente, con mayor porcentaje de mica (Industrial Minerals and Rocks, 1994).

2.2.2 Uso de la mica

Las hojas de micas obtenidas de la separación de bloques de micas o como hojas ensamblada, constituyen un material importante en la industria eléctrica y electrónica. La mica de bloque, de alta calidad, se utiliza para la construcción de tubos eléctricos; de botellas para aforar gases a alta temperaturas; y de diafragmas regulares. La mica de baja calidad y la ensamblada, se utilizan en las instalaciones de aparatos eléctricos de uso doméstico (lámparas incandescentes, tapones, etc.)

La mica de película se emplea principalmente como un dieléctrico en los condensadores. La mica diseminada se utiliza para la construcción de micas ensamblada; ésta se emplea principalmente como aislante en motores eléctricos y transformadores. La mica molida seca se utiliza como ingrediente en la elaboración de pintura, goma elástica, plástico, y varillas de soldadura y la mica molida húmeda se emplea en la manufactura de neumáticos.

2.2.2.1 Pintura

La mica es usada como extendedor de pigmentos, es decir, para darle a la pintura esa característica de mayor poder de recubrimiento del principal pigmento que es el dióxido de titanio, reduciendo a su vez, el cuarteo de la pintura. Los productos de la pintura, tales como emulsiones, pinturas exteriores, pinturas anticorrosivas, pinturas para el área marina, entre otros, necesitan de la mica para controlar los excesos de grasa, y para impermeabilizar o reducir la penetración y colaborar en la adhesión. La lista de beneficios del uso de la mica en pinturas es considerable. Su estructura laminar se dispersa fácilmente dentro de las soluciones de pinturas, reforzándola mecánicamente para reducir el hundimiento y el escurrimiento de la misma, mientras provee de un capa resistente. Ayuda a mejorar las propiedades anticorrosivas, extendiendo su tiempo de efecto; asimismo, protege contra el

deterioro por la luz solar, aporta un brillo atractivo a la superficie y su alta resistencia térmica la ha hecho adecuada para su uso en pinturas resistentes a altas temperaturas.

En pinturas aluminizadas, la mica triturada en seco es usada como un sustituto del aluminio por encima de un 25%, de manera que los costos disminuyan. Por una razón similar, la mica es incluida en pinturas para tráfico y texturizadas, mejorando a su vez la resistencia a la abrasión de las mismas. Asimismo, se utiliza en imprimaciones para disminuir la tendencia a formar ampollas en medios húmedos y como un potencial sustituto del asbesto en recubrimientos para terrazas.

Por lo tanto, el creciente empleo de la mica en las pinturas no se debe simplemente a sus propiedades como lubricante y extendedor, sino también a que las escamas transparentes de mica ligan entre sí las películas de pintura, mejoran su adherencia y evitan que se agrieten. Al adaptarse en las capas de pintura como las escamas al cuerpo de los peces, crean superficies resistentes al desgaste, a la acción de la atmósfera, a la penetración de agua, oxígeno y electrolitos.

Otras de las características utilizadas por estas industrias venezolanas como requisito para adquirir esta materia prima, son las siguientes:

- Apariencia: polvo ligeramente amarillo.
- Absorción de Aceite: 29 a 45 (%)
- Retención de malla: Máximo 15,5% en la malla 325 y 0,2% en la malla 100.
- Humedad: 1%

2.2.2.2 **Petróleo**

La mica mezclada con aditivos del lodo de perforación actúa como un sellador de secciones porosas en el barreno de perforación debido a su estructura laminar. Asimismo, ayuda a mantener los otros sólidos del lodo en suspensión. Se utilizan diferentes distribuciones de tamaños de partículas para prevenir tipos específicos de pérdidas de circulación que son asociados con particulares formaciones de rocas. Para comprender mejor el proceso, se hace necesario definir ciertos conceptos. Como es

sabido, el fluido de perforación (lodo) es una mezcla de agua, barro, material para darle peso a la mezcla y unos cuantos agentes químicos. Algunas veces se utiliza aceite en vez de agua o se le añade un poco de aceite al agua para darle ciertas propiedades deseables.

El lodo de perforación tiene varias funciones importantes; se utiliza para arrastrar los desperdicios hasta la superficie para desecharlos y mantener la presión de las formaciones bajo control, ya que un hoyo lleno de lodo ejerce presión sobre las formaciones que forman sus paredes y por lo tanto iguala la presión de las formaciones. Mientras más pesado el lodo, más presión ejerce. Es por esto que se usan materiales para darle peso al lodo. Entre estos materiales, la baritina es el más usado para añadirle peso al lodo hasta que se igualen las presiones del hoyo. El barro se le añade al lodo para mantener los desperdicios en suspensión mientras van saliendo del hoyo. El lodo también sirve para cubrir las paredes del hoyo para que no se derrumben.

2.2.3 Especificaciones de la mica

Las especificaciones química y física para la mica se presentan en la tabla 6 y tabla 7 respectivamente.

Tabla 6. Especificaciones químicas de la mica.

| Análisis Químico de la mica | |
|--------------------------------|-----|
| SiO ₂ | 49% |
| Al ₂ O ₃ | 29% |
| CaO | 1% |
| Fe ₂ O ₃ | 5% |
| K ₂ O | 10% |
| Na ₂ O | 1% |

Fuente: www.segemar.gov.ar.

Tabla 7. Características físicas de la mica.

| Características Física | |
|--------------------------|--------------------------------|
| Densidad específica | 2,80 – 2,85 gr/cm ³ |
| Material soluble en agua | Máx. 0,5% |
| pH | 8 – 9 |
| Dureza | 2,5 Mohs |

Fuentes: www.segemar.gov.ar.

2.2.4 Depósitos de mica en Venezuela

Aún cuando Venezuela contiene numerosas formaciones metamórficas presentando mica como mineral esencial tanto en la Cordillera de la Costa como en el sistema Andino y el escudo Precámbrico, sólo las Formaciones Sierra Nevada en Mérida septentrional y Las Brisas en Carabobo occidental, presentan secuencias de micacitas en las cuales la muscovita constituye más del 80% en volumen.

En el área de Piedras Blancas, las micacitas de la Formación Sierra Nevada contienen en muchas zonas más de 95% de muscovita conformando la principal mena de este mineral en nuestro país. Desafortunadamente, la ubicación de la zona económica en el Parque Nacional Páramo de La Culata hace imposible cualquier extracción comercial de minerales en la región. De hecho, las explotaciones experimentales de mica ejecutadas en esa zona desde 1990 han quedado totalmente paralizadas. La mica que se ha venido utilizando en Venezuela en su mayoría es de procedencia extranjera, debido a que la explotada en el país no cubre la demanda de este mineral como materia prima. A continuación en la tabla 8 se muestran los principales países productores de mica.

Tabla 8. Producción mundial de la mica.

| Producción de mica a nivel mundial (Toneladas) | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| País | 1.999 | 2000 | 2.001 | 2.002 | 2.003 |
| Francia | 19.000 | 21.000 | 15.000 | 17.000 | 0 |
| Rusia | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 | 10.000 |
| España | 9.362 | 10.086 | 9.874 | 11.738 | 11.800 |
| Sur África | 1.010 | 676 | 937 | 821 | 980 |
| Zimbabwe | 499 | 273 | 0 | 0 | 0 |
| Canadá | 30.000 | 30.000 | 30.000 | 30.000 | 30.000 |
| México | 971 | 1658 | 648 | 456 | 506 |
| Usa | 95.400 | 101.000 | 97.800 | 81.100 | 78.600 |
| Argentina | 3.097 | 4.665 | 2.110 | 1.770 | 1.894 |
| Brasil | 5.000 | 4.000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| China | 40.700 | 43.300 | 52.200 | 54.000 | 66.200 |
| India | 3.386 | 4.117 | 6.095 | 3.575 | 4.201 |
| Irán | 1.470 | 4.562 | 4.615 | 2406 | 0 |
| Australia | 1.016 | 749 | 959 | 605 | 636 |
| Total | 220.911 | 236.086 | 234.238 | 217.471 | 208.817 |

Fuente: World Mineral Statistics, 1995-1999.

2.3 EL CUARZO

El cuarzo es un mineral de anhídrido silícico extraordinariamente abundante en la corteza terrestre en la que entra a formar parte de un gran número de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Su fórmula química es SiO_2 y sus características son las siguientes:

El cuarzo (SiO_2) presenta las siguientes características: sistema romboédrico, Dureza (H) = 7, Densidad (G) = 2,65. Caracterizado por su elevada dureza, fractura concoidea y ausencia de clivaje

El cuarzo en su estado más puro, es totalmente incoloro (foto 2), ya que carece de impurezas o inclusiones que afecten su transparencia, con doble refringencia orientada por un eje único, lo que lo hace un excelente conductor y canalizador para todo tipo de energía, con forma de cristales piramidales hexagonales, con frecuencia agrupados en drusas o geodas y, técnicamente se aprovecha su vibración molecular hiperestable para controlar la exactitud de circuitos electrónicos, como en relojes, *timers*, dispositivos de activación y desactivación, etc.

Foto 2. Cuarzo hialino.



Fuente: www.rumoreslatinos.com

2.3.1 Clasificación del cuarzo

Atendiendo a la diferencia de color se dan las siguientes variedades del cuarzo:

2.3.1.1 Variedades macrocristalinas

- Cristal de roca transparente.
- Cuarzo lechoso blanco opaco.
- Amatista transparente violeta.
- Cuarzo rosado rosa, rojo o rosáceo.

- Citrino o Falso topacio amarillo transparente.
- Cuarzo ahumado gris o negro.
- Cuarzo falso zafiro azul.
- Jacinto de Compostela rojo opaco.

2.3.1.2 Variedades criptocristalinas

- Agata con bandas paralelas a los bordes de colores vistosos.
- Ónice con las bandas alternantes de colores claros y oscuros.
- Jaspe opaca de colores vistosos.
- Sílex opaca de colores claros y oscuros.
- Xilópalo madera silicificada.
- Heliotropo verde con manchas amarillas.

2.3.2 Uso del cuarzo

El cuarzo es uno de los minerales industriales más importantes por sus múltiples usos, es fundamental en la provisión de silicio para la elaboración de ferrosilicio. El cristal se utiliza en la fabricación de instrumentos ópticos, aparatos de radio, aparatos químicos, etc; el triturado y molido se usa en la elaboración de ferromanganeso, preparación de cajas para moldes de fundición, en cerámica refractaria, industria del vidrio, fabricación de lijas, raspa para fósforos, polvos abrasivos y filtros finos. Las finas partículas de cuarzo de las arenas silíceas son usadas como abrasivo para pulimentar superficies metálicas (arenado).

De acuerdo al grado de molienda, a su utilización, y al contenido de impurezas, se encuentra el cuarzo metalúrgico: se utiliza como silicio, en la elaboración de ferrosilicio y ferrosilicio al manganeso. También como carga en altos hornos. Su contenido de hierro no es limitativo y el cuarzo para vidrio, cerámica, esmaltes y para derivados químicos, son empleados en la obtención de silicatos solubles, xerogeles e hidrogel, como elemento ligante y agente antideslizante.

2.3.3 Especificaciones técnicas para el cuarzo

Según el uso o destino, las normas y especificaciones se muestran en las tabla 9, tabla 10 y tabla 11; valores limitativos tanto en su composición, como en su contenido. Para cerámica y esmaltes: $\text{SiO}_2 = 99 \%$ (cerámica), y $\text{SiO}_2 = 99 \%$ (esmaltes), el hierro no debe estar presente ya que daría tonalidad rojiza a la cerámica blanca. Para polvos abrasivos, molido a malla - 120. Para refractarios silícios: Para este rubro se requiere un alto grado de pureza de la sílice en la fabricación de ladrillos refractarios. El amasado de éstos requiere la presencia de aglomerantes como la alúmina (Al_2O_3) y álcalis (feldespatos).

Tabla 9. Especificaciones para la industria metalúrgica

| Purezas | Contenido % |
|-------------------------|-------------|
| SiO_2 | > 99,15 |
| Al_2O_3 | < 0,15 |
| Fe_2O_3 | < 0,10 |

Fuente: www.segemar.gov.ar

Tabla 10. Especificaciones para la industria del vidrio.

| Impurezas | Contenido % |
|--|--------------------------|
| Al_2O_3 | < 0,20 |
| Fe_2O_3 | < 0,015 – 0,004 (óptico) |
| Fe_2O_3 | < 0,050 – 0,15 (común) |
| CaO + MgO | < 0,05 |
| $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ | < 0,01 |

Fuente: www.segemar.gov.ar

Tabla 11. Especificaciones para la industria de derivados químicos.

| Impurezas | Contenido % |
|--|-----------------|
| Al_2O_3 | < 0,20 |
| Fe_2O_3 | < 0,015 – 0,003 |
| CaO + MgO | < 0,15 |
| $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ | < 0,01 |

Fuente: www.segemar.gov.ar

2.3.4 Depósitos de cuarzo en Venezuela

Existen depósitos de cuarzo y cuarcita en los estados Carabobo y Anzoátegui, en Cojedes existe cuarzo aluvional, y en Bolívar existe depósitos de cuarzo masivo.

Los depósitos del Estado Carabobo se presentan como lentes y masas de Cuarzo semihialino con espesores que en muchos casos superan los 3 m, asociados con esquistos y filitas de la Formación Las Brisas. Los mejores depósitos se ubican entre las poblaciones de Bejuma en Carabobo occidental y Miranda.

Aún cuando hasta el momento no se han efectuado estudios evaluativos detallados, estos depósitos parecen constituir una importante reserva de materia prima en vista de su excelente calidad, para la fabricación de silicio metálico y ferrosilicio.

En Anzoátegui septentrional se ubican cuarcitas de alta calidad de la Formación Barranquín. Los depósitos se presentan como rocas homogéneas, muy ricas en cuarzo semiredondeado y con bajos porcentajes de hierro y alúmina. Estratigráficamente se presenta como niveles clásticos asociados con secuencias de lutitas y areniscas arcillosas de la Formación Barranquín, una gruesa unidad del Cretáceo que constituye la base del Grupo Sucre, el cual aflora extensamente a todo lo largo de Anzoátegui septentrional y Sucre occidental.

CAPITULO III

3 BENEFICIO DE MINERAL

Los minerales tal como son extraídos de sus yacimientos no constituyen verdaderas menas en condiciones de riqueza y pureza, por lo que deben ser sometidos a un tratamiento industrial que ha de beneficiarlos. En la mayoría de los casos se realiza un conjunto de operaciones preparatorias para transformarlos en menas y hacer posible su beneficio. Este procedimiento constituye la preparación de los minerales cuyo objetivo es lograr la mejor recuperación y hacer más económico el beneficio ulterior de éstos, convirtiendo el mineral, tal como sale de la mina, en otro más comercial desde el punto de vista de su riqueza, del tamaño, o de ambos.

3.1 PREPARACIÓN DE LOS MINERALES

El proceso de preparación de minerales puede considerarse formado por una etapa de fragmentación o reducción de tamaño, donde no hay una separación de especies mineralógicas, seguida de una de separación, donde se hace uso de las propiedades naturales o adquiridas para lograr la separación de especies mineralógicas.

3.1.1 Operaciones de fragmentación.

El fin de éstas es reducir cuerpos sólidos por medio de acciones físicas externas hasta un tamaño requerido con el sistema de concentración. Las operaciones de fragmentación son de vital importancia en el procesamiento de minerales. Una mena ha de ser reducida hasta que los minerales valiosos que contiene sean liberados de la roca que los aloja o queden expuestos para tratarse químicamente.

Debido a que las menas se encuentran finamente diseminadas e íntimamente asociadas con la ganga, ellas deben ser inicialmente liberadas antes de llevarse a cabo la separación. La terminología de esta técnica se designa con el término general de fragmentación, en el cual, el tamaño de partícula de una mena es reducida

progresivamente hasta un grado en que pueda separarse en fracciones valiosas y carentes de valor (útil y ganga).

Como es sabido los explosivos son usados en minería para remover las menas de sus estratos naturales y por lo tanto, la voladura puede ser considerada como el primer paso en la fragmentación. La fragmentación en la planta de procesamiento mineral se lleva a cabo a través de una serie de procesos de trituración y molienda. De modo general básicamente la diferencia entre trituración y molienda consiste para el caso de trituración se realiza una reducción de tamaños gruesos, las piezas que fragmentan no llegan a ponerse en contacto, el trabajo es más selectivo, se realiza en seco, utiliza una serie de aparatos en serie. Por otra parte la molienda lo hace con los finos, las piezas que fragmentan se ponen en contacto, el trabajo es menos selectivo, puede realizarse en seco o en húmedo y utiliza una serie de aparatos en serie o paralelo. En general, el proceso de fragmentación puede usarse para producir partículas del tamaño y la forma requeridas; para liberar minerales valiosos de la ganga para que puedan concentrarse; o para incrementar el área de superficie disponible para exhibirse a la reacción química.

3.1.1.1 Trituración

Para llevar a cabo el proceso de trituración, generalmente se emplean etapas sucesivas de trituración primaria, secundaria, terciaria y, a veces, hasta cuaternaria, en función de las veces que el mineral necesite ser reducido de tamaño (tabla 12) relacionándose cada etapa con la maquinaria que se emplea. Sin embargo, no existe ninguna norma para delimitar los límites por tamaños. Para fines de este trabajo fue realizada en cuatro etapas: trituración primaria, secundaria, terciaria y cuaternaria.

Tabla 12. Tamaños de Trituración.

| Tamaños | Admisión | Descarga |
|------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Trituración Primaria | Trozo más grande que sale de mina | 8”- 4” |
| Trituración Secundaria | 8” - 4” | ½ “si se continua |
| Molienda | ¾” – ½ “ | 417 - 74μ (35-200) mallas. |

- Trituración primaria.

Esta es la primera etapa designada en la reducción de tamaños del material, los aparatos de este grupo se alimentan con el mineral que se envía desde la mina, y por este motivo, las máquinas deben ser capaces de admitir el trozo más grande que provenga de la zafra. Las operaciones de quebrantado concluyen cuando el todouno, que se admitió de la mina, se ha reducido hasta un tamaño máximo comprendido entre 60 mm y 30 mm, lo que puede conseguirse, según las circunstancias, con una sola máquina o con varias en serie.

- Trituración Secundaria

En función de las veces que el mineral necesite ser reducido de tamaño, los aparatos de trituración secundaria toman el material que descargan de la trituración primaria y lo reducen hasta un tamaño que sea apropiado para alimentar una tercera o cuarta trituración o a los aparatos de molienda.

Equipos de trituración

La trituración primaria y secundaria se hace por medio de máquinas en las que, por su construcción mecánica, se evita que las superficies que efectúan la rotura establezcan contacto; mientras que, en la molienda, dichas superficies sólo están separadas por el género que se está moliendo.

Existen dos equipos diferentes para la trituración, dependiendo del tipo de roca a ser triturada. De manera general, las rocas abrasivas y duras son trituradas por compresión entre superficies resistente y los materiales menos abrasivos y más suaves, son triturados por impacto, cizallamiento o también por mecanismos de compresión. (Schilitt, W. en Howard H., 1992).

- Las trituradoras primarias

Son máquinas altamente resistentes, usadas para reducir la zafra proveniente de la mina a un tamaño adecuado, para su mejor transporte y posterior alimentación de las trituradoras secundarias. Los equipos que suelen utilizarse son: trituradoras de impacto de cilindros, giratorias y las de mandíbulas.

Las trituradoras de impacto reducen de tamaño los materiales minerales, mediante unos martillos fijos o móviles sujetos a un rotor central. El tamaño de los materiales triturados depende de la friabilidad del material y de la velocidad del rotor.

Las trituradoras de cilindros están compuestas por un cilindro giratorio horizontal, provisto de salientes o dientes, que empujan el material a triturar contra una placa curva inclinada y fija, que forma con el cilindro la cámara de trituración (Peláez. E., 1980). La compresión es llevada a cabo por cizallamiento y compresión del mineral entre la superficie del rodillo y las placas de rotura. Al girar el cilindro, los picos enganchan a la roca y la van fracturando contra la placa hasta que el material pasa entre la separación cilindro – placa.

Triturador giratorio está formado por un cono montado en un eje vertical dentro de una carcasa rígida. Dicho eje mantiene la parte superior estacionaria mientras que la parte inferior gira excéntricamente, lo cual transmite al cono un movimiento excéntrico – pendular. Los materiales, al introducirse en el cono por la parte superior, caen por gravedad, y son comprimidos entre las paredes de la carcasa y el cono excéntrico que gira en el centro.

Las trituradoras de mandíbulas en esencia consisten de dos piezas llamadas mandíbulas, dispuestas una frente a la otra en forma de V; una de las cuales es fija, y

la otra es móvil (figura 3), cuyo movimiento se logra por la oscilación alrededor de un eje horizontal, generado por medio de un sistema de biela excéntrica y de placas de articulación. El material, introducido por la parte superior, es fragmentado debido al acercamiento de la mandíbula móvil, y va descendiendo en la cámara de trituración con el alejamiento de dicha mandíbula. Este retroceso permite a los fragmentos generados, descender hacia la parte más estrecha, donde se someterán a una nueva compresión al avanzar la mandíbula. Finalmente, los materiales machacados salen de las trituradoras por la abertura inferior. Estos movimientos de acercamiento – alejamiento de la mandíbula móvil, son los responsables de la trituración por compresión y del avance de los materiales por la cámara de trituración.

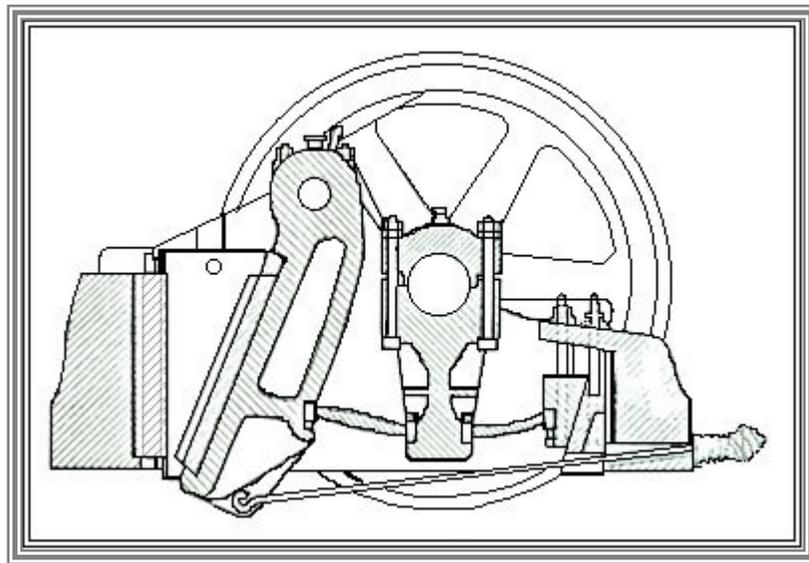


Figura 3. Machacadora de Mandíbulas Tipo Blake (Fuente Peláez 1980).

- Las trituradoras secundarias

Son mucho más ligeras que las trituradoras primarias y su propósito es reducir el género procedente de la trituración primaria a un tamaño adecuado para alimentar los aparatos de molienda o para llevarse a una concentración previa. Dentro de los aparatos utilizados se encuentran los trituradores de cono, los cilindros dentados, los molinos de martillos y los cilindros trituradores.

Los trituradores de cono se caracterizan por sus superficies convergentes de trituración, donde la superficie externa tiende a ser paralela a la superficie del cono, la cual es su principal diferencia con respecto a las trituradoras giratorias de campana. Los trituradores de cono se destinan principalmente para ultra – finos en aplicaciones específicas cuando se exigen cantidades de arenas o finos importantes y sus granulometrías suelen estar comprendidas entre los 20 mm y los 5 mm.

Los cilindros dentados consisten de dos rodillos horizontales provistos de dientes, los cuales giran en sentido contrario. Uno de ellos se encuentra soportado por cojinetes deslizantes que se mantienen en posición con resortes. Su característica más importante radica en su robustez, su construcción modular, su mínima producción de finos y su bajo costo de mantenimiento.

Los molinos de martillos, al igual que para la trituración primaria, pueden emplearse para la trituración secundaria, sometiendo el género a la acción de choques violentos que producen su fragmentación. Su aplicación fundamental es en la trituración de rocas blandas, desde calizas a arcillas; sin embargo, a partir del contenido del 6% de cuarzo, las rocas son demasiados abrasivas para ser tratadas económicamente por percusión.

Los cilindros trituradores (figura 4) tienen la misma morfología que los cilindros dentados, con la salvedad de montar unos cilindros completamente lisos; siendo inclusive la distancia entre los propios cilindros más próxima. Los mismos se componen de dos cilindros de igual diámetro con ejes horizontales y paralelos, girando en sentido contrario. El hecho de que sufra una compresión, e

inmediatamente después sea abandonado el material mineral, es característico de los cilindros, y por ello son los aparatos trituradores que producen menos polvo. Son apropiados para triturar menas en seco, hasta tamaños comprendidos entre 6 y 1,65 mm (1/4" y malla 10"), respectivamente. Las ventajas más sobresalientes son su gran capacidad, poca altura y fácil acceso para el mantenimiento por lo que se usa mucho en plantas móviles o semimóviles para la producción de piedra picada en canteras, etc.

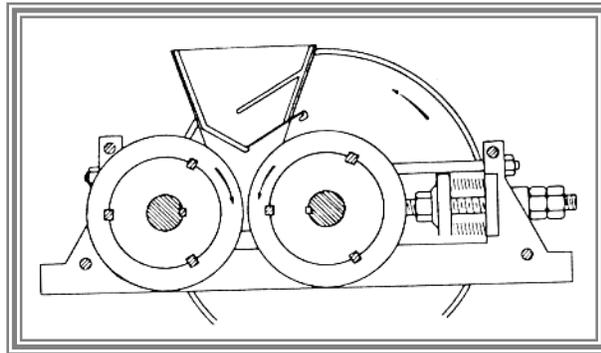


Figura 4. Cilindros trituradores (Fuente Peláez 1980).

Esta operación persigue, bien sea desprender el mineral útil de la ganga al tamaño más grueso posible; obtener un tamaño apropiado para el procedimiento de concentración adoptado; o conseguir un producto de condiciones comerciales. Todas las menas tienen una malla económicamente óptima de molienda, la cual dependerá de muchos factores, incluyendo la extensión de la dispersión de los minerales de valor en la ganga, y los subsecuentes procesos de concentración a ser empleados. Con la molienda se puede controlar el tamaño del producto que se necesita y, por esta razón, se dice que una molienda correcta es la clave para un buen procesamiento de los minerales.

Así como en la trituración se realiza en una serie de etapas el proceso de molienda, generalmente también se lleva a cabo en una serie de etapas sucesivas, primaria, secundaria, terciaria, en función de las veces que el mineral necesite ser reducido de tamaño, relacionándose cada etapa con la maquinaria que se emplea. Esta puede subdividirse, también, según los medios de molienda y el hecho de que la molienda se efectúe en medio húmedo o seco.

Molienda simple: Es la que convierte la totalidad del material en elementos inferiores a una dimensión determinada sin tener en cuenta ninguna consideración de granulometría interna del producto.

Molienda forzada: Es aquella cuyo producto molido debe contener una cantidad de finos superior al límite determinado; es decir, el producto molido debe presentar la máxima superficie posible, por ejemplo, los pigmentos, pinturas, etc.

Molienda condicionada: Es aquella cuyo producto molido debe tener la menor cantidad posible de supertriturados, bien sea perjudicial o innecesario.

Molienda diferencial o selectiva: Es la que se aplica a productos estructuralmente heterogéneos y que permite aumentar la reducción de los componentes frágiles frente a los duros.

Molienda formal: Es aquella según la cual la forma de los fragmentos obtenidos influye en el valor del producto. La forma buscada puede ser de granos pequeños cúbicos, con muy poca cubicidad, planos, de escamas, entre otros.

Molienda autógena: Es la que hace reducciones volumétricas, en las cuales los elementos a moler se fragmentan por percusión y fricciones recíprocas. Este tipo de molienda se caracteriza por la no contaminación del producto molido debido al metal que proviene del desgaste de los elementos moledores.

Molienda semiautógena: Es la que utiliza una pequeña cantidad de bolas grandes de acero para quebrar ciertos tamaños intermedios de partículas.

Los equipos de molienda son los utilizados para la última etapa en el proceso de fragmentación; en los mismos, las partículas son reducidas en tamaño frotando una capa fina de éstas entre superficies duras, que se desplazan tangencialmente una con respecto a la otra bajo presiones suficientes para agrietar y cizallar las partículas. En este sentido, se han diseñado grandes tambores cilíndricos rotatorios de acero conocidos como molinos, cargados hasta algo menos de la mitad de su volumen con cuerpos sueltos, que son grandes y pesados con respecto a las partículas de mena, pero pequeños en comparación con el volumen del tambor.

Cuando un molino gira, la carga moledora se eleva a lo largo de la pared ascendente hasta alcanzar un equilibrio dinámico (figura 5); el conjunto adquiere un movimiento rotativo general alrededor de un núcleo central, que permanece más o menos estacionario. Los elementos (barras o bolas) situados entre la pared ascendente del molino y el núcleo citado, se desplazan en sentido ascendente, mientras que al otro lado del núcleo, el movimiento es opuesto.

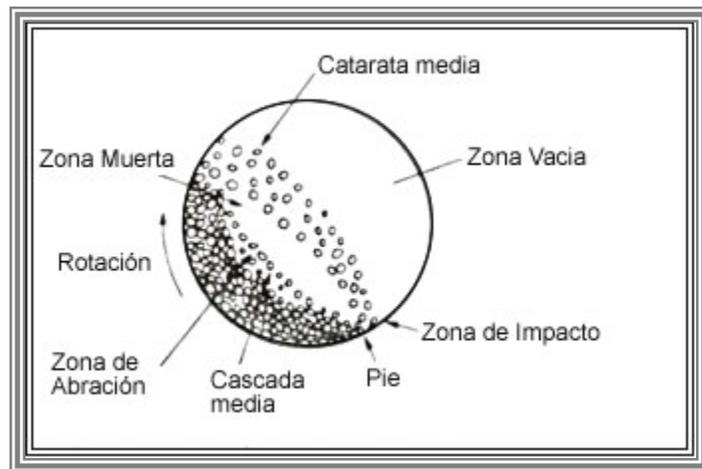


Figura 5. Movimiento carga en los molinos (Fuente: Wills, B. 1997).

