

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

**CONCENTRACIÓN DE FASES ZEOLITICAS DE LAS TOBAS
ZEOLITIZADAS DEL YACIMIENTO CAIMANES**

Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias técnicas

MAFEFE FRAZAO NDUMBA

Moa, julio 2007

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

**CONCENTRACIÓN DE FASES ZEOLITICAS DE LAS TOBAS
ZEOLITIZADAS DEL YACIMIENTO CAIMANES**

Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias técnicas

Autor: MAFEFE FRAZAO NDUMBA

Tutores: Dr. C. Alfredo L. Cuello Velázquez

Dr. C. Gerardo Orozco Melgar

Dr. C. Juan M. Menéndez Aguado

Moa, julio, 2007

Tesis en opción del grado científico Doctor en Ciencias Técnicas al Ing. Mafefe Frazao Ndumba

AGRADECIMIENTOS

A la Revolución cubana que me acogió en esta tierra de Martí durante 18 años para formarme como un profesional y al Gobierno de Angola que entre millones de hijos campesinos como yo me dio la posibilidad de una beca en Cuba.

A los Drs. Alfredo Lázaro Coello Velázquez, Gerardo Orozco Melgar, Juan María Menéndez Aguado, Arturo Rojas Purón, Jesús Blanco Moreno y Pedro Beyris Mazar que de una manera u otra me han dado apoyo moral, científico, intelectual y material a lo largo de estos 4 años para concretar bases para este triunfo.

A la compañera MSc. Moraima Fernández, a los compañeros del laboratorio de la Planta de Tratamiento de Agua de la Empresa Comandante Ernesto Che-Guevara, los profesores del ISMMM y del grupo de ingeniería para el desarrollo de la Escuela Técnica de Ingeniería Universitaria de Mieres de la Universidad de Oviedo (España).

A los Ing. Gustavo y Yunieska, a la compañera Maydelin Medina y María del Carmen Tamayo que de una manera u otra han estado presentes en los momentos más difíciles de mi vida familiar y profesional.

Tesis en opción del grado científico Doctor en Ciencias Técnicas al Ing. Mafefe Frazao Ndumba

DEDICATORIA

A mis padres Joao Ndumba y María Iambissa que han sido mi inspiración para obtener este Título que me alejó de ellos por largos años.

A mi hijo y esposa que me han apoyado incondicionalmente sin tener en cuenta horarios y que es un ejemplo a seguir.

A mis hermanos y hermanas en especial Gilda que ha vivido de cerca nuestras dificultades y ha puesto su grano de arena.

SÍNTESIS

La presente investigación, está dirigida a la concentración de las fases zeolíticas de las rocas zeolitizadas de un horizonte del yacimiento Caimanes en la región de Moa, Cuba. Dada la necesidad de producción de zeolitas naturales con mayor valor agregado, eliminando las impurezas y con ello el aumento del contenido de la fase zeolítica mediante métodos de beneficio lo que repercute a una mejora en sus propiedades físicas y físico-químicas, factor que aumenta la diversidad de aplicaciones de estos sólidos con fines industriales. Hasta la actualidad el parámetro de calidad que se ha considerado es la granulometría no así el contenido de la fase zeolítica.

Entre los principales resultados del trabajo están la caracterización de las rocas zeolitizadas con vista al beneficio de minerales, donde se emplean las técnicas de Difracción de Rayos X, Microscopía Electrónica de Barrido, Fluorescencia de Rayos X, y Análisis Térmicos, así como el empleo de la molienda diferencial, flotación y el hidrociclado para la separación del cuarzo, que es la principal impureza de las rocas zeolíticas. Empleando el experimento factorial completo del tipo 3^3 y el software Statgraphic versión 5.1 para la interpretación de los resultados.

ABSTRACT

The current research is focused on zeolitic phase's concentration of the zeolitic rocks from one of the horizons of Caimanes Deposit in Moa, Cuba, due to the necessity of producing natural zeolita with more aggregate value, eliminating the impurities resulting in the increase of the zeolitic phase contents through profitable methods, which have an effect in the improvement of the physical and physical – chemical characteristics, factor that increases the diversity of the implementation of such solids used with industrial purposes. Nowadays the gradation is the quality parameter to take into account unlike the zeolitic phase contents.

Among the mayor results there are, the characterization of the material through different techniques such as: x-rays diffraction, electronic microscopy, x-rays fluorescence, thermal and quantitative análisis. The using of diference milling, flotation and likewise a hydrocyclone which allows the quartz splitting from the zeolitic phases as key impurity, through a throughout factorial experiment of 3ⁿ kind and using the Statgraphic version 5.1 software for the interpretation of the results.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.- MARCO CONCEPTUAL	6
Introducción	6
I.1 Estado del arte de la concentración mediante molienda diferencial	6
I.2 Estado del arte de la concentración de silicatos y aluminosilicatos por flotación	7
I.3 Empleo de los hidrociclones en la clasificación de minerales	9
I.4 Empleo de los hidrociclones en la concentración de minerales.	10
I.5 Generalidades sobre las zeolitas naturales	13
I.6- Estado del conocimiento del yacimiento Caimanes.	15
Conclusiones parciales.	17
CAPÍTULO II. - MATERIALES Y MÉTODOS.	18
Introducción	18
II.1 Muestreo y preparación de las muestras	19
II.1.1 Toma de la muestra y reducción de tamaño	19
II.2 Métodos empleados en la caracterización de la muestra inicial y los productos del beneficio	23
II.2.1 Empleo de la difracción de RX para determinar la composición mineralógica	23
II.2.2 Estudio del comportamiento térmico de las muestras	23
II.2.3 Análisis cualitativo de la muestra inicial y productos del beneficio.	24
II.2.4 Análisis cuantitativo de la muestra inicial y los productos finales	24
II.2.5 Estudio de las muestras por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	24
II.2.6 Determinación de la composición química de las muestras	24
II.3 Procedimientos empleados en la preparación mecánica y el beneficio	25

II.3.1	Determinación de la composición granulométrica	27
II.3.2	Estudio de liberación de las fases mineralógicas mediante el proceso de molienda	28
II.3.3	Clasificación de los minerales mediante hidrociclones	31
II.4	Concentración de las fases zeolíticas.....	33
II.4.1	Ensayos de flotación por espumas.....	33
II.4.2	Concentración en Hidrociclones	34
II.5	Planificación de los experimentos	37
II.5.1	Planificación de experimento de flotación.....	37
II.5.2	Planificación de experimentos para la concentración en hidrociclones	38
CAPÍTULO III. - DISCUSION E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA INICIAL.		41
III.1	Composición mineralógica determinada por Difracción de Rayos X.....	41
III.2	Análisis cuantitativo de la muestra inicial.....	42
III.3	Análisis Térmico diferencial y termogravimétrico.....	43
III.4	Análisis químico de la muestra.....	46
III.5	Microscopía electrónica de barrido (MEB).	48
	Conclusiones parciales.	53
CAPÍTULO IV. - DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO.....		54
	Introducción.....	54
IV.1	Tamaño óptimo de molienda	54
IV.2	Resultados de la clasificación en hidrociclones	59
IV.3	Resultados de los ensayos de flotación.	61

IV.4 Resultados del experimento factorial completo (EFC), para diferentes diámetros de hidrociclones.	66
IV.4.1 Hidrociclón con diámetro 10 mm.	67
IV.4.2 Hidrociclón con diámetro 25,4 mm.	70
IV.4.3 Hidrociclón con diámetro 50,8 mm.	74
IV.5 Valoración económica de las alternativas tecnológicas.....	81
IV.5.1 Cálculo de los índices de rentabilidad	86
Conclusiones parciales	89
CONCLUSION GENERAL	90

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la producción de zeolitas naturales ha experimentado un crecimiento sostenido debido a su probada utilidad como elemento natural utilizado en la conservación de semillas para la agricultura, en la fabricación de fertilizantes, en el tratamiento de aguas, mejoramiento y conservación de los suelos, producciones agrícolas protegidas, alimentación animal, tamiz molecular, en obras de la construcción, en la medicina como antibacteriano y su uso en las aplicaciones medioambientales gracias a su bajo costo y amplio espectro de sus aplicaciones (Blish, 2000; Rivera-Garza, 2000; Rabilero, 2002; Egret, 2004; Rodríguez-Iznaga, 2001; Rodríguez-Iznaga, 2000). Estas aplicaciones están relacionadas con las propiedades físicas y físico-químicas de las zeolitas, destacándose: la presencia de canales interconectados con movimiento de agua y cationes intercambiables, alto grado de hidratación y deshidratación, baja densidad y gran volumen de vacío, conductividad eléctrica, estabilidad térmica que permiten emplearlas como tamices moleculares, intercambio catiónico, adsorción de gases y vapores, así como catálisis (Gottardi, 1985; Benvimdo, 1994; Blish, 2000). El alto contenido de óxidos de hierro, metales pesados, vidrio volcánico, arcillas y otras fases ajenas a la zeolita constituyen impurezas en la mayoría de las rocas zeolíticas que influyen de manera negativa en los procesos industriales, principalmente en el área de la biotecnología, industria química y física, medicina, donde las limitaciones en su pureza genera un intercambio ineficaz, la actividad de las especies iónicas se modifican y las propiedades de selectividad bajan su eficiencia o alteran los resultados (Rodríguez- Fuentes, 2000).

La diversidad de sus aplicaciones implica una gran variedad de producciones, caracterizadas principalmente por su espectro granulométrico, como principal característica de calidad, el contenido no es un parámetro a considerar hasta la actualidad, comúnmente el procesamiento de las zeolitas naturales incluye las operaciones de reducción de tamaño mediante la

Tesis en opción del grado científico Doctor en Ciencias Técnicas al Ing. Mafefe Frazao Ndumba

trituration y la molienda, así como el cribado y la clasificación, posteriormente se emplean con fines industriales.

En el marco de las discusiones del curso-taller sobre las Zeolitas Naturales y su diversificación realizado en Guayaquil (Marzo, 2002) se planteó la necesidad de buscar fórmulas que conduzcan al logro de producciones de zeolitas naturales de mayor valor agregado, estabilizar la composición sustancial y aumentar el contenido de las fases zeolíticas mediante la concentración, lo que constituye un reto para el mundo científico.

En Cuba las plantas de tratamiento de zeolitas no aprovechan racionalmente las fracciones menores de 0,8 mm.

El beneficio de silicatos y aluminosilicatos es una actividad compleja debido a su alta capacidad de adsorción y similitud entre sus propiedades (Razumov, 1981).

Las investigaciones relacionadas con la zeolita han estado dirigidas a sus aplicaciones que la hicieron denominar mineral del siglo XX. En cuanto a la temática de concentración poco se ha hecho, algunos autores han tratado el tema entre los que se destacan: Hutchison, 1974; Ming y Dixon, 1987; Pabalan, 1994, emplearon líquidos densos como bromoformo y tetrabromoetano seguido de la separación magnética y electrostática para separar las fases férricas. Estos procesos no han tenido trascendencia industrial debido a la cinética del proceso que puede demorar días, alto costo y toxicidad de los reactivos empleados y las serias dificultades tecnológicas en su recuperación, que bien pudiera abaratar la tecnología.