En la ascensión, llega un momento en que las barras o bolas se separan de la pared y, dependiendo de las condiciones de marcha, caen dando sobre la propia carga o describen una parábola en el aire. En el primer caso se dice que el molino trabaja en cascada y en el segundo, es decir, cuando hay caída libre de las barras o bolas, en catarata. (Peláez, E., 1980).

El equipo utilizado para el estudio de moliendabilidad fue el molino de bola el cual se describe a continuación:

Están formados por cámaras cilíndricas o tronco – cónicas revestidas, a las que se hace girar con el fin de efectuar una molienda cuyos productos finales estén comprendidos entre los tamaños de 0 y 30 micras a 0 y 200 micras.

El material moledor está conformado por bolas de diferentes diámetros, en función de los materiales a moler. Dichos elementos moledores suelen tener forma esférica (bolas), aunque también pueden presentar formas cilíndricas, cónicas e

irregulares. En función del sistema de descarga, los molinos pueden definirse como: molinos de descarga por rebose; con parrillas colocadas sobre la periferia; con parrillas colocadas a lo largo de toda la extremidad opuesta a la entrada; de evacuación a lo largo del cilindro y de evacuación por corrientes de aire. Pueden utilizarse tanto en molienda por vía seca, como por vía húmeda y son recomendados en la fabricación de cemento y minerales no metálicos, como fosfatos, barita, cuarzo, entre otros.

3.1.2 Separación

Con el objeto de separar los tres minerales feldespato, mica y cuarzo aprovechando las propiedades naturales o adquiridas del producto mineral proveniente de las distintas operaciones de reducción de tamaño (Conminución), surgen las operaciones de separación por clasificación para controlar el tamaño de dicho material mineral que alimenta a los equipo de reducción de tamaño y el de concentración donde se aprovechan las propiedades naturales del producto mineral.

3.1.2.1 Operaciones de clasificación

En la clasificación la propiedad aprovechada es el tamaño directo o indirecto del material mineral. El producto, procedente de la trituración o molienda, no se ajusta a los tamaños requeridos y, por lo tanto, hay que hacer una separación por dimensiones en función de su uso final. Existen dos tipos básicos de separación: clasificación dimensional determinado por el cribado y el tamizado y separación isodrómica.

El cribado que es de manera directa a través de cribas, que normalmente se emplean para los tamaños de partículas minerales más gruesos (> 250 μm ; malla 60); y los clasificadores, para los minerales más finos; aunque el uso de uno u otro método dependerá de muchos factores en la práctica tales como: el tipo de mena, la alimentación a la planta, etc. Las cribas se caracterizan por el uso de barreras físicas para lograr una separación dimensional; mientras que, los clasificadores, emplean

equipos para la separación de partículas minerales según su rapidez de asentamiento en un fluido, logrando así una separación isodrómica.

- Clasificación dimensional

El cribado es una operación que comienza desde el momento en que el todouno entra en la planta de trituración y se sucede en las diversas etapas de la fragmentación y la molienda. Dicho proceso se realiza sobre cribas que presentan aberturas de dimensiones determinadas. Existe un amplio rango de propósitos para el cribado, de los cuales, para la industria minera, se pueden mencionar:

Prevenir la entrada de partículas minerales de tamaño inferior a las máquinas de trituración, de manera de incrementar su capacidad y eficiencia;

Prevenir que el material mineral con sobre tamaño paseen a la próxima etapa en operaciones de trituración y molienda en circuito cerrado; preparar un producto final de tamaño adecuado.

Series de Cribas:

La serie o conjunto de cribas más conveniente para dividir el género en grupos depende del propósito que se persigue. Depende desde el punto de vista de la escala a la cual se realiza se pueden distinguir: el cribado con fines industriales o el tamizado de laboratorio, con fines analíticos.

Para tamaños inferiores a los 6mm se usan universalmente series normalizadas constituidas por telas metálicas cuyos pasos varían en proporción geométrica. Las series más conocidas son la “Tyler Standard” y la A.S.T.M. En la serie Tyler la base es la malla 200 y la razón es $\sqrt{2}$. Cada tamiz se designa por el número de la malla, o sea el número de hilos en una pulgada lineal, por lo que dicho número no corresponde al paso ni éste podría calcularse sin saber el diámetro de los alambres. Como en la serie Tyler o en cualquier otra serie normalizada, los tamices se fabrican conforme a normas específicas. A cada número de malla corresponde una abertura o paso determinado. En la serie A.S.T.M. la base es la malla 18, con abertura de 100 mm, y

la razón es $\sqrt[4]{2}$, a esta serie corresponde la malla 325 con paso de 0,044mm. En la tabla 13 se indica la correspondencia entre los números de las mallas y las distancias entre los hilos, o pasos, en mm, para ambas series.

Tabla 13. Serie Tyler y A.S.T.M

| Serie Tyler estándar | | Serie A.S.T.M estándar | |
|----------------------|-------------|------------------------|--------------|
| Malla | Abertura mm | Malla | Abertura mm. |
| 3 | 6,680 | 3 | 6,350 |
| 4 | 4,699 | 4 | 4,760 |
| 6 | 3,327 | 6 | 3,360 |
| 8 | 2,362 | 8 | 2,380 |
| 10 | 1,651 | 12 | 1,680 |
| 14 | 1,168 | 16 | 1,190 |
| 16 | 1,000 | 18 | 1,000 |
| 20 | 0,833 | 20 | 0,840 |
| 28 | 0,589 | 30 | 0,590 |
| 35 | 0,417 | 40 | 0,420 |
| 48 | 0,295 | 50 | 0,297 |
| 65 | 0,298 | 70 | 0,210 |
| 100 | 0,147 | 100 | 0,150 |
| 150 | 0,104 | 140 | 0,105 |
| 200 | 0,074 | 200 | 0,074 |
| 270 | 0,053 | 270 | 0,053 |
| 400 | 0,037 | 400 | 0,038 |

Fuente: (PELÁEZ, E., 1980).

- Clasificación Isodrómica:

La clasificación o separación isodrómica es un método de separación de mezclas de minerales en dos o más productos, con base en la velocidad con la cual los granos caen a través de un medio fluido. En el procesamiento mineral, este medio es usualmente agua, y la clasificación en seco es generalmente aplicada a partículas minerales, las cuales son consideradas muy finas para ser separadas eficientemente por medio del cribado. Puesto que la velocidad de las partículas, en un medio fluido,

es dependiente no sólo del tamaño sino también de la gravedad específica y forma de las partículas, los principios de clasificación son importantes en la separación mineral utilizando concentradores por gravedad. En general, en la preparación de minerales, la separación por gravedad tiene dos finalidades: separar minerales de la misma densidad por tamaños (clasificación); o de distintas densidades, de acuerdo con su clase (concentración por gravedad).

3.1.2.2 **Concentración mineral**

La actividad minera se puede decir, en forma general, que consiste en su primera fase en descubrir los recursos minerales que se hallan en el suelo, su posterior extracción y colocarlo en condiciones para su utilización en las industrias metalúrgicas, cerámicas y químicas. Esta última etapa incluye diversos procesos de concentración o separación de minerales, los cuales hacen uso de diferentes propiedades de los minerales. Las operaciones de concentración son las más importantes a que se someten los minerales antes de su tratamiento y tiene por objeto separar las partículas de acuerdo con su riqueza, recogiendo el útil y descartando el estéril.

Dentro de los mecanismos necesarios para darle las condiciones que requiere la industria se establece una serie de grupos de procesos de concentración, el cual hace uso de la diferencia de propiedades inherentes a los mismos, entre ellas, peso específico, susceptibilidad magnética y eléctrica respectivamente. Entre los métodos de concentración se tienen:

- Concentración Gravitacional
- Flotación
- Separación Magnética
- Separación Electroestática

En los últimos 25 años, se han introducido nuevas y avanzadas tecnologías, que en algunos casos son aplicables sólo a algunos minerales específicos. Estas

tecnologías han impactado el campo de los minerales y en especial de los minerales industriales en muchos aspectos, tales como:

El desarrollo de productos minerales de más alta calidad, lo cual aumenta sus propiedades y, por lo tanto, el valor de los artículos que incorporan esos productos de alta calidad, influyendo significativamente en los precios.

El desarrollo de productos minerales mejorados o nuevos de un mineral particular, el cual reemplaza otro mineral, incrementando así la participación en el mercado de los mismos en una industria o aplicación específica.

La extensión de las reservas minerales de una compañía a través de la utilización de menas, que no habían podido ser introducidas en el mercado por no tener las especificaciones requeridas sin el uso de estas tecnologías.

Por estar tan bien colocados estos productos minerales en el mercado, las aplicaciones de las nuevas tecnologías han hecho contribuciones substanciales en la reducción de los costos de producción de esos productos.

En este sentido, las operaciones de concentración son las más importantes a las cuales se someten los minerales antes de su tratamiento metalúrgico o empleo industrial y tienen por objeto, separar las partículas de acuerdo con su riqueza, recogiendo el útil y descartando el estéril.

En una operación de concentración es necesario conocer los siguientes términos:

Cabeza: recibe este nombre el género con que se alimentan los sistemas o aparatos de concentración.

Productos: Se le designa a las tres fracciones que se obtienen al procesar el género al final de los sistemas o aparatos de concentración; siendo

Concentrado: es la parte enriquecida.

Mixtos: es la parte que requiere tratamiento posterior, para producir a su vez un concentrado y una cola.

Colas: es la parte que contiene la ganga

Ganga: se define con este nombre aquellos minerales presentes en la mena, pero para el caso considerado carecen de valor.

Mena: Es una reunión o complejo natural de minerales de donde puede extraerse con beneficio industrial, un metal o compuesto metálico, o en general, una fracción útil.

Zafras: Son los materiales que se obtienen en los frentes de arranque en la mina.

Esteriles: Son los materiales que se arrancan en la mina al realizar labores fuera de la parte mineralizada, como por ejemplo al quitar el recubrimiento en la mina a cielo abierto.

3.1.2.2.1 Concentración por flotación

La concentración de mineral por flotación consiste en separar el mineral útil de la ganga, esto después de una reducción de tamaño hasta su liberación y aprovechando las propiedades que tienen algunos minerales de adherirse a las burbujas de aire existentes en una emulsión o pulpa, recogándose en una espuma mineralizada, mientras que los otros minerales se hunden en el líquido. La figura 6 muestra un esquema que recibe el nombre de flotación por espuma o con agitación de aire; en éste se puede observar el proceso mediante el cual se consigue la separación del mineral útil de la ganga introduciendo finas burbujas de gas en la fase líquida que se adhieren a las partículas y la fuerza ascensional que experimenta el conjunto de partícula – burbuja de aire hacen que suban hasta la superficie del líquido, convirtiéndose las burbujas en su movimiento ascendente, en vehículo portador del mineral a la superficie, donde se reúnen formando una espuma cargada de mineral.

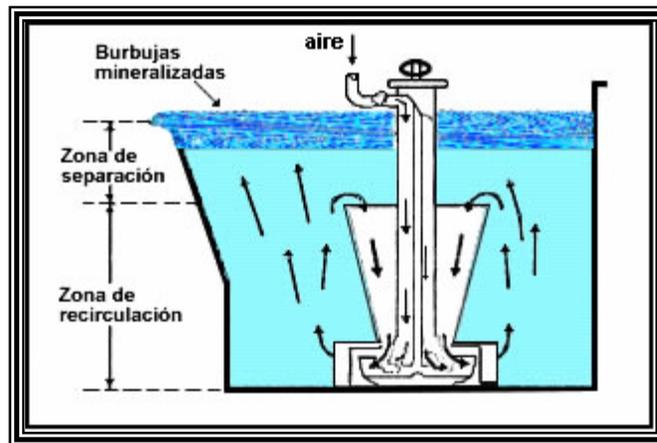


Figura 6. Proceso de Flotación (Fuente: PELAÉZ, Eduardo 1980)

El proceso de concentración por flotación es selectivo o diferencial, por cuanto un mineral o grupo de minerales son flotados para separarlos de la ganga que los acompaña. Sin embargo, cuando la separación es de minerales distintos como los sulfurados de los no sulfurados, se conoce como flotación colectiva, mientras que el término flotación diferencial se restringe a aquellas operaciones que comprenden la separación de tipos similares de mineral. Un ejemplo de flotación diferencial es la concentración y subsiguiente concentración de sulfuros de cobre, plomo, zinc y hierro a partir de un solo mineral. Mediante la aplicación adecuada de agentes modificantes, se puede lograr la separación diferencial usando el mismo agente colector para todos los concentrados. Otros minerales pueden reaccionar en forma diferente, haciendo necesario un colector distinto en cada etapa de concentración.

Para mejorar o crear la flotabilidad del mineral se requiere de la adición de sustancias químicas llamadas reactivos de flotación que tienen la propiedad de mejorar la superficie del mineral para que pueda adherirse a las burbujas de aire. Pocas partículas minerales tienen flotabilidad natural, es decir, forman una unión estable burbuja-partícula. Para ello, es necesario cambiar las propiedades superficiales de las partículas minerales de hidrofílicas a hidrofóbicas mediante el uso de un reactivo químico llamado colector. También es necesario que éstas posean el tamaño adecuado de tal forma que asegure una buena liberación de las especies minerales.

En un proceso de concentración los ensayos de laboratorio analítico y semi-industriales pueden determinar definitivamente cuales son las condiciones más apropiadas que se deben seguir para cada caso mineral. Se requiere el estudio de la naturaleza y estructura de la mena. Si ésta ofrece una estructura tal, que el mineral esté mezclado con la ganga, es preciso que previamente mediante la molienda se haya alcanzado un grado de liberación óptimo.

La mena se somete a gran cantidad de ensayos en el laboratorio con los equipos apropiados, pero un estudio de flotación exploratorio previo determina la aptitud de flotación del mineral y su rendimiento, no sin observar el comportamiento con relación a las condiciones de trabajo siguientes:

- Tamaño del grano útil.
- Grado de dilución de la pulpa.
- Grado de alcalinidad.
- Adición o no de aceites o mezclas y dosificación.
- Importancia de las reacciones de oxidación.
- Empleo de colectores químicos y otros reactivos o agentes.
- Grado y duración de agitación o dosificación de aire y presión según la clase de aparato empleado.

Esquemas de Flotación

Los esquemas se diferencian unos de otros por el número de etapas y ciclos de concentración. Dependiendo del número de etapas se dividen en: una, dos, y múltiples etapas y cada una puede contener varios ciclos, los cuales deberán ser precisados. Los esquemas de flotación de tres etapas se han utilizado para menas de diseminación regular o complicada y los de tres o más ciclos se emplean para menas polimetálicas.

La elección del esquema de flotación depende de las características de diseminación del útil en la mena y la capacidad de éste y de la ganga de enlodarse durante la trituración. Los esquemas de flotación dependen principalmente del contenido de útil en la mena, de las propiedades de flotabilidad del útil y de la ganga y las condiciones en que se presenta el concentrado.

Las características y particularidades de cada caso determinan el tipo de aparato a adoptar y el esquema de tratamiento requerido para la flotación eficaz del mineral. Al determinar lo fundamental del tratamiento a utilizar se traza el esquema más conveniente con los aparatos necesarios y probando las distintas combinaciones de flotación con desbaste, agotado y limpieza simple o múltiple y relimpieza, llegando a trazar el esquema definitivo del tratamiento que debe darse al mineral ensayado.

En todo proceso de concentración por flotación, aprovechar las diferencias entre el útil y la ganga es fundamental, como se ha dicho en párrafos anteriores; si éstas no existen hay que crear el medio necesario para que se presenten o se aumentan las ya existentes. Esto se logra mediante el tratamiento de las energías superficiales que poseen las partículas del alimento de flotación, por lo que es necesario considerar las tres fases presentes: sólida (compuesta por la muestra a flotar), líquida (compuesta por el agua) y gaseosa (compuesta por el aire).

- Fase Sólida

La Fase Sólida está representada por la mena, involucra los diferentes minerales, sustancias que poseen estructura cristalina en un arreglo espacial regular. El carácter de la superficie del mineral depende de su sistema cristalino, de la existencia o no de planos de corte y de los enlaces iónicos o covalentes de los átomos que forman el cristal, de modo que el comportamiento de las partículas sólidas en el proceso de concentración por flotación, está afectado por el carácter del mineral y de su superficie.

- Fase Líquida

La Fase Líquida, representada por el agua de la pulpa, emplea agua por su abundancia, facilidad de adquisición y propiedades, siendo el único líquido que se emplea en flotación. El tratamiento previo a su empleo en la pulpa de flotación no es muy corriente, pero en algunos casos es necesario eliminar sales de calcio, magnesio o sodio, ya que su presencia puede hacer que se consuman mayores cantidades de reactivos o en su defecto, producir cambios en las propiedades de flotabilidad de algunos minerales, así como materia orgánica o coloides, que pueden modificar la superficie del mineral de interés.

- Fase Gaseosa

La Fase Gaseosa se ve representada por el aire que es necesario inyectar al sistema para formar las burbujas. Puede ser inyectado a presión atmosférica ligeramente comprimido. Es introducido en el equipo de flotación junto con la pulpa, disuelto en el agua y mecánicamente por dispositivos del equipo o con equipos auxiliares. El aire por una parte lleva a las interfaces el oxígeno y los demás gases existentes en el aire, sirviendo además como agitador de la pulpa y como transporte de las partículas del útil en la pulpa. De los gases presentes en el aire, el anhídrido carbónico y el vapor de agua tienen influencia en la flotación, ya que algunos minerales no se adhieren a las burbujas si no han absorbido previamente cierta cantidad de gas, principalmente el oxígeno, que cambie el potencial de la superficie y contribuya a hacerla hidrófoba.

- Interfase gas – líquidos.

Se produce en flotación entre el aire y el agua, la característica principal de esta interfase está en el espesor del orden de 10 amstrongs (0.000.001 mm). Se pasa de la densidad del agua a otra unas mil veces menor. En la superficie límite del agua como en la de cualquier líquido que este en equilibrio con su vapor, existe una presión hacia adentro o tensión superficial, que se origina porque en el seno del líquido se compensan las fuerzas de atracción intermoleculares, mientras que en la

superficie no, debido al espaciamiento que hay fuera de las moléculas que hay fuera de ella.

La tensión superficial depende del líquido, pues está relacionada con el tipo de enlace que posean sus moléculas, de la temperatura, pues al aumentar ésta disminuye aquella hasta desaparecer cuando se alcanza la temperatura crítica y convertirse el líquido en vapor, de la presión del gas y de la presencia en el líquido de sustancias disueltas.

- Interfase sólido - líquido:

Se produce entre los minerales de la mena y el agua, como ya se ha dicho, los sólidos sumergidos en ésta poseen en su superficie cargas eléctricas que determinan la hidratación del mineral o la fijación a su red cristalina de reactivos presentes en el líquido de la pulpa. En la partícula sumergida los puntos superficiales que tienen cargas atraen a los iones móviles de carga contraria existente en el líquido. Esta atracción se realiza en sentido radial si los iones atraídos son positivos, pues estos tienen localizadas su carga en el centro, mientras que si se trata de aniones la atracción se produce entre el punto de la red y los electrones de las órbitas exteriores de aquellos.

- Interfase gas – sólido.

Se produce entre los minerales de la mena y el aire, a través de ella ocurre la oxidación de los minerales, por ejemplo de los sulfuros, que se convertirán en sulfatos por pasos o estados intermedios, como resultado de la oxidación cambia en el mineral la composición de la capa externa y aumenta en la pulpa la concentración de cationes metálicos y sus respectivos aniones, que reaccionaran con la superficie del mineral y los reactivos.

Se produce entre los minerales de la mena y el aire, a través de ella ocurre la oxidación de los minerales, por ejemplo de los sulfuros, que se convertirán en sulfatos por pasos o estados intermedios, como resultado de la oxidación cambia en el mineral la composición de la capa externa y aumenta en la pulpa la concentración de cationes

metálicos y sus respectivos aniones, que reaccionarán con la superficie del mineral y los reactivos.

Potencial electroquímico y doble capa eléctrica

La adsorción que tiene lugar en la superficie de una partícula mineral es regulada en gran medida por la naturaleza eléctrica de esa superficie. Los iones que son quimiadsorbidos en la superficie mineral establecen la carga de la superficie, y se les llama iones determinantes del potencial. Estos iones pueden ser iones de la superficie del mineral, iones de hidrógeno o hidroxilo, iones colectores que forman sales solubles con los iones de la superficie mineral. La densidad de adsorción de los iones determinantes del potencial de la superficie mineral determina la carga de superficie en un mineral. Todo sólido sumergido en un líquido, adquiere carga eléctrica en su superficie por adsorción de iones (Kelly & Spottiswood, 1990).

Como se muestra en la figura 7 los iones que permanecen adheridos a la superficie mineral corresponden a la capa de Stern y los iones que son arrastrados con la solución pertenecen a la capa de Gouy. Estas etapas se describen a continuación:

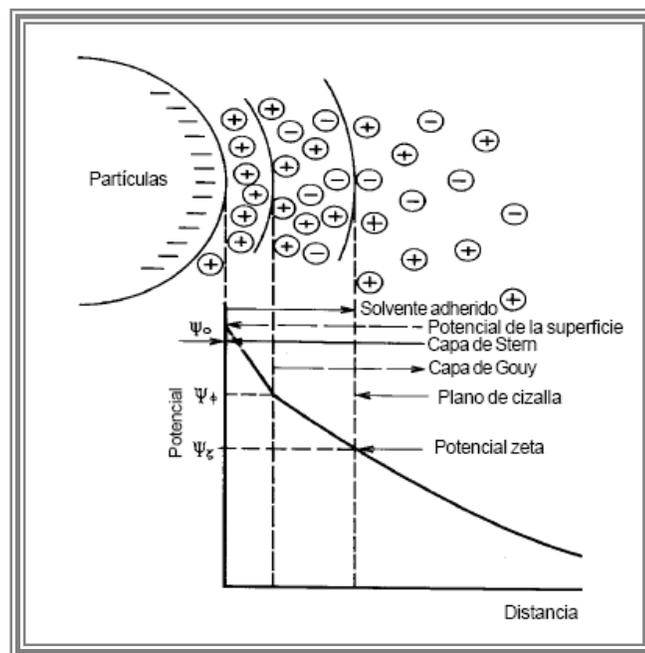


Figura 7. Potencial Electroquímico y doble capa eléctrica. Fuente: Kelly & Spottiswood, 1990.

- Doble capa eléctrica

Las partículas hidrofóbicas son inestables; la presencia en medio de electrolitos crea alrededor de las partículas una doble capa eléctrica que les permite permanecer separadas entre sí y dispersarse sin sedimentar, estabilizando el sistema.

Si una partícula A se cargó negativamente y una B se cargó positivamente, atraerán iones de signo opuesto, es decir, contraiones. En ausencia de movimiento, estos iones serán neutralizados por iones de carga opuesta, pero estos iones dotados de movimiento tienden a difundirse alrededor de las partículas. Por ejemplo, la partícula A negativa va a atraer iones positivos, solamente una parte de los iones de signo opuesto a la partícula quedan firmemente adheridos a la superficie de ésta y forman una capa monomolecular de contraiones llamada capa fija o capa de *Stern*. La concentración de contraiones es mucho mayor en la superficie (capa de Stern) véase la figura 7, y va disminuyendo hacia el interior del líquido, los demás iones se distribuyen a distintos niveles de acuerdo a la carga de la partícula, formando lo que se llama capa difusa o de Gouy-Chapman.

Sin embargo, hay un punto de la capa difusa donde la carga eléctrica de la partícula no se hace sentir más y a ese punto se lo llama punto de neutralidad. Como no se puede medir la carga de la partícula, lo que se mide es la diferencia del potencial que hay entre la zona de separación de la capa fija y la capa difusa y el punto de neutralidad. A ese potencial se lo llama potencial Z (debido a que se lo representa con la letra griega Z y es la verdadera estimación de la carga de la partícula. Las fuerzas de repulsión entre las partículas está dada por el espesor de la capa difusa, que es el potencial Z . Se mide con un zetámetro que mide movilidad electroforética.

Al potencial presente en el plano de esfuerzo cortante ubicado entre los límites de las capas de *Stern* y *Gouy*, se le denomina potencial zeta.

- Punto de carga cero

El estudio de los fenómenos electrocinéticos pone en evidencia la carga superficial de un sólido como el cuarzo, mica y feldespato sumergidos en una solución acuosa. El signo y valor del potencial Z se relacionan directamente con la naturaleza y cantidad de especies adsorbidas a través de fuerzas electrostáticas. Los sólidos pueden de esta forma considerarse como intercambiadores de iones, cuya capacidad de intercambio depende, en la mayor parte de los casos, del pH de la solución.

Las condiciones en las cuales la carga de la superficie del mineral se hace igual a cero son de particular importancia. La actividad de los iones determinantes del potencial en el cual la carga de superficie es igual a cero se llama punto de carga cero del mineral. Cuando los iones H^+ y OH^- son determinantes del potencial, el punto de carga cero se expresa en función del pH. Cada mineral posee un punto de carga cero, el cual indica la carga de la superficie del mismo en presencia de un pH dado. La figura 8 representa el efecto de la actividad del ión determinante sobre la carga superficial del mineral.

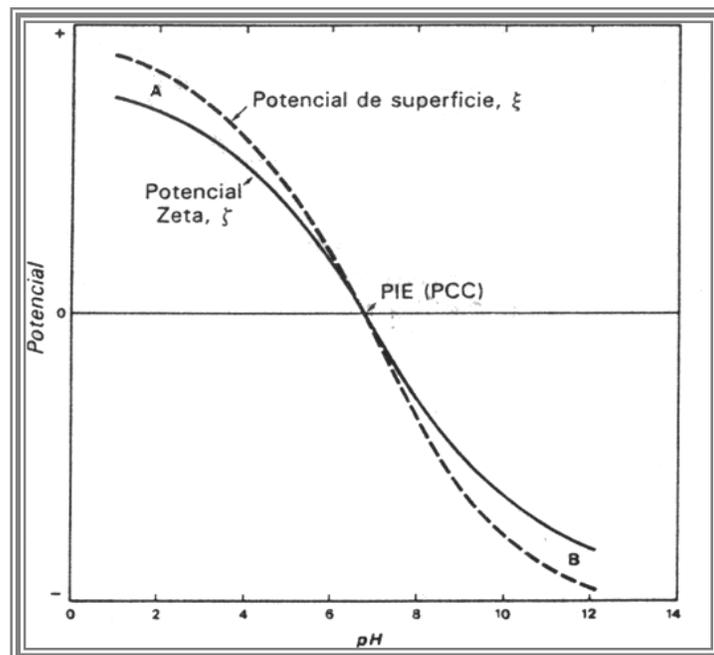


Figura 8. Efecto de la actividad del ión determinante

Reactivos de flotación

La clasificación de los reactivos de flotación prevé su división en dependencia de su función en la flotación en los siguientes grupos: los colectores, los espumantes, los activadores, los depresores, los reguladores de pH.

La regulación de la química de la solución puede abarcar la adición de estos reactivos, ya sean activadores, que aumentan la selectividad intensificando la absorción del colector, o reactivos depresores que retardan o evitan la absorción del colector. También se puede incluir la adición de un dispersor para asegurar que las superficies minerales estén libres de partículas finas. Los espumantes, tienen dos funciones, mejorar la dispersión de las burbujas finas en la pulpa y controlar las características de la espuma.

Colectores:

Los colectores son los más decisivos de los reactivos de flotación. Según Dudenkov (1980), los colectores son moléculas o iones orgánicos que se adsorben selectivamente sobre las superficies minerales. El destino principal de los colectores es la hidrofobización selectiva de la superficie de las partículas de ciertos minerales en la pulpa de flotación, para crear condiciones favorables de su adherencia a las burbujas de aire para su ulterior extracción en concentrados. Estos disminuyen la humectación de las partículas del mineral y aumentan su capacidad de adherencia a las burbujas de aire.

Son los reactivos que siendo adsorbidos por la superficie de las partículas en forma de capas muy finas aumentan la flotabilidad de las mismas, esto se debe a que aumentan su hidropelencia y su adherencia al aire de modo que puedan adherirse a las burbujas y ascender con ellas hacia la superficie de la célula. Los agentes que forman películas de espesor monomolecular se denominan promotores (adsorción química), en tanto que los reactivos que forman películas de varios espesores moleculares se denominan colectores (adsorción física).

El éxito de la flotación se debe al perfeccionamiento o descubrimiento de colectores y promotores específicos para ciertas clases de minerales. Estos reactivos son en general compuestos orgánicos hidrosolubles cuya molécula está formada por una parte polar y por una parte no polar, que debido a la adsorción (con o sin reacción química) sobre la superficie de las partículas de uno de los tipos de materiales en suspensión, de preferencia a los demás, forman sobre dichas partículas un revestimiento hidrorrepelente. Las moléculas de colectores y promotores, o sus iones activos, son adsorbidas por las partículas de forma que los extremos polares se orientan hacia la superficie del material, y los extremos no polares se disponen formando el revestimiento exterior de las partículas, esta reacción superficial puede ser reversible o irreversible. Estos reactivos y su clasificación se muestran a continuación en la figura 9.

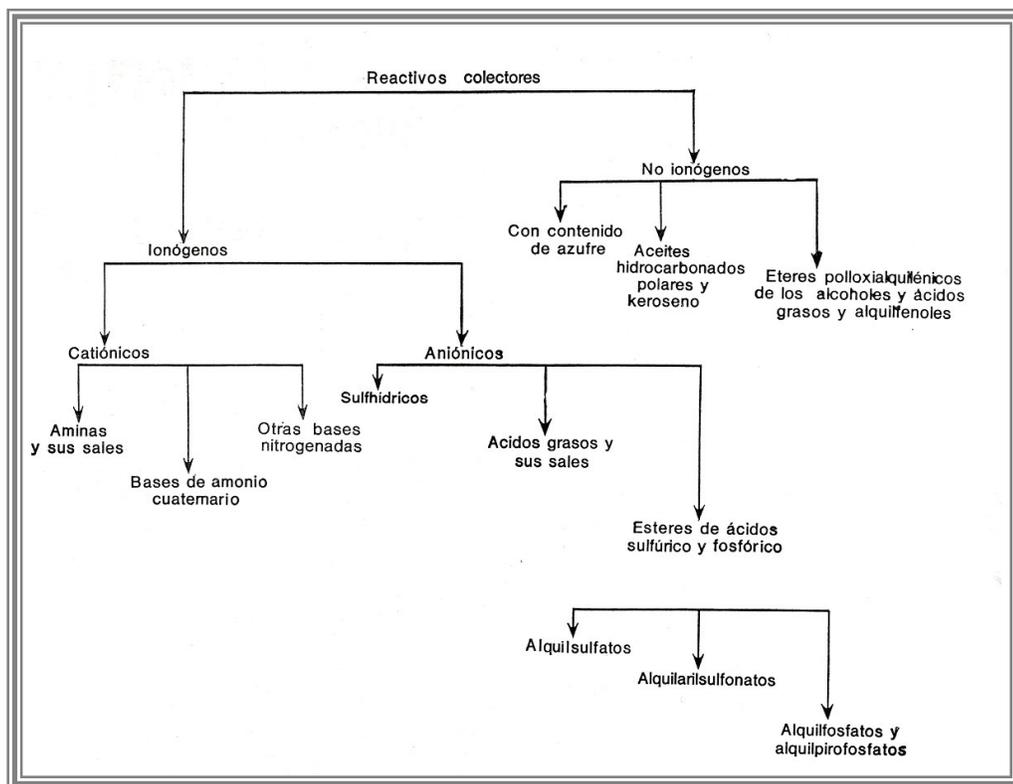


Figura 9. Clasificación de los reactivos colectores.

Por su capacidad a la disociación en la pulpa de flotación, los colectores se dividen en dos grupos:

- Los ionizables, que se disocian en iones.
- Los no ionizables, que actúan en forma molecular.

En dependencia de si la parte de flotación activa de la molécula es anión o catión, los colectores ionizables se subdividen en:

- Aniónicos, si los iones activos tienen carga negativa
- Catiónicos, si los iones activos tienen carga positiva

Aun cuando muchos minerales poseen una excelente flotabilidad natural, y no necesitan de un colector, se pueden considerar como minerales muy puntuales y su importancia en la flotación es relativa y limitada. La selectividad de los colectores que se emplean en la industria depende de la naturaleza del grupo de enlace, es decir, de su capacidad para incorporarse al mineral.

Los reactivos colectores catiónicos son derivados del ion amonio o del amoníaco, los reactivos catiónicos modernos están representados principalmente por dos clases de sustancias orgánicas: las aminas y las sales amoníacas. Las aminas son derivadas del amoniaco, las cuales en dependencia de la cantidad de los átomos de hidrógeno sustituidos por radicales hidrocarburos, se dividen en primarias (a), secundarias (b) y terciarias (c), como se muestra en la figura 10.

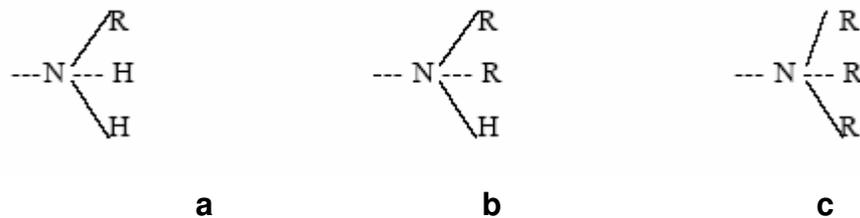


Figura 10. Clasificación de la amina: Fuente: Peláez, 1980.

La denominación de la amina proviene a partir radicales hidrocarburos que entran en su composición. Las aminas inferiores son perfectamente solubles en agua y al aumentar el peso molecular la solubilidad de la amina en agua disminuye. Las aminas superiores son las sustancias sólidas, insolubles en agua. Las dosis usuales de este reactivo se encuentran en 250 gr/ton (peláez E, 1980).

Los colectores catiónicos tienen como regla general lo siguiente:

- Es de gran importancia la interacción electrolítica entre el mineral deseado y el colector a utilizar.
- Se requieren colectores de largas cadenas carbonadas.
- Se requieren concentraciones moderadas de colector.
- La adhesión o afinidad entre el colector y el mineral parece ser menos fuerte, pero se nivela el sistema con un largo ángulo de contacto.
- El tiempo de acondicionamiento requerido antes de flotar es relativamente corto.
- Existe sensibilidad por efecto de las lamas.
- Los colectores usualmente poseen poder espumante.
- La selectividad de los colectores catiónicos para minerales específicos es usualmente pobre.

Los colectores no ionizables también se dividen en los reactivos que contienen azufre bivalente, alcoholes, alquilfenoles; entre los reactivos que pueden considerarse no iónicos están: el petróleo y sus derivados, kerosene, fuel-oil y otras fracciones medianas y los aceites de hulla son colectores típicos, que tienen las desventajas, respecto a los reactivos mencionados anteriormente, de formar una espuma grasienta que contiene una masa pegajosa de burbujas difícil de romper en la operación posterior de sedimentación y de que en algunos casos conviene no tener trazas de aceite en el mineral concentrado. El aceite de pino, que generalmente se clasifica como espumante, actúa también como colector con la ventaja sobre los anteriores de

que no es tan pegajoso. Todos estos reactivos colectores se utilizan para flotar carbono, grafito, azufre y molibdenita (S_2Mo) dado que se adsorben fácilmente sobre estos minerales naturalmente hidrófugos. Se agregan cantidades del orden de 500 g por tonelada de mineral.

Espumantes:

Los agentes espumantes son sustancias tenso - activas heteropolares, que se adsorben selectivamente en la interfase aire - agua. En la fase líquida de la pulpa de flotación su acción eleva la resistencia mecánica de las burbujas de aire, favorece su conservación en estado disperso, aumentando de esta forma la superficie de adherencia de las partículas de mineral flotante y la estabilidad de la espuma de flotación. El uso de los espumantes es fundamental, pues se necesita para obtener la espuma, que es el vehículo de transporte de mineral que las burbujas han atrapado y así llevarlas a la superficie de las celdas de flotación, es requisito indispensable que se forme sobre ésta una espuma estable. Estos disminuyen la tensión superficial y contribuyen junto con las partículas adheridas a evitar que las burbujas de aire se rompan al llegar a la superficie, debido a las diferencias de presiones en el medio.

Como características relevantes, los espumantes, no deberían tener influencia determinante en la flotabilidad de los sólidos de la pulpa, deben limitarse a producir espuma; también es importante que su acción no esté influida por la condición de la pulpa, ya que en ella se presentan, además de los componentes de la mena, otros reactivos y variaciones en el pH, necesarios para ajustar el medio a las condiciones requeridas para hacer flotar el mineral de interés, en las flotaciones selectivas. La eficacia de algunos espumantes depende en gran parte del pH de la pulpa.

Los principales espumantes son los aceites de pino, que en la flotación reducen la tensión superficial del agua y aumenta la viscosidad sobre todo el mineral pulverizado que capta. Su acción espumante es debida a su contenido de alcoholes, principalmente de terpineoles, que es un alcohol aromático de fórmula $C_{11}H_{17}OH$.

El aceite de pino para flotación es un líquido transparente de color amarillo claro a amarillo oscuro. Éste se obtiene al elaborarse la sepa en la fábrica extracción de colofonia en baterías de difusión, donde tiene lugar la extracción de sustancias resinosas con solventes orgánicos (generalmente, gasolina). El extracto obtenido se envía a elaboración ulterior, la cual se reduce a destilar la gasolina, la que luego vuelve al proceso para obtener el aceite de flotación.

Auxiliares:

Estos actúan modificando o controlando el desenvolvimiento de los minerales en una operación de flotación, los constituyen productos químicos que serán: depresantes, activantes, reguladores del pH y modificadores. La combinación, cantidad, punto de adición y tipo de reactivo químico, de los agentes de flotación mencionados, será específica para cada muestra dada, luego de cuidadosos mediante de ensayos de laboratorio. Los reactivos auxiliares se utilizan como modificadores o reguladores de las diferentes reacciones que intervienen en el proceso.

Como reactivos reguladores, se agrupan los reactivos que se añaden a la pulpa con el objeto de crear en ella las condiciones apropiadas para que se modifiquen las propiedades superficiales de los minerales, de tal forma que solamente los deseables pasen a la pulpa. Se utilizan para elevar la selectividad de flotación y para aumentar la extracción de minerales. Los reguladores, influyendo en la interacción del colector con los minerales, aumentan o disminuyen la hidrofobización de sus superficies. En este sentido, existen los reactivos de activación, los depresores y los reguladores de pH. La activación de la flotación del mineral está relacionada con la provocación de la susceptibilidad de una especie en un medio en el que generalmente no respondería a la acción del colector. (Kelly, E, 1990).

Por otro lado, con una acción contraria a los activadores, los agentes reguladores de acción depresora impiden la adsorción del colector por la superficie de los minerales y elevan su humectación.

Dependiendo del papel que desempeñan, estos se clasifican en:

- Reactivos activantes:

Estos reactivos destruyen la acción de los reactivos deprimentes, es decir, preparan de nuevo la superficie de los minerales seleccionados para que pueda actuar el colector. Los principales activantes que se utilizan en la industria son: el sulfato de cobre y los ácidos minerales; el sulfato de cobre reacciona rápidamente con la galena, mientras que de los ácidos minerales se emplea solamente en la industria, el ácido sulfúrico, por su bajo costo, como activante, de la pirita deprimida con cianuro o cal.

- Reactivos deprimentes:

Con una acción contraria a los activadores, los agentes reguladores de acción depresora impiden la adsorción del colector por la superficie de los minerales y elevan su humectación. El reactivo más importante es el silicato de sodio, empleado para deprimir cuarzo y otros silicatos en dosis usuales de 1,2 kg/ton (PELÁEZ, E., 1980). El mecanismo de la acción depresora del regulador en la superficie de mineral consiste en el desplazamiento del ión colector; la reducción o impedimento de la adsorción del colector; el enlace de los iones del activador en la superficie del mineral y en el volumen de la pulpa; la formación con el colector de un compuesto poco soluble en el volumen de la pulpa; la creación en el mineral de cubrimientos que estorban el contacto entre la superficie que adsorbe el colector y la burbuja de aire; la disolución de la superficie mineral y la separación de los iones que activan la flotación del mineral, o la disolución y eliminación del colector quimiadsorbido junto con los iones de la red cristalina.

Aumentan la tendencia a mojarse de los minerales que se desean flotar, es decir, hacen hidrófila la superficie de los minerales que deben permanecer en la pulpa. Los deprimentes mas importantes son, los cianuros de sodio o de potasio, para pulpas alcalinas, se usan principalmente para deprimir la blenda y los sulfuros de cobre, pero suelen ser altamente tóxicos y su precio elevado; otro deprimente es el sulfuro sódico, que se emplea para deprimir la mayoría de los sulfuros. En la

flotación de cuarzo y silicatos, el empleo de silicato sódico (Na_2SiO_3), que es una sal formada por un ácido débil y una base fuerte, y es sustituido en la industria por el vidrio soluble, empleándose en dosis de acuerdo a las propiedades de alcalinidad de la pulpa.

- Modificadores del pH:

Sirven para controlar la concentración iónica de la pulpa y sus reacciones, a través de la acidez o alcalinidad. La regulación de este es fundamental en la flotación, ya que la mayoría de los minerales flotan bien dentro de un determinado intervalo de pH y fuera de él es imposible conseguir su adherencia a las burbujas de aire; al valor de pH por encima del cual el mineral no flota se le llama pH Crítico y varía con la temperatura de la pulpa y la dosis y naturaleza del reactivo.

- Reactivos reforzadores:

Estos reactivos se emplean para acentuar la aptitud para flotar los minerales que no se han sometido a la acción de los deprimentes, por lo que este reactivo puede ser utilizado como activante o como reforzador. La acción reforzadora puede obtenerse por la presencia de un ión común, algunas veces son los cationes y otras los aniones. Los reforzadores más empleados en la industria son el sulfato de cobre y el sulfuro sódico.

La acción de los ácidos y álcalis en la flotación (reguladores de pH), es determinada por la compleja influencia de los iones H^+ y OH^- en el estado de las sustancias disueltas en la fase líquida de la pulpa y en las superficies interfaciales. Al cambiarse el pH de la pulpa varían las propiedades y la solubilidad, tanto de los mismos reactivos de flotación como también de los minerales. En dependencia del régimen del agente reactivo y la composición mineral de la pulpa, la variación del pH puede ejercer una influencia tanto activadora, como depresora, durante la flotación.

La adherencia de los iones hidrógeno o hidroxilo en la superficie del mineral varía el estado eléctrico de la superficie, y con ello influye en la adherencia de los iones del colector en la capa de difusión o directamente en la superficie. Son

especialmente sensibles a la variación de pH aquellos materiales para los cuales los iones H^+ y OH^- son los que determinan el potencial (cuarzo, silicatos, hidróxidos). Asimismo, regulando el pH es posible mantener una concentración determinada de formas, iónica y molecular, del colector y el depresor y, con ello, regular la selectividad de la flotación.

- Preparación de la pulpa para la flotación

La preparación de la pulpa de flotación es fundamental para lograr una efectiva alimentación en la planta de concentración. Existen factores que influyen en los resultados de la flotación, como lo son los que se derivan de la naturaleza de la mena o del sistema de explotación de la mina y del transporte de las zafras al lavadero. También es posible que estas se generen en el proceso de tratamiento mineral, como lo son la trituración, molienda y clasificación, así como también se presentan factores influyentes durante el proceso de flotación. La composición mineralógica del útil, es quizás el factor más importante y que influye de manera decisiva sobre la flotación, pues de ella dependen tanto los reactivos que se empleen como el tipo de tratamiento. Es por eso importante controlar en el lavadero ciertos factores como el tamaño de las partículas y la dilución de la pulpa, que son los factores de mayor relevancia.

El tamaño de las partículas afecta las condiciones de fijación del mineral a la burbuja e influye en la velocidad de flotación y en las reacciones entre el mineral y los reactivos, siendo el tamaño más conveniente dependiente por una parte del peso específico del mineral útil y por otra parte del grado de diseminación, ya que para que las partículas puedan ascender junto con la espuma a la superficie y permanecer en ella deben ser de un tamaño tal que su peso sumergido sea incapaz de vencer la adhesión a la burbuja.

El tamaño máximo rara vez es mayor a la malla 48 de acuerdo con A.S.T.M (0,3 mm), ya que las partículas mayores, aparte de la liberación, son difíciles de flotar debido a su mayor peso y además debe existir una relación entre el peso de la burbuja cargada de partículas minerales y el empuje ascensional de la misma. Respecto al

tamaño mínimo, las recuperaciones disminuyen cuando las partículas son inferiores a $10\mu\text{m}$, y al ascender el tamaño por debajo de $5\mu\text{m}$, las propiedades superficiales de los minerales se asemejan tanto que es difícil recoger el útil e impedir que la ganga pase a la espuma, dando como resultado recuperaciones de baja calidad y bajo grado de concentración.

Otro problema que se presenta en la preparación mineral, es la heterogeneidad de la composición de la mena, pues al no ser de igual dureza los diferentes componentes minerales, los más blandos se fragmentan con mayor facilidad.

Debido a este problema, las cantidades de lamas en la pulpa, que resultan de la desintegración de los componentes de la ganga hasta el tamaño de micrones, resultan perjudiciales pues éstas se adhieren a las burbujas, limitan a las mismas del acceso mineral útil y ensucian los concentrados al pasar a la espuma.

Ya que los costos de molienda del mineral varían con el tamaño, habrá por lo antes ya expuesto, un tamaño óptimo para el tratamiento de cada mena. Para su cálculo, es importante considerar que mientras mayor sea el tamaño de las partículas de mayor es su tendencia a sedimentarse y como consecuencia aumenta el consumo de energía y el desgaste de las máquinas de flotación, debido al aumento de la rotación en el eje de agitación de las celdas de flotación.

Por otro lado, la dilución de la pulpa, en los circuitos de flotación de la pulpa, puede variar entre 1:1 y 6:1, es decir, entre 50% y 14% de sólidos en peso; el exceder estos extremos no es recomendable, pues por una parte una pulpa con más del 40% de sólidos resulta demasiado densa y en ella se reduce la velocidad de flotación y baja la recuperación y por otro lado, si se tiene demasiada agua los reactivos están muy diluidos.

- Equipos para Flotación

Los equipos denominados máquinas de flotación se utilizan en el proceso para separar de ella un concentrado o un rechazo. Esta separación se efectúa al introducir aire para generar las burbujas en la pulpa que esta dentro de la máquina. Éstas suelen clasificarse según la forma como produzcan las burbujas, en dos grupos:

Máquinas por introducción de aire por agitación mecánica (De celdas)

Fagergrene (Impulsor de TipoRotor Turbina); Denver (Impulsor de turbina plana); Agitar (Impulsores de Discos con Postes); Krupp (Con Impulsor de turbina plana)

Outokumpu (Impulsor de turbina plana Curvo); Sala (Impulsor de turbina plana)

- Introducción de aire por agitación mecánica (De tanque)
- Maxwell (Impulsor de Turbina Plana o Inclínada)
- Nagahm (Impulsor de Turbina de Aspas Curvas)
- Máquinas Neumáticas (Se introduce aire a presión)
- De Columna (Agitación por Contracorriente)
- Máquinas Neumáticas (Se introduce aire a presión. De tanque o celda)
- Cyclo Cel (De Bombeo Tangencial)
- Davrra (De BombeoTangencial)
- Flotaire (De Flujo a Contracorriente)
- Operaciones de concentración o enriquecimiento

CAPITULO IV

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Con el fin de adquirir la información necesaria para hacer posible el estudio de factibilidad técnica y enriquecimiento de una mena cuarzo-feldespática-micácea proveniente de MINERA MINORCA MONTALBÁN C.A, para obtener tres concentrados feldespato, mica y cuarzo; se llevó a cabo a través del Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas, del Departamento de Minas, un desarrollo experimental, con el objetivo de caracterizar la muestra y realizar una programación de ensayos de concentración, siendo esta etapa de vital importancia en el desarrollo y cumplimiento de los objetivos de este trabajo. En este sentido ejecutó una serie de etapas, el cual se presenta en forma esquemática en la Figura 11.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

Efectuar una caracterización detallada de la muestra es algo primordial ya que ello proporciona datos de gran interés para el posterior tratamiento de la misma. De los estudios de la caracterización llevados a cabo se deriva una información valiosa en cuanto a asociaciones minerales presentes en la muestra, interdependencia entre dichos minerales, formas y tamaños de grano, impurezas presentes, discriminación entre minerales útiles y aquellos según el caso, considerados como impurezas, posibles interpretaciones en cuanto a génesis del depósito entre otras. Toda ésta información permite canalizar y orientar los métodos a aplicar para un óptimo tratamiento y beneficio de la muestra, que de una forma económica permitan satisfacer la demanda, cuarzo, feldespato y mica, tanto en el mercado nacional como en el internacional, bajo condiciones de calidad establecidas. Para la caracterización de la muestra se realizó una descripción macroscópica, el análisis petrográfico, fluorescencia y difracción de Rayos X, análisis granulométrico y químico.

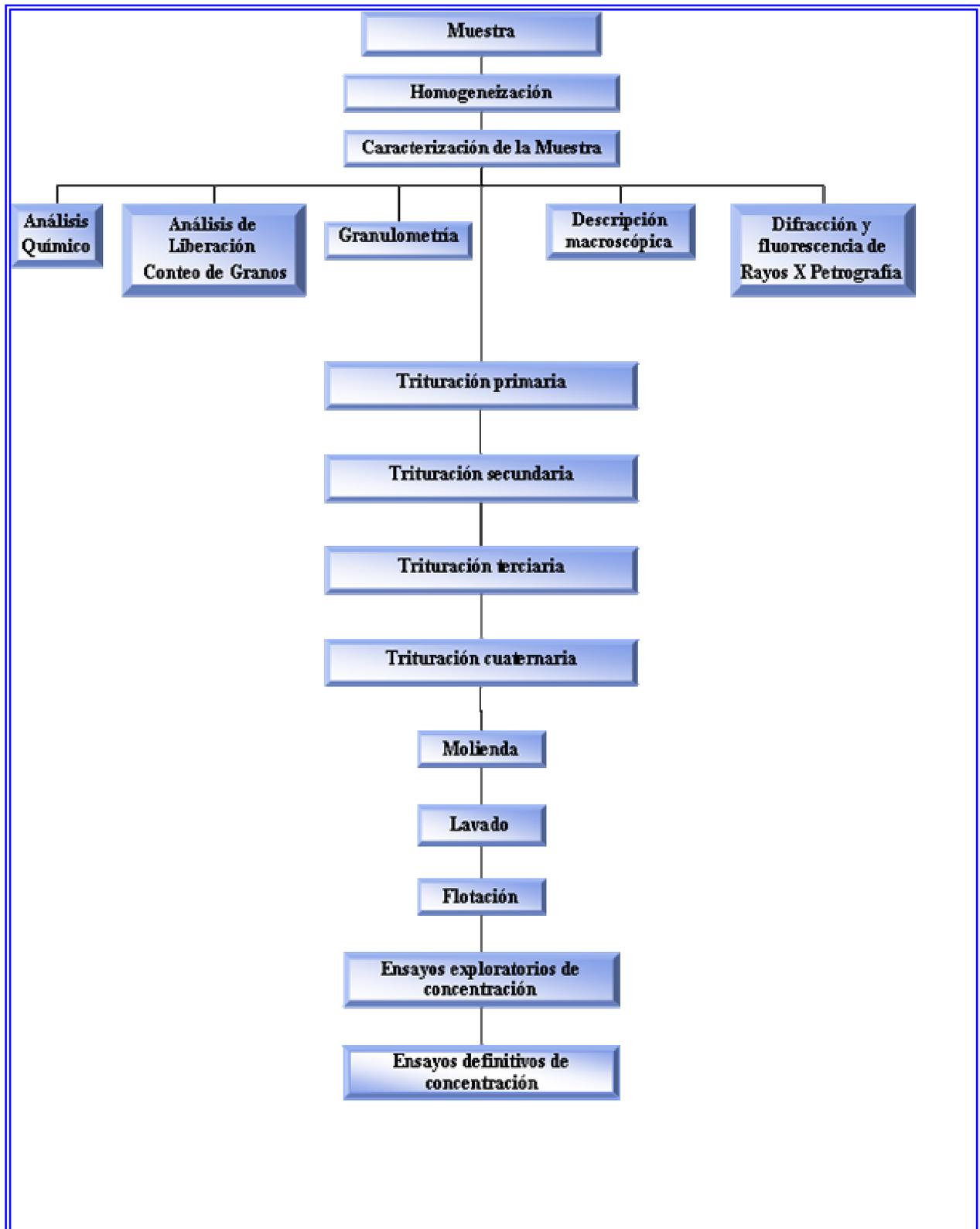


Figura 11. Esquema General del Desarrollo Experimental (Fuente: Elaboración propia).

4.1.1 Descripción macroscópica

La mena objeto de estudio fue obtenida del personal de la empresa minera Minorca Montalbán. Este se encargó del muestreo y toma de muestras, proporcionando 250 kg de material para ser estudiado. El material, una vez en el Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas, de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, fue sometido a una homogeneización y reconocimiento visual de los trozos tomados en campo para su descripción macroscópica a los fines de determinar; color de la roca fresca y meteorizada, textura donde se toma en cuenta la forma, cantidad y disposición de los minerales, tamaño de los trozos y por último, la composición mineralógica donde se clasifican los minerales.

Los tamaño de los fragmentos roca, considerados muestras de mano, presentaban tamaños promedios entre 25 cm de largo por 20cm de ancho.

Color de meteorización: gris claro

Color fresco: blanco

El material presenta una textura gnesica característica de una roca metamórfica; es decir de grano grueso, estructura granular y hábito macizo, con cuarzo, plagioclasa y mica, un brillo perlino característico de la mica, así como pequeñas venas de cuarzo que se intercalaban con el gneis. El tamaño de la mica no se aprecia con exactitud, presentándose de forma diseminada, identificándose sólo por su brillo.

4.1.2 Estudio petrográfico

Se obtuvieron dos secciones finas en el laboratorio de INGEOMIN, éstas se sometieron a análisis de petrográfico en el laboratorio Mineralogía y Petrología Ígneo – Metamórfica, de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, cuyos resultados se muestran en la tabla 14 y tabla 15.

- Muestra A

Tabla 14. Resultado del análisis petrográfico (muestra A)

| Composición mineralógica | % en la muestra |
|----------------------------------|-----------------|
| Cuarzo | 50 |
| Plagioclasa (Albita) | 25 |
| Feldespato potásico (Microclino) | 20 |
| Moscovita | 5 |

La primera sección fina analizada llamada muestra A, posee las características (textural - mineralógico) es gneis cuarzo plagioclásico feldespático. Es una roca metamórfica caracterizada por presentar fundamentalmente granos hipidioblásticos (con poco desarrollo de caras) de cuarzo, microclino y plagioclasa de diferentes tamaños que van desde fino hasta cristales grandes. La textura de la roca es fundamentalmente gnéisica. El mineral predominante en la sección es el cuarzo (50%) el cual refleja, bajo nícoles cruzados, extinción ondulatoria típica del cuarzo metamórfico. La plagioclasa presente en la muestra es albita (figura 12) y es el segundo mineral en importancia dentro de la sección (25%) mostrando el típico maclado que las caracteriza en nícoles cruzados. En algunas plagioclasas se puede apreciar cierto grado de alteración e incluso también se observan inclusiones de minerales.

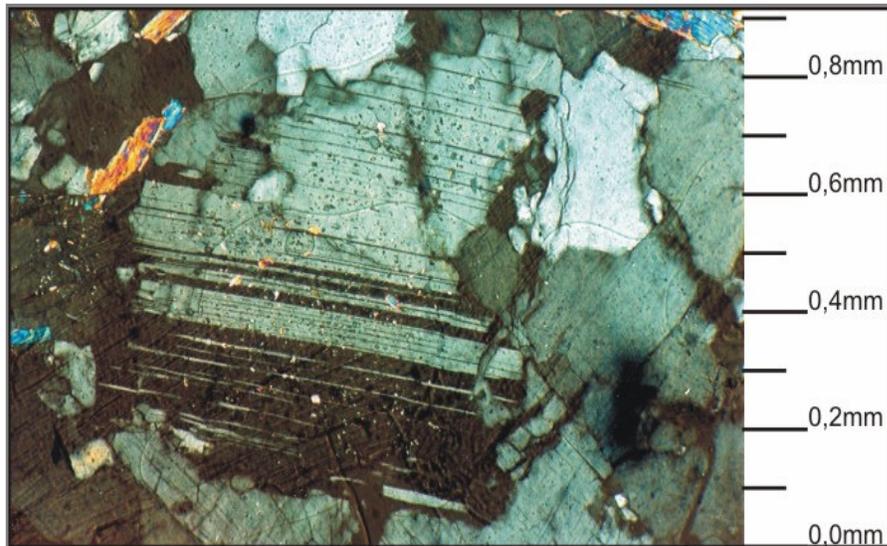


Figura 12. Mineral de plagioclasa tipo albita con su maclado característico visto bajo nicoles cruzados.

El microclino ocupa un 20% en la sección fina constituyéndose en el tercer mineral en orden de importancia, y muestra el típico maclado en rejas característico bajo nicoles cruzados, tal como aparece reflejado en la figura 13.

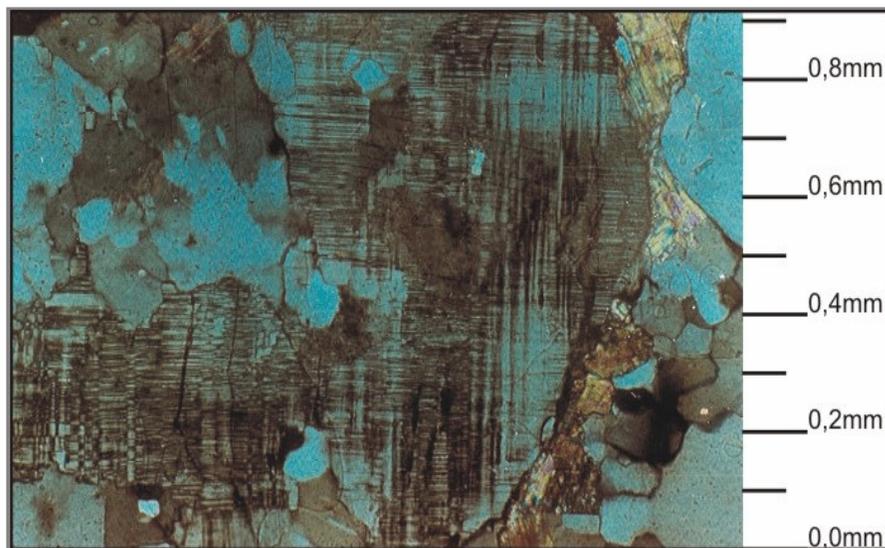


Figura 13. Microclino con sus características maclas enrejadas visto bajo nicoles cruzados.

La muscovita por su parte es transparente y algo pleocroica bajo nícoles paralelos con un relieve mayor al del bálamo de la sección (figura 14), reflejando una fuerte birrefringencia con colores del segundo orden superior bajo nícoles cruzados. Además los cristales tienen aspecto perfectamente tabular y se encuentran en los bordes de los granos de plagioclasa, cuarzo y microclino con cierta deformación. No obstante, este mineral ocupa sólo un 5% dentro de la sección fina. El protolito de esta roca metamórfica analizada es de tipo ígneo, posiblemente un granito, dados los contenidos de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico (microclino). Algunos de los cuarzos estudiados presentan inclusiones de minerales lo cual indica la proveniencia de una roca ígnea.

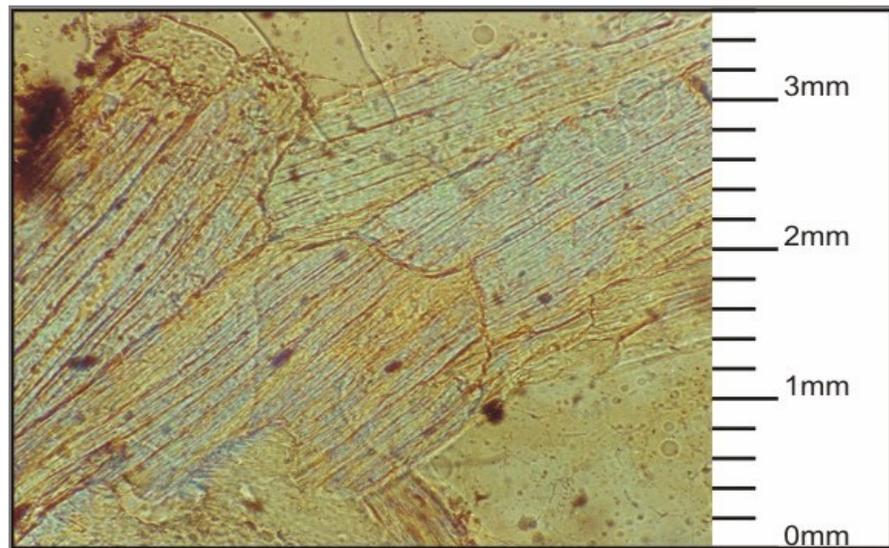


Figura 14. Cristales de muscovita vistos bajo nícoles paralelos.