Gennaro, 1997, enriqueció la zeolita tipo Chabacita por molienda diferencial, en la fracción menor de 45 μm , los resultados mostraron que para un tiempo de 5 min. se logra incrementar el contenido desde 60 hasta 85 %; en las rocas zeolíticas de Nápoles, Italia; Benvimdo y Pereira 2000, concentraron la zeolita mediante la molienda diferencial en el yacimiento de la cuenca de Parnaíba (Brasil), donde las arcillas se concentran en las fracciones menores de 74 μm , las zeolitas en la fracción (295–74) μm y el cuarzo en la fracción mayor de 295 μm ;

(Ranney, 1980), emplea sales para disolver los óxidos de hierro y luego la flotación de las fases amorfas elevando el contenido de zeolitas en un 10 %; como tamaño de molienda establece menores de 1 μ m. A nuestro juicio, el hecho de moler a este tamaño impone un alto consumo de energía en la molienda, vale destacar que para moler a un tamaño menor de 100 μ m, se requiere un consumo de 13,5 kw/h (Martins, 2005), lo que limita la aplicabilidad de este procedimiento.

La revisión de los conocimientos precedentes sobre la concentración de silicatos y aluminosilicatos de otros minerales con propiedades similares como el cuarzo en caolines, el estéril del carbón y arena sílice en otras menas con el empleo de hidrociclones, permitió considerar el empleo de esta tecnología con buenos resultados para el tratamiento de materiales de granulometría fina, (Austin, 1994; Linch, 1975; Weiss, 1982; Wills, 1982; Wills, 1998, 2006). En la literatura se reportan importantes experiencias sobre la utilización de los hidrociclones en la separación de minerales de diferentes densidades (Rao, 1975; Arterburn, 1982; Feursteneau, 2003).

De acuerdo a la revisión bibliográfica no se reporta la separación del cuarzo de las zeolitas y tampoco se ha encontrado alguna referencia de empleo de los hidrociclones para la concentración de las fases zeolíticas.

Las rocas zeolíticas del yacimiento Caimanes han sido caracterizadas fundamentalmente para su empleo en zeopónico y en aplicaciones medioambientales de los residuos de la industria cubana del níquel (Aguirre, 1999; Batista, 2005; Rodríguez-Iznaga, 2001; Rodríguez-Iznaga, 2000). A pesar del volumen de trabajos realizados el escaso empleo de técnicas modernas para cuantificar las fases mineralógicas, el no estudio del comportamiento térmico y otras caracterizaciones orientadas al beneficio de las rocas zeolíticas del yacimiento Caimanes ha sido uno de sus principales limitantes.

Tesis en opción del grado científico Doctor en Ciencias Técnicas al Ing. Mafefe Frazao Ndumba

Objeto de estudio: Las rocas zeolitizadas de un horizonte del sureste del yacimiento Caimanes.

Campo de Acción: La separación del Cuarzo de las rocas zeolitizadas.

Problema Científico: El conocimiento científico sobre el yacimiento Caimanes para el beneficio, limita la selección y desarrollo tecnológico para la concentración de las fases zeolíticas como resultado de la separación total o parcial de las fases de cuarzo.

Hipótesis

La identificación mineralógica cualitativa y cuantitativa de las fases presentes en las rocas zeolíticas, la determinación del grado de liberación de las partículas minerales y tamaño de los granos puede potenciar la evaluación de alternativas tecnológicas para la concentración de las fases zeolíticas.

Objetivo General:

Evaluar alternativas tecnológicas para la concentración de las fases zeolíticas del yacimiento Caimanes con el fin de obtener un producto de mayor valor agregado.

Objetivo específicos:

1. Determinar la composición mineralógica y propiedades de las rocas zeolíticas mediante el empleo de las técnicas de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, análisis térmico diferencial y otras técnicas que permitan una caracterización adecuada para tomar decisiones sobre alternativas de concentración de fases.
2. Evaluar las alternativas tecnológicas de molienda diferencial, flotación y concentración en hidrociclones de diferentes diámetros con ayuda de los diseños experimentales 3ⁿ para la separación del cuarzo presente en las tobas zeolíticas.

Tareas de investigación:

1. Toma y preparación de muestra.
2. Estudio mineralógico mediante: difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y análisis químicos y térmicos.
3. Determinación de la composición granulométrica.
4. Determinación del tamaño de grano y grado de liberación.
5. Concentración de fases zeolíticas por métodos de beneficio.
6. Valoración de la influencia de las variables de diseños de la tecnología empleada en las funciones de respuestas.
7. Valoración económica de las alternativas tecnológicas estudiadas.

NOVEDADES CIENTÍFICAS

1. Se identificó la presencia y predominio de la zeolita del tipo heulandita sobre la clinoptilolita en la zona sureste del yacimiento Caimanes.
2. Se establece que para un tiempo de molienda en seco de 5 min, se concentra la clinoptilolita en la fracción menor de 74 μm , y en la fracción mayor de 74 μm se concentra la heulandita.
3. Se establece la viabilidad de la separación del cuarzo de la roca zeolitizada en hidrociclones de fondo plano, el contenido de zeolita alcanza 94 - 95 % y el cuarzo disminuye a 5 % en el material reboso. Se establece que con el aumento del diámetro del hidrociclón el valor del coeficiente de determinación y de correlación aumentan y con ello la linealidad de los modelos.

CAPÍTULO I.- MARCO CONCEPTUAL

Introducción

En el presente capítulo se realiza un análisis de los diferentes aspectos relacionados con los temas que son discutidos en la bibliografía consultada con el fin de disponer de los elementos básicos y las tendencias actuales que resultan esenciales para el desarrollo del trabajo, el estado del arte de la concentración de fases zeolíticas a partir las rocas zeolitizadas mediante la molienda diferencial, flotación y la separación gravimétrica, procesos tradicionalmente aplicados para su beneficio dirigidos a la separación de fases no zeolíticas como óxidos de hierro y arcillas, principalmente.

I.1 Estado del arte de la concentración mediante molienda diferencial

A pesar de las consecuencias energéticas que genera el proceso de molienda Andréiev, (1980); Austin y Concha, (1994), está dirigido fundamentalmente a lograr el grado de liberación adecuado del material y la concentración bajo el efecto de la molienda diferencial. Existe una diferencia marcada en la dureza de las dos fases principales: de 4 y 7 en la escala de Mohs para la fase zeolítica y el cuarzo respectivamente y la particularidad en la molibilidad de cada mineral, Coello-Velázquez, 1993, confirma la hipótesis de Fuesterman, (1962), para los minerales lateríticos y sobre la base de la sistematización de numerosos trabajos que plantean la tesis sobre la individualidad en la molienda de los minerales. Menéndez-Aguado, (2007), plantean que los minerales se muelen de acuerdo a sus propias regularidades, Martins, (2005), estableció el índice de Bond para las rocas zeolíticas del yacimiento de Caimanes. El consumo energético en su tratamiento mediante la molienda de la zeolita es menor al comparar con los resultados de la caliza blanda, caliza dolomitizada y la arenisca según Rosell, (2004); Benvimdo, (2000), para las rocas zeolíticas del yacimiento de la cuenca de Parnaíba (Brasil), se logró concentrar mediante la molienda las arcillas en las

Tesis en opción del grado científico Doctor en Ciencias Técnicas al Ing. Mafefe Frazao Ndumba

fracciones menores de 74 μm , las zeolitas en la fracción 295–74 μm y el cuarzo en la fracción mayor de 295 μm , luego separó los óxidos de hierro mediante flotación por espumas con colectores catiónicos como las aminas primarias y almidón como depresor; Gennaro, (1997), enriqueció la chabacita por molienda diferencial concentrándola en la fracción menor de 45 μm , los resultados mostraron que para un tiempo de 5 min, se logra incrementar el contenido de la chabacita desde 60 a 85 %; la fracción pobre en contenido de zeolita se separa empleando separadores magnéticos y electrostático para las rocas zeolíticas de Nápoles, Italia; Rodríguez- Fuentes, (1997), empleó el método conocido como cama fluidizada para la purificación de zeolitas cubanas empleando el lavado para la separación de fases arcillosas por reboso.

I.2 Estado del arte de la concentración de silicatos y aluminosilicatos por flotación

Otras investigaciones dirigidas a la concentración la desarrollaron los autores que a continuación describimos para diferentes yacimientos en el mundo: Pabalan (1994), para el yacimiento de clinoptilolita en la región de Death Valley Junncción en California, usó un procedimiento establecido por Mehra y Jackson (1960), para extraer óxidos y arcillas, disolvió los óxidos de hierro con sales de sodio, dionato, bicarbonato y citrato sobre la base la formación de complejos de hierro donde las zeolitas se mantienen inertes, se logra extraer el 50 % de los óxidos; Hutchison (1974), reporta la separación de fases férricas y otras ajenas a las zeolitas con el empleo de líquidos densos de carácter inertes como la mezcla de Bromophorm, tetrabromoethano y NN-dimetil formamida, por la diferencia de densidades. Ranney (1980), reporta la separación de elementos amorfos mediante el proceso de flotación, con el empleo de sales solubles y la condición necesaria de tamaño de molienda inferior a 1 μm ; Ming y Dixon (1987), aprovechan la densidad de la clinoptilolita y clase granulométrica que varía entre 2-50 μm , para separar los óxidos de hierro y material orgánico de las rocas zeolíticas con el empleo de líquidos densos, en zeolitas del sur de Texas, USA. Aunque los

resultados fueron relativamente satisfactorios, el hecho del empleo de líquidos densos limita su trascendencia; las tres fases acompañantes son los óxidos de hierro, arcillas y cuarzo fundamentalmente.

Para establecer el régimen de reactivo se tuvo en cuenta en investigaciones precedentes de la separación del cuarzo de otros aluminosilicatos, como el feldespato principalmente en medio ácido-básico con colectores catiónico y aniónicos, como oleato de sodio, dodecylamina, cocoamina, Aeromine a razón de 100-300 g/t; (Manser, 1975; Dudenkov, 1980; Benvimdo, 1998; Vidyadhar, 2002; Sekulić, 2004). Los reactivos que actúa como depresores para feldespatos se recomiendan los cloruros de: calcio, sodio y potasio del grupo alcalino terreo en dependencia del catión que más predomine, este reactivo es dosificado a concentraciones de 5-10 kg/t, (Razumov, 1981; Blazy, 1984; Sayilgan, 2004), el silicato sódico a 600-1000 g/t como depresor y activar la superficie del feldespato con metales alcalinos. (Bayat, 2006; Orhan, 2006), como reguladores del medio se emplean sales de carbonato de calcio, óxido de calcio e hidróxido de sodio a razón de 1-5 kg/t, con pH ligeramente alcalino de 7-10 y en medio ácido pH (2-3.5), reducido con ácido sulfúrico y fluorhídrico. Los espumantes el Mertil Isobutil Carbinol, Aerofroth, Aceite de pino entre 70-100 g/t; (Sekulić, 2004; King, 1982; King, 2001; Bozkurt, 2005), la velocidad de rotación del impelente varía en la flotación para el acondicionamiento 1000-1500 rpm, mientras en la flotación este varía entre 650-800 rpm, para las mejores condiciones de aireación de la pulpa con una previa atricción a 60-75% de concentración de sólidos y para el proceso de flotación varía 20 a 30 % de sólido (King, 1982; Razumov, 1981; Hiçyilmaz, 2004). La activación de cuarzo se realiza por cationes de níquel, cobalto, cobre, magnesio y del grupo alcalino térreo. Estudio de zeta-potencial para los iones de calcio revelan una relación directa de la concentración con la adsorción de los cationes en la superficie del cuarzo (Fornasiero, 2005; Grau, 2005).