- Muestra B

Tabla 15. Resultado del análisis petrográfico (muestra B).

| Composición mineralógica | % en la muestra |
|----------------------------------|-----------------|
| Cuarzo | 50 |
| Plagioclasa (Albita) | 30 |
| Feldespato potásico (Microclino) | 15 |
| Moscovita | 5 |

La sección petrográfica de la muestra B refleja un contenido mineralógico similar (tabla 14) a la muestra A, con la única diferencia de que aumenta el contenido de plagioclasa tipo albita a un 30%, mientras que el porcentaje de microclino dentro de la sección se reduce a 20%, aproximadamente. Todos los minerales reportados en la sección fina presentan las mismas características petrográficas especificadas para la muestra A. De igual forma el nombre dado a la roca se sigue manteniendo por cuanto la plagioclasa y el feldespato potásico (microclino) ocupan el segundo y tercer orden de importancia respectivamente en la sección. Además de esto, el protolito igualmente sigue siendo ígneo (figura 15).

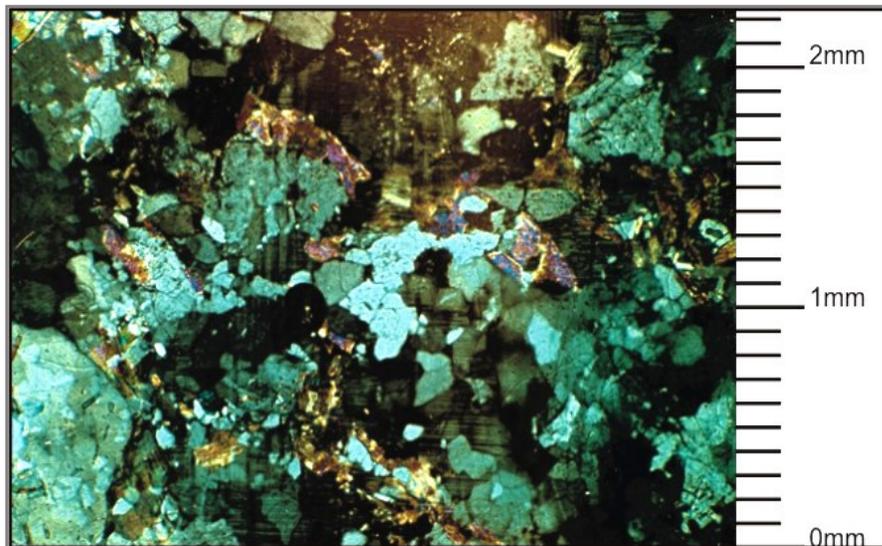


Figura 15. Aspecto general de la sección petrográfica B donde se aprecian cristales de cuarzo, plagioclasa, microclino y moscovita.

4.1.3 Análisis de difracción de Rayos X

Los cristales poseen una estructura ordenada tridimensional con periodicidades características o períodos de identidad a lo largo de los ejes cristalográficos. Cuando un haz de Rayos X choca contra tal distribución tridimensional hace que los electrones que encuentran en su trayectoria vibren con una frecuencia de la radiación X incidente. Estos electrones vibrantes absorben parte de la energía de los Rayos X, y actuando como fuente de nuevos frentes de onda, emiten (dispersan) esta energía como radiación X de la misma frecuencia y longitud

de onda. En general, las ondas dispersadas interfieren destructivamente, pero en algunas direcciones específicas se refuerzan entre sí para producir un efecto de dispersión cooperativo que recibe el nombre de difracción.

La realización de este análisis se llevó a cabo en el laboratorio de Difracción y Fluorescencia de Rayos X, del Departamento de Geología de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, el cual arrojó los siguientes resultados que se pueden apreciar en la tabla 16.

Tabla 16. Resultados de análisis de muestras por Difracción de Rayos X.

| Muestras | Mineralogía por DRX |
|-------------|--|
| IngMinas 01 | Microclino, Albita, Cuarzo, Moscovita. |
| IngMinas 02 | Microclino, Albita, Cuarzo, Moscovita. |

Los minerales presentes en la muestra analizada por difracción de rayos X se describen a continuación (tabla 17).

Tabla 17. Características de los minerales encontrados por Difracción de Rayos X.

| Mineral | Composición Química | Generalidades |
|------------|-----------------------------|--|
| Moscovita | $KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$ | Dureza (H) = 2 – 2½, Densidad (G) = 2,76 – 2,88. Caracterizado por su exfoliación muy perfecta y color claro. Transparente a incoloro en las hojas delgadas |
| Albita | $NaAlSi_3O_8$, | Dureza: 6 a 6,5 según Mohs, Brillo vítreo. Densidad: 2,62 gr/cm ³ . |
| Microclino | $KAlSi_3O_8$ | Contiene 16,93% de K ₂ O, 18.35% de Al ₂ O ₃ y 64.73% de SiO ₂ , Dureza 6 a 6,5 Textura: Perfectamente liso. Densidad 2,5 gr/cm ³ Color: Incoloro, blanco, gris, rosa carne. |
| Cuarzo | SiO_2 | Dureza (H) = 7, Densidad (G) = 2,65. Caracterizado por su elevada dureza, fractura concoidea y ausencia de clivaje. |

La muestra analizada por el método de difracción de rayos X, arroja resultados cualitativos similares a los obtenidos en el estudio petrográfico. Se aprecia la presencia de tres minerales esenciales como son la mica, feldespato y cuarzo. La mica se considerará, en adelante, con respecto a los resultados finales de este trabajo, como moscovita, al feldespato como sódico y potásico, y cuarzo, correspondiendo estos a el grupo de los silicatos, presentando similares propiedades físicas y químicas que la identifican como una mena compleja.

Los resultados así expresados son favorables, debido a que entre los objetivos a desarrollar ésta la recuperación de los tres minerales considerados de interés comercial.

4.1.4 Análisis de fluorescencia de Rayos X

La fluorescencia de Rayos X está reconocida como el método muy preciso de determinación de la composición atómica de materiales. Se basa en que la muestra a analizar se bombardea por el flujo de fotones de altas energías (Rayos X) y se analiza el espectro de energías de fotones secundarios emitidos por la muestra. Un espectrofluorímetro de Rayos X consiste de la fuente de radiación primaria (tubo de Rayos X o radioisótopo), detector para analizar la radiación de la muestra y medios que permiten representar el espectro y analizarlo.

La aplicación de este método genera información cuantitativa de los elementos, este fue realizado. En el laboratorio de Mineralogía y Petrología Ígneo Metamórfica de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica UCV a través de un Difractómetro de Rayos X, marca PHILIPS MINIPAL. Los resultados se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Resultados de análisis de muestras por fluorescencia de Rayos X.

| Mayoritarios en % (FRX- Philips Minipal) | | | | | | | | |
|--|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|------------------|------------------|
| Muestra | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | K ₂ O | TiO ₂ |
| IngMinas 01 | 67,62 | 10,01 | 0,68 | <0,01 | 4,22 | 0,20 | 0,31 | 0,10 |
| IngMinas 02 | 73,40 | 7,61 | 1,01 | <0,01 | 3,75 | 0,18 | 1,78 | 0,07 |

Se realizó un análisis por Fluorescencia de Rayos X a los elementos traza, en partes por millón, como unidades de concentración (ppm), para conocer el grado de impurezas presente en la mena, que puede ser inconveniente para un concentrado de feldespato de alta ley para la industria del vidrio o la cerámica, según las especificaciones comerciales (tabla 19).

Tabla 19. Fluorescencia de Rayos X (Elementos traza)

| Muestra | Traza en ppm (FRX-Niton) | | | | | | | |
|-------------|--------------------------|----|-----|----|-----|-----|-----|----|
| | Zr | Sr | Rb | Zn | Co | Ni | V | Mo |
| IngMinas 01 | 36 | 20 | 356 | - | 63 | 197 | 29 | 11 |
| IngMinas 02 | 8 | 6 | 306 | 21 | 105 | 126 | <20 | 4 |

4.1.5 Trituración y análisis granulométrico

Como parte del proceso de caracterización, el análisis granulométrico es uno de los ensayos más significativos. El tamaño de las partículas minerales de los materiales es una variable primordial en la mayoría de los procesos de beneficio mineral, para conocer el rango en el cual se encuentran las mismas, así como su distribución. Dicha distribución por tamaños, en la fase final de un proceso de reducción de tamaño, es de considerable importancia para las especificaciones industriales y el diseño de la planta de beneficio mineral.

Este análisis se realizó para los productos provenientes de las etapas de trituración o fragmentación en las instalaciones del Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas, del Departamento de Minas. Este proceso de clasificación se realizó en seco, en los tamices de 20 cm de diámetro de la serie A.S.T.M. Para cada análisis se utilizó una cantidad representativa de muestra, tanto para el producto de la trituración primaria, como el de la secundaria, terciaria y cuarta, provenientes éstas, de la preparación de la muestra, como se describe en cada una de las etapas de trituración.

Cada muestra se colocó convenientemente durante 10 minutos en el tamizador colgante “Rotap”, dispositivo vibratorio y de sacudidas que permite el proceso de clasificación.

Trituración Primaria

La alimentación de esta etapa fue realizada con muestras provenientes de mina de 20x15 cm. Ésta se llevó a cabo en una machacadora de mandíbulas tipo Denver, de dimensiones (25,40 x 20, 32) cm con salida a 7,62cm. El producto de esta operación fue sometido a un análisis granulométrico en seco, los resultados se muestran en el gráfico 1 y tabla 20 que se muestran a continuación:

Gráfico 1. Curva granulométrica de la trituración primaria.

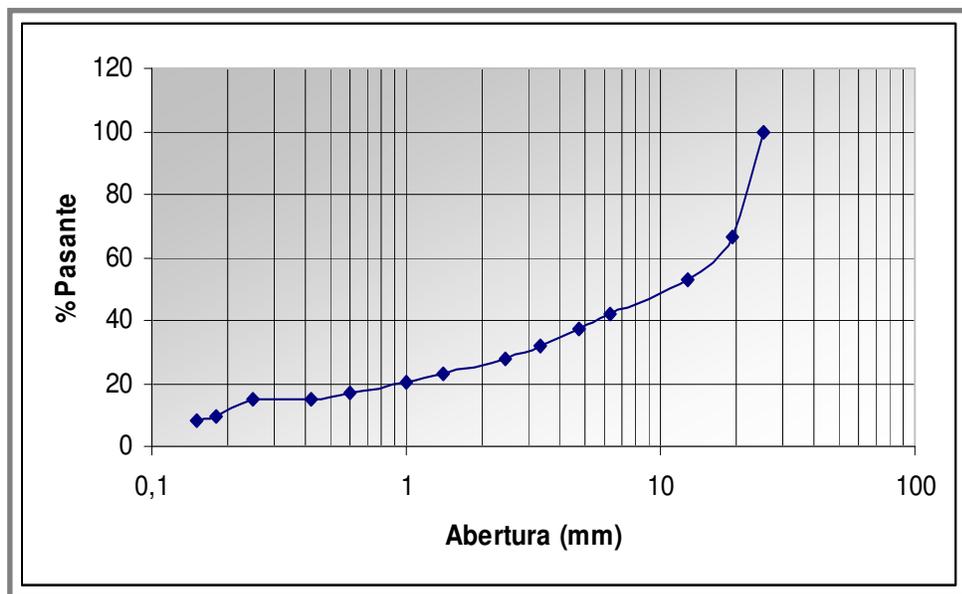


Tabla 20. Análisis granulométrico de la trituración primaria.

| Malla A.S.T.M | Abertura (mm) | Retenido % | Acumulado % | Pasante % |
|---------------|------------------|---------------|----------------|--------------|
| 1" | 25,400 | 0,000 | 0,000 | 100,000 |
| 3/4" | 19,000 | 33,820 | 33,820 | 66,180 |
| 1/2" | 12,700 | 13,180 | 47,000 | 53,000 |
| 1/4" | 6,300 | 10,950 | 57,950 | 42,050 |
| 4 | 4,750 | 4,950 | 62,900 | 37,100 |
| 6 | 3,350 | 5,000 | 67,900 | 32,100 |
| 8 | 2,440 | 4,540 | 72,440 | 27,560 |
| 14 | 1,400 | 4,690 | 77,130 | 22,870 |
| 18 | 1,000 | 2,570 | 79,710 | 20,290 |
| 30 | 0,600 | 3,180 | 82,890 | 17,110 |
| 40 | 0,425 | 2,020 | 84,910 | 15,090 |
| 60 | 0,250 | 0,100 | 85,010 | 14,990 |
| 80 | 0,180 | 5,450 | 90,460 | 9,540 |
| 100 | 0,150 | 1,210 | 91,670 | 8,330 |
| -100 | <0,150 | 8,330 | 100,000 | 0,000 |

- Trituración secundaria

El material proveniente de la trituración primaria se sometió a una segunda trituración utilizando una machacadora de mandíbulas tipo Denver, de (12 × 7,5 cm) con salida a 2,54 cm, al cual se le realizó un análisis granulométrico, cuyos resultados se muestran en el gráfico 2 y tabla 21.

Grafico 2. Curva granulométrica de la trituración secundaria.

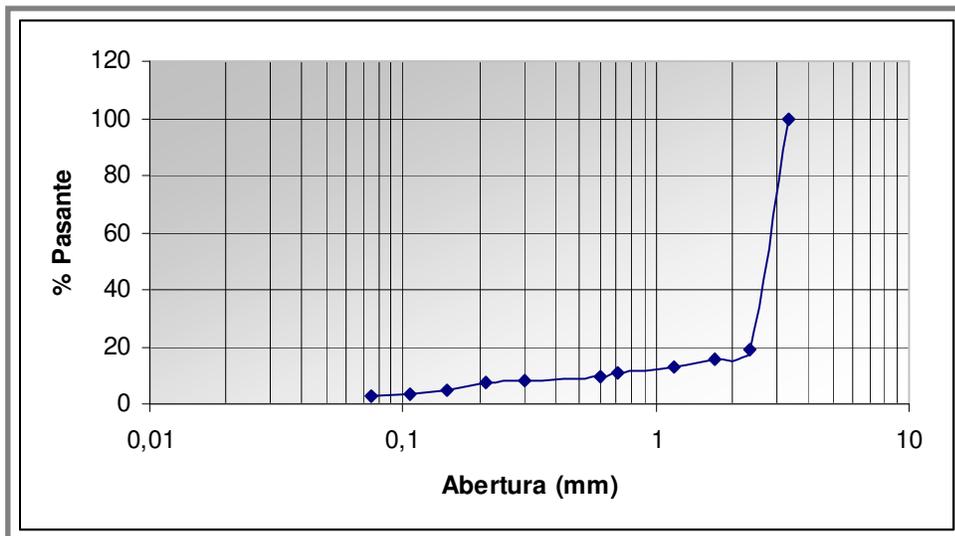


Tabla 21. Análisis granulométricos de la trituración secundaria.

| Malla A.S.T.M | Abertura mm | Retenido % | Acumulado % | Pasante % |
|---------------|----------------|---------------|----------------|--------------|
| 6 | 3,350 | 75,120 | 75,120 | 100,000 |
| 8 | 2,360 | 5,570 | 80,690 | 19,310 |
| 12 | 1,700 | 3,430 | 84,120 | 15,880 |
| 16 | 1,180 | 2,810 | 86,930 | 13,070 |
| 25 | 0,710 | 2,300 | 89,230 | 10,770 |
| 30 | 0,600 | 0,990 | 90,220 | 9,780 |
| 50 | 0,300 | 1,970 | 92,190 | 7,810 |
| 70 | 0,212 | 0,350 | 92,540 | 7,460 |
| 100 | 0,150 | 2,49 | 95,020 | 4,980 |
| 140 | 0,106 | 1,550 | 96,570 | 3,430 |
| 200 | 0,075 | 0,880 | 97,450 | 2,550 |
| -200 | -0,075 | 2,550 | 100,000 | 0,000 |

- Trituración Terciaria

Después del análisis granulométrico, al producto de la trituración secundaria en donde los porcentajes de material pasante a la malla 100 resultaron por debajo del 5%, se decidió realizar una tercera etapa de trituración al producto de la segunda trituración con el fin de lograr una mayor fragmentación. Ésta se realizó con los cilindros trituradores de 25 x 15cm, con descarga de 3 mm. El gráfico 3 muestra la distribución granulométrica y el análisis granulométrico en la tabla 22, producto de esta trituración.

Gráfico 3. Curva granulométrica de la trituradora terciaria.

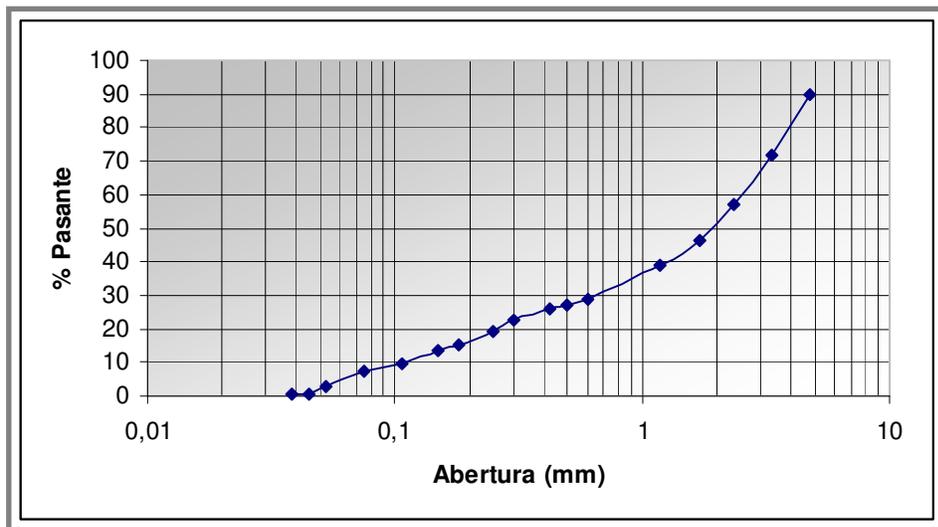


Tabla 22. Análisis granulométricos de la trituración terciaria.

| Malla A.S.T.M | Abertura mm | Retenido % | Acumulado %. | Pasante % |
|---------------|----------------|---------------|-----------------|--------------|
| #1/4 | 6,300 | 2,780 | 2,780 | 97,220 |
| 3 | 6.350 | 0,200 | 2,990 | 97,010 |
| 4 | 4,750 | 7,250 | 10,240 | 89,760 |
| 6 | 3,350 | 18,000 | 28,240 | 71,760 |
| 8 | 2,360 | 14,710 | 42,950 | 57,050 |
| 12 | 1,700 | 10,820 | 53,770 | 46,230 |
| 16 | 1,180 | 6,980 | 60,750 | 39,250 |
| 30 | 0,600 | 10,370 | 71,120 | 28,880 |
| 35 | 0,500 | 1,710 | 72,830 | 27,170 |
| 40 | 0,425 | 1,330 | 74,160 | 25,840 |
| 50 | 0,300 | 3,190 | 77,350 | 22,650 |
| 60 | 0,250 | 3,410 | 80,760 | 19,240 |
| 80 | 0,180 | 3,700 | 84,470 | 15,530 |
| 100 | 0,150 | 2,100 | 86,570 | 13,430 |
| 140 | 0,106 | 3,720 | 90,290 | 9,710 |
| 200 | 0,075 | 2,590 | 92,880 | 7,120 |
| 270 | 0,053 | 4,220 | 97,100 | 2,900 |
| 325 | 0,045 | 2,310 | 99,400 | 0,600 |
| 400 | 0,038 | 0,200 | 99,610 | 0,390 |
| -400 | -0,038 | 0,390 | 100,000 | - |

- Trituración Cuaternaria.

Se utilizó la trituradora de rodillo, pero ajustada a un tamaño de descarga menor a 1mm. La alimentación de este proceso es el material retenido en la malla 140 de la trituración terciaria. El producto así obtenido es llevado a el proceso de molienda. Se procedió nuevamente a su homogeneización y cuarteo sistemático mediante el empleo del cuarteador Jones, hasta tener las muestras representativas en fracciones de 10 Kg cada una. Este material así preparado fue utilizado para el estudio de moliendabilidad. El gráfico 4 muestra la distribución granulométrica y la tabla 23 el análisis granulométrico de esta cuarta etapa.

Gráfico 4. Curva granulométrica de la cuaternaria.

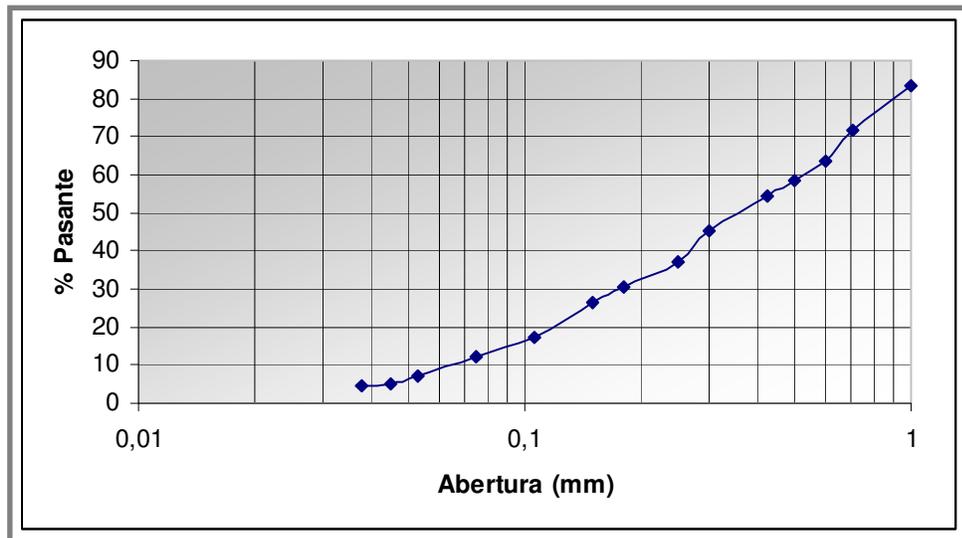


Tabla 23. Distribución granulométrica trituración cuaternaria.

| Malla A.S.T.M | Abertura mm | Retenido % | Acumulado % | Pasante % |
|---------------|----------------|---------------|----------------|--------------|
| 18 | 1,000 | 16,300 | 16,450 | 83,550 |
| 25 | 0,710 | 11,750 | 28,200 | 71,800 |
| 30 | 0,600 | 8,300 | 36,500 | 63,500 |
| 35 | 0,500 | 4,950 | 41,450 | 58,550 |
| 40 | 0,425 | 4,100 | 45,550 | 54,450 |
| 50 | 0,300 | 9,000 | 54,550 | 45,450 |
| 60 | 0,250 | 8,540 | 63,090 | 36,910 |
| 80 | 0,180 | 6,380 | 69,470 | 30,530 |
| 100 | 0,150 | 3,900 | 73,370 | 26,630 |
| 140 | 0,106 | 9,400 | 82,770 | 17,230 |
| 200 | 0,075 | 5,230 | 88,000 | 12,000 |
| 270 | 0,053 | 4,800 | 92,800 | 7,200 |
| 325 | 0,045 | 2,120 | 94,920 | 5,080 |
| 400 | 0,038 | 0,360 | 95,280 | 4,720 |
| -400 | -0,038 | 4,560 | 99,840 | 0,160 |

De esta fase de reducción de tamaño constituida por las 4 etapas de trituración se puede observar que por debajo de la malla 18 el porcentaje de material pasante en la trituración primaria es menor al 20%. Sin embargo del análisis de la distribución granulométrica en la trituración secundaria se tiene que este porcentaje fue menor por debajo de la malla 6, lo cual indica que esta etapa no alcanzó una buena reducción de tamaño, mientras que entre la tercera y cuarta etapa de trituración el porcentaje de pasante disminuye proporcionalmente a medida que disminuye la abertura del tamiz, indicando esto una mejor distribución granulométrica

De estos resultados se determinó la distribución por tamaño de la muestra, le cual permite cuantificar las distintas fracciones granulométricas que componen la alimentación del estudio de moliendabilidad.

4.1.6 Análisis químico.

Se realizó un análisis químico por el método de Absorción Atómica para determinar cuantitativamente la cantidad de los elementos constituyentes de la muestra objeto de estudio, en el Laboratorio del Instituto Nacional de Geología y Minería, INGEOMIN.

La espectroscopía de adsorción atómica usa la adsorción de la luz para medir la concentración de la fase gaseosa de átomos. Ya que la mayoría de las muestras son sólidas o líquidas, los átomos o iones de los analitos, que es el componente o elementos de interés analítico de una muestra, deben ser vaporizados a la flama. Los átomos adsorben luz visible o ultravioleta y hacen transiciones a niveles de energía más altos. La concentración del analito es determinada por la cantidad de adsorción. Aplicando la ley de Beer-Lambert directamente en la espectroscopía AA es difícil debido a la eficiencia de la atomización de la muestra de la matriz a la no-uniformidad de la concentración, a la longitud de la trayectoria de los átomos del analito.

Las mediciones de concentración son generalmente determinadas de una curva de calibración, después de haber calibrado el aparato con los estándares de concentración conocida.

A continuación se muestra en la tabla 24 el resultado del análisis químico aplicado a la muestra mineral el cual reportó los siguientes resultados

Tabla 24. Resultados de Análisis Químico.

| Elemento | SiO ₂ % | Al ₂ O ₃ % | Na ₂ O % | K ₂ O % |
|-----------------|--------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------|
| Muestra mineral | 79,27 | 10,31 | 3,28 | 2,96 |

El resultado de este análisis químico presenta un porcentaje SiO₂, Al₂O₃, y K₂O reproducidos en los resultados.

La escogencia de %SiO₂, %Al₂O₃, %Na₂O y %K₂O a ser determinados por absorción atómica, se debió a que a partir de éstos se pueden determinar los

porcentajes de los elementos mayoritarios presentes en los tres minerales de interés cuarzo, mica y feldespato, considerándose estos indicadores de la presencia de dichos minerales.

4.1.7 Análisis de liberación.

Un prerequisite esencial para la separación de un mineral en sus fracciones de útil y ganga es la liberación de los granos de mineral útil de los granos de mineral ganga. El grado de liberación (f) es el porcentaje de un mineral dado que existe en la forma de partículas libres, es decir, partículas que contienen sólo ese mineral con relación al total de la muestra. Las partículas que contienen a la vez los minerales útil y ganga se conocen como partículas no liberadas o mixtas, y gran parte de las dificultades que se experimenta en la separación de minerales, radica en el tratamiento de estas partículas, ya que necesitan posteriores trituraciones para poder ser liberadas, adicionando gastos de energía a los equipos para realizar dichos procesos, lo que encarece los costos de la planta de tratamiento de mineral

El grado de liberación se define como:

$$\text{Total de partículas de útil en el mixto} = \frac{\Sigma \text{mixtos } f\%}{100}$$

$$f = \frac{\text{Total de partículas liberadas}}{(\text{Total de partículas liberadas} + \text{total de partículas de útil en el mixto})}$$

La liberación del componente útil de la ganga se logra debido a la diferencia en las propiedades físicas existentes entre ambos y la separación se produce en los límites de los granos de la mena y a lo largo de las caras de los granos debido a debilidades en la estructura cristalina.

- Procedimiento

A partir de los análisis granulométricos de las etapas terciaria y cuaternaria de la trituración, se tomaron distintas fracciones del producto obtenido en las diferentes mallas, para ser observadas en un microscopio petrográfico, tipo Orthoplan, perteneciente al Laboratorio de Mineralogía y Petrología del Departamento de

Geología de la escuela de Geología, Minas y Geofísica, donde se pudo identificar el cuarzo, mica y feldespatos, tanto en partículas liberadas, es decir partículas que contienen sólo ese mineral con relación al total de la muestra, como en partículas no liberadas o mixtas, siendo éstas, las partículas que contienen a la vez a los tres minerales. Se observó, que a medida que la abertura de la malla disminuía, aumentaba el grado de liberación; sin embargo, no se lograba un grado de liberación óptimo, lo que llevó a realizar un ensayo de molienda para 5min, 10minutos y 15 minutos con material de la trituración cuaternaria como alimentación para realizar un conteo modal de partículas.

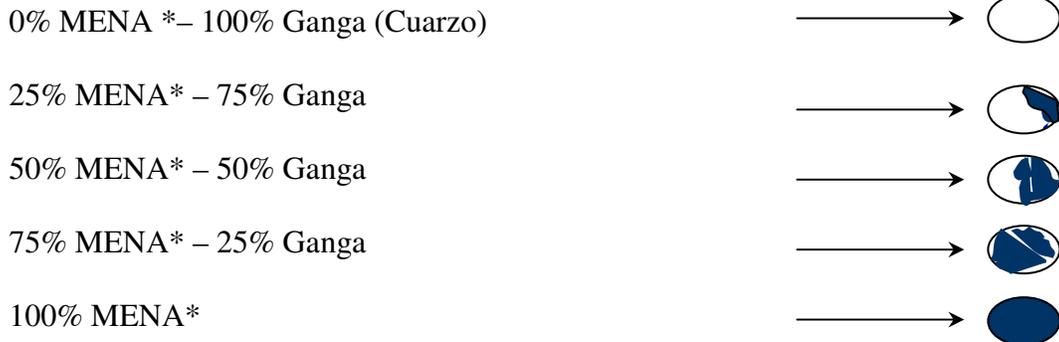
Se visualizó en el microscopio Petrográfico el producto de estos tiempos siendo el producto de la molienda durante 15 minutos donde mejor se observó visualmente un porcentaje de los tres minerales en la forma de partículas libres, con relación del total de la muestra. El material retenido en cada una de las mallas utilizadas en los análisis granulométricos fue homogenizado, extrayendo de cada una de ellas pequeñas porciones representativas del total retenido en cada malla, siendo éstas analizadas individualmente bajo el microscopio electrónico antes mencionado.

Como material escogido para realizar el ensayo se tomaron las fracciones provenientes del retenido sobre las mallas 30, 35, 40, 50, 60, 80, 100, 140 y 200. Cabe destacar que para las fracciones de las mallas 270, 325, 400 y la -400 no se logró realizar el conteo modal por no tener una buena definición de los minerales estudiados con el microscopio.

Para ello, cada una de estas muestras se colocó y fijó en portaobjetos, procediendo al conteo de las partículas con ayuda de una plantilla que permitía el desplazamiento horizontal y vertical del portaobjeto. De esta manera, se fijaba la posición vertical y se realizaba el conteo haciendo un “barrido” horizontal; una vez terminada la línea, se movía la posición vertical y se repetía el proceso de barrido. Este procedimiento se realizó para el conteo modal de 600 partículas para cada una de las mallas antes mencionadas, tanto para el feldespatos como para mineral de mica, mientras que para el cuarzo no se realizó el conteo por ser el mineral matriz y el

mayor en orden de abundancia en la mena, éste siempre se visualizaba en partículas liberadas.

El criterio para llevar a cabo el conteo de partículas se basó en diferentes relaciones de liberación, tomando como referencia los colores, que identifica cada partícula mineral, por ejemplo, tal como se describe a continuación:



Por ser el cuarzo un producto de los tres minerales a recuperar, la ganga se toma como producto de importancia y MENA comprende bien granos de mica o granos de feldespato.

- Grado de liberación para el feldespato

Los granos de mineral de feldespato se identificaron tomando como referencia el color, observándose el feldespato sódico amarillo ocre y el potásico amarillo claro. La tabla 25 muestra los resultados del estudio realizado para éste, en el cual se puede observar un porcentaje importante de partículas liberadas a partir de la malla 100 que se incrementa notablemente en la malla 200.

Tabla 25. Análisis de liberación del feldespato

| Malla A,S,T.M. | Abertura (mm) | 100 % | 75 % | 50 % | 25 % | Liberación % |
|-------------------|------------------|----------|---------|---------|---------|-----------------|
| 30 | 0,600 | 0 | 45 | 300 | 255 | 0,000 |
| 35 | 0,500 | 0 | 100 | 150 | 350 | 0,000 |
| 40 | 0,425 | 0 | 120 | 380 | 100 | 0,000 |
| 50 | 0,300 | 0 | 90 | 210 | 300 | 0,000 |
| 60 | 0,250 | 50 | 45 | 355 | 150 | 16,736 |
| 80 | 0,180 | 313 | 154 | 75 | 58 | 65,140 |
| 100 | 0,150 | 394 | 74 | 80 | 52 | 78,408 |
| 140 | 0,106 | 420 | 81 | 42 | 57 | 81,395 |
| 200 | 0,075 | 507 | 50 | 19 | 24 | 90,536 |

- Grado de liberación para la mica

Las partículas de mineral de mica se reconocen por los diferentes colores que refleja el mismo grano, el cual refleja por la luz un color rosado intenso, azul y amarillo. La tabla 26 muestra los resultados del estudio realizado para la mica, donde se tiene que el grado de liberación está en la malla 140. Es importante destacar que la mica representa un 5% con respecto al total de la mena, lo que se ve reflejado en un bajo porcentaje de liberación de la misma.

Tabla 26. Análisis de liberación de la mica.

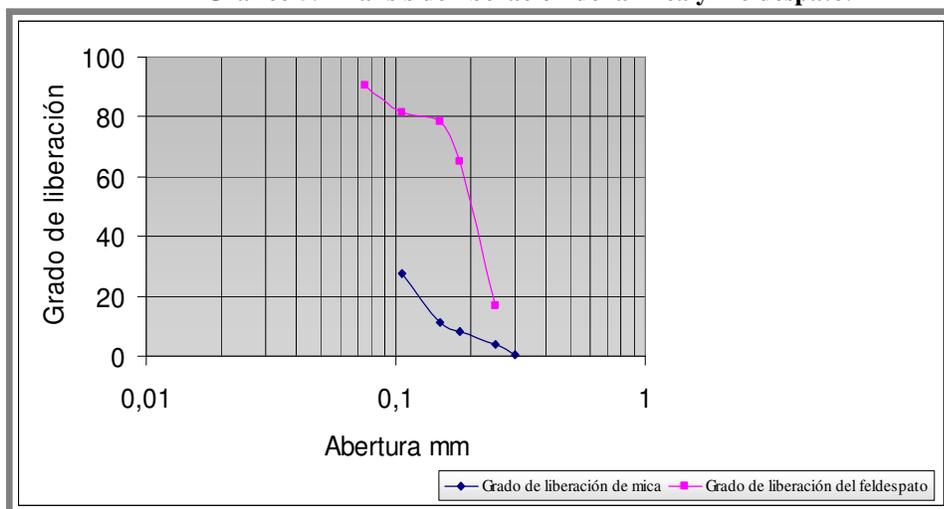
| Malla A.S.T.M | Abertura (mm) | 100% | 75% | 50% | 25% | Liberación % |
|---------------|---------------|------|-----|-----|-----|--------------|
| 30 | 0,600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 | 0,500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | 0,425 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 0,300 | 1 | 252 | 200 | 147 | 0,306 |
| 60 | 0,250 | 14 | 269 | 212 | 105 | 4,023 |
| 80 | 0,180 | 28 | 247 | 168 | 157 | 8,321 |
| 100 | 0,150 | 33 | 143 | 187 | 237 | 11,263 |
| 140 | 0,106 | 88 | 133 | 156 | 223 | 27,372 |

- Grado de liberación del cuarzo

Los cristales de mineral de cuarzo fueron identificados por su color blanco característico. Debido al hecho de que el cuarzo se presenta como matriz de la mena no se realizó el conteo para el grado de liberación, por observarse las partículas del mineral liberadas en todas las mallas.

En el gráfico 5 se puede observar la diferencia en los porcentajes de liberación de feldespato con respecto a la mica, donde para la malla 140 el porcentaje de liberación para feldespato es de 81,395%, mientras que para la mica fue de 27,372%.

Gráfico 5. Análisis de liberación de la mica y el feldespato.



4.1.8 Estudio de Moliendabilidad

Una vez conocido el tamaño de liberación de las especies minerales que conforman la mena se procede a continuar la reducción del tamaño con una etapa de molienda representada por el estudio de moliendabilidad Gaudin – Shuman.

En este sentido los ensayos de molienda se efectuaron en el Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas del departamento de Minas, para el cual se prepararon 5 kg de material como alimentación para el molino de bolas, marca Denver, para un tiempo de estadía en el molino a razón de 5 minutos, con el fin de determinar la distribución granulométrica del producto en esos tiempos y, a su vez, construir la gráfica Gaudin – Schuhman, presentada en el gráfico 6, la cual relaciona los resultados granulométricos con el tiempo necesario para lograr un producto triturado a una malla dada. A continuación, la tabla 27 muestra los porcentajes de pasante obtenidos en los tres tiempos de molienda: 5,10 y 15 minutos.

Tabla 27. Porcentaje de pasante para los tiempos de molienda.

| Malla A.S.T.M | % Pasante | | | |
|------------------|----------------|-------|--------|--------|
| | Abertura mm | 5 min | 10 min | 15 min |
| 30 | 0,600 | 76,67 | 91,87 | 98,88 |
| 35 | 0,500 | 73,05 | 89,15 | 97,63 |
| 40 | 0,425 | 69,17 | 85,70 | 95,28 |
| 50 | 0,300 | 59,97 | 76,12 | 86,38 |
| 60 | 0,250 | 53,58 | 72,13 | 79,67 |
| 80 | 0,180 | 42,28 | 56,72 | 61,28 |
| 100 | 0,150 | 35,85 | 42,60 | 55,50 |
| 140 | 0,106 | 25,15 | 26,27 | 35,38 |
| 200 | 0,075 | 19,22 | 20,70 | 27,05 |
| 270 | 0,053 | 3,52 | 3,20 | 2,98 |
| 325 | 0,045 | 1,08 | 1,45 | 0,93 |
| 400 | 0,038 | 0,80 | 1,07 | 0,77 |
| -400 | -0,038 | 0,42 | 0,58 | 0,55 |

En la tabla 27 pueden observarse los porcentajes de pasante para los tres tiempos de molienda, en la cual se aprecia una mayor distribución de material a mayor tiempo de estadía en el molino. En función a estos porcentajes de pasante y sus respectivas mallas, para los 3 tiempos de molienda, se construye el gráfico Gaudin Shuman para el estudio de moliendabilidad.

Para el trazado de las gráficas se tomó el procedimiento Gaudin Schuman, el cual viene dado por la siguiente fórmula:

$$Pp = 100 \times \left(\frac{d}{k} \right)^\alpha$$

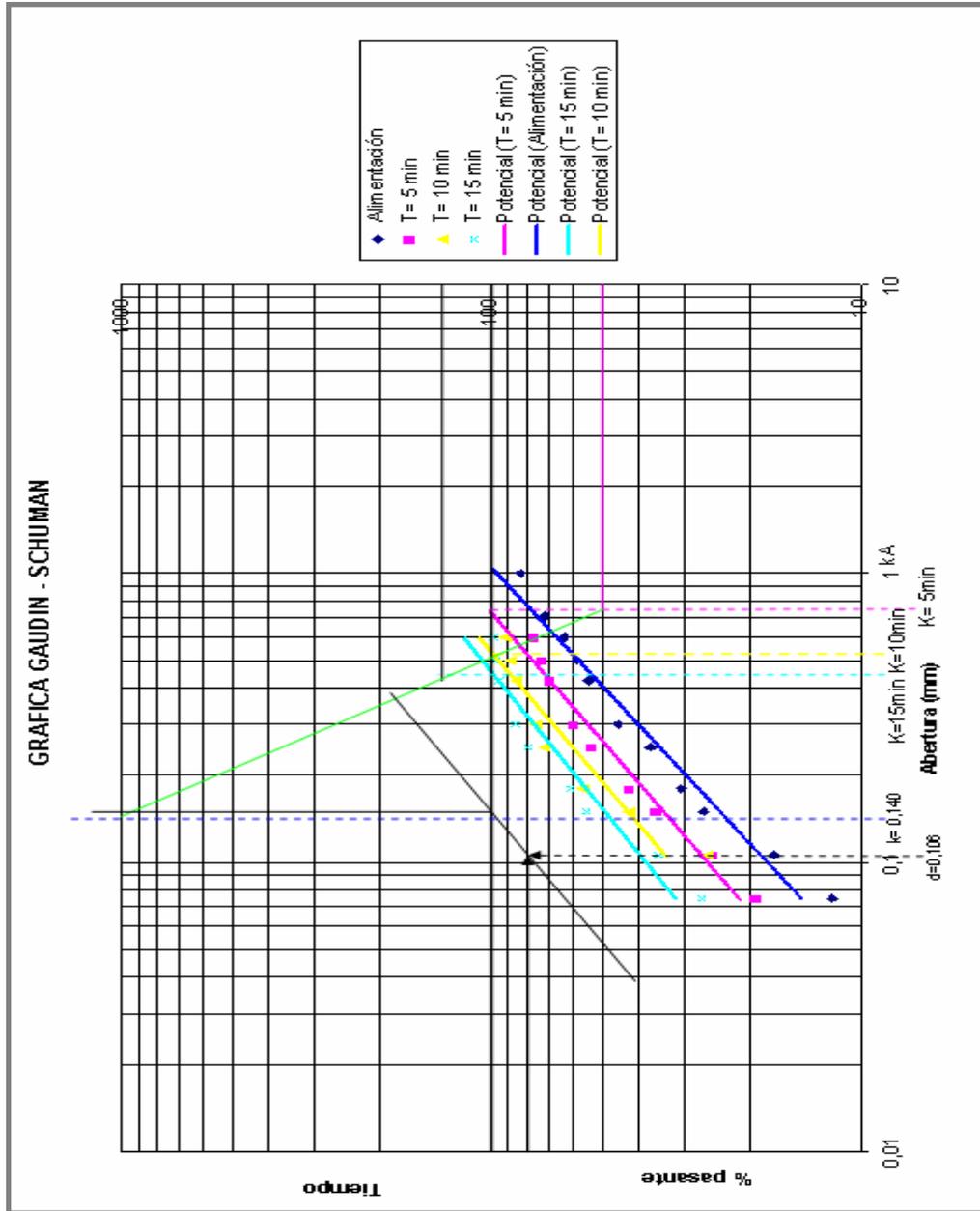
Donde: Pp es el % en peso que en el producto de la fragmentación es menor que el tamaño d de partículas y K y α son dos constantes llamadas, respectivamente módulo de tamaño y módulo de distribución. Al realizar la gráfica en escala logarítmica, α es la pendiente de la recta que resulta y K el tamaño máximo, puesto que es el valor que toma para Pp = 100.

El cálculo del tiempo de molienda necesario para obtener un determinado porcentaje de material pasante a una determinada malla se realiza a través del procedimiento Gaudin – Schuhman. Se construye una gráfica logarítmica de 2 x 2 ciclos, representado en el eje de las abscisas las aberturas de mallas, tomadas en milímetros y en el primer ciclo del eje de las ordenadas los porcentajes en peso del material pasante en cada una de las mallas. De esta manera, se procedió a realizar la gráfica Gaudin – Schuhman (véase gráfico 6) con los porcentajes pasantes obtenidos en la trituración cuaternaria, lo cual representa la alimentación de los tres tiempos de molienda; llevando los porcentajes de pasante al eje de las ordenadas y al eje de la abscisa sus respectivas aberturas. En el gráfico 6 puede notarse el paralelismo de las curvas de distribución, partiendo de la referencia la recta de la alimentación.

La recta de tiempo se traza prolongando la rectas de 5, 10 y 15 minutos hasta cortar con el 100% pasante, luego se buscan en el eje de las ordenas los tiempos 5. 10

y 15 minutos, a los cuales se les hace corresponder con los puntos del 100% pasante para cada tiempo, se obtienen así 3 puntos que pertenecen a la recta de tiempo.

Gráfico 6. Gaudin – Schuhman



(Fuente: Elaboración propia)

- Tiempo de molienda a través de la grafica Gaudin – Schuhman,

.El estudio de moliendabilidad se requiere para conocer el tiempo necesario para obtener el 80% de los tamaños de partículas menores a la malla 140, el cual resultó en 1 hora 37 minutos. Se toma la malla 140 por estar la malla de corte para la mica y feldespatos entre 100 y 200.

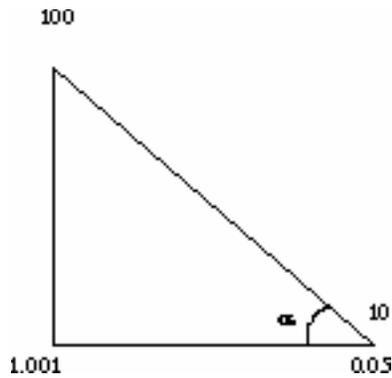
Procedimiento para determinar el tiempo de estadía del material en el molino de forma gráfica.

- Se requiere un porcentaje de pasante (P_p) de un 80 %
- Malla A.S.T.M 140 (0,106 mm)

Estos valores se llevan a la gráfica Gaudin – Schuhman, donde el porcentaje de pasante (80%) es llevado al eje de las ordenadas y la abertura en milímetros al eje de la abscisa, obteniendo así un punto a través del cual se traza una recta paralela a la alimentación, utilizando la propiedad punto pendiente para rectas, ésta es prolongada hasta la horizontal correspondiente al 100% pasante acumulado obteniendo un punto, que luego se interpola hasta la recta de tiempo. El punto interpolado se lee en el eje de las ordenadas representando éste el tiempo requerido para obtener un 80% pasante a una malla 140, resultando éste de 97 minutos, el cual equivale a 1 hora 37 minutos (gráfico 6 Gaudin – Schuhman).

Este resultado fue comprobado de manera analítica con el siguiente procedimiento:

Cálculo de alfa (módulo de distribución)



$$\alpha = \arctg\left(\frac{\log(100) - \log(10)}{\log(1,001) - \log(0,05)}\right) = 37,35^\circ$$

Cálculo de k (módulo de tamaño)

$$P_p = 100 \left(\frac{d}{k}\right)^\alpha \quad \text{Ecuación del módulo de tamaño.}$$

Se sustituye el valor de α en la ecuación anterior y se despeja k.

$$k = \frac{d}{\left(\frac{\log\left(\frac{P_p}{100}\right)}{\log(\alpha)}\right)} \quad \begin{array}{l} d = 0,106 \text{ mm} \\ P_p = 80 \% \\ \alpha = 37,35^\circ \end{array}$$

$$k = 0,107$$

Este valor se lleva a la gráfica de Gaudin – Schuhman en el eje de la abscisa, se prolonga hacia arriba y donde corta la recta de tiempo se traslada hacia la derecha del gráfico donde se lee el tiempo de molienda, aproximadamente 100 minutos.

- Análisis granulométrico de la molienda

A manera de comprobación, este ensayo se realizó tomando en cuenta el análisis granulométrico de la trituración cuaternaria el cual dió como resultado un porcentaje de retenido acumulado de 82,77% y un 17,23% de material pasante para la malla 140. Esta representa un alto porcentaje de material que no cumple con el tamaño requerido para la alimentación de la etapa experimental de los ensayos de concentración, razón por la cual el material debe ser sometido a un proceso de molienda.

A continuación se muestran resultados de análisis granulométricos de la molienda en el gráfico 7 y tabla 28.

En la tabla 28 se puede observar el resultado de la granulometría de la molienda 1 hora 37 minutos, en donde el porcentaje de pasante para la malla 140 resultó en un 74,30% mientras que en la trituración cuaternaria, en la tabla 23, estuvo por debajo del 20%, exactamente un 17,23%.

En el gráfico de Gaudín – Shuman para la malla 140 se tiene un 80% pasante en un tiempo de estadía 1 hora 37 minutos, sin embargo en la tabla 24 del análisis granulométrico de la molienda 1 hora 37 minutos se puede ver que para la malla 140 el porcentaje de material pasante es 74,30%, esto se debe al hecho de que siempre hay un porcentaje de pérdida por el material fino, además de la realización de la gráfica de Gaudin –Shuman, el cual se construye con líneas de tendencia.

Gráfico 7. Curva granulométrica de la molienda

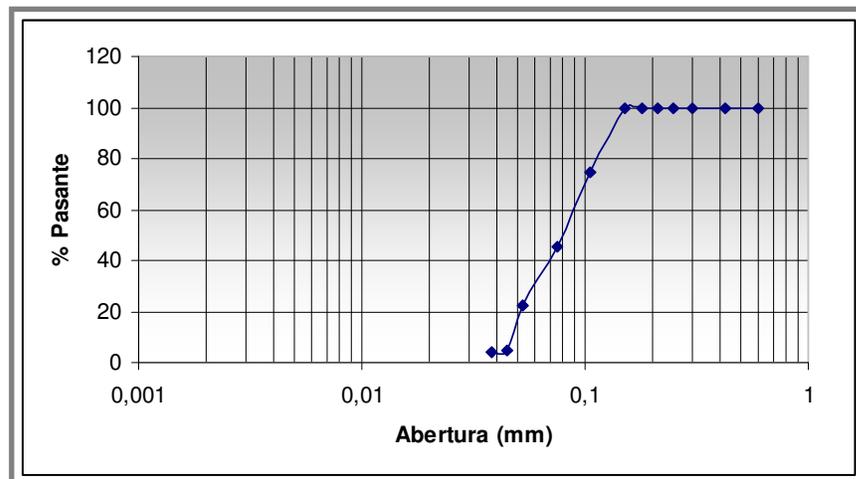


Tabla 28. Granulometría de la molienda 1 hora 37 minutos.

| Malla A.S.T.M | Abertura mm | % Retenido | %Acumulado | % Pasante |
|---------------|-------------|------------|------------|-----------|
| 30 | 0,600 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 40 | 0,425 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 50 | 0,300 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 60 | 0,250 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 70 | 0,212 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 80 | 0,180 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 100 | 0,150 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 140 | 0,106 | 25,70 | 25,70 | 74,30 |
| 200 | 0,075 | 28,90 | 54,60 | 45,40 |
| 270 | 0,053 | 23,07 | 77,67 | 22,33 |
| 325 | 0,045 | 17,28 | 94,95 | 5,05 |
| 400 | 0,038 | 1,08 | 96,03 | 3,97 |
| -400 | -0,038 | 2,70 | 98,73 | 1,27 |

4.2 PROCESO DE CONCENTRACIÓN MINERAL

Una vez caracterizada la muestra, se continúa con el proceso de concentración mineral. En este sentido, se ejecutaron una serie de ensayos descriptivos que permite definir los factores influyentes o condicionantes de la flotación, con el fin de lograr un diseño experimental de la flotación a través del cuál se establecer las condiciones y parámetros para los ensayos definitivos de concentración. Los ensayos descriptivos se iniciaron con unas pruebas misceláneas, para el reconocimiento del comportamiento de la mena en el proceso de flotación, así como también los ajustes

requeridos en manipulación y adiestramiento del equipo, instrumentos y reactivos de flotación.

El proceso de recuperación mineral de feldespato, mica y cuarzo, se realizará por flotación, por ser una operación de concentración de aplicación usual tanto nacional como internacional, en menas cuarzo feldespáticas.

Para iniciar el proceso de flotación, se tomó como referencia una serie de antecedentes e investigaciones aplicadas, relativa al enriquecimiento de menas feldespáticas, cuarzo micáceo, descrito a continuación:

- Para el beneficio de menas feldespáticas se trabaja en un circuito de flotación donde hay una preparación de pulpa en medio ácido (2 - 3 de pH) con ácido sulfúrico al 10% y amina como colector para el feldespato (Martiz Mónica, 1994).
- Para el caso de la mica se trabajó un circuito en medio básico (8- 10) con Na_2SiO_3 como depresor de sílice y amina como colector de mica (Estrada R., 2001)
- Para el beneficio del cuarzo, según revisión bibliográfica de beneficio de arenas feldespáticas con, mineral de hierro, cuarzo y micas, considerados estos como contaminantes, se aplica el proceso de beneficio de separación magnética para eliminar los óxidos de hierro, y de flotación para separar el cuarzo. Las pruebas de flotación se llevaron a cabo en una celda de flotación Denver con tanques de acero inoxidable de 1, 2 y 3 litros Se realizó el diseño experimental estadístico para cada uno de los tres tipos de mena. Luego del análisis de los resultados obtenidos, se determinó que para procesar los tres tipos de mena a las mismas condiciones, se requiere una granulometría -150+200 Tyler, un pH de 2,1 y 2,2 gramos de colector por Kg de mineral y espumante aceite de pino y nonil fenol(www.minas.unalmed.edu.co/facultad/publicaciones/dyna/143/EL%20BENEFICIO%20DE%20ARENAS.htm).

- Otro trabajo de investigación fue el de absorción de colectores aniónicos en silicatos, en el cual se explica el potencial zeta del feldespato, mica y cuarzo, el cual se tomó como referencia para determinar el pH en el proceso de flotación (Paulo Roberto de Magallanes Viana <http://www.eng.ufmg.br/>)

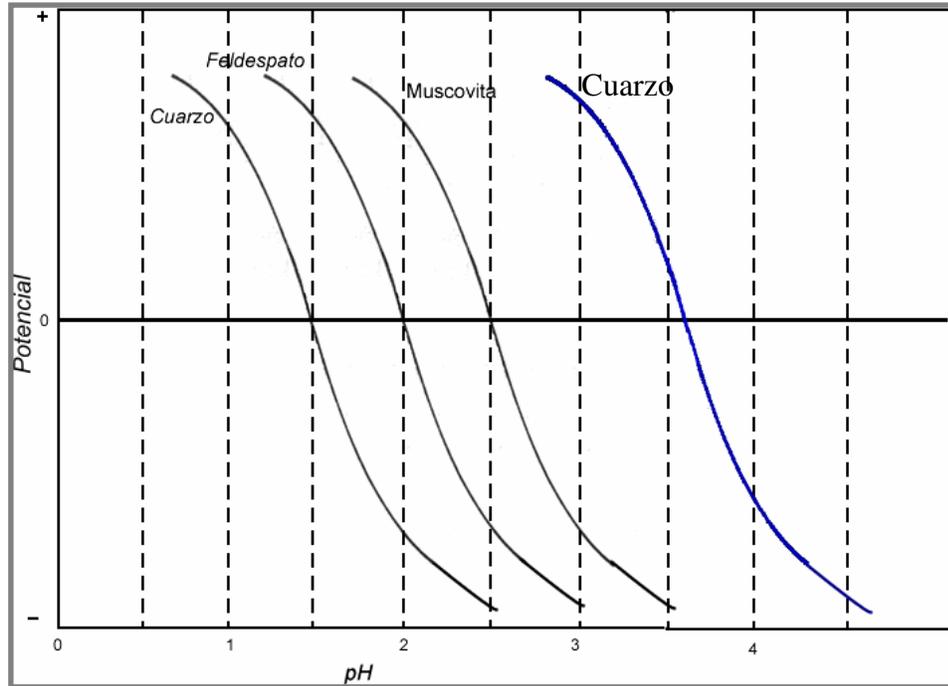
4.2.1 Ensayos exploratorios de concentración

Dado que los tres componentes principales de la mena constituyen tres concentrados económicos a comercializar, es decir, feldespato, cuarzo y mica, debe diseñarse un circuito de flotación compuesto en dos etapas.

La primera etapa en un circuito de flotación de pH ácido para obtener el concentrado C1 de cuarzo y una segunda etapa con pH básico para obtener un concentrado C2 de mica y otro C3 de feldespato; esto se fundamenta en referencia al capítulo III de este estudio, donde se explica que la adsorción del reactivo colector que tiene lugar en la superficie de una partícula mineral es regulada en gran medida por la naturaleza eléctrica de esa superficie.

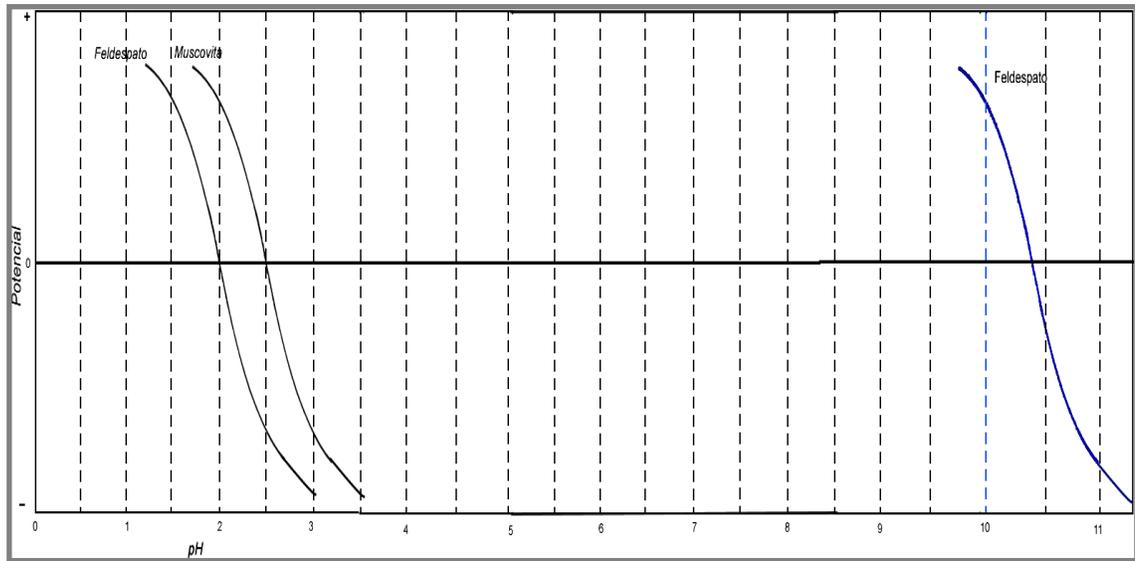
Cada mineral posee un punto de carga cero, el cual indica la carga de la superficie del mismo en presencia de un pH dado. La figura 16 hace referencia a los puntos de carga cero los cual es son valores fijos para cada mineral, siendo el de la moscovita (2,5), para el feldespato (2) y para el cuarzo (1,5), según Paulo Roberto de Magallanes Viana. En la figura 17 se puede apreciar la carga superficial de los tres minerales, para un pH 3, el cual es negativa y en presencia del colector catiónico amina, los tres minerales flotan con facilidad, debido al hecho de que el ión activante de la amina es el catión, lo que hace que estos migren hacia la superficie del mineral que está cargada negativamente, formando una capa repelente al agua, es decir, los hace hidrofóbicos, ocasionando que las partículas minerales entren en contacto y se adhieran a las burbujas de aire, permitiendo así que dichas partículas se eleven a la superficie y formen una espuma mineralizada.

Figura 16. Puntos de carga cero de la moscovita, feldespato y cuarzo



Fuente: Paulo Roberto de Magallanes Viana <http://www.eng.ufmg.br/>

Figura 17. Efecto del depresor en el potencial zeta



Fuente: Paulo Roberto de Magallanes Viana <http://www.eng.ufmg.br/>

Cuando la mena está compuesta por varios minerales que se comportan de manera análoga frente al reactivo colector, la acción colectora de ésta se puede controlar parcialmente variando el pH, pues al modificar, por ejemplo, la concentración de iones H^+ alrededor de la partícula mineral se impide la acción del colector catiónico. Sin embargo, para separar los minerales de interés, uno de otro, es necesario crear diferencias en la actitud para flotar de los distintos minerales que se quieren recuperar. Esto se consigue agregando además del colector y espumante otro que crea diferencias entre ellos, por ejemplo el depresor.

Es por esto que en una primera etapa de flotación, donde el objetivo es separar el cuarzo C1 de la mica y el feldespato, en un medio ácido de concentración, es necesario añadir un reactivo depresor capaz de modificar la carga superficial del cuarzo, para impedir la acción del reactivo colector. El silicato de sodio es un reactivo depresor de silicatos, es selectivo y actúa según el tamaño de grano de la partícula o de la característica superficial de mineral, razón por la cual al agregarlo al proceso de flotación, y al estar en contacto con la superficie mineral del cuarzo cambia el punto de carga cero; siendo esto representado en la figura 16, en donde se puede observar que el punto de carga cero del cuarzo es trasladado hacia la derecha la curva de esta, lo que hace cambiar la carga superficial del cuarzo, de negativa a positiva, para el mismo pH ácido de 3. El cuarzo al tener la misma carga del colector, produce un efecto de repulsión hacia el colector, haciendo que éste permanezca en la pulpa de flotación obteniendo en la espuma mineralizada mica y feldespato.

El proceso anterior se realiza en una segunda etapa de flotación para pH básico, en este caso para obtener un concentrado de C2 de mica y uno C3 de feldespato. En la figura 17 se puede observar que el punto de carga cero de la moscovita y el feldespato son valores fijos para cada mineral como ya se mencionó anteriormente. Sin embargo al agregar el silicato de sodio, traslada el punto de carga cero hacia la derecha, haciendo la carga superficial o potencial zeta para el feldespato positiva para un pH básico, lo que hace que éste permanezca en la pulpa y la mica flote. En esta etapa también se puede notar la acción selectiva del silicato de sodio de

actuar según el tamaño de partícula, actuando como depresor en este caso del feldespatos.