I.3 Empleo de los hidrociclones en la clasificación de minerales.

Los hidrociclones en las plantas de tratamiento de minerales han tomado un auge considerable, donde la problemática ambiental se agudiza y las dificultades en el tratamiento de fracciones finas. Las ventajas de esta tecnología están marcadas en el aprovechamiento del espacio para las instalaciones, mínimo consumo de energía, diseño sencillo y ausencia de elementos móviles; los hidrociclones están compuestos de material polietileno resistente a la abrasividad y la oxidación, bajo consumo energético alta productividad varía entre 0,2–100 m³/h y la posibilidad de empleo de baterías de hidrociclones trabajando en paralelo, la ausencia de reactivos lo hacen muy competitivo. Entre los principales proveedores y productores aparecen Australia, Chile, USA, Japón, (Redrut, 2002; Bouso, 1998; Bradley, 1965).

La principal función de su diseño es la separación de partículas según su tamaño y el deslame en circuito cerrado de molienda, previa a la flotación u otros procesos de beneficio, también en la separación de minerales de diferentes densidades como los metales preciosos (Bradley, 1965; Bergström, 2006; Wills, 1998; Wills, 2006; Lynch, 1975; Arterburn, 1982). El principio de operación se basa en la velocidad de sedimentación de una partícula sólida en un campo centrífugo, la alimentación tangencial de la pulpa a una presión determinada provoca un movimiento helicoidal de la emulsión que genera una fuerza centrífuga que permite expulsar las partículas al exterior de este con la ayuda del flujo de aire ascendente, las fracciones de menor tamaño no son capaces de superar la resistencia del fluido y son arrastradas por el torbellino ascendente, producto de la elevación del aire atmosférico y descargado a reboso junto a la mayor parte del agua, las partículas gruesas logran atravesar la resistencia del fluido y llegan a chocar con las paredes la fuerza centrífuga acelera su velocidad en sentido de la fuerza de gravedad, (King, 2001; King, 2000; Austin, 1994). En los equipos de clasificación centrífugos no ocurre una clasificación ideal (perfecta) independientemente de la composición granulométrica y las propiedades físicas de los minerales constituyentes de la mena. La

eficiencia de la clasificación se ve influida por el efecto “pared” y el efecto dispersivo del fluido, turbulencia con influencia negativa, en la figura I.1 se muestra un hidrociclón convencional.

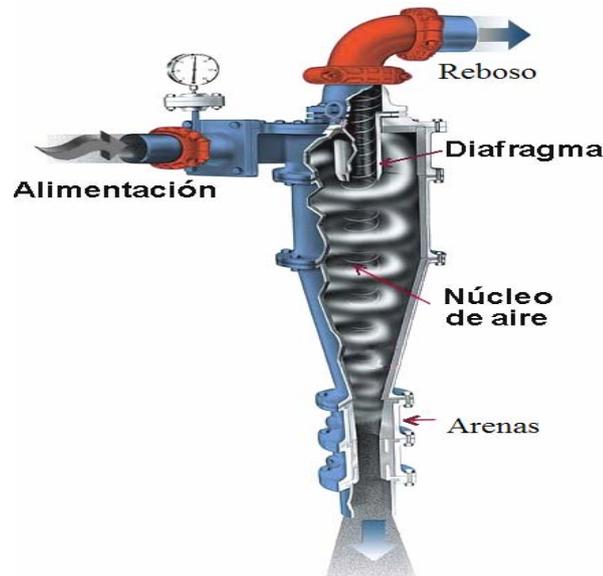


Figura I.1 Vista de un hidrociclón convencional, (King, 2001).

Lynch et al., (1977) y Pires et al., (1980) al experimentar con hidrociclones con diámetro de 100 hasta 300 mm establecieron que la curva de partición para hidrociclones geoméricamente iguales no varía. Ya anteriormente (Lynch y Rao, 1975), habían confirmado que los hidrociclones geoméricamente iguales tienen similares valores de rendimiento independientemente de las características del mineral.

I.4 Empleo de los hidrociclones en la concentración de minerales.

La separación gravitacional y centrífuga se emplea ampliamente en la concentración de metales pesados, como diamantes y oro. Existen experiencias importantes en el enriquecimiento de la ilmenita en yacimiento de placeres, la eliminación de arcillas y carbón con tamaños de 200 a 20 μm (Feursteneau, 2003; Bergström, 2006; Gray, 1997). La separación de los minerales en hidrociclones según la diferencia en la velocidad de sedimentación en un medio depende de muchos factores que se asocian a la densidad de los minerales, densidad del medio, forma y dimensiones de las partículas, las fuerzas externas que

actúan sobre las partículas producidas entre el choque entre las partículas, efecto pared, fuerza de gravedad y de empuje según, Austin y Concha, 1994. Las investigaciones realizadas en la concentración de minerales en hidrociclones se han basado fundamentalmente en el efecto de sedimentación contrariada fenómeno que ocurre cuando la concentración de sólido es superior al 15 %, (Swanson, 1989; Wills y Napier-Mun, 2006; Linch, 1975). En este régimen se incrementan el efecto de la densidad en la separación, mientras que los que trabajan en régimen de sedimentación libre emplean suspensiones diluidas, para incrementar el efecto del tamaño en la separación como se ilustra en la figura I.2 y I.3, (Weiss, 1982; Feursteneau, 2003).

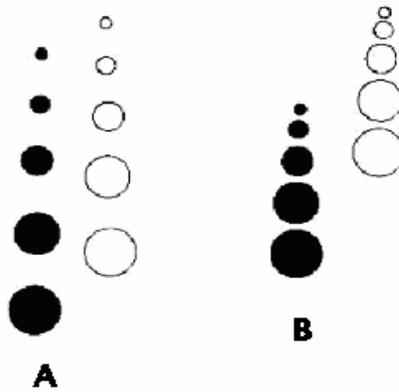


Figura I.2 Velocidades de caída de minerales en el fluido
(a) Sedimentación libre, (b) Sedimentación contrariada

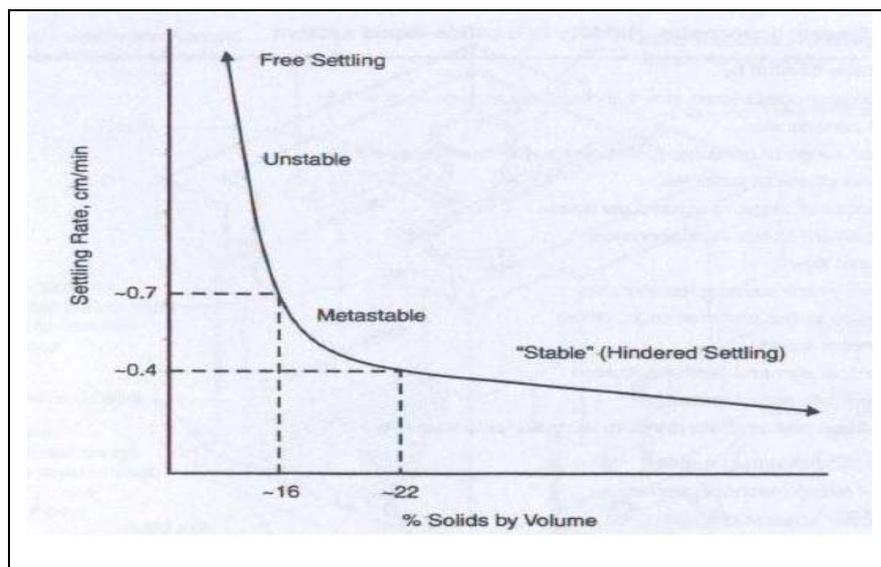


Figura I.3 Efecto de la concentración de sólidos en la sedimentación libre y contrariada

Es práctica habitual el empleo de hidrociclones en la separación de cuarzo en caolines. La literatura reporta que más del 40 % de los carbonos en Estados Unidos se concentran en hidrociclones. En los hidrociclones de fondo plano (Circulating Bed Cyclone), el tubo fluidizado genera dos tipos de flujos: uno de arriba hacia abajo en la zona cercana a las paredes y de abajo hacia arriba en la zona central, adicionalmente se crean flujos radiales desde la pared al centro en el fondo del hidrociclón. Estos fenómenos son aprovechados en la concentración gravimétrica. La experimentación de los hidrociclones para la clasificación y concentración de minerales ha permitido establecer la diferencia en forma constructiva de la parte cónica, como se muestra en las figuras I.4 y en la figura I.5 se muestra los hidrociclones de fondo plano.

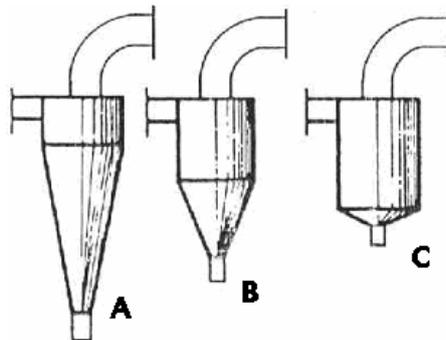


Figura I. 4 Diferentes tipos de hidrociclones: **a-** Espesamiento; **b-** clasificación; **c-** concentración

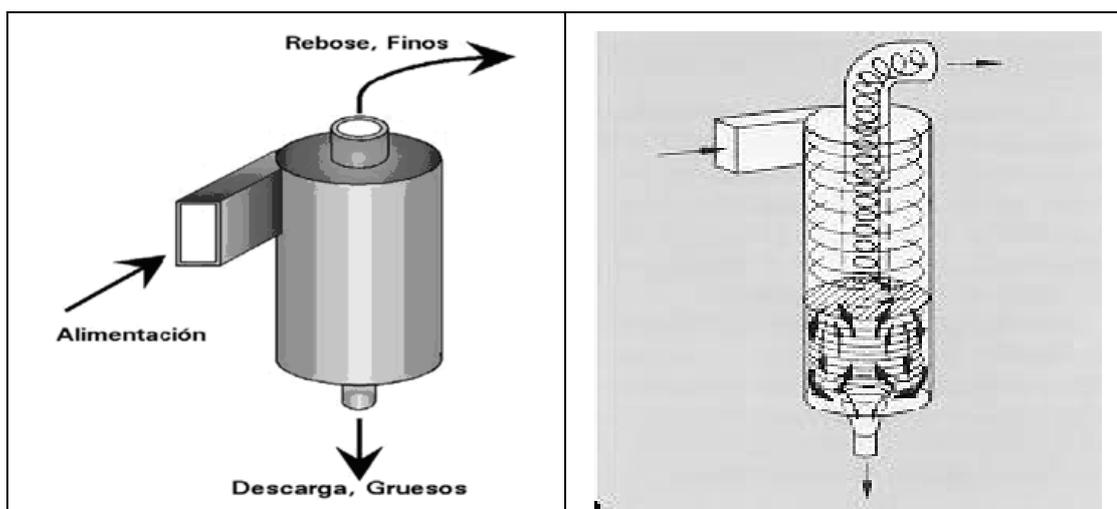


Figura I. 5 Hidrociclones de fondo plano

En los hidrociclones de fondo plano el lecho fluido que se crea en el fondo actúa como un colchón que amortigua las variaciones en la concentración de sólidos de la alimentación, lo que permite mantener estable el tamaño de corte y una clasificación selectiva de diferentes minerales, el enriquecimiento al producto descargado como grueso. Otra ventaja de estos equipos es la separación existente entre los flujos del torbellino secundario ascendente y el primario descendente y el empleo de una extensión que permite un mayor tiempo de residencia del material en el interior que permite una sedimentación controlada en régimen de sedimentación contrariado, (Weiss, 1982; Wills, 2006; Bouso, 1999; Bouso, 1998; Redrut, 2002).

1.5 Generalidades sobre las zeolitas naturales

Las zeolitas naturales son aluminosilicatos con una estructura tridimensional de tetraedros de SiO_4 , que queda cargada negativamente al sustituirse algunos de los átomos de silicio por aluminio trivalente. La carga iónica equilibra con iones mono, bi y hasta tri-valentes, una de las características principales de las estructuras de las zeolitas que no la poseen otros aluminosilicatos, su armazón es abierta con anchas cavidades que pueden estar interconectadas una con otras. Estas se rellenan de agua a través de la cual viajan los cationes para ocupar distintas posiciones. Estas particularidades condicionan las propiedades de la zeolita como intercambiadores iónicos naturales, la habilidad para adsorber y desorber agua y gases (Mark, 2003; Roque, 1988; Rosell, 2007; Rodríguez-Fuentes, 2000; Rivera, 2000; Rivera, 2000; Velázquez, 2002). Estudios realizados por el Instituto de Materiales y Reactivo de la Universidad de la Habana (IMRE), indican que los grandes productores de las zeolitas sintéticas tienen comprados los mayores yacimientos de zeolitas naturales en varias regiones del mundo, dificultando así el mercado y obstaculizando el desarrollo científico (Rodríguez-Fuentes y Montes, 2000).

El estudio sobre las zeolitas fue iniciado tempranamente por el mineralogista, Frederick Cronsted en 1756, dada la importancia y diversidad de sus usos, el estudio de las zeolitas sigue siendo de gran interés para un grupo importante de investigadores y productores, sus características formidables lo hicieron llamar “El mineral del siglo XX”. En los años 50 pasaron de las curiosidades a minerales industriales por el gran descubrimiento que significó para las ciencias geológicas, el pertenecer a rocas sedimentarias, en la actualidad se han reportado más de 1000 yacimientos de zeolitas en casi 40 países, (Rodríguez- Fuentes, 2000; Triana, 1992; Benvimdo, 1994). Todavía en los años cuarenta los investigadores ingleses pensaban que era mineral escaso en su estado natural y por su importancia se desarrollaron las zeolitas sintéticas en sustitución de las zeolitas naturales, el grupo natural es mayormente empleado y comercializado en bruto. Las zeolitas naturales están junto a las arcillas y carbones activados los solventes más baratos y la clinoptilolita es la variedad más abundante (Barley, 1999), en la tabla. I.1 se muestran las principales variedades de zeolitas naturales y sus fórmulas químicas.

Tabla I.1 Principales zeolita naturales y su composición química (Blish, et al., 2000)

Zeolita	Código	Fórmula idealizada	CIC meq/g	Si/Al
Chabacita	CHA	$\text{Ca}_6 [\text{Al}_{12} \text{Si}_{24} \text{O}_{72}]. 40 \text{H}_2\text{O}$	3,9	1,43-4,18
Erionita	ERI	$\text{Na}_2 \text{K}_2 \text{Mg} \text{Ca}_{1,5} [\text{Al}_{19} \text{Si}_{27} \text{O}_{72}]. 27 \text{H}_2\text{O}$	2.8	3,05-3,99
Clinoptilolita	CLIN	$\text{Na}_3 \text{K}_3 [\text{Al}_{16} \text{Si}_{30} \text{O}_{72}]. 20 \text{H}_2\text{O}$	2,2	2,92-5,04
Heulandita	HEU	$\text{Ca}_4 [\text{Al}_8 \text{Si}_{28} \text{O}_{72}]. 24\text{H}_2\text{O}$	3.2	2,85-4,31
Mordenita	MOR	$\text{Na}_8 [\text{Al}_8 \text{Si}_{40} \text{O}_{96}]. 24\text{H}_2\text{O}$	2,29	4,19-5,79
Phillipsita	PHI	$\text{Na}_2 \text{K}_2 \text{Ca} [\text{Al}_6 \text{Si}_{16} \text{O}_{32}]. 12\text{H}_2\text{O}$	4,49	1,45-2,87
Faujasite	FAU	$\text{Na}_{20} \text{Ca}_{12} \text{Mg}_8 [\text{Al}_{60} \text{Si}_{132} \text{O}_{384}]. 235\text{H}_2\text{O}$	3,6	-----

I.6- Estado del conocimiento del yacimiento Caimanes.

En Cuba existen depósitos de rocas zeolitizadas en casi todas las provincias y regiones geográficas, destacándose los siguientes yacimientos: La Pita, Tasajeras, el Chorrillo, San Andrés, Palmarito del Cauto y Caimanes. El yacimiento Caimanes fue estudiado a finales de los años 80 por especialistas del ISMM y de la Geominera de Oriente de manera conjunta en un sector con área de aproximadamente 1 km² como se muestra en la figura I.6, por medio de una red de exploración compuesta por perfiles de 150 m y pozos a 50 m. Los principales resultados de este trabajo fueron publicados por (Orozco, 1996; Orozco, 2002). Se estableció que las tobas del sector estudiado están compuestas principalmente por zeolita del tipo Clinoptilolita producto de la alteración del vidrio volcánico, además se reportó la presencia de Mordenita asociada a las zonas de agrietamiento. Como fases minerales subordinadas se reportaron la Plagioclasa, Cuarzo y Montmorillonita, ésta última aumenta con la profundidad de corte geológico que se representa en la figura I.7.

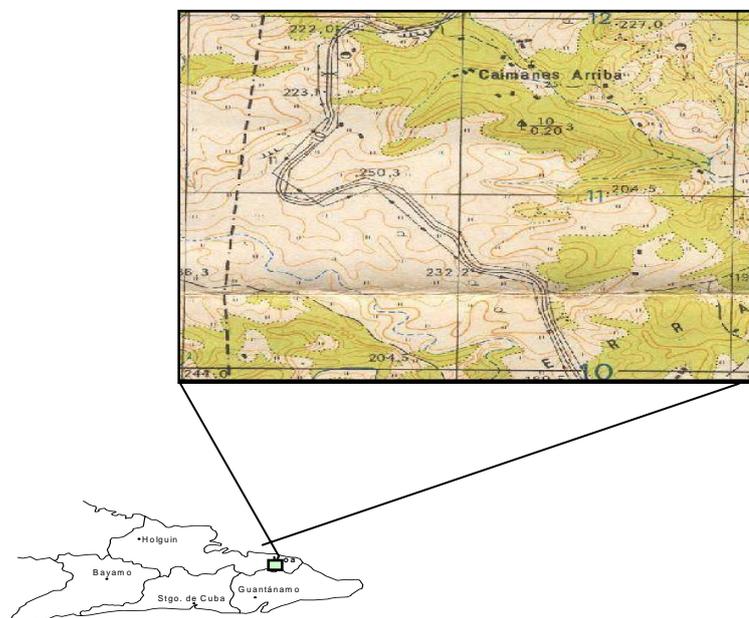


Figura I.6 Mapa de ubicación y topográfico del sector evaluado del yacimiento Caimanes, Moa

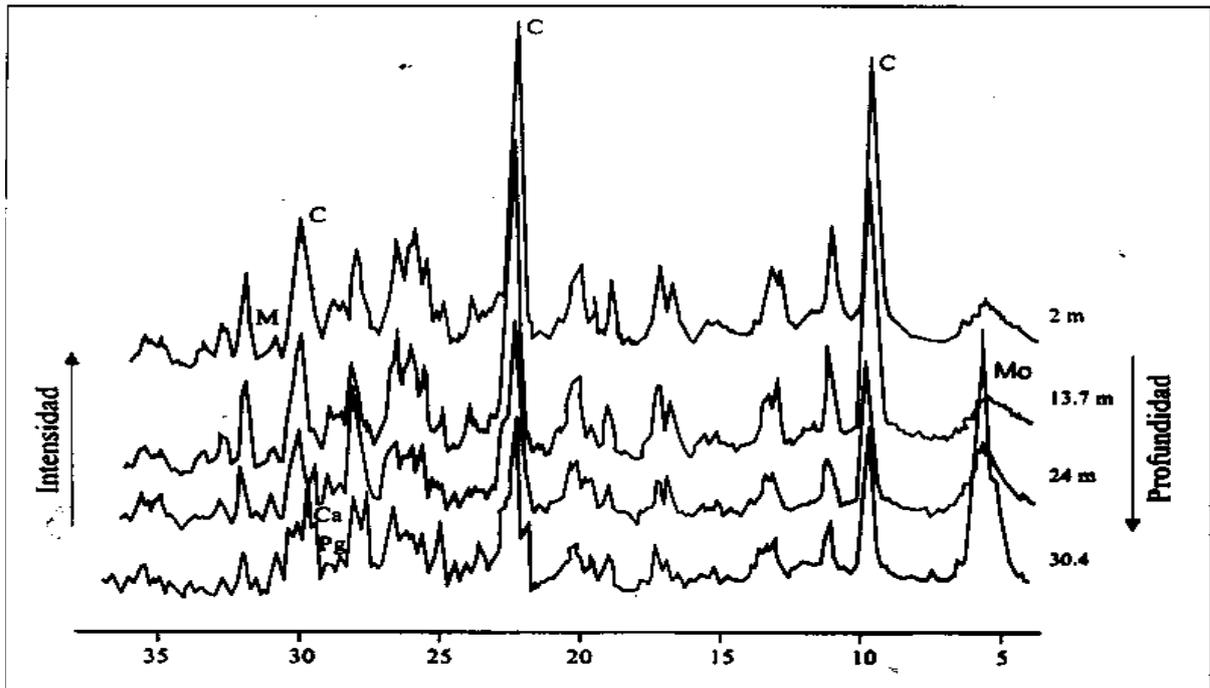


Figura I.7 Difractogramas reportados por Orozco, 1996

En 1989 fue explotada una cantera de rocas zeolíticas en el yacimiento Caimanes en el sector que no fue caracterizado geológico ni mineralógicamente, distante de 1,5 km, al sur del sector previamente estudiado. Estas rocas zeolitizadas se emplearon en el zeopónico del Cupey , Moa. Los resultados de capacidad de intercambio catiónico del material extraído fueron muy buenos lo que demuestran la homogeneidad y estabilidad de las rocas zeolíticas por el rumbo. Otros autores, han empleado muestras puntuales de rocas zeolíticas del mismo yacimiento para el tratamiento de residuales, (Aguirre, 1999; Rodríguez-Iznaga, 2001; Rodríguez-Iznaga, 2000), utilizando con éxito la capacidad de intercambio catiónico. Según ellos el mineral predominante era la Clinoptilolita; (Batista, 2005), utilizó una muestra tomada de la cantera abandonada del yacimiento Caimanes para su empleo en el secado del sulfuro producido por la Empresa Ernesto Che Guevara. No se reporta en la bibliografía consultada algún trabajo de caracterización dirigido al beneficio de las rocas zeolitizadas ni al estudio térmico del mismo material.