La programación de ensayos exploratorios de concentración para definir y cuantificar los parámetros y condiciones de flotabilidad de la mena cuarzo feldespática muscovítica, se realizó fijando de forma alterna los niveles de variación de cada uno de los parámetros, y realizando combinaciones entre ellos. Lo antes descrito condujo, como ya se mencionó a la realización de pruebas en un circuito de dos etapas de flotación; una en un medio ácido, y otra en un medio básico, en donde se establecieron tiempos de acondicionamiento de los reactivos de flotación, las revoluciones por minuto rpm del rotor de la celda de flotación para determinar el efecto de la velocidad de agitación (rpm) en la formación de espumas, granulometría, cantidad de sólido y dilución de la pulpa.

En cuanto a las revoluciones por minutos (r.p.m.) del equipo de flotación, se realizaron ensayos a diferentes r.p.m, entre 900 -1200 r.p.m, encontrándose que para 1.100 rpm. la formación de espuma se presentaba en un tiempo de 2 minutos, mientras que para 1.200 rpm, se produce un rebose de la espuma mineraliza de manera acelerada, lo que puede conducir a que no se complete totalmente la acción de los reactivos de flotación, caso contrario, para un número de revoluciones por debajo de 1.100 rpm. la formación de espuma era menos acelerada, lo que puede causar que se pierda en parte la acción del reactivo colector, característica ésta de la amina como reactivo colector.

La dilución de la pulpa para el proceso de flotación se tomó en tres un 16% y 20% con el propósito de hacerla menos densa, más diluida, para lograr una mejor absorción de los reactivos de flotación y una mejor separación de los tres minerales, para cada caso se determinará experimentalmente que dilución es la que mejor responde al proceso de flotación.

El uso de la amina como reactivo colector en dosis establecidas según revisión bibliográfica, es la que mejor responde como reactivo colector en flotación de minerales no metálicos; por lo que la flotación es catiónica por ser el reactivo

colector amina, el cual tiene la capacidad de disociación en iones en la pulpa de flotación, y donde la parte activa de la molécula es un catión.

En consecuencia a lo anterior se programó una serie de ensayos exploratorios el cual se realizarón en el Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas del Departamento de Minas de la Facultad de Ingeniería de la UCV, bajo el esquema de la figura 18 que se muestran a continuación:

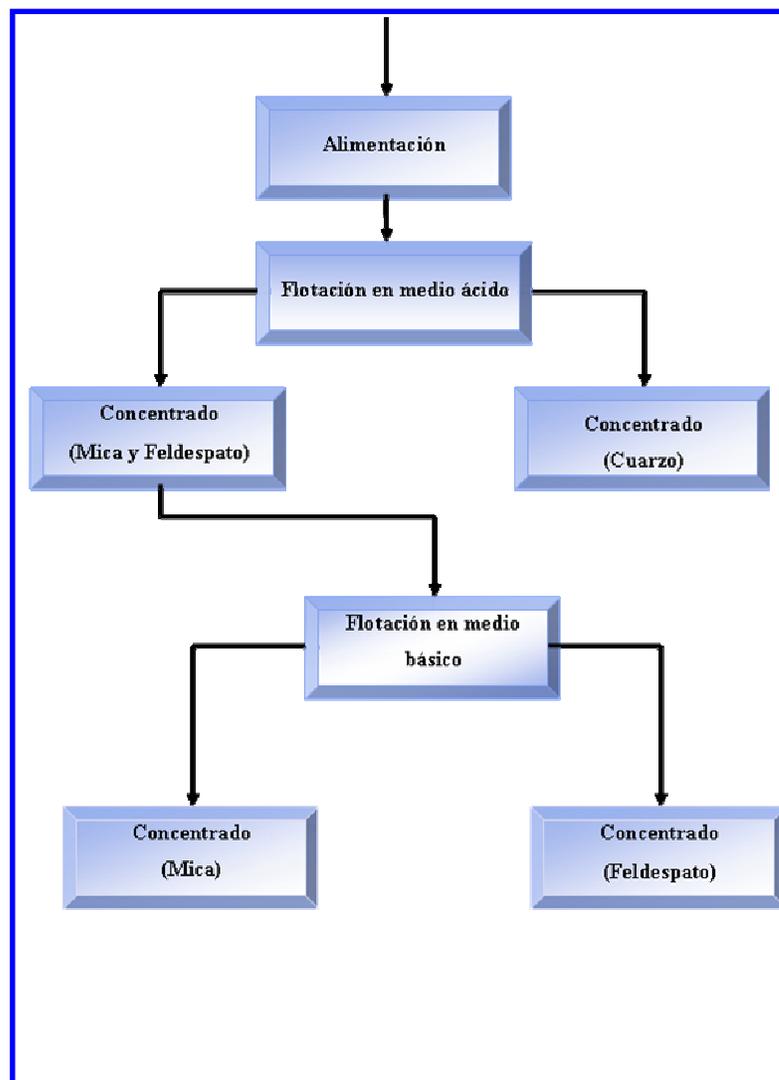


Figura 18. Esquema para los ensayos exploratorios.

- Equipo

El equipo utilizado en los ensayos exploratorios, fue la celda de flotación Denver D-12 de la cual se dispone en el Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas del Departamento de Minas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, (figura 19) la cual tiene capacidad entre 500 y 2000 cc.



Figura 19. Máquina de flotación (Denver, D-12).

- Velocidad de Agitación.

Debido a ensayos descriptivos en el laboratorio, a experiencias anteriores a nivel industrial y en referencia a trabajos realizados; se fijó en 1.100 r.p.m. la velocidad de agitación para favorecer una mejor formación de burbujas y espuma mineralizada. Además esta velocidad intermedia permite que se mantenga la unión de

partícula y reactivo estable, sin peligro de desprendimiento de una con relación a la otra.

- Granulometría:

La alimentación se realiza con el material obtenido en el ensayo de molienda pasante malla 140, al cual se le realizó un proceso de deslamado a través de un tamiz 325 A.S.T.M. con el propósito de remover finos y lamas que interfieren en la flotación debido a que las partículas finas no favorecen la acción del reactivo colector al cubrir las partículas de la mena. Hay que destacar que la alimentación de la segunda etapa de flotación fue sometida a un proceso de lavado con agua para eliminar el ácido que se agregó en la primera etapa de flotación.

- Modificador de pH

La primera etapa de flotación se preparó en un medio ácido con ácido sulfúrico al 10%, disponible en el laboratorio y de práctica usual en etapas de flotación ácida.

Una segunda etapa se realizó con un pH básico, con hidróxido de sodio como regulador de pH, también disponible en el laboratorio y de usual práctica en etapas de flotación básica.

- Reactivo Colector

El reactivo colector utilizado fue la amina por ser ésta la que mejor responde en flotación de silicatos. Las propiedades de la amina utilizada son las siguientes:

Nombre comercial: Flotigam EDA-3B, marca Clariant, con una densidad de $0,87\text{gr/cm}^3$, con textura viscosa, soluble en agua.

- Reactivo Depresor

El Na_2SiO_3 , es el reactivo químico minero que mejor responde como depresor de silicatos. En el proceso de la flotación se utilizó éste como depresor de cuarzo y en la segunda como depresor de feldespatos.

- Reactivo Espumante

El reactivo utilizado fue el aceite de pino, por ser éste el disponible en el Laboratorio de Concentración de Menas. Siendo éste un líquido de color amarillo más o menos oscuro y olor característico, la solubilidad del aceite de pino es baja del orden de unos 2,5 gramos/litros y su densidad varía entre 0,915 y 0,935 gr/cc.

- Dilución y cantidad de sólidos

Se estableció una masa de sólidos de 200 gramos para una dilución 16,6% y 250 gr para una del 20%, esto con el fin de obtener una pulpa diluida que permita la mejor absorción de los reactivos en la superficie de los tres minerales.

- Tiempo de acondicionamiento.

Una vez llevada la pulpa al medio ácido o medio básico a través del regulador de pH, inicialmente, el acondicionamiento sin entrada de aire se estimó en 5 minutos, iniciando el ensayo con el silicato de sodio con 2 minutos. Seguidamente, 2 minutos correspondieron al acondicionamiento para la amina y 1 minuto para el espumante.

- Tiempo de retiro de espuma

Este parámetro permite controlar el tiempo de desalojo de la espuma mineralizada de la celda de flotación y al mismo tiempo, permite separar en dos fases la flotación programada. La recolección de la espuma se realizó en un período de 2 minutos, cuyo espesor se encontraba entre los 8 a 10 cm; se procedió al filtrado de productos concentrados y colas, y secado en estufa a 300 °C.

4.2.1.1 Ensayos exploratorios de la primera etapa de flotación

Se realizaron 22 flotaciones individuales, cuyo resultados se muestra en la tabla 29, variando unos parámetros y dejando otros fijos como se detalla a continuación:

Parámetros fijos

- rpm: 1100.
- Granulometría: Pasante malla 140.

Parámetros variables

- Dilución de pulpa: 4 :1 (20%) y 5: 1 (16,6%).
- pH con H₂SO₄ :1 – 2 – 3- 4.
- Depresor Na₂SiO₃ en dosis: 2225,5; 2503,6; 2781,8 y 3060 gr/tn.
- Colector Amina: 348; 462,7; 522; 696 y 1040 gr/tn.
- Espumante aceite de pino 0; 249,3; 374; 623,3 y 997,3 gr/tn.
- Tiempo de acondicionamiento: 4 – 5 – 6 y 7 minutos.

Tabla 29. Programación de los ensayos exploratorios primera etapa

| Ensayo | pH | Amina gr /tn | Pino gr/tn | NaSiO ₂ gr/tn | Tiempo. min | Dilución % |
|--------|----|-----------------|---------------|-----------------------------|----------------|---------------|
| f1 | 3 | 348,00 | 0,00 | 556,36 | 4 | 16,6 |
| f2 | 3 | 522,00 | 374,00 | 2781,82 | 5 | 20,0 |
| f3 | 3 | 522,00 | 997,33 | 1112,73 | 5 | 16,6 |
| f4 | 3 | 522,00 | 1371,33 | 1390,91 | 5 | 16,6 |
| f5 | 3 | 696,00 | 374,00 | 2503,6 | 5 | 16,6 |
| f6 | 3 | 1044,00 | 623,33 | 2225,50 | 6 | 16,6 |
| f7 | 3 | 1044,00 | 997,33 | 1112,73 | 5 | 16,6 |
| f8 | 3 | 1044,00 | 1371,33 | 1390,91 | 5 | 16,6 |
| f9 | 3 | 1392,00 | 374,00 | 2503,6 | 6 | 16,6 |
| f10 | 3 | 1392,00 | 623,33 | 834,55 | 5 | 16,6 |
| f11 | 3 | 1044,00 | 374,00 | 5563,64 | 5 | 16,6 |
| f12 | 3 | 1914,00 | 997,33 | 2781,82 | 5 | 20,0 |
| f13 | 2 | 378,00 | 374,00 | 2225,45 | 5 | 16,6 |
| f14 | 2 | 2610,00 | 748,00 | 1112,73 | 5 | 20,0 |
| f15 | 2 | 1392,00 | 748,00 | 1947,27 | 6 | 16,6 |
| f16 | 1 | 374,00 | 374,00 | 1390,91 | 6 | 16,6 |
| f17 | 1 | 348,00 | 249,33 | 2781,82 | 5 | 20,0 |
| f18 | 1 | 870,00 | 249,33 | 2781,82 | 5 | 20,0 |
| f19 | 1 | 522,00 | 374,00 | 3060,00 | 6 | 20,0 |
| f20 | 1 | 2610,00 | 0,00 | 2781,82 | 5 | 20,0 |
| f21 | 4 | 522,00 | 124,67 | 2781,82 | 6 | 20,0 |
| f22 | 4 | 522,00 | 374,00 | 2781,82 | 5 | 20,0 |

4.2.1.2 Ensayos exploratorios de la segunda etapa de flotación

Se realizaron 18 flotaciones como se muestra en la tabla 30, variando unos parámetros y dejando otros fijos los cuales se detallan a continuación:

Parámetros fijos

- rpm = 1.100.
- Granulometría: Pasante malla 140.

Parámetros variables

- Dilución de pulpa: 4 :1 (20%).
- pH con NaOH: 8 – 9 – 10 – 11 – 12.
- Depresor Na_2SiO_3 dosis: 2.225,5; 2.503,6; 2.781,8 y 3.060 gr/ton.
- Colector Amina: 348; 462,7; 522; 696 y 1040 gr/ton.
- Espumante aceite de pino: 0; 249,3; 374; 623,3 y 997,3 gr/ton.
- Tiempo de acondicionamiento: 4 – 5 – 6 y 7 minutos.

Tabla 30. Programación de los ensayos exploratorios segunda etapa

| Ensayo | pH | Amina gr/tn | Pino gr/tn | NaSiO ₂ gr/tn | Tiempo. min |
|--------|----|----------------|------------|-----------------------------|----------------|
| f23 | 8 | 348,00 | 374,00 | 3060,00 | 5 |
| f24 | 8 | 870,00 | 374,00 | 2781,82 | 5 |
| f25 | 8 | 174,00 | 124,67 | 2781,82 | 6 |
| f26 | 8 | 348,00 | 249,33 | 2225,45 | 6 |
| f27 | 9 | 2610,00 | 748,00 | 2781,82 | 5 |
| f28 | 9 | 462.7,00 | 374,00 | 3060,00 | 5 |
| f29 | 9 | 348,00 | 374,00 | 2225,45 | 6 |
| f30 | 10 | 696,00 | 748,00 | 4172,73 | 5 |
| f31 | 10 | 522,00 | 249,33 | 0,00 | 5 |
| f32 | 10 | 1044,00 | 0,00 | 4172,73 | 4 |
| f33 | 10 | 522,00 | 374,00 | 2781,8 | 5 |
| f34 | 10 | 522,00 | 0,00 | 4172,73 | 5 |
| f35 | 10 | 1392,00 | 374,00 | 3060,00 | 5 |
| f36 | 10 | 522,00 | 124,67 | 2225,45 | 5 |
| f37 | 11 | 348,00 | 124,67 | 3060,00 | 5 |
| f38 | 11 | 522,00 | 374,00 | 3060,00 | 5 |
| f39 | 12 | 522,00 | 374,00 | 3060,00 | 5 |
| f40 | 12 | 2610,00 | 0,00 | 5563,64 | 4 |

4.2.1.3 Resultados preliminares de los ensayos exploratorios.

Una vez concluidos los ensayos exploratorios se procedió a seleccionar un número de muestras representativas del total de éstas para su posterior análisis químico, con el objetivo de verificar su composición química.

Para la selección de la muestras se tomó criterios cualitativos de color de la espuma mineralizada, ya que en el proceso exploratorio de flotación se pudo observar entre otros, que la formación de la espuma presentaba diferencias de colores de acuerdo al mineral flotado.

Como se pudo observar en la primera etapa realizada con pH ácido para obtener un concentrado conjunto de feldespato y mica, la espuma recogida era de color beige claro, como se muestra en la foto 3, mientras que en la segunda etapa de flotación realizada con un pH básico, para obtener un concentrado de mica la espuma recogida presentaba un color verde claro como se muestra en la foto 4 se verificó estos, luego de un proceso de lavado y secado en el cual se pudo notar un color beige en el concentrado feldespato y un color verde claro con tonalidades brillantes, en el caso de la mica; del mismo modo el concentrado de cuarzo presentaba un color blanco claro que lo diferenciaba del concentrado de feldespato que era de tonalidades beiges. En base a estas observaciones el color se tomó como indicativo de la presencia de un mineral u otro.

Otro punto importante es el balance de masa de los productos obtenidos, debido a que se relaciona la cantidad de masa en la alimentación, con la obtenida de los dos productos. El pH también se tomó en cuenta en la selección de las muestras por ser éste un parámetro determinante en el proceso de flotación para cada uno de los tres minerales. Por último, las limitaciones de índole económicas, también fue otro factor determinante en la selección.

En base a lo antes expuesto se seleccionó el ensayo f2 de la primera etapa de flotación y de la segunda etapa el ensayo f33 y el concentrado de f23 a los cuales se le realizó análisis químico, siendo estos señalados en la tabla 31, y en la tabla 32.

Esta selección se realizó en base a lo antes mencionado mediante un análisis cualitativo a los tres concentrados, en donde visualmente presentaban la mejor diferencia de color entre estos. Con relación a las masas se obtuvo en estos ensayos un balance de masas aceptable entre la alimentación y las masas obtenidas en el concentrado y las cola del proceso de concentración y por último, estos dos criterios y bajo sustento de revisiones bibliográficas de los medios de concentración para flotar menas feldespáticas cuarzo micáceas se determinó un pH ácido para el concentrado de cuarzo y uno básico para el concentrado mica y feldespato.

Foto 3. Flotación de la primera etapa, espuma mineralizada de feldespato y mica.

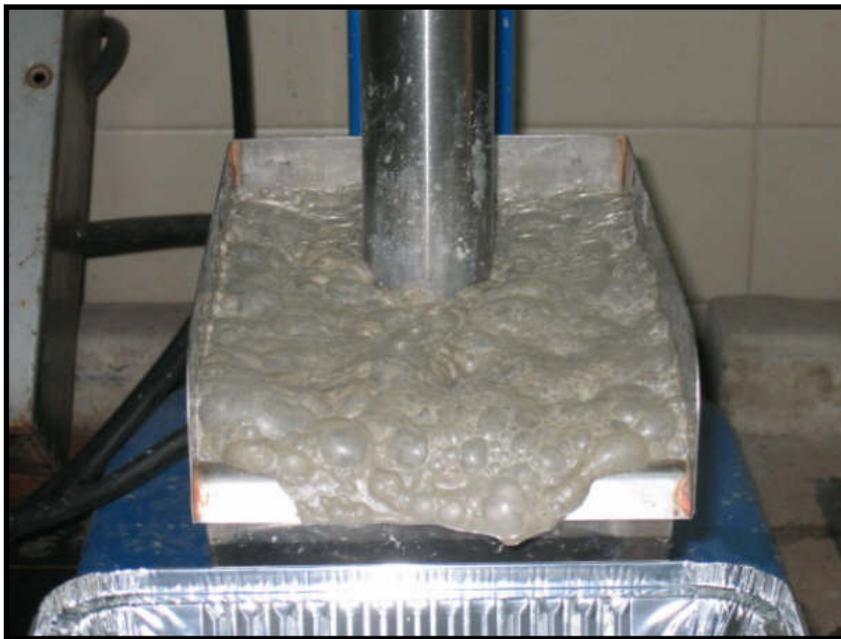


Foto 4. Flotación de la segunda etapa, espuma mineralizada mica



Tabla 31. Condiciones de las muestras

| Ensayo | Muestra | Concentrado | Cola | pH | Masa gr. |
|--------|---------|-----------------|------------|----|----------|
| f2 | C1 | Mica feldespato | - | 3 | 110 |
| | E1 | - | cuarzo | 3 | 136 |
| f33 | C2a | Mica | - | 10 | 20 |
| | E2a | - | feldespato | 10 | 76 |
| f23 | C2 | - | feldespato | 8 | 90 |

Tabla 32. Resultado de laboratorio. Ensayos exploratorios

| Muestra | SiO ₂ % | Al ₂ O ₃ % | Na ₂ O% | K ₂ O% |
|---------|--------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------|
| C1 | 70,67 | 12,59 | 1,92 | 2,32 |
| E1 | 80,75 | 7,65 | 1,66 | 1,72 |
| C2a | 58,43 | 18,67 | 1,21 | 4,31 |
| E2a | 79,25 | 9,83 | 1,72 | 1,74 |
| C2 | 75,42 | 10,84 | 1,83 | 1,90 |
| Cabeza | 79,27 | 10,31 | 1,95 | 2,96 |

Como se explicó, este proceso de concentración busca obtener 3 concentrados, C1 cuarzo, C2 mica y C3 feldespato. A las muestras seleccionadas se les realizó análisis químico por absorción atómica, el cual determinó los %SiO₂ total, %Al₂O₃, %Na₂O y %K₂O, tomando estos como indicador de los 3 productos: moscovita KAl₂(AlSi₃)O₁₀(OH)₂, microclino (KAlSi₃O₈), albita (NaAlSi₃O₈), y cuarzo (SiO₂), por tener elementos químicos en común.

En la tabla 32 se puede ver que el resultado del análisis químico de % SiO₂ a la muestra E1 fue el mayor con respecto al obtenido en las otras. Este se toma como indicativo de mayor contenido de sílice como cuarzo, por ser la muestra E1 uno de los 3 productos obtenidos en la primera etapa de flotación. También se tiene que el % SiO₂ en la muestra cabeza fue de 79.27 %, es decir menor que en % SiO₂ en E1; esto se debe a que el % SiO₂ igual 80,75 en E1 no representa la sílice sólo de cuarzo sino también de feldespato y mica. Debido al hecho de ser estos ensayos de flotación pruebas o ensayos preliminares. Para alcanzar ensayos definitivos se requiere continuar el proceso hasta obtener el mejor grado de recuperación.

Igualmente sucede con la muestra C2, producto obtenido como concentrado de la segunda etapa de flotación, contentivo de mica en donde el %Al₂O₃ y %K₂O son mayor es, con relación a los resultados de estos en la alimentación. Esto se debe al hecho de que al igual que para el concentrado de cuarzo, los concentrados de mica y

feldespato no representan una recuperación sólo de estos, pues la espuma mineralizada siempre trae algo del otro mineral, ya que como se mencionó anteriormente son ensayos preliminares.

4.2.2 Experimentos de concentración definitivos.

En base a los resultados obtenidos en los ensayos exploratorios, se continuó con los experimentos de concentración definitivo para el cual se programó una serie de ensayos en dos etapas de flotación.

La primera etapa para obtener un concentrado C1 de cuarzo con un pH ácido y una segunda etapa de flotación en un pH básico, alimentado con el concentrado de la primera etapa, después de un proceso de lavado con agua para eliminar el ácido, con el objeto de lograr separar la mica C2 como concentrado (espuma mineralizada) y un producto en la cola de concentrado de feldespato C3.

En conclusión a lo anterior se programó un esquema experimental de flotación definitivo presentado en la figura 20. De igual modo, se definieron los parámetros para los ensayos definitivos de concentración.

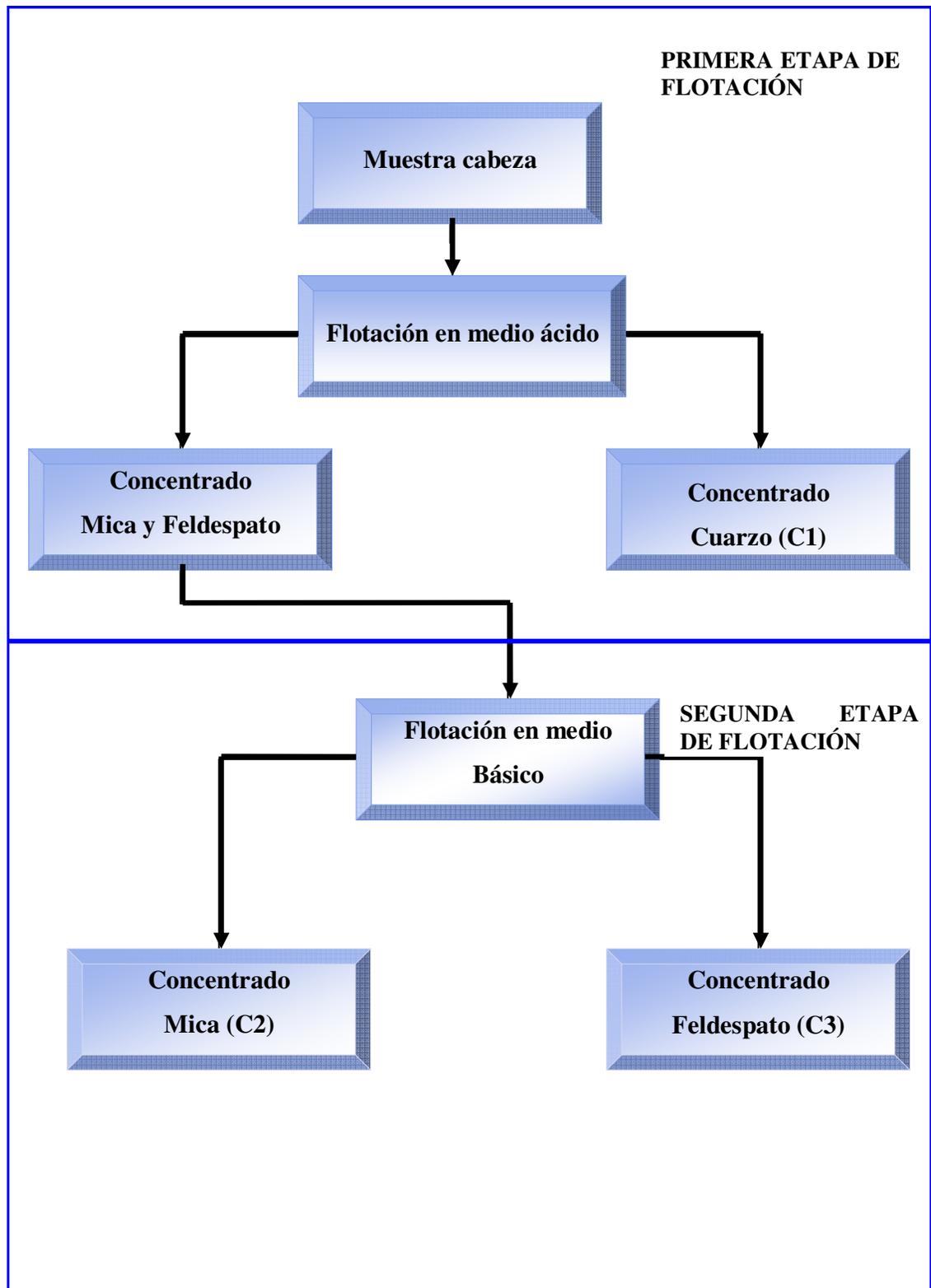


Figura 20. Esquema experimental de flotación definitivo

A partir de los ensayos exploratorios se establecieron los parámetros para las pruebas experimentales, a los se le realizó una combinatoria, resultando un número importante de ensayos, por lo que se tomaron, de acuerdo a los exploratorios, parámetros fijos y otros variables con el objetivo de disminuir el número de experimentos, pero de manera que no arrojaran cambios en los resultados.

Primera etapa de flotación

Parámetros fijos:

- H₂O: 1000 cc
- rpm: 1100
- Dilución :4:1
- Alimentación: 250 gr.
- Granulometría: < malla 140 A.S.T.M.
- Tiempo de acondicionamiento

Tiempo de colector (T_c) 2 min.

Tiempo de espumante (T_e) 1 min.

Los ensayos experimentales se iniciaron bajo las condiciones que se muestran en la tabla 33 para obtener un concentrado C1 de cuarzo en la primera etapa y con la variación del pH, además de variación en la dosificación de los reactivos de flotación.

Tabla 33. Parámetros y dosis iniciales de ensayos experimentales (primera etapa)

| Parámetros | 1era Etapa |
|----------------------------------|--------------------------------|
| Amina EDA 3B | 522,00 gr/ton |
| Aceite de pino | 374,00gr/ton |
| Na ₂ SiO ₃ | 2.781,82gr/ton |
| Regulador de pH | H ₂ SO ₄ |
| pH | 3 |
| Tiempo colector | 2 min |
| Tiempo depresor | 2 min |
| Tiempo espumante | 1 min |

Bajo las condiciones antes mencionadas se definieron 5 series en medio ácido para los ensayos de flotación definitivos los cuales se muestran a continuación:

Primera serie: consistió de 4 flotaciones, como se muestra en la tabla 34, con la finalidad de obtener un pH óptimo, variando el pH y manteniendo fijos las dosis de reactivos de flotación y tiempos de acondicionamiento.

Tabla 34. Primera serie, variación del pH (primera etapa).

| Ensayo | pH | Amina (gr/ton) | A. Pino (gr/ton) | Depresor (gr/ton) | Tiempo de acondicionamiento | | |
|--------|----|-------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|------|------|
| | | | | | Depresor (min) | | |
| 1 | 1 | 522 | 374 | 2781,8 | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 2 | 2 | | | | | | |
| 4 | 3 | | | | | | |
| 20 | 4 | | | | | | |

Nota: Tiempo de depresor: Td.

Segunda serie: consistió 4 flotaciones el cual se muestra en la tabla 35, variando las dosis de amina y manteniendo fijos el pH, dosis de espumante, depresor y tiempos de acondicionamiento.

Tabla 35. Segunda serie, variación en la dosis de amina (primera etapa).

| Ensayo | pH | Amina (gr/ton) | A. Pino (gr/ton) | Depresor (gr/ton) | Tiempo de acondicionamiento Depresor (min) | | |
|--------|----|-------------------|---------------------|----------------------|---|------|------|
| | | | | | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 13 | 3 | 348 | 374 | 278,8 | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 5 | | 462,7 | | | | | |
| 8 | | 522 | | | | | |
| 17 | | 696 | | | | | |

Tercera Serie: consistió en 4 flotaciones, como se muestra en la tabla 36, variando las dosis de Na_2SiO_3 y manteniendo fijos el pH, dosis de espumante, amina y tiempos de acondicionamiento.

Tabla 36. Tercera serie, variación de la dosis del depresor (primera etapa).

| Ensayo | pH | Amina (gr/ton) | A. Pino (gr/ton) | Depresor (gr/ton) | Tiempo de acondicionamiento Depresor (min) | | |
|--------|----|-------------------|---------------------|----------------------|---|------|------|
| | | | | | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 11 | 3 | 348 | 374 | 2225,5 | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 6 | | | | 2503,6 | | | |
| 9 | | | | 2781,8 | | | |
| 18 | | | | 3060 | | | |

Cuarta Serie: consistió en 4 flotaciones como se muestra en la tabla 37, variando las dosis de aceite de pino y manteniendo fijos el pH, dosis del depresor, amina y tiempos de acondicionamiento.