Conclusiones parciales.

1. En el caso de las rocas zeolíticas los métodos empleados para la concentración de las fases zeolíticas se relacionan con la molienda diferencial y la flotación principalmente. Aunque existen algunas referencias sobre la concentración mediante el uso de líquidos densos, su trascendencia industrial está fuertemente limitada por el efecto nocivo, alto costo y recuperación de dichos líquidos.
2. No se reporta en la literatura consultada el empleo de hidrociclones para la concentración de fases zeolíticas, pero si en otras menas de propiedades similares como en caolines y carbones donde han mostrado su uso para concentrar minerales con un costo relativamente bajo.
3. Es insuficiente el conocimiento científico sobre la caracterización de las rocas zeolitizadas del yacimiento Caimanes para su beneficiabilidad.

CAPÍTULO II. - MATERIALES Y MÉTODOS.

Introducción

Los experimentos se desarrollaron en los laboratorios del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y de la Escuela Universitaria de Ingenierías Técnicas de Mieres de la Universidad de Oviedo. En el capítulo se abordan los siguientes aspectos:

1. Caracterización de los principales equipos, medios de medición, y materiales que fueron utilizados, durante el desarrollo del trabajo.
2. Exposición de las principales técnicas y procedimientos utilizados durante el trabajo experimental.

Entre los principales equipos y métodos utilizados en los ensayos de laboratorio encontramos: trituradoras de mandíbulas para la reducción de tamaño de la muestra investigada, el empleo del método del anillo y el cono y divisores de Johnson en la homogenización y cuarteo, así como balanzas, molino, hidrociclones, máquina de flotación y un grupo importante de técnicas analíticas que como la difracción de rayos X, la microscopia electrónica de barrido, Análisis térmico y fluorescencia de rayos X, etc. Los resultados de la investigación se corroboraron en varios laboratorios de importantes Universidades Brasileñas y Alemanas, entre otras Instituciones del país.

II.1 Muestreo y preparación de las muestras

II.1.1 Toma de la muestra y reducción de tamaño

La muestra para la investigación fue tomada en el horizonte superior de una cantera del yacimiento Caimanes compuestas por tobas vítreas alteradas al grupo de minerales zeolíticos. El método de muestreo empleado es por surco a toda altura del talud de 3 m aproximadamente como se muestra en las figuras II.1 y II.2, la muestra tomada tiene una masa de 1 t.



Figura II.1. Vista de la zona de toma de muestra en la cantera del yacimiento Caimanes, Moa



Figura II.2 Base del talud; se observa el típico color verde de las rocas y grietas rellenas por óxidos de hierro

La muestra en su totalidad fue sometida a un proceso de reducción de tamaño en dos etapas de trituración, empleando trituradoras de mandíbulas primaria (TQ₁) y secundaria (TQ₂) con

Tesis en opción del grado científico Doctor en Ciencias Técnicas al Ing. Mafefe Frazao Ndumba

alimentación de 100 y 20 mm y la descarga de 20 y 3,15 mm, como se muestra en las figuras II.3 y II.4. La descarga de la segunda etapa de trituración se emplea una criba de control con tamaño de corte de 3,15 mm, el material retenido fue recirculado. El producto cernido del proceso de cribado fue homogenizado y cuarteado empleando el método del anillo y el cono representados en las figuras II.5 y II.6.

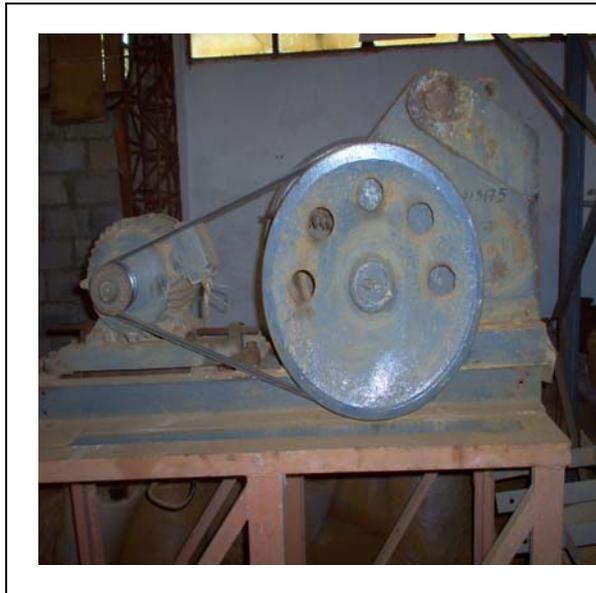


Figura II.3 TQ (320x165) mm



Figura II.4 TQ (150x75) mm



Figura II.5. Homogenización y cuarteo por el método del anillo y el cono.

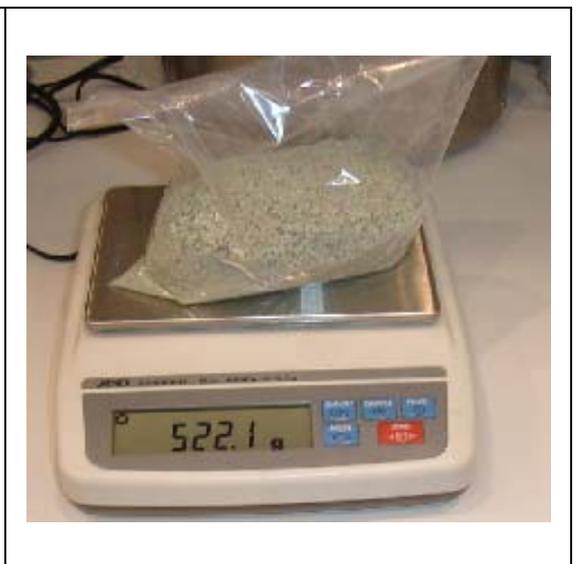


Figura II.6. Balanza Sartorio, empleada en el pesaje del material cuarteado

Durante el proceso de homogenización y cuarteo de las muestras se emplearon divisores de Johnson de diferentes escalas que se muestran en las figuras II.7; II. 8; II. 9 y II. 10, con el objetivo de mitigar el error de muestreo y lograr una composición homogénea de la masa y su representatividad.



Figura II. 7 Balanza técnica. Pesaje de muestra



Figura II. 8 Divisor de Johnson

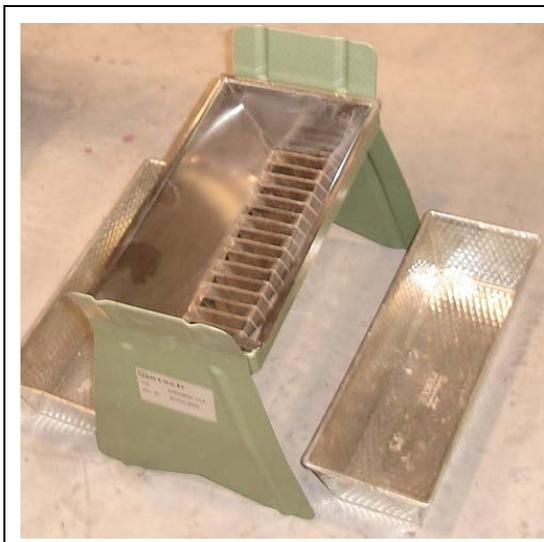


Figura II. 9 Divisor de Johnson



Figura II. 10 Divisor de Johnson

Las muestras fueron cuarteadas hasta alcanzar una masa de 600 g y empaquetadas en bolsas de plástico para las pruebas analíticas, estudios de la caracterización y el posterior desarrollo de la investigación. En la figura II.11, aparece el esquema de homogenización y cuarteo empleado.

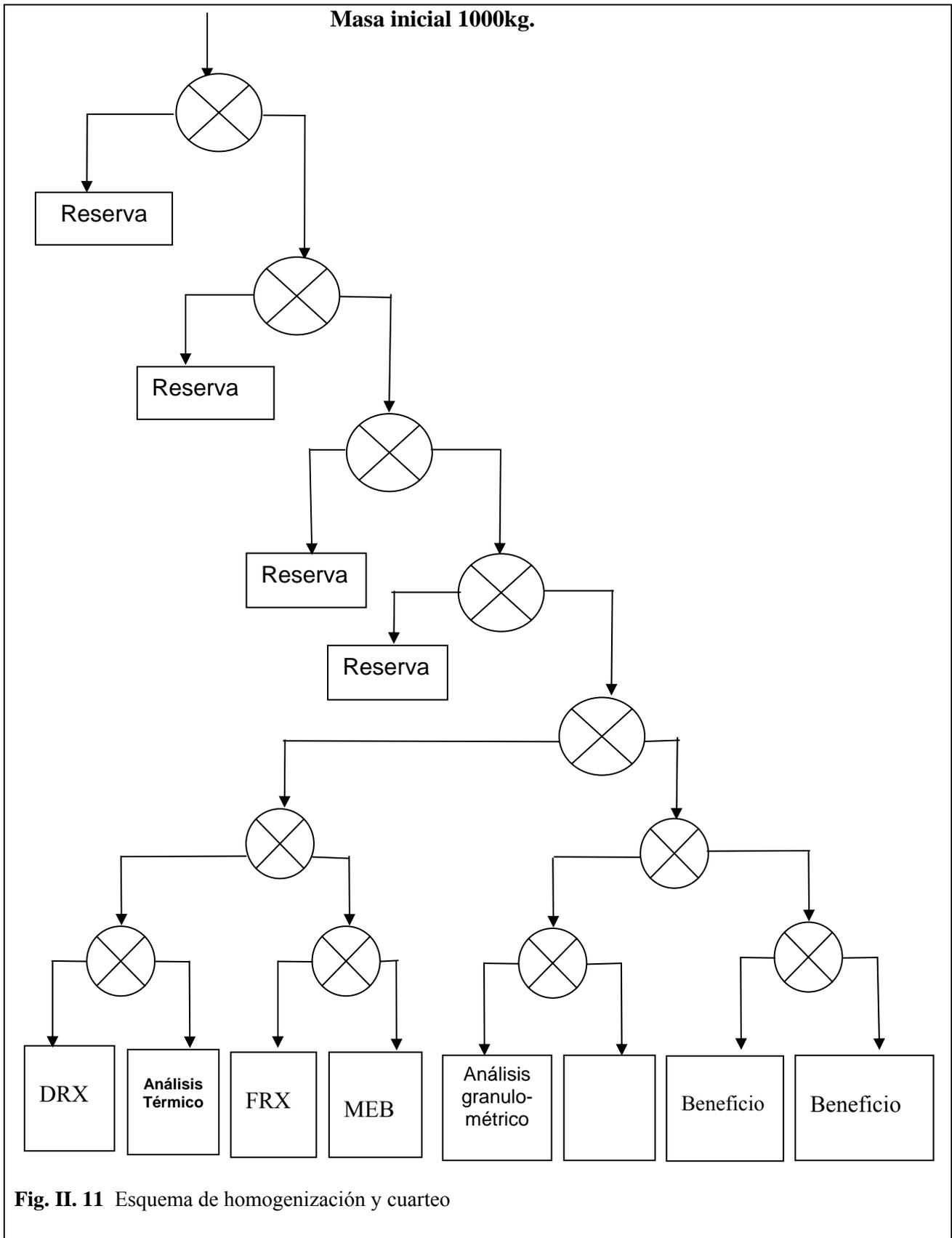


Fig. II. 11 Esquema de homogenización y cuarteo

II.2 Métodos empleados en la caracterización de la muestra inicial y los productos del beneficio.

II.2.1 Empleo de la difracción de RX para determinar la composición mineralógica.

Las muestras fueron pulverizadas por debajo de los 20 μm para eliminar los errores de micro absorción, empleando un mortero de ágata y con ayuda de un molino analítico de laboratorio tipo RS 100 como se muestra en la figura II.12. Los análisis se realizaron con los siguientes equipos: Difractómetro HZG-4, con radiación CoK_{α} , y X'Pert MPD que se representa en la figura II.13.

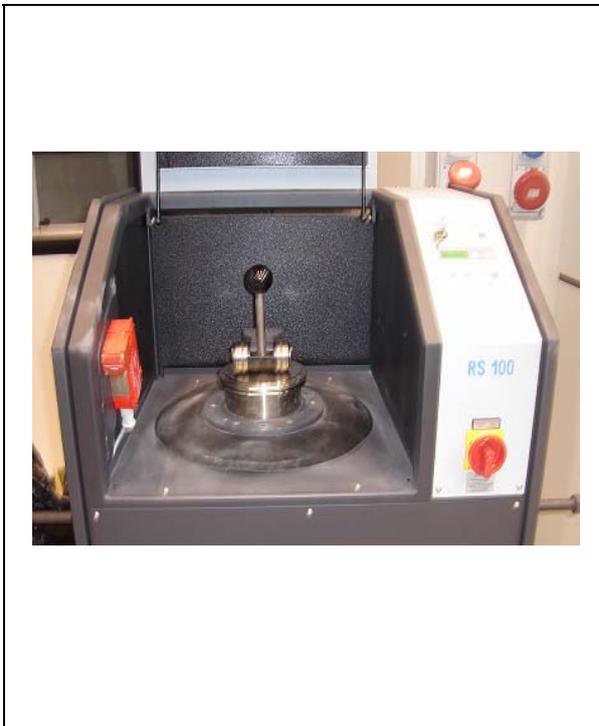


Figura II. 12 Molino analítico tipo RS100



Figura II. 13. Difractómetro X'Pert

II.2.2 Estudio del comportamiento térmico de las muestras

Las técnicas de análisis térmicos diferencial (ATD) y termogravimétrico (ATG), fueron empleadas con el objetivo de evaluar la presencia de fases arcillosas de difícil identificación mediante la difracción de rayos X, se empleó una muestra de 12-14 mg, la velocidad de calentamiento fue de 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ desde la temperatura inicial de 25 $^{\circ}\text{C}$ hasta los 1100 $^{\circ}\text{C}$ con el equipamiento conjugado de TG y ATD según modelo PL-STA Thermal Science.

II.2.3 Análisis cualitativo de la muestra inicial y productos del beneficio.

Para determinar la composición sustancial y las fases mineralógicas presentes en la muestra se emplearon los diferentes difractogramas obtenidos por la técnica de difracción de rayos X, los que fueron interpretados utilizando los software Analyze, de la firma alemana Seifert y el software High Store (2002), de la firma holandesa Philips con la base de datos de la Internacional Center for Diffraction Data de 1998 (ICDD).

II.2.4 Análisis cuantitativo de la muestra inicial y los productos finales.

Se empleó el software Autoquan de la firma Seifert y a manera de control se utilizó el método de patrones de difracción-absorción con el uso de coeficientes de absorción, esta metodología es aplicada en el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM) de la norma (NC ZZ: 2005), para la cuantificación de zeolitas tipo: Clinoptilolita-Heulandita y Mordenita. Con el objetivo de validar el contenido de Cuarzo en la muestra, se tomó una muestra patrón de características conocidas del material de sílice pura, mineral proveniente de la Mina Sílice la Cuesta de la región de Asturias, España, para los análisis cualitativos y cuantitativos.

II.2.5 Estudio de las muestras por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).

Con el objetivo de estudiar el tamaño, el grado de entrecrecimiento, la textura y morfología de los granos de los minerales presentes, se empleó la técnica de la MEB, con un microscopio electrónico de barrido ABT 55 (ISI).

II.2.6 Determinación de la composición química de las muestras

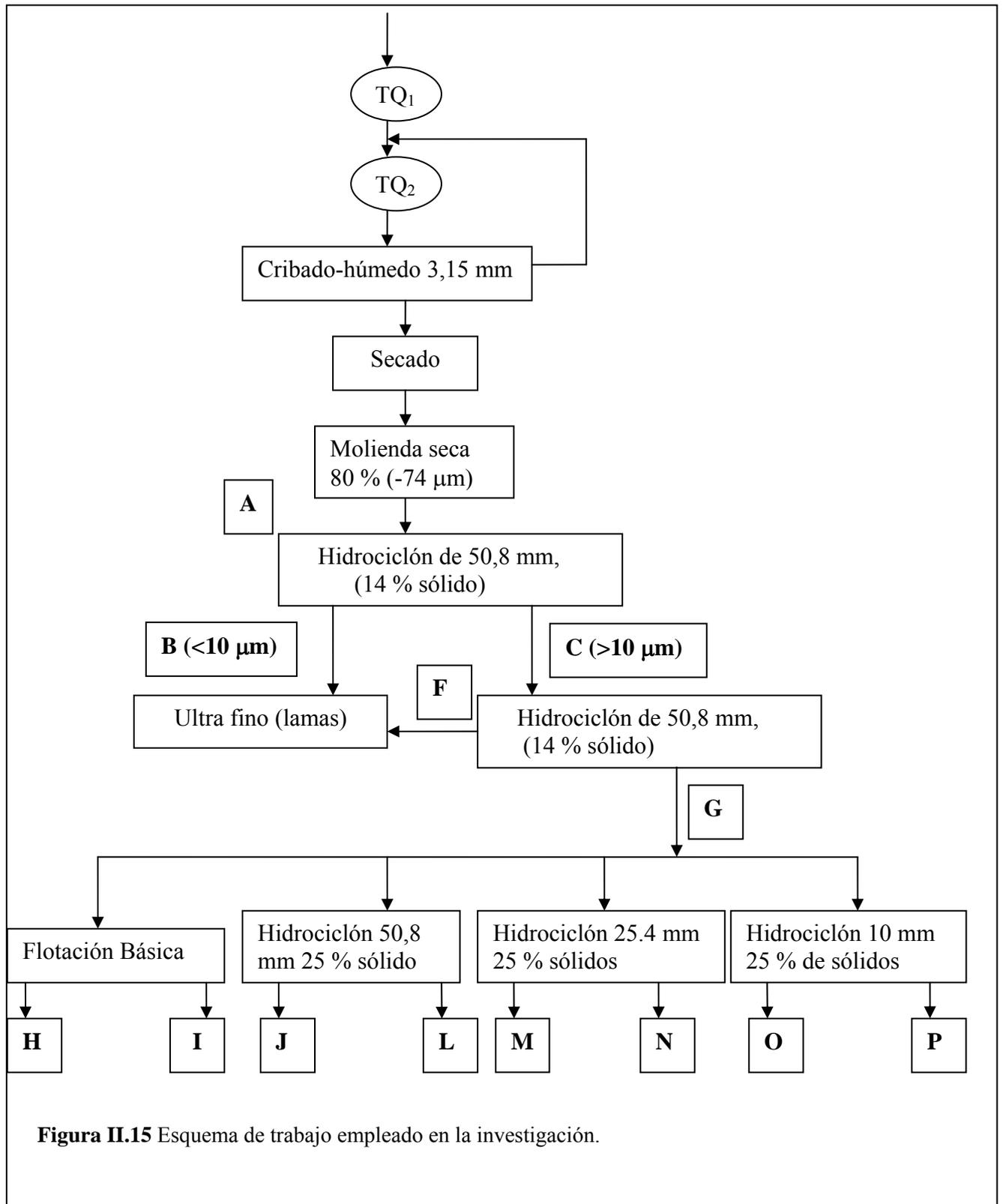
La composición química de la muestra inicial de roca zeolitizada, así como de los productos obtenidos se efectúa por la técnica de fluorescencia de RX, en el equipo modelo PW-2404 de la marca Philips que se muestra en la figura II.14.



Figura II. 14 Equipo de fluorescencia de rayos X, modelo PW-2404

II.3 Procedimientos empleados en la preparación mecánica y el beneficio

En la figura II.15 se muestra el esquema de trabajo y las alternativas tecnológicas seleccionadas durante la investigación y una secuencia de las operaciones y procesos así como los productos finales de cada operación. Se tritura el material en TQ₁ y TQ₂, luego se criba con tamiz de corte de 3,15 mm, recirculando el retenido, el producto cernido se alimenta al proceso de molienda, hasta que el material logre más del 80% del material en la clase menor de 74 μm , con posterioridad se clasifica mediante el hidrociclonado en dos etapas (producto A y C) para eliminar las fracciones menores de 10 μm (fango), y se almacena como ultra finos (producto B + F). El producto de las arenas del hidrociclonado con tamaño de grano superior a 10 μm (producto G), se envía a las etapas de concentración en hidrociclones y flotación básica. Los productos J, M y O simbolizan el producto reboso y la nomenclatura L, N y P, simboliza la arenas para los hidrociclones de diámetros 10; 25,4 y 50,8 mm, mientras que los productos H, I, representan las espumas y las colas de la flotación por espuma respectivamente.



II.3.1 Determinación de la composición granulométrica

La composición granulométrica se determinó mediante el análisis de tamices, por vía húmeda, teniendo en cuenta el tamaño máximo de la descarga de la segunda etapa de trituración, basándose en la serie de Taylor $\sqrt{2}$, se seleccionó los tamices de diámetros: (3,15; 2; 1,25; 0,8; 0,51; 0,25; 0,16; 0,074; 0,044) mm, en la tamizadora eléctrica modelo AS 200 (Figura II.16), para determinar la masa mínima del análisis granulométrico se empleó la ecuación II.1 (Andreiev, 1980).

$$Q_{\text{mínima}} = 0,02(d)^2 + 0,5d \quad \dots\dots\dots\text{II.1}$$

Donde:

d- diámetro máximo de alimentación, (mm).

$Q_{\text{mín}}$ - masa mínima, (Kg).