Tabla 37. Cuarta serie, variación del espumante (primera etapa).

| Ensayo | pH | Amina (gr/ton) | A. Pino (gr/ton) | Depresor (gr/ton) | Tiempo de acondicionamiento Depresor (min) | | |
|--------|----|-------------------|---------------------|----------------------|---|------|------|
| | | | | | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 15 | 3 | 348 | 0 | 2781,8 | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 12 | | | 352,5 | | | | |
| 3 | | | 374 | | | | |
| 10 | | | 467,5 | | | | |

Quinta Serie: consistió 4 flotaciones el cual se muestra en la tabla 38, variando los tiempos de la dosis del depresor y manteniendo fijos el pH, dosis del depresor, espumante y amina.

Tabla 38. Quinta serie, variación en el tiempo de acondicionamiento del depresor (primera etapa)

| Ensayo | pH | Amina (gr/ton) | A. Pino (gr/ton) | Depresor (gr/ton) | Tiempo de acondicionamiento Depresor (min) | | |
|--------|----|-------------------|---------------------|----------------------|---|------|------|
| | | | | | Tc=2 | Td=1 | Te=1 |
| 7 | 3 | 348 | 374 | 2781,8 | Tc=2 | Td=1 | Te=1 |
| 14 | | | | | | Td=2 | |
| 16 | | | | | | Td=3 | |
| 19 | | | | | | Td=4 | |

Segunda etapa de flotación

Parámetros fijos

- H₂O: 1000 cc..
- rpm: 1100.
- Dilución 4:1.
- Alimentación 250 gr.

- Granulometría:< malla 140 A.S.T.M.
- Tiempo de acondicionamiento
- Tiempo de colector $T_c = 2 \text{ min}$

Tiempo de espumante $T_e = 1 \text{ min}$

Los ensayos experimentales de la segunda etapa se iniciaron bajo las condiciones que se muestran en la tabla 39 para obtener un concentrado C2 de mica y C3 de feldespato, continuando con la variación del pH y dosis de los reactivos de flotación.

Tabla 39. Parámetros y dosis iniciales de ensayos experimentales (segunda etapa)

| Parámetros | 2da Etapa |
|---------------------------|----------------|
| Amina EDA 3B | 522,00 gr/tn |
| Aceite de pino | 374,00gr/tn |
| Na_2SiO_3 | 2,781,82 gr/tn |
| Regulador de pH | NaOH |
| pH | 10 |
| Tiempo colector | 2min |
| Tiempo depresor | 2min |
| Tiempo espumante | 1 min |

Bajo las condiciones antes mencionadas se definieron 5 series en medio básico para los ensayos de flotación definitivos el cual mostrados a continuación:

Primera serie: consistió de 3 flotaciones como se muestra en la tabla 40, con la finalidad de obtener un pH óptimo, variando el pH y manteniendo fijos las dosis de reactivos de flotación y tiempos de acondicionamiento.

Tabla 40. Primera serie, variación de pH (segunda etapa)

| Ensayo | pH | Amina (gr/ton) | A. Pino (gr/ton) | Depresor (gr/ton) | Tiempo de acondicionamiento Depresor (min) | | |
|--------|----|-------------------|---------------------|----------------------|---|------|------|
| | | | | | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 1 | 8 | 348 | 374 | 2781,8 | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 6 | 9 | | | | | | |
| 15 | 10 | | | | | | |

Segunda serie: consistió 3 flotaciones como se muestra en la tabla 41, variando las dosis de amina y manteniendo fijos el pH, dosis de espumante, depresor y tiempos de acondicionamiento.

Tabla 41. Segunda serie, variación de la dosis de amina (segunda etapa).

| Ensayo | pH | Amina (gr/ton) | A. Pino (gr/ton) | Depresor (gr/ton) | Tiempo (min) | | |
|--------|----|-------------------|---------------------|----------------------|-----------------|------|------|
| | | | | | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 9 | 10 | 348 | 374 | 2781,8 | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 8 | | 462,7 | | | | | |
| 3 | | 522 | | | | | |

Tercera Serie: consistió 3 flotaciones como se muestra en la tabla 42, variando las dosis de Na_2SiO_3 y manteniendo fijos el pH, dosis de espumante, amina y tiempos de acondicionamiento.

Tabla 42. Tercera serie, variación del depresor (segunda etapa).

| Ensayo | pH | Amina (gr/ton) | A. Pino (gr/ton) | Depresor (gr/ton) | Tiempo de acondicionamiento Depresor (min) | | |
|--------|----|-------------------|---------------------|----------------------|---|------|------|
| | | | | | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 11 | 10 | 348 | 374 | 2225,5 | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 4 | | | | 2503,6 | | | |
| 14 | | | | 2781,8 | | | |

Cuarta Serie: consistió 3 flotaciones como se muestra en la tabla 43, variando las dosis de espumante y manteniendo fijos el pH, dosis de depresor, amina y tiempos de acondicionamiento.

Tabla 43. Cuarta serie, variación de la dosis de espumante (segunda etapa)

| Ensayo | pH | Amina (gr/ton) | A. Pino (gr/ton) | Depresor (gr/ton) | Tiempo de acondicionamiento Depresor (min) | | |
|--------|----|-------------------|---------------------|----------------------|---|------|------|
| | | | | | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 12 | 10 | 348 | 0 | 2781,8 | Tc=2 | Td=2 | Te=1 |
| 10 | | | 352,5 | | | | |
| 13 | | | 374 | | | | |

Quinta Serie: consistió flotaciones el cual se muestra en la tabla 44, variando los tiempos de la dosis del depresor y manteniendo fijos el pH, dosis del depresor, dosis del espumante y amina.

Tabla 44. Quinta serie variación del tiempo de acondicionamiento del depresor (Segunda etapa)

| Ensayo | pH | Amina (gr/ton) | A. Pino (gr/ton) | Depresor (gr/ton) | Tiempo de acondicionamiento Depresor (min) | | |
|--------|----|-------------------|---------------------|----------------------|---|------|------|
| | | | | | Tc=2 | Td=1 | Te=1 |
| 2 | 10 | 348 | 374 | 2781,8 | Tc=2 | Td=1 | Te=1 |
| 5 | | | | | | Td=2 | |
| 7 | | | | | | Td=3 | |

4.2.3 Resultados de ensayos experimentales de flotación

De los ensayos experimentales de flotación al igual que en los exploratorios, se obtuvo los tres concentrados económicos a comercializar, es decir, feldespato, cuarzo y mica.

La tabla 45 muestra las masas en gramos correspondientes al concentrado en conjunto de mica y feldespato y el producto en cola contentiva de cuarzo, de la primera etapa de flotación.

Tabla 45. Masas obtenidas ensayos experimentales, 1era etapa.

| Ensayo | Concentrado mica feldespato gr. | Cola cuarzo gr. | Masa Total |
|--------|------------------------------------|--------------------|------------|
| 1 | 123,3 | 120,3 | 243,6 |
| 2 | 124,3 | 120,4 | 244,7 |
| 3 | 102,3 | 141,3 | 243,6 |
| 4 | 79,8 | 165,3 | 245,1 |
| 5 | 87,3 | 149,6 | 244,9 |
| 6 | 53,7 | 159,3 | 235,8 |
| 7 | 89,2 | 155,3 | 244,5 |
| 8 | 139,3 | 93,0 | 232,3 |
| 9 | 93,5 | 151,5 | 245,0 |
| 10 | 95,3 | 129,4 | 224,6 |
| 11 | 103,3 | 142,3 | 245,6 |
| 12 | 93,2 | 147,3 | 240,5 |
| 13 | 82,6 | 156,4 | 239,9 |
| 14 | 79,8 | 168,3 | 245,1 |
| 15 | 58,5 | 185,8 | 244,3 |
| 16 | 62,2 | 180,0 | 243,2 |
| 17 | 85,6 | 158,5 | 244,1 |
| 18 | 78,3 | 150,3 | 228,5 |
| 19 | 89,2 | 155,6 | 244,8 |
| 20 | 103,5 | 139,7 | 243,2 |

La tabla 46 muestra las masas obtenidas en la segunda etapa de flotación en donde el concentrado es mica y la cola, pulpa que permanece en la celda contentiva de feldespato.

Tabla 46. Masas obtenidas en ensayos experimentales 2da Etapa.

| Ensayo | Concentrado de mica gr | Cola feldespato gr | Masa Total |
|--------|---------------------------|-----------------------|------------|
| 1 | 58,6 | 186,3 | 245,2 |
| 2 | 54,6 | 192,3 | 246,9 |
| 3 | 40,60 | 200,5 | 241,1 |
| 4 | 64,5 | 180,8 | 245,3 |
| 5 | 78,3 | 166,4 | 244,7 |
| 6 | 62,8 | 178,5 | 241,3 |
| 7 | 83,5 | 162,3 | 245,8 |
| 8 | 59,5 | 182,3 | 241,8 |
| 9 | 69,5 | 172,6 | 242,1 |
| 10 | 63,4 | 178,8 | 242,2 |
| 11 | 58,2 | 183,5 | 241,7 |
| 12 | 60,5 | 183,2 | 243,7 |
| 13 | 83,5 | 158,8 | 242,3 |
| 14 | 75,6 | 171,5 | 247,3 |
| 15 | 56,4 | 190,7 | 247,1 |

Al igual que en los ensayos exploratorios, el realizar un análisis químico para todos los ensayos de concentración, sería de gran importancia para los ensayos experimentales definitivos, pero debido a que éstos conllevan a un gasto de reactivos, así como también de equipamiento necesario, de los cuales no se disponen en su totalidad en el Laboratorio de Concentración de Menas de la U.C.V, no fue posible la realización de estos a cada uno de los 35 ensayos.

Se tomaron 9 ensayos como muestras representativas de los realizados con pH ácido y 8 con pH básico para análisis químico. La selección de las muestras se realizó en base a los mismos criterios cualitativos que se tomaron en los experimentales.

4.2.3.1 Resultados de análisis químico primera etapa

La tabla 47 muestra los resultados del análisis químico obtenido en la primera etapa de flotación.

Tabla 47. Resultados de laboratorio. 1^{era} etapa de flotación.

| Ensayos pH acido | | Al ₂ O ₃ % | Na ₂ O % | K ₂ O % | Si ₂ O % | Si ₂ O(Cruda) % |
|---------------------|-------|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|
| 1 | conc. | 23,81 | 3,72 | 7,35 | 66 | 63,22 |
| | Cola | 9,87 | 2,7 | 2,92 | 81,95 | 77,88 |
| 2 | conc. | 22,1 | 3,6 | 6,21 | 61,91 | 71,3 |
| | cola | 10,65 | 2,7 | 3,28 | 80,69 | 77,25 |
| 3 | conc. | 21,24 | 3,9 | 4,92 | 63,45 | 55,60 |
| | cola | 7,82 | 2,7 | 2,02 | 84,66 | 80,78 |
| 4 | conc. | 13,17 | 4,15 | 2,9 | 76,86 | 62,30 |
| | cola | 8,82 | 2,8 | 2,67 | 84,01 | 80,08 |
| 8 | conc. | 13,17 | 3,55 | 3,19 | 75,33 | 72,91 |
| | cola | 8,23 | 2,97 | 2,47 | 82,51 | 79,11 |
| 12 | conc. | 18,43 | 3,3 | 4,95 | 69,64 | 66,65 |
| | cola | 10,08 | 3,41 | 3,21 | 79,91 | 75,98 |
| 14 | conc. | 17,36 | 3,45 | 4,58 | 66,66 | 67,65 |
| | cola | 10,08 | 3,25 | 3,37 | 81,81 | 76,53 |
| 18 | conc. | 12,08 | 3,98 | 3,19 | 78,73 | 75,11 |
| | cola | 10,7 | 3,34 | 3,45 | 81,51 | 76,53 |
| 19 | conc. | 16,76 | 4,1 | 4,54 | 71,2 | 82,4 |
| | cola | 10,13 | 2,7 | 3,06 | 81,17 | 71,6 |
| Cabeza 1° Flotación | | 10.31 | 3.28 | 2.96 | 79.27 | 75,94 |

Como se puede ver en la tabla 47 a las muestras seleccionadas se le realizó análisis de %Si₂O cruda el cual representa la sílice como mineral de cuarzo con el propósito de determinar la recuperación en función de este, por ser el cuarzo el concentrado a recuperar en esta primera etapa de flotación.

4.2.3.2 Resultados de análisis químico segunda etapa de flotación

Como se mencionó anteriormente la alimentación para la segunda etapa de flotación se realizó con el concentrado de la primera etapa de flotación luego de un proceso de lavado con agua para eliminar el ácido de la primera etapa. La tabla 48, muestra el resultado de análisis químico de esta.

Tabla 48. Análisis químico de la alimentación (cabeza) 2da etapa.

| | Al ₂ O ₃ % | Na ₂ O % | K ₂ O % | Si ₂ O % | Si ₂ O(Cruda) % |
|--------------------------|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------|
| Cabeza 2° Concentrado | 18,43 | 3,3 | 4,95 | 69,64 | 66,65 |

Considerando que la alimentación de la segunda etapa de flotación es el concentrado mica - feldespato obtenido de la primera etapa de flotación, los productos del ensayo f12 son los más adecuados para probar en la segunda etapa en virtud de un punto de equilibrio en masa y calidad visual de los mismos.

La tabla 49 y 50, muestra los resultados de análisis químico de las muestras seleccionadas en la segunda etapa de flotación.

Tabla 49. Resultados de laboratorio: concentrado de mica C2. 2^{da} flotación.

| Ensayo pH básico | %Al ₂ O ₃ | %Na ₂ O | %K ₂ O | %Si ₂ O |
|------------------|---------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | 21,21 | 2,11 | 5,74 | 66,46 |
| 4 | 17,91 | 2,59 | 4,84 | 68,78 |
| 6 | 21,49 | 1,89 | 5,97 | 65,56 |
| 8 | 23,71 | 1,24 | 5,74 | 66,46 |
| 9 | 24,25 | 1,23 | 7,25 | 62,22 |
| 12 | 25,04 | 1,08 | 7,49 | 62,22 |
| 14 | 25,48 | 0,92 | 7,61 | 58,65 |
| 15 | 24,41 | 0,98 | 7,21 | 59,90 |
| Cabeza | 18,43 | 3,28 | 4,95 | 66,65 |

Tabla 50. Resultados de laboratorio. Concentrado de feldespato C3. 2^{da} flotación.

| Ensayos pH básico | %Al ₂ O ₃ | %Na ₂ O | %K ₂ O | %Si ₂ O | %Si ₂ O(Cruda) |
|-------------------|---------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|
| 1 | 13,23 | 3,36 | 3,89 | 75,09 | 69,5 |
| 4 | 9,79 | 3,28 | 2,97 | 80,09 | 67,2 |
| 6 | 11,01 | 3,49 | 3,19 | 81,24 | 58,3 |
| 8 | 11,14 | 3,56 | 2,98 | 82,58 | 66,2 |
| 9 | 10,00 | 3,44 | 2,84 | 81,81 | 71,5 |
| 12 | 9,77 | 3,33 | 3,01 | 80,75 | 54,5 |
| 14 | 10,33 | 3,98 | 2,98 | 82,14 | 49,3 |
| 15 | 9,15 | 3,89 | 3,16 | 78,99 | 74,5 |
| Cabeza | 18,43 | 3,28 | 4,95 | 66,65 | 75,94 |

4.2.4 Cálculos para la Recuperación

En el proceso de concentración, se busca conseguir la mayor recuperación posible, siendo éste calculado utilizando la siguiente formula:

$$R = \frac{c(a - e)}{a(c - e)} * 100$$

Donde

R: Recuperación

c: Porcentaje de un componente del concentrado

a: Porcentaje de un componente de la alimentación.

e: Porcentaje de un componente en la cola

Así mismo se debe considerarse el balance de masa de los productos obtenidos a partir de una alimentación dada.

Balance de masa.

Como puede observarse, en la tabla 51 para este caso, la suma del peso del cuarzo presente en el concentrado y en la cola, no supera el peso de cuarzo presente en la muestra (alimentación) antes del proceso de flotación.

Tabla 51. Balance de masa de cuarzo muestra de 1era etapa flotación. (Cálculo tipo)

| Ensayo 3 | Peso (gr) | gr de Cuarzo | % Cuarzo |
|--------------|-----------|--------------|----------|
| Alimentación | 250 | 189,85 | 75,94 |
| Conc. | 102,3 | 56,27 | 55,60 |
| Cola | 141,3 | 114,14 | 80,78 |
| Total | 243,6 | 170,41 | --- |

Como se puede ver los gramos totales de cuarzo en la muestra alimentación es de 189,85gr y la suma entre el concentrado y la cola no superan este valor que es de 170,41 gr del total. A continuación se muestra un cálculo modelo.

Balance de masa para la muestra 3 de ensayo experimental, en la primera etapa

| | | |
|-----------------|-------|-----------------------------------|
| gr. Q en cabeza | % | |
| 250 ----- | 100 | |
| X ----- | 75,94 | X = 189,85gr en la muestra cabeza |

| | | |
|----------------|------|---------|
| Concentrado | % | |
| 102,3 gr ----- | 100 | |
| X ----- | 55,6 | X=56,27 |

| | | |
|----------------------------|-------|---------------|
| Producto en la cola Cuarzo | % | |
| 141,3 gr ----- | 100 | |
| X ----- | 80,78 | X= 114,14 gr. |

En la primera etapa de flotación la recuperación se realizó con los resultados de óxido de silicio como cuarzo puro, por ser el objetivo de esta primera etapa de flotación.

A continuación se presenta un cálculo tipo de la recuperación (R) tomando como referencia al concentrado de cuarzo (C1) de la primera etapa.

Para el ensayo número 12.

Oxido de silicio en la cabeza: a= 75,94%

Oxido de silicio en el concentrado c= 66,65%

Oxido de silicio en la cola e= 75,98%

$$R = \frac{75,98(75,94 - 66,65)}{75,94(75,98 - 66,65)} * 100 = 99,62\%$$

A este concentrado se le realizó un conteo modal, resultando que el concentrado (C1) posee un contenido promedio de 10% de mica, tomando en cuenta es este hecho se le resto al resultado obtenido en el cálculo anterior. El concentrado C1 del ensayo doce expresa que es rico en cuarzo presentando un porcentaje de recuperación de 89,62%. Esta operación se le aplicó a los resultados de la tabla 52.

4.2.4.1 Recuperación de C1 de la primera etapa de flotación

La tabla 52 muestra los resultados del cálculo de la recuperación de C1 cuarzo de la primera etapa.

Tabla 52. Porcentaje de Recuperación, Concentrado C1 1^{era} etapa

| Ensayo | pH | %SiO ₂ cruda | %RSiO ₂ cuarzo |
|--------|----|----------------------------|------------------------------|
| 1 | 1 | 77,88 | 79,00% |
| 2 | 2 | 77,25 | 84,00% |
| 3 | 2 | 80,78 | 71,00% |
| 4 | 3 | 80,08 | 37,00% |
| 8 | 3 | 79,11 | 41,00% |
| 12 | 3 | 75,98 | 89,62% |
| 14 | 3 | 76,53 | 84,00% |
| 18 | 3 | 76,53 | 49,00% |
| 19 | 4 | 77,99 | 72,00% |

4.2.4.2 Recuperación de C2 de la segunda etapa de flotación

La recuperación C2 de mica moscovita $KAl_2(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$, se realizó tomando como indicativo el %K₂O en el concentrado de la segunda etapa de flotación

Cálculo tipo para recuperación de mica C2

$$R = \frac{c(a - e)}{a(c - e)} * 100$$

Para el ensayo número 8.

Oxido de potasio en la cabeza: a= 4.95%

Oxido de potasio en el concentrado c= 6.57%

Oxido de potasio en la cola e= 2.98%

$$R = \frac{6,57(4,95 - 2,98)}{4,95(6,57 - 2,98)} * 100 = 72,83\%$$

La tabla 53 muestra los resultados de la recuperación en el concentrado C2 en la segunda etapa de flotación.

Tabla 53. Porcentaje de recuperación, 2^{da} C2 Mica.

| Ensayo | pH | %K ₂ O | %RK ₂ O |
|--------|----|-------------------|--------------------|
| 1 | 8 | 5,74 | 66,44% |
| 4 | 10 | 4,84 | 85,87% |
| 6 | 9 | 5,97 | 76,35% |
| 8 | 9 | 6,57 | 72,83% |
| 9 | 10 | 7,25 | 70,08% |
| 12 | 10 | 7,49 | 65,52% |
| 14 | 10 | 7,61 | 65,41% |
| 15 | 10 | 7,21 | 64,38% |

4.2.4.3 Recuperación de C3 de la segunda etapa de flotación

La recuperación de C3 de la segunda etapa de flotación, se realizó tomando como indicativo el % Na₂O en el concentrado de feldespatos de la segunda etapa.

A continuación la tabla 54 muestra la recuperación de feldespato (C3), a este concentrado se le realizó un conteo modal, dando como resultado que el feldespato contiene un promedio de 10% de mica, este porcentaje se le resta a los resultados de los cálculos de la recuperación presente en la tabla 54.

Tabla 54. Porcentaje de recuperación, 2^{da} C3 feldespato

| Ensayo | pH | %Na ₂ O | % RNa ₂ O C3 |
|--------|----|--------------------|----------------------------|
| 1 | 8 | 3,42 | 86% |
| 4 | 10 | 3,28 | 80% |
| 6 | 9 | 3,49 | 82% |
| 8 | 9 | 3,56 | 85% |
| 9 | 10 | 3,44 | 87% |
| 12 | 10 | 3,33 | 89% |
| 14 | 10 | 3,25 | 90% |
| 15 | 10 | 3,18 | 88% |

4.2.5 Efecto de parámetros, primera etapa de flotación

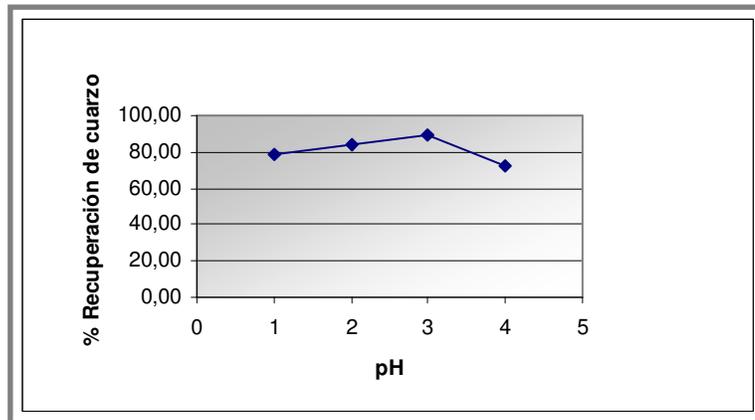
De los ensayos de concentración realizados tomando el diseño experimental antes señalado se realizaron las gráficas donde se pueden observar las curvas que representan los porcentajes de recuperaciones de Si₂O(Cruda) para C1 de cuarzo, de Na₂O para C2 de mica y de K₂O para C3 de feldespato que se muestran a continuación.

- El efecto del pH en la recuperación de C1 cuarzo: Tabla 55 y gráfico 8.

Tabla 55. Efecto del pH en la Recuperación de cuarzo

| Ensayo | pH | %R cuarzo |
|--------|----|-----------|
| 1 | 1 | 79,00 |
| 2 | 2 | 84,00 |
| 12 | 3 | 89.62 |
| 19 | 4 | 72,00 |

Gráfico 8. pH. Vs Recuperación de cuarzo.

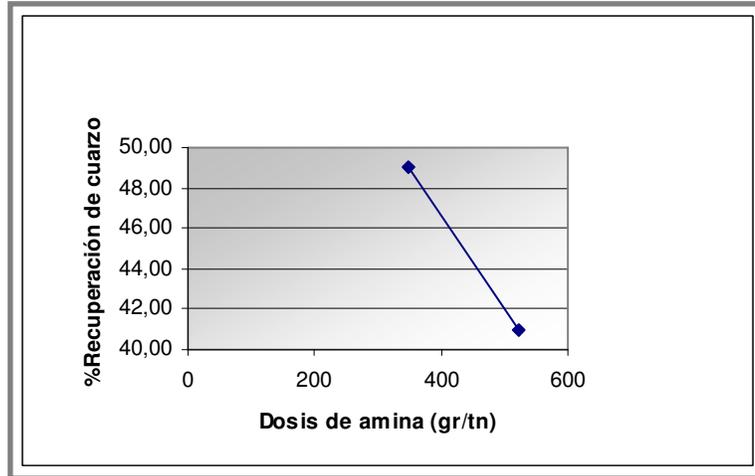


- El Efecto de la dosis de amina en la recuperación de C1 cuarzo: Tabla 56 y gráfico 9.

Tabla 56. Efecto de amina en la Recuperación de cuarzo.

| Ensayo | Dosis de Amina gr/tn. | % R cuarzo |
|--------|--------------------------|------------|
| 8 | 522 | 41 |
| 18 | 348 | 49 |

Gráfico 9. Dosis de amina Vs Recuperación de cuarzo.

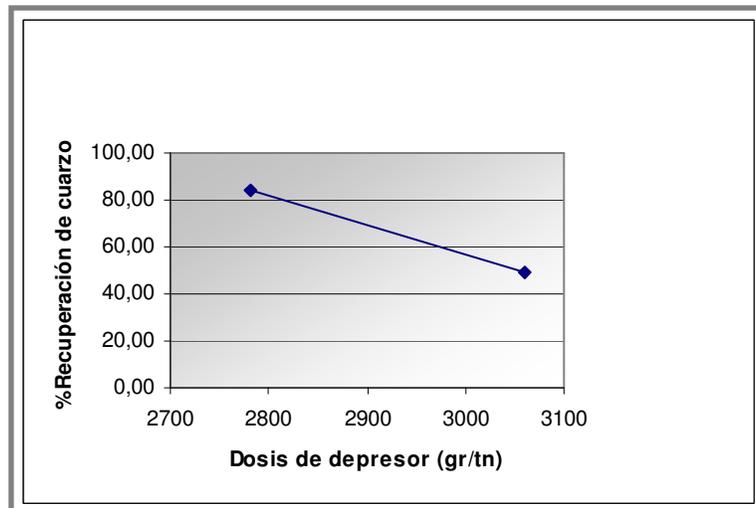


- Efecto de la dosis del depresor en la recuperación de C1 cuarzo: Tabla 57 y gráfico 10.

Tabla 57. Efecto del depresor en la Recuperación de cuarzo.

| Ensayo | Dosis de depresor | %R cuarzo |
|--------|-------------------|-----------|
| 14 | 2781,8 | 84 |
| 18 | 3060 | 49 |

Gráfico 10. Dosis del depresor Vs % Recuperación de cuarzo.

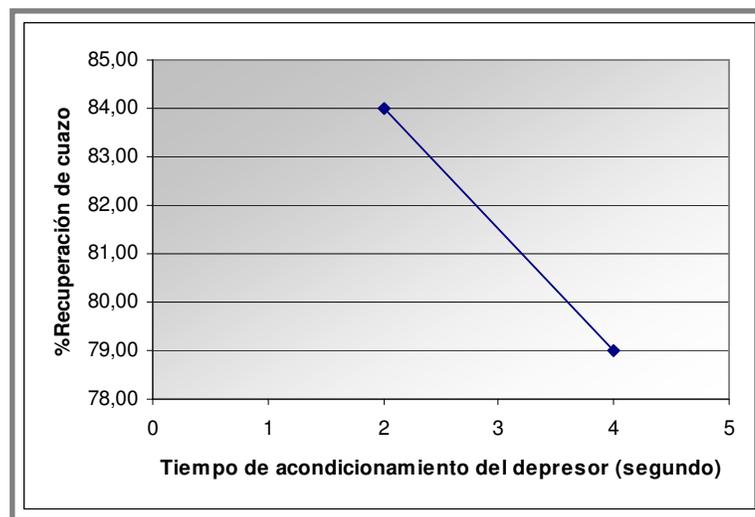


- Efecto del tiempo de acondicionamiento del depresor en la recuperación de C1 cuarzo: Tabla 58 y gráfico 11.

Tabla 58. Efecto del tiempo de acondicionamiento del depresor en la Recuperación de cuarzo.

| Ensayo | Tiempo de acondicionamiento (min) | %R cuarzo |
|--------|-----------------------------------|-----------|
| 14 | 2 | 84 |
| 19 | 4 | 79 |

Gráfico 11. Tiempo de acondicionamiento del depresor Vs % Recuperación de cuarzo.

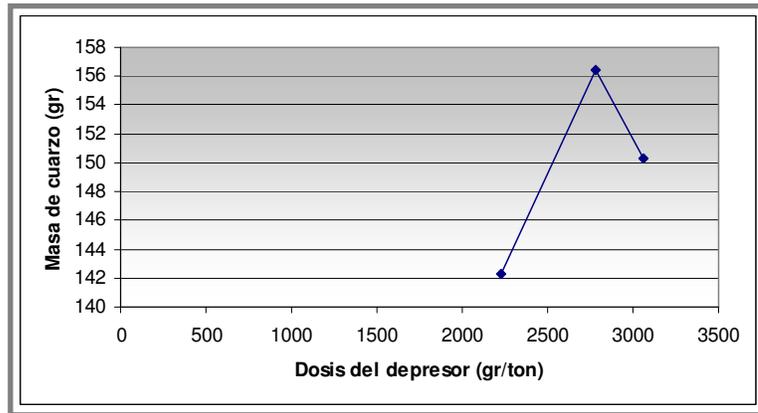


- Efecto de la dosis del depresor Vs masa de C1 cuarzo: Tabla 61 y gráfico 12.

Tabla 59. Efecto del depresor en la masa de cuarzo.

| Ensayo | Dosis de depresor | Masa cuarzo (gr) |
|--------|-------------------|------------------|
| 11 | 2225,5 | 142,3 |
| 13 | 2781,8 | 156,4 |
| 18 | 3060 | 150,3 |

Gráfico 12. Dosis de depresor Vs masa de cuarzo.



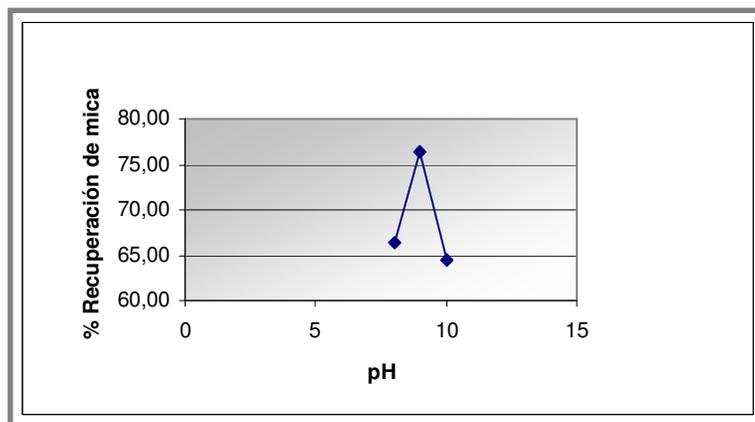
4.2.6 Efecto de parámetros, segunda etapa de flotación

- Efecto del pH en la recuperación de C2 mica: Tabla 60 y gráfico 13.