Figura II.16. Tamizadora Retsch AS-200

El material es secado en una estufa durante 30 min a una temperatura que varía en entre 90-100 °C, luego se determina los índices tecnológicos. Para el pesaje se utilizó una balanza digital y para el secado del material se utilizó una estufa automática a una temperatura de 100 °C, que se muestra en la figura II.17 y II.18 respectivamente.



Figura II.17. Balanza digital modelo sartorio **Figura II.18.** Estufa eléctrica automática

II.3.2 Estudio de liberación de la fases mineralógicas mediante el proceso de molienda

El objetivo principal del proceso está dirigido al estudio de la diferencia en la molibilidad de los minerales presentes, determinar el grado de liberación de las partículas y el tiempo de molienda óptimo.



Figura II.19 Molino de bolas (19.5 x 18.5)

Para los ensayos de cinética de la molienda se empleó el molino de bolas como se indica en la figura II.19, con dimensiones de 18,5 x 19,8 cm., trabajando a 90 rpm, con una carga de bolas de diferentes diámetros y un grado de llenado del molino de 45 % como se indica en la metodología.

Determinación de la carga de bola y características constructivas del molino por la expresión II.2

$$D = 28 \sqrt[3]{d}$$

$$D = 28 \sqrt[3]{3,15} = 41,04 \approx 40mm \quad \dots\dots\dots (II.2)$$

D- diámetro de la bola máximo; mm

d- diámetro máximo alimentado al molino; mm

La masa de la carga de bolas fue determinada por la expresión II.3

$$M_b = \delta_b \varphi V \quad \dots\dots\dots (II.3)$$

Donde:

δ_b : Densidad de las bolas (tomamos 4,06 g/cm³, para bolas forjadas de acero)

φ : Grado de llenado de bolas en el molino, 45 %

V_{mol} : volumen interior del molino, cm³

$$V_{mol.} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{4} \quad \dots\dots\dots (II.4)$$

$$V_{mol.} = 5693,4 \text{ cm}^3$$

Donde d -diámetro del molino, (19,8 cm.); h- altura del molino, (18,5 cm). Se determina la masa de carga de bolas, considerando la carga de bolas como el 45 % del volumen del molino

Donde 4,06 es la densidad de las bolas, (g/cm³); φ -grado de llenado de las bolas en el molino, (45 %), el volumen que ocupa el mineral debe estar entre el 60 y 90 % del volumen de los espacios entre bolas Coello-Velázquez, (1993); Andréiev, (1980).

$$V_{mat.} = (0,6 - 0,9) \cdot V_{eeb} \quad \dots\dots\dots (II.5)$$

Siendo V_{eeb} _ volumen de los espacios entre bolas; (cm³)

$$V_{eeb} = V_{c.b.} - V_{t.b.} \quad \dots\dots\dots (II.6)$$

Siendo $V_{t.b.}$ _ volumen total de las bolas; (cm^3)

$$V_{t.b.} = \Sigma V_b. \dots\dots\dots (II.7)$$

Sustituyendo en (II.6), el volumen de los espacios entre bolas es:

$$V_{eb} = V_{mol} - V_{tb} \dots\dots\dots$$

Sustituyendo el valor del volumen de los espacios entre bolas en (II.5) y considerando que el material ocupa el 70 % de dichos espacios, se obtiene:

$$V_{mat.} = V_{tb} \cdot 0.7; cm^3 \dots\dots\dots (II.8)$$

Se determina la masa de mineral a alimentar al molino por la expresión II.9.

$$M_{ali.} = \rho_{mat.} \cdot V_{mat.} \dots\dots\dots (II.9)$$

Donde $\rho_{mat.}$ -es la densidad del material; (g/cm^3). $M_{ali.}$ -es la masa que se alimenta al molino en kg, que es de 0,6 kg para los ensayos de cinética de la molienda se emplearon los tiempos, 5; 10; 15; 20; 25; 30 min, con una carga de bolas representada en la tabla II.1.

Tabla. II.1 Datos de la carga de bolas de molino empleado en el estudio de liberación de las fases mineralógicas.

Φ bolas (mm)	Nº de bolas.	Masa (g)	% masa
38.1	12	2725	30
31.75	19	2500	26
25.40	32	2155	23
22.25	44	1990	21
Total	162	9370	100

El producto molido a diferentes tiempos se evaluó la liberación de los granos minerales empleando por un microscópico óptico y con ayuda de una lupa electrónica para reproducir las imágenes.

II.3.3 Clasificación de los minerales mediante hidrociclones

Para el experimento se emplea un hidrociclón Mozley y mediante las curvas de partición que se muestra en la figura II.20. Donde se seleccionaron los diámetros de los tubos de reboso y arenas correspondientes para un corte de las partículas en 10 μm , así como la presión de alimentación recomendada para establecer las condiciones experimentales y se garantice la mayor eficiencia de la clasificación, con el objetivo de eliminar lamas ó ultra finos perjudiciales al proceso de concentración en hidrociclones y flotación principalmente.

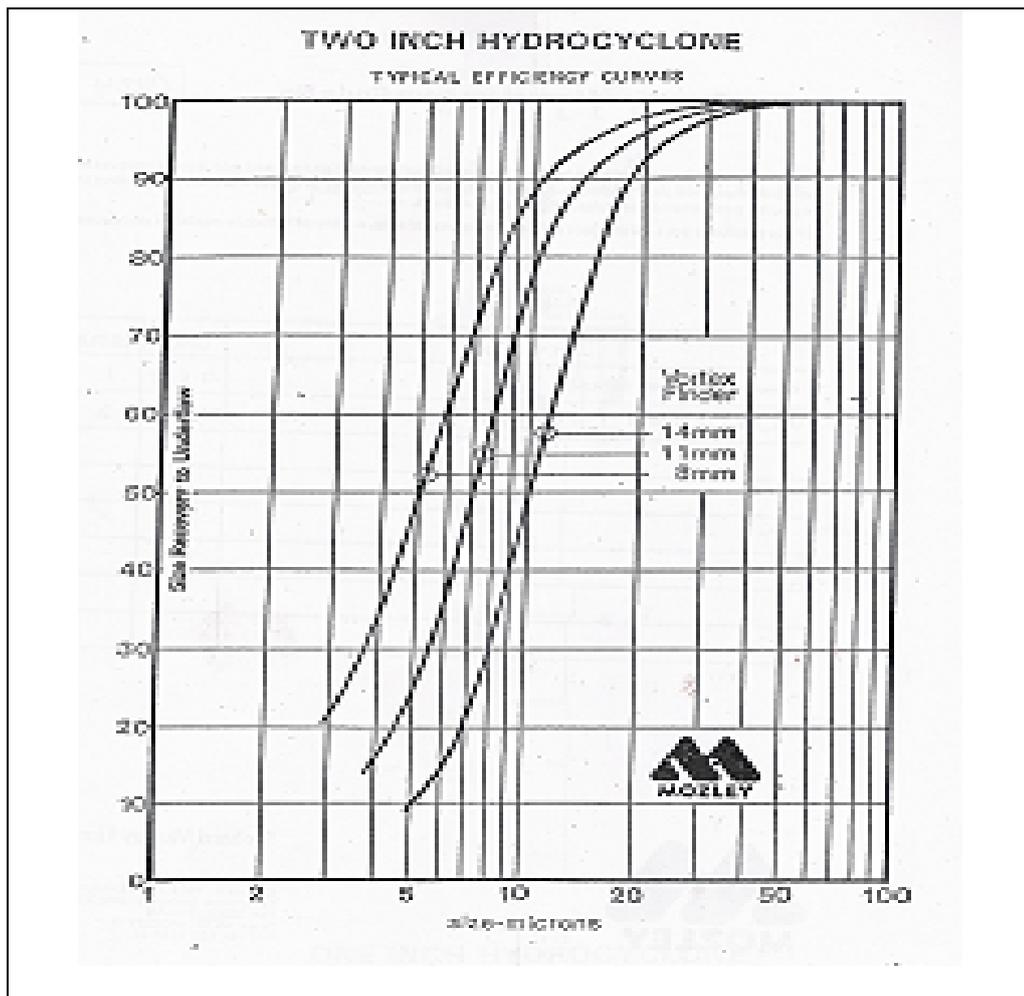


Figura II.20 Curvas de partición del fabricante Mozley.

El equipo es accionado por una bomba Mono Merlín, montada en banco y un motor eléctrico de 1,5 kw, el diámetro del hidrociclón es de 50,8 mm y tronco cónico como se indica en la figura II.21, el diámetro de reboso seleccionado es de 14,3 mm, y de la arenas 4,5 mm, la relación líquido sólido empleada es de 14 %, con una presión de alimentación que varía entre 20 - 40 kpa (Redrut, 2002). El tiempo de acondicionamiento de la pulpa se tomó de 10 min, se tuvo en cuenta la estabilidad de la electricidad y abastecimiento de agua para el montaje del banco de ensayo de tipo continuo.



Figura II. 21 Hidrociclón 50,8 mm fondo cónico (C124) empleado en el deslamado.

Para el éxito en la operación se recomienda abrir la llave de drenaje para cambiar el agua y evacuar los finos acumulados en el fondo de la cámara que pudieran contaminar el producto y tener el recipiente de agitación limpio, cerrar la llave de drenaje y llenar el tanque del hidrociclón con agua hasta 35 litros. Abrir la válvula bypass y asegurarse de que está cerrada la de alimentación al hidrociclón. Encender el motor manteniendo el agua en agitación durante 2 min, luego añadir 5 kg de material zeolítico de forma dosificada con el 80 % de la

clase menor de 74 μm , debidamente homogenizado y cuarteado, dejando en agitación la suspensión durante 10 min para el acondicionamiento de la pulpa y homogeneidad del material. Luego se abre la válvula de alimentación al hidrociclón, cerrando paulatinamente la válvula bypass y controlando la presión mediante el manómetro hasta valores de presión de (20-40) kpa, se debe esperar 3 min, para estabilizar la presión y luego tomar muestras simultáneas en las arenas y reboso empleando dos recipientes tarados, obteniéndose dos productos. Se realiza un análisis granulométrico de control en un tamiz de corte 25 μm y evaluar la efectividad de la operación posteriormente la muestra tomada es secada, y esta operación, se repite en un segundo ciclo en iguales condiciones de operación para el material de las arenas. El producto reboso se caracteriza y se almacena como ultra finos mientras las arenas de la segunda etapa de la clasificación se envía al proceso de flotación básica y concentración en hidrociclones.

II.4 Concentración de las fases zeolíticas.

II.4.1 Ensayos de flotación por espumas.

En este proceso para la separación del cuarzo de las fases zeolíticas Heulandita y Clinoptilolita se seleccionó los reactivos con el objetivo de modificar la tensión superficial de las partículas ya liberadas en el proceso de molienda, para el proceso se empleó una máquina de flotación Humbolt Wedag y una celda de 1 litro ver figura II.22.