Tabla 60. Efecto del pH en la Recuperación de mica.

| Ensayo | pH | % Rmica |
|--------|----|---------|
| 1 | 8 | 66,44 |
| 6 | 9 | 76,35 |
| 15 | 10 | 64,38 |

Gráfico 13. pH Vs Recuperación de mica.

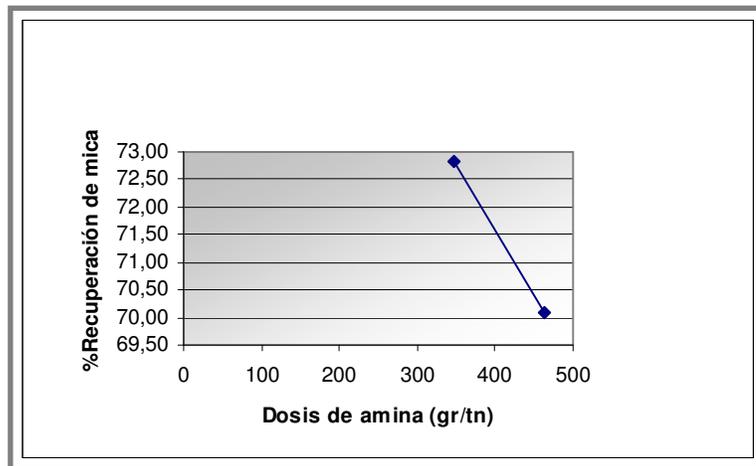


- Efecto de la dosis de amina en la recuperación de C2 mica: tabla 61 y gráfico 14.

Tabla 61. Efecto de la amina en la Recuperación de mica.

| Ensayo | Dosis de Amina | % Rmica |
|--------|----------------|---------|
| 8 | 348 | 72,83 |
| 9 | 462,7 | 70,08 |

Gráfico 14. Dosis de amina Vs % Recuperación de mica.

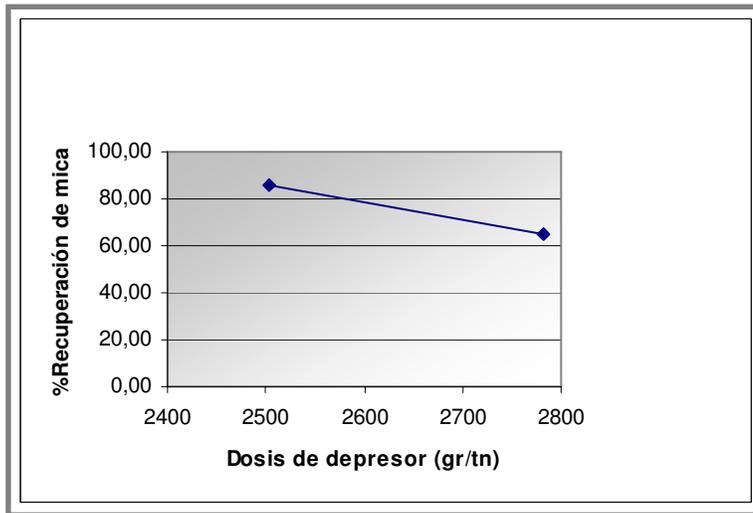


- Efecto de la dosis del depresor en la recuperación de C2 mica: Tabla 62 y gráfico 15.

Tabla 62. Efecto del depresor en la Recupetración de mica.

| Ensayo | Dosis de depresor | % Rmica |
|--------|-------------------|---------|
| 4 | 2503,6 | 85,87 |
| 14 | 2781,8 | 65,41 |

Grafico 15. Dosis de depresor Vs % Recuperación de mica.

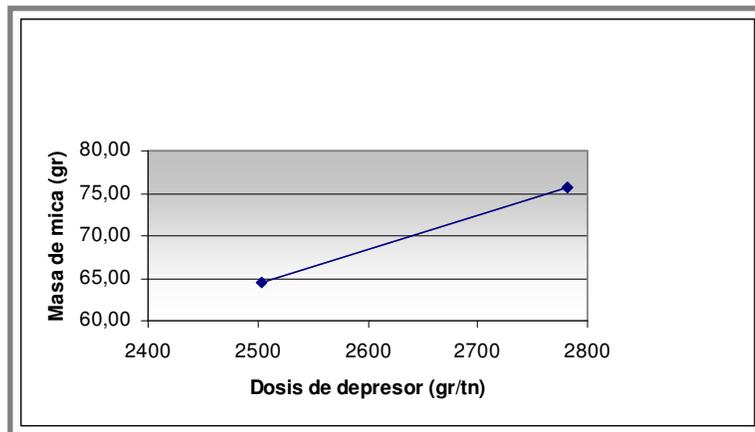


- Efecto de la dosis del depresor Vs masa de C2 mica: Tabla 63 y gráfico 16.

Tabla 63. Efecto del depresor en la masa de mica.

| Ensayo | Dosis de depresor | Masa mica (gr) |
|--------|-------------------|----------------|
| 4 | 2503,6 | 64,5 |
| 14 | 2781,8 | 75,6 |

Gráfico 16. Dosis del depresor Vs masa de mica.

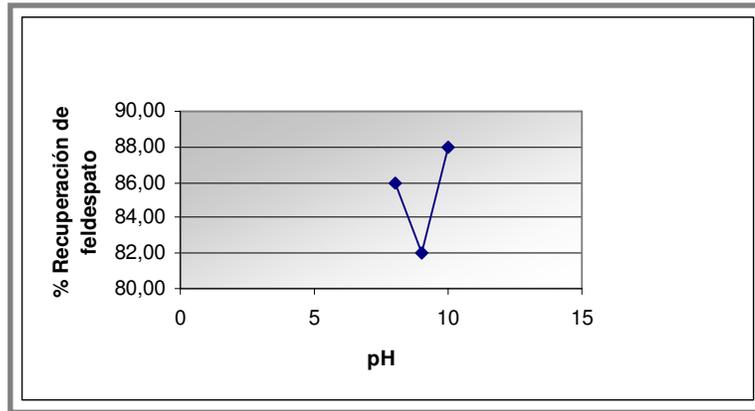


- Efecto del pH en la recuperación de C3 feldespato: Tabla 64 y gráfico 17.

Tabla 64. Efecto del pH en la Recuperación de feldespato.

| Ensayo | pH | %R feldespato |
|--------|----|---------------|
| 1 | 8 | 86 |
| 6 | 9 | 82 |
| 15 | 10 | 88 |

Gráfico 17. pH Vs % Recuperación de feldespato.

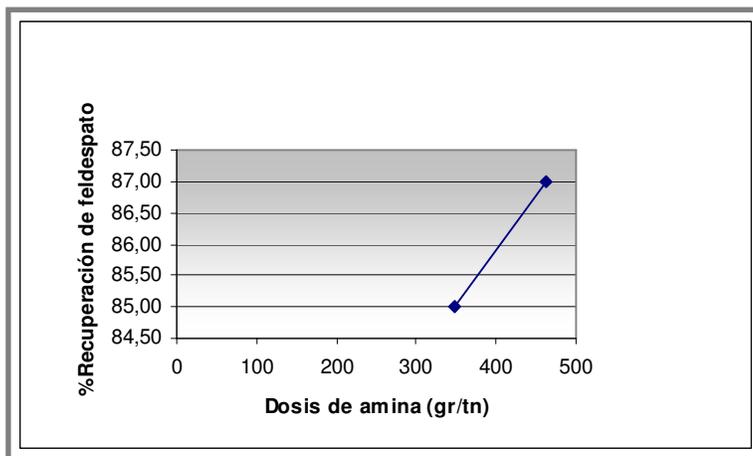


- Efecto de la dosis de amina en la recuperación de C3 feldespato: Tabla 65 y gráfico 18.

Tabla 65. Efecto de la amina en la recuperación de feldespato.

| Ensayo | Dosis de Amina gr/tn | % R feldespato |
|--------|----------------------|----------------|
| 8 | 348,0 | 85 |
| 9 | 462,7 | 87 |

Gráfico 18. Dosis de amina Vs % Recuperación de feldespato.

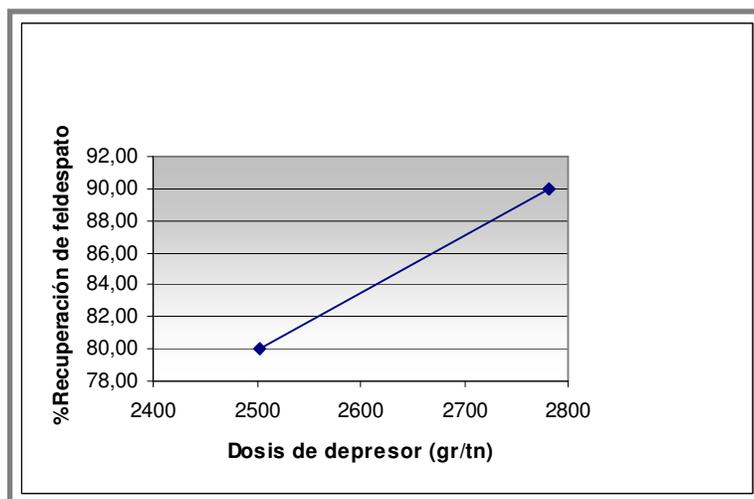


- Efecto de la dosis del depresor en la recuperación de C3 feldespato: Tabla 66 y gráfico 19.

Tabla 66. Efecto del depresor en la Recuperación de feldespato.

| Ensayo | Dosis de depresor | % R feldespato |
|--------|-------------------|----------------|
| 4 | 2503,6 | 80 |
| 14 | 2781,8 | 90 |

Gráfico 19. Dosis del depresor Vs % de Recuperación de feldespato.

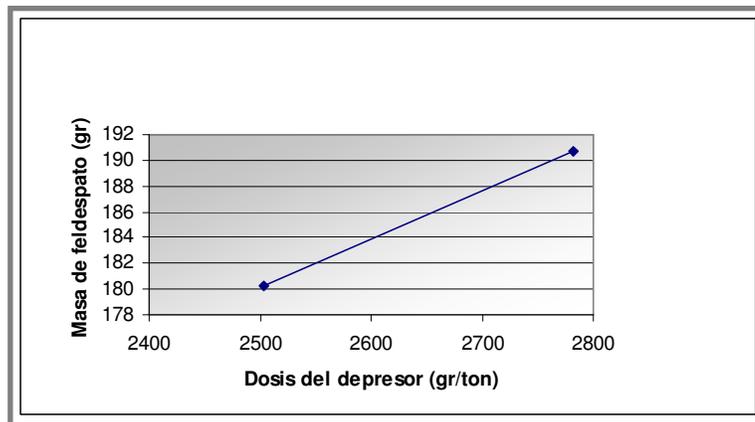


- Efecto de la dosis del depresor Vs masa de C3 feldespato: Tabla 67 y gráfico 20.

Tabla 67. Efecto del depresor en la masa del feldespato.

| Ensayo | Dosis de depresor | Masa de feldespato (gr) |
|--------|-------------------|-------------------------|
| 4 | 2503,6 | 180,3 |
| 15 | 2781,8 | 190,7 |

Gráfico 20. Dosis del depresor Vs masa de feldespato.



4.2.7 Análisis de resultados

Para el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de concentración por flotación se midió el efecto de variación de pH, dosis de colector, depresor, y tiempo de acondicionamiento de depresor sobre las respuestas obtenidas en recuperación de %SiO₂ en la primera etapa para el concentrado C1 de cuarzo.

Para el análisis de la segunda etapa igualmente se midió el efecto de variación de pH, dosis de colector, dosis de depresor y tiempo de acondicionamiento de depresor sobre las respuestas obtenidas en la recuperación de %K₂O del concentrado C2 para mica y de %Na₂O para feldespato.

- Primera etapa de flotación: C1 cuarzo

Para el concentrado C1 de la primera etapa, cuando se varía el pH como se muestra en la tabla 55 y gráfico 8, la mejor recuperación se obtiene con un pH 3. A medida que el disminuye por debajo de 3 la recuperación tiende a bajar, lo mismo ocurre cuando el pH se incrementa por encima de tres.

Por encima y por debajo de pH 3 el efecto de acidez combinada con el efecto del depresor aumenta las posibilidades de flotabilidad del cuarzo y disminuye su recuperación.

La amina es el segundo parámetro a variar en esta primera etapa, en la tabla 56 y gráfico 9 se puede notar que la recuperación se incrementa cuando la misma toma el valor de 348 gr/ton, caso contrario ocurre cuando toma el valor de 522 gr/ton, a medida que aumenta la dosis de reactivo colector amina hay una adsorción en contra las partículas de cuarzo cubierta de depresor las cuales se debilitan dejando espacio abiertos, haciendo el cuarzo vulnerable a la acción de la amina siendo arrastrado este con la espuma mineralizada de feldespato y mica.

Con relación a la dosis de depresor se observa que es el reactivo que marca la pauta en este estudio, en la tabla 57 y gráfico 10 se aprecia que la mejor recuperación de cuarzo es de 84% cuando la dosis es de 2781,8 gr/ton, y para la dosis de 3060 gr/ton la recuperación disminuye a 49%. Al aumentar la dosis de depresor se saturan los granos de cuarzo; haciendo que el excedente de depresor recubre partículas de feldespato y mica, contaminado el concentrado de cuarzo y disminuyendo su recuperación.

El tiempo de acondicionamiento del depresor se puede notar que influye categóricamente en la recuperación de cuarzo a medida que este aumenta, este hecho se puede observar en la tabla 58 y gráfico 11 que para un tiempo de 2 minutos se obtiene una recuperación de 84 % y para un tiempo de 4 minutos 79 %, esto quiere decir, que a medida que se incrementa el tiempo disminuye la recuperación. Acondicionar mucho tiempo proceso de flotación desfavorece la permanencia de la

capa de silicato de sodio sobre las partículas de cuarzo, perdiendo la efectividad deseada.

Además se puede comprobar lo ante expuesto al observar que la dosis del depresor también influye en la cantidad de concentrado (C1) obtenido en el proceso, en la tabla 59 y gráfico 12 se observa que la mejor recuperación de la masa de cuarzo se obtiene con 2781,8 gr/ton de silicato de sodio.

Relacionando toda la información obtenida se puede concluir que, para la primera etapa, las mejores condiciones fueron las siguientes: pH 3, dosis de amina 348 gr/ton, dosis de depresor 2781,8 gr/ton, tiempo de acondicionamiento del depresor de 2 minutos, granulometría pasante malla 140 y rpm 1.100.

- Segunda etapa de flotación: C2 mica

Al analizar la tabla 60 y el gráfico 13 se puede observar el efecto de pH sobre la recuperación de mica, en donde para el concentrado C2 de la segunda etapa, la mejor recuperación se obtiene con un pH 9 con valor de 76,35%; sin embargo para valores de pH por encima y por debajo de éste el porcentaje de recuperación disminuye. Este hecho se debe a que por encima y por debajo de pH 9 las partículas de feldespato deprimidas con silicato de sodio pierden efectividad en la unión entre ambos, haciendo que la amina actúe sobre el feldespato, contaminando el concentrado de mica y disminuyendo la recuperación de la misma.

La amina es el segundo parámetro que se varió en esta segunda etapa, en el gráfico 14 y tabla 61 se puede notar que la mejor recuperación fue de 72,83% para una dosis de 348 gr/ton, mientras que para una dosis 462,7 gr/ton la recuperación disminuye. Como en la primera etapa de flotación a medida que aumenta la cantidad de amina hay una reacción en contra de las partículas de feldespato recubiertas de depresor las cuales se debilitan dejando espacios abiertos que hacen al feldespato vulnerables a la acción de la amina, el cual trae como consecuencia que el mismo flote con la mica.

Con relación a la dosis de depresor la tabla 62 y gráfico 15 se puede apreciar que la mejor recuperación de mica es de 85,87% cuando la dosis es de 2053,6 gr/ton, y para dosis de 2781,8 gr/ton la recuperación disminuye a 65,41%. El exceso en la dosis de depresor hace que la mica se deprima junto con el feldespató, esto debido a que al aumentar la dosis de depresor se saturan los granos de feldespató; haciendo que el excedente recubra partículas de mica, contaminando el concentrado de éste y disminuyendo su recuperación.

Lo anteriormente expuesto se comprueba en la tabla 63 y gráfico 16 donde se muestra el efecto del depresor en la recuperación de masa de C2 mica, en donde para una dosis de 2781,8 gr/ton de silicato de sodio se tiene la mayor masa.

Según el análisis antes expuestos, se puede decir que el mejor porcentaje de recuperación para C2 mica se obtiene bajo las siguientes condiciones: pH 9, dosis de amina 348 gr/ton, dosis de depresor 2503,6 gr/ton, granulometría pasante malla 140 y rpm 1.100.

- Segunda etapa de flotación: C3 feldespató

Se verifica que el efecto del pH, dosis de amina, dosis de depresor y masa de feldespató, en la recuperación de feldespató es lo opuesto a lo sucedido para la mica, la tabla 64 y gráfico 17 muestra el efecto de pH sobre la recuperación, en donde para el concentrado C3 feldespató de la segunda etapa, la mejor recuperación se obtiene con un pH 10 con valor de 88%.

El efecto de la amina en la recuperación de feldespató se puede observar en la tabla 65 y gráfico 18 donde se aprecia que la mejor recuperación fue de 87% para una dosis de 462,7 gr/ton, mientras que para una dosis 348 gr/ton la recuperación es de 85 %.

Con relación a la dosis de depresor en la tabla 66 y gráfico 19 se aprecia que la mejor recuperación de feldespató es de 90% para una dosis de depresor de 2781,8 gr/ton, y para una de 2503,6 gr/ton la recuperación es de un 80 %.

Lo anteriormente expuesto se observa en la tabla 67 y gráfico 20 donde la mayor masa se obtiene con una dosis de 2781,8 gr/ton de silicato de sodio.

Según el análisis descrito se puede decir que el mejor porcentaje de recuperación para C3 se obtiene bajo las siguientes condiciones: pH 10, dosis de amina 348 gr/ton y la dosis de depresor 2781,8 gr/ton, granulometría pasante malla 140 y 1100 rpm.

Se observa que para obtener concentrado de feldespato se requiere pH 10, mientras que para la mica un pH 9. Se debe hacer un estudio más detallado alrededor del pH 9 y 10 para conseguir el pH óptimo o de equilibrio para las recuperaciones de concentrado de mica y feldespato que cumplan con los intereses de mercado de la empresa.

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones que se derivaron del desarrollo de este Trabajo Especial de Grado:

- La muestra proveniente de MINERA MINORCA MONTALBÁN C.A es una roca metamórfica cuarzo feldespática micácea con un contenido de 79,27% de SiO₂, 10,31% de Al₂O₃, 1,95% de Na₂O y 2,96% de K₂O, bajo extracción minera donde se comercializa el feldespato. El cuarzo y la mica presentes son factibles de recuperación como concentrados de cada uno, constituyendo subproductos también negociables.
- Se toma la granulometría pasante malla 140 (A.S.T.M) como de corte, debido a que a partir de ésta se incrementa el grado de liberación de mica y feldespato. Según el estudio de moliendabilidad para alcanzar esta granulometría se debe moler aproximadamente una hora y cuarenta minutos, si se supera este tiempo se producen lamas, las cuales se aglomeran alrededor del mineral a flotar por el efecto de la electrotáctica existente entre ellas. Este hecho perjudica el efecto del reactivo colector sobre el mineral.
- Para evitar que el reactivo depresor y colector pierdan su efectividad es necesario establecer que las revoluciones por minuto no excedan de 1100, ya que la unión de los reactivos con los minerales que intervienen en el proceso son susceptibles a desprenderse por encima de este límite.
- Las características de carga superficial sustentadas por la investigación bibliográfica condujo a la utilización del colector catiónico amina Flotigam EDA-3B, para la primera etapa, donde se obtiene un concentrado de cuarzo en medio ácido y en la segunda, un concentrado de mica y feldespato en medio básico, así como silicato de sodio como reactivo depresor.

Primera etapa de flotación

- Para la primera etapa de flotación se puede decir que la mejor recuperación de C1 cuarzo se obtiene con las siguientes condiciones: medio ácido pH 3, dosis de amina Flotigam EDA – 3B 348 gr/ton, dosis de depresor silicato de sodio 2781.8 gr/ton, tiempo de acondicionamiento del depresor es de 2 minutos, granulometría pasante malla 140, dilución de pulpa 20% y 1.100 rpm, alcanzando una recuperación de 90%.
- La recuperación de C1 cuarzo disminuye cuando el pH toma valores de 1, 2 y 4. Este resultado probablemente sea causado por la combinación del grado de acidez junto con el efecto del reactivo depresor, el cual aumenta las posibilidades de flotabilidad del cuarzo.
- La dosis de 348gr/ton de amina se considera óptima, ya que al aumentar hay una reacción en contra de la capa de depresor que cubre las partículas de cuarzo, lo que hace a éste vulnerable a la acción de la amina, el cual es arrastrado con la espuma mineralizada de feldespato y mica, disminuyendo la recuperación de cuarzo.
- Si la dosis de depresor es superior a 2781,8 gr/ton conduce a una saturación del mismo en los granos de cuarzo; haciendo que el excedente del reactivo depresor envuelva las partículas de feldespato y mica, contaminando así el concentrado de cuarzo, disminuyendo su recuperación notablemente.
- El comportamiento del tiempo de acondicionamiento del reactivo depresor en la recuperación de cuarzo fue de dos minutos, tiempo que se necesita para que los iones migren hacia la superficie mineral para formar la doble capa eléctrica creando las condiciones hidrofílicas del cuarzo, lo que hace al reactivo perder efectividad.

Segunda etapa de flotación

- Para separar la mica del feldespato las mejores condiciones para alcanzar este objetivo fueron las siguientes: pH 9, dosis de amina Flotigam EDA – 3B de 348

gr/ton, dosis de depresor silicato de sodio 2503,6 gr/ton, granulometría pasante malla 140, dilución de pulpa 20%, 1.100 rpm y tiempo de acondicionamiento del depresor dos minutos.

- La recuperación para C3 feldespato se obtiene bajo las siguientes condiciones: pH 10, dosis de amina Flotigam EDA – 3B 348 gr/ton y la dosis de depresor silicato de sodio de 2781,8 gr/ton, granulometría pasante malla 140, dilución de pulpa 20%, 1.100 rpm y tiempo de acondicionamiento del depresor dos minutos.
- Dada la similitud entre las densidades de los tres minerales, cuarzo, mica y feldespato, en el proceso de concentración mineral, el silicato de sodio fue el reactivo de mayor relevancia o determinante para lograr la mayor recuperación de los tres concentrados por separado, ya que éste modifica el potencial de la superficie de los minerales, cambiando el punto de carga cero.
- Manteniendo la pulpa ácida las recuperaciones de cuarzo va aumentando, sin embargo, al hacerla menos ácida la recuperación disminuye notablemente, lo que confirma que el silicato de sodio traslada el punto de carga del cuarzo. Para un pH que se acerca a 4, su potencial sea positivo y dado que el colector es catiónico, este no flota, mientras que para un pH 4 el potencial de éste cambia a negativo favoreciendo la acción del colector.
- El proceso anterior se da para la segunda etapa, donde a medida que se acerca a un pH 10 disminuye la recuperación de mica y aumenta la recuperación de feldespato, lo que sustenta la revisión bibliográfica de que el silicato de sodio traslada el punto de carga del feldespato, haciendo que, para un pH por encima de 9 su potencial cambie a positivo y dado que la amina es un reactivo catiónico, éste no flota, quedando en la celda depresando al feldespato.

RECOMENDACIONES

- Para la primera etapa de flotación se debe realizar un estudio más detallado alrededor del pH 3; se sugiere que se tomen los siguientes valores de pH 2,00; 2,50; 3,00; 3,50 y 4,00. con el objetivo de conseguir el pH óptimo para la mayor recuperación de cuarzo.
- Para obtener concentrado de feldespato se requiere pH 10, mientras que para la mica un pH 9. Basados en este hecho se debe realizar un estudio más minucioso alrededor del pH 9 y 10, para así conseguir el pH de equilibrio para las recuperaciones de concentrado de mica y feldespato.
- Se debe llevar a cabo un estudio donde se utilicen otros reactivos colectores catiónicos, tales como las bases de amonios cuaternarios y bases nitrogenadas, para así conocer el comportamiento de la recuperación de los minerales cuarzo, mica y feldespato frente a estos colectores.
- En la segunda etapa la mejor recuperación de mica se obtiene para una dosis de depresor de 2503,6 gr/ton, mientras que para el feldespato es de 2781,8 gr/ton. Basado en este hecho se debe llevar a cabo un estudio más en detalle para conocerla dosis de equilibrio del reactivo depresor que arroje los mejores resultados en la recuperaciones de ambos minerales.
- Dado que los concentrados obtenidos no cumplen con a especificaciones comerciales se recomienda continuar con estudios preliminares iniciándolos con las dosis de reactivos y pH bajo con los cuales se logró la mayor recuperación con objeto de realizar un diseño experimental donde se evalúen dosis y pH en rangos menores, para lograr conseguir que los tres concentrados cumplan con las especificaciones comerciales que exige el mercado de cerámica, vidrio, refractario y pinturas.

BIBLIOGRAFÍA

ESTRADA, Dityubet R. (2001). Beneficio mineral de la mica presente en la Cantera Cura, San Joaquín, Estado Carabobo. Tesis Universidad Central de Venezuela, Escuela Geología, Minas y Geofísica.

GONZALEZ, Miguel (1970). Concentración del feldespato y mica del Páramo de Piedras Blancas. Estado Mérida. Departamento de Minas de la U.C.V.

CONTRERAS, José L. (2004). Flotación de mica contenida en la laguna de sedimento de la planta de tratamiento de la Arenera El Torito, Municipio Libertador, Estado Carabobo. Tesis Universidad Central de Venezuela, Escuela Geología, Minas y Geofísica.

COLOMA, Juan R. (1983). Obtención de concentrado de fosfatos a partir de areniscas fosfáticas uranílicas de la Quebrada del Los Monos Distrito Libertador, Estado Táchira Tesis Universidad Central de Venezuela, Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

HURLBUT, Dana. (1956). Manual de Mineralogía. 6º Edición, Barcelona. Editorial Reverté.

KELLY & Spottiswood (1990). Introducción al Procedimiento de Minerales. 1^{era} Edición. Editorial Lumusa. México.

PELÁEZ, Eduardo (1980). Preparación y Concentración de Minerales. 3º y 4º Edición. Caracas. Inédito.

CORPOCENTRO (1991). 1^{era} Congreso de Desarrollo Minero de la Región Central. Valencia, Estado Carabobo. s/p. Inédito.

CORPOCENTRO (2001). 2^{do} Congreso de Desarrollo Minero de la Región Central. Valencia, Estado Carabobo. s/p. Inédito.

RODRÍGUEZ, Simón. (1998). Excursión Técnica. Yacimientos de Minerales Industriales de la Cordillera de la Costa. Escuela de GMYG. Universidad Central de Venezuela. 15 pp. Inédito.

BAKER, Ron. (1979). Conceptos Básicos de Perforación. Servicio de Extensión Petrolera. Universidad de Texas. Austin, Texas. 230 pp.

BERLINER & Staff (s/f). Report on Ground Mica. Informe del Ministerio de Energía y Minas. New York. 12 pp. Inédito.

CHAPMAN, George (1983). Mica. En S. LEFOND (Ed.) Industrial Minerals and Rocks. 5th. Edition. Vol. 2. S.M.M.E. Evergreen, Colorado. 1446 pp.

DEER, HOWIE & ZUSSMAN. (1966). An Introduction to the Rock Forming Minerals. Longman Group Limited. London. 528 pp.

DE TONI, Bruno del (1983). Geología de la Zona de Guacara. San Joaquín. Estado Carabobo. Departamento de Geología, Universidad Central de Venezuela. T.E.G. 180 pp. Inédito.

FERNÁNDEZ, E. (1965). Preparación Mecánica de Minerales y Carbones. 3^o Edición. Editorial Dussat, S.A. Madrid, España. 580 pp.

MORGAN, B. (1969). Geología de la Región de Valencia, Estado Carabobo. Boletín Geológico. Caracas, 10 (20): 4 – 136.

TAGGART, Arthur del (1966). Elementos de Preparación de Minerales. 1^o Edición. Ediciones Interciencias. Madrid. España. 648 pp.

Adsorción de colectores aniónicos en los silicatos. Disponible: www.minas.unalmed.edu. (Consultada: 2005, Enero 15).

El beneficio de arenas feldespáticas. Una solución para la industria de cerámica colombiana.

Disponible:

www.minas.unalmed.edu.co/facultad/publicaciones/dyna/143/EL%20BENEFICIO%20DE%20ARENAS.htm. (Consultada: 2005, Enero 15).

Léxico Estratigráfico Argentino. Disponible: www.segemar.gov.ar. (Consultada: 2005, Enero 15).

Principales estadísticas de los minerales, países productores de minerales, importadores. Disponible: www.mineralsuk.com. (Consultada: 2005, Enero 25).

Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela. Disponible: www.pdvsa.com/lexico. (Consultada: 2005, Enero 25).

Department of Geological Sciences. Disponible: www.geolab.unc.edu. (Consultada: 2005, Marzo 15).

World Availability of Mica. Disponible: www.icrmica.com. (Consultada: 2005, Marzo 15).

Premier mica company. Disponible: www.micaindia.com. (Consultada: 2005, Marzo 15).

Lecciones hipertextuales de mineralogía y petrología. Gneis. Disponible: www.montes.upm.es/Dptos/DptoSilvopascicultura/Edafologia/guia/Fichas/gneis. (Consultada: 2005, Marzo 20).

Uso y especificaciones del cuarzo. Disponible:

www.segemar.gov.ar/P_Oferta_Regiones/Oferta/Cuarzo/Usos/. (Consultada: 2005, Octubre 15)

Oferta y demanda mundial de los minerales feldespatos, mica y cuarzo. Disponible www.segemar.gov.ar/. (Consultada: 2005, Octubre 15).

Definiciones básicas de los minerales. Disponible:

www.fagro.edu.uy/geologia/web/Mat_Apo/RyM/rym-2. (Consultada: 2005, Octubre 15).

Feldspar and Nepheline Syenite. Disponible:

www.minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/feldspar/feldmyb01.pdf.
(Consultada: 2005, Octubre 15).