Se tuvo en cuenta el control de las variables establecidas en la planificación de los experimentos como los tipos de reactivos y su dosificación, la limpieza de las celdas y del rotor eliminando cualquier tipo de contaminación. El mineral posee el 80 % del material en la clase menor de 74 μm , previamente deslamado en hidrociclones y secado, se pesa una masa de 333,3 g, se atricciona a 70 % de sólido y 1000 rpm durante 5 min, para limpiar las superficies de los granos y un lavado posterior sobre tamiz de 25 μm , para el proceso se

Tesis en opción del grado científico Doctor en Ciencias Técnicas al Ing. Mafefe Frazao Ndumba

emplea una relación líquido sólido de 28 % con velocidad del impelente de 750 rpm, durante 3 min. Seguidamente se dosifica el hidróxido de calcio a una concentración de 5 kg/t, como regulador del medio y activador, se agita durante 1 min manteniendo el pH entre 7- 8 unidades; se añade el cloruro de calcio a razón de 5-10 kg/t como depresor, luego se añade el colector seleccionado la dodecylamina diluido al 10 % a razón de 100-300 g/t, se agita durante 2 min, el espumante Metil Isobutil Carbinol y Oreprer 3030 a concentraciones de 70-100 g/t, se agita durante 3 min. Posteriormente se abre la válvula mecánica para el paso del aire y comienza el proceso de flotación y extracción de espumas con una paleta de polietileno durante 8 min.



Figura II. 22 Máquina de flotación Hombolt Wedag

II.4.2 Concentración en Hidrociclones

Los ensayos de concentración en hidrociclones se basaron en un experimento factorial completo. Se seleccionó un banco de hidrociclones Mozley para la separación de fases

zeolíticas y de cuarzo, para la selección de los tipos de hidrociclones se tuvo en cuenta los reportes de literatura sobre los diámetros de hidrociclón recomendado para el tratamiento de fracciones finas y para la selección del diámetro del tubo de reboso y las arenas, se tuvo en cuenta los valores estandarizados por los fabricantes y de experiencias en caolines que garantiza la homogeneidad en el movimiento del fluido a diferentes presiones de alimentación (Bouso, 1998, 2000, Mular y Bhappu, 1980; Lynch, 1977). La presión de alimentación varía entre 10 y 30 PSI, a valores de presión superior produce una sobrecarga en el diafragma del hidrociclón provocando ruptura del mismo Redruct, (2002); Bouso, (1990, 1998). Los hidrociclones seleccionados fueron con diferentes diámetros: 10; 25,4 y 50,8 mm como se representa en la figura II.23, los de diámetro de 10 y 25,4 mm son convencionales (tronco cónicos), mientras el de diámetro 50,8 mm es de fondo plano como se muestra en la figura II.24.

Todos los ensayos se realizaron con una concentración de sólido del 25 %, para un régimen de sedimentación contrariada donde aumenta el efecto de separación por la diferencia de densidad no por tamaño del grano.



Figura II. 23 Hidrociclones de diámetro: 50,8 mm (fondo plano y cónico), 25,4 mm y 10 mm; (de izquierda a derecha).



Figura II. 24 Hidrociclón de diámetro 50,8 mm y fondo plano con extensión

Durante los ensayos de laboratorio se tuvo en cuenta como principal propiedad la diferencia entre sus densidades que es de 2,18 y 2,65 g/cm³, diferencia poco notable para su separación en procesos de concentración gravimétrica, en este grupo los hidrociclones a diferencia de otros procesos de flujo horizontal, ejerce mayor influencia la fuerza centrífuga que duplica la velocidad de las partículas no así solo la fuerza de gravedad en flujo vertical. Para el ensayo se ajusta los parámetros y condiciones de las variables independientes establecidas en el diseño del experimento: diámetro del hidrociclón, diámetro de los tubos de reboso y de las arenas así como la presión de alimentación y tipo de hidrociclón.

Se debe abrir la llave de drenaje para cambiar el agua, evacuando los finos acumulados y limpiar el recipiente con una alimentación de agua corriente, luego se llena el tanque con 20 litros de agua y se enciende el motor con agua en agitación, posteriormente se cierra la llave de alimentación al hidrociclón y se abre la llave bypass, se procede a la dosificación del

Tesis en opción del grado científico Doctor en Ciencias Técnicas al Ing. Mafefe Frazao Ndumba

material con una masa total de 5 kg del producto arenas de la segunda etapa de clasificación previamente secado. Se agita el producto durante 10 min, se garantiza la homogenización de la pulpa para un 25 % de sólido, se procede a tomar muestras de manera simultánea en el reboso y las arenas para un tiempo de muestreo de 3 min, en un periodo de 1min constante, luego se toman dos réplicas del mismo material a una alimentación constante y se registran las condiciones experimentales y el peso de la pulpa. Se debe resaltar que es un experimento continuo donde no varían las condiciones iniciales para todo el experimento, el material es secado a temperatura de 90-100 °C,

el producto final es homogenizado y cuarteado en divisores de Johnson, se toma una muestra representativa y se muele en molino de ágata para la caracterización del material por difracción de rayos X e interpretados y evaluados por los software Analyze para obtener los datos cualitativos y Autoquan para los datos cuantitativos que permiten determinar los índices tecnológicos del beneficio de minerales.

II.5 Planificación de los experimentos

II.5.1 Planificación de experimento de flotación

El método utilizado para el estudio de las variables dependientes e independientes y establecer las condiciones óptimas de experimentación fue aleatorio, basándose en los regimenes de reactivos empleados en la flotación de cuarzo con otros aluminosilicatos. En el ensayo se optimizan los factores operacionales de forma independiente teniendo en cuenta las variables más influyentes como el consumo del colector, depresor, espumante, manteniendo constante un grupo de variables no menos importantes en los niveles reportados en la literatura consultada como: la velocidad de rotación del impelente, concentración del activador y regulador del medio, la concentración de sólidos, temperatura y pH. Los resultados de los productos finales se comparan entre el concentrado y las colas, donde con posterioridad se

evalúan los contenidos iniciales y finales de cuarzo y zeolita. En la tabla II.2, se muestran las variables independientes seleccionadas y la variación de los mismos. La flotación se realiza en pruebas batch.

Tabla II.2 Variables independientes y concentraciones empleadas en el experimento de flotación

Variables independientes	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 7
Espumante Orepreg 3030 (100 g/t)	100	100	x	x	X	X	X
Espumante (MIBC) (100-200) g/t	x	x	100	100	200	100	100
Depresor CaCl ₂ (5-10 kg/t)	5	5	5	10	10	5	5
Activador Ca OH (5 kg/t)	5	5	5	5	5	5	5
Colector Dodecylamina (100- 300) g/t	100	300	100	200	200	300	200

II.5.2 Planificación de experimentos para la concentración en hidrociclones

Para el estudio de la concentración en hidrociclones se emplea el experimento factorial completo (EFC), esta permite evaluar la influencia de todas las variables de la matriz y sus interacciones, así como establecer el modelo matemático del experimento.

1- Se determinó la cantidad mínimo de ensayo mediante la expresión:

$$N = \emptyset^k$$

$$N = 3^3 = 27$$

N- número de ensayos;

\emptyset - cantidad de niveles

k- cantidad de factores

2 – La elección de las variables independientes se muestran en la tabla II.3

3 - Teniendo en cuenta las variables de entrada son 27 ensayos para cada tipo de hidrociclón para un total de 81 ensayos. Al sumar las tres réplicas correspondientes de cada ensayo suman un total de 243 condiciones de ensayos representados en la tabla II.4.

Tabla. II. 3 Variables independientes empleadas en el experimento factorial completo

Variables independientes	Diámetro del Hidrociclón (mm)		
	10,0	25,4	50,8
Diámetro de la tobera de reboso (mm)	3,2; 2,6; 1,0	7,0; 5,5; 3,0	14,3; 11,1; 8,0
Diámetro de la tobera de arenas (mm)	2,0; 1,5; 1,0	3,2; 2,2; 1,5	4,7; 6,3; 8,0
Presión alimentación (kpa)	69; 138; 206	69; 138; 206	69; 138; 206

4 -Los resultados fueron sometidos al tratamiento matemático – estadístico con ayuda del software Statgraph 5,1 para el análisis de varianza y regresión múltiple. Todas las pruebas se desarrollaron de manera continua, los ensayos de concentración en hidrociclones se realizan en instalaciones continuas.

Tabla II. 4 Matriz del experimento factorial completo empleado en la investigación

Número de ensayo	Diámetro reboso (mm)	Diámet arenas (mm)	Presión (kpa)	Diámetro reboso (mm)	Diámetro arenas (mm)	Presión (kpa)	Diámetro reboso (mm)	Diámetro arenas (mm)	Presión (kpa)
Hidrociclón de 10 mm			Hidrociclón de 25,4 mm			Hidrociclón de 50,8 mm			
1	3,2	2	69	7	3,2	69	14,3	4,7	69
2	3,2	2	138	7	3,2	138	14,3	4,7	138
3	3,2	2	206	7	3,2	206	14,3	4,7	206
4	3,2	1,5	69	7	2,2	69	14,3	6,3	69
5	3,2	1,5	138	7	2,2	138	14,3	6,3	138
6	3,2	1,5	206	7	2,2	206	14,3	6,3	206
7	3,2	1	69	7	1,5	69	14,3	8	69
8	3,2	1	138	7	1,5	138	14,3	8	138
9	3,2	1	206	7	1,5	206	14,3	8	206
10	2,6	2	69	5,5	3,2	69	11,1	4,7	69
11	2,6	2	138	5,5	3,2	138	11,1	4,7	138
12	2,6	2	206	5,5	3,2	206	11,1	4,7	206
13	2,6	1,5	69	5,5	2,2	69	11,1	6,3	69
14	2,6	1,5	138	5,5	2,2	138	11,1	6,3	138
15	2,6	1,5	206	5,5	2,2	206	11,1	6,3	206
16	2,6	1	69	5,5	1,5	69	11,1	8	69
17	2,6	1	138	5,5	1,5	138	11,1	8	138
18	2,6	1	206	5,5	1,5	206	11,1	8	206
19	1	2	69	3	3,2	69	8	4,7	69
20	1	2	138	3	3,2	138	8	4,7	138
21	1	2	206	3	3,2	206	8	4,7	206
22	1	1,5	69	3	2,2	69	8	6,3	69
23	1	1,5	138	3	2,2	138	8	6,3	138
24	1	1,5	206	3	2,2	206	8	6,3	206
25	1	1	69	3	1,5	69	8	8	69
26	1	1	138	3	1,5	138	8	8	138
27	1	1	206	3	1,5	206	8	8	206

CAPÍTULO III. - DISCUSION E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA INICIAL.

III.1 Composición mineralógica determinada por Difracción de Rayos X

Al interpretar los difractogramas empleando el software Analyze, las fases mineralógicas principales identificadas fueron zeolitas del tipo Heulandita y Clinoptilolita minerales isoestructurales y de manera subordinada aparece el Cuarzo como se muestra en la figura III.1. Este resultado constituye una novedad científica reportado en esta investigación, ya que por vez primera se reporta la presencia de la heulandita en las tobas zeolitizadas del yacimiento Caimanes. Este mineral tiene una relación Si/Al < 4, y los valores de la capacidad de intercambio cationico es de 3,2 meq/g superior a la capacidad de intercambio de la Clinoptilolita y Mordenita y notándose diferencias mineralógicas con los resultados reportados en investigaciones precedentes.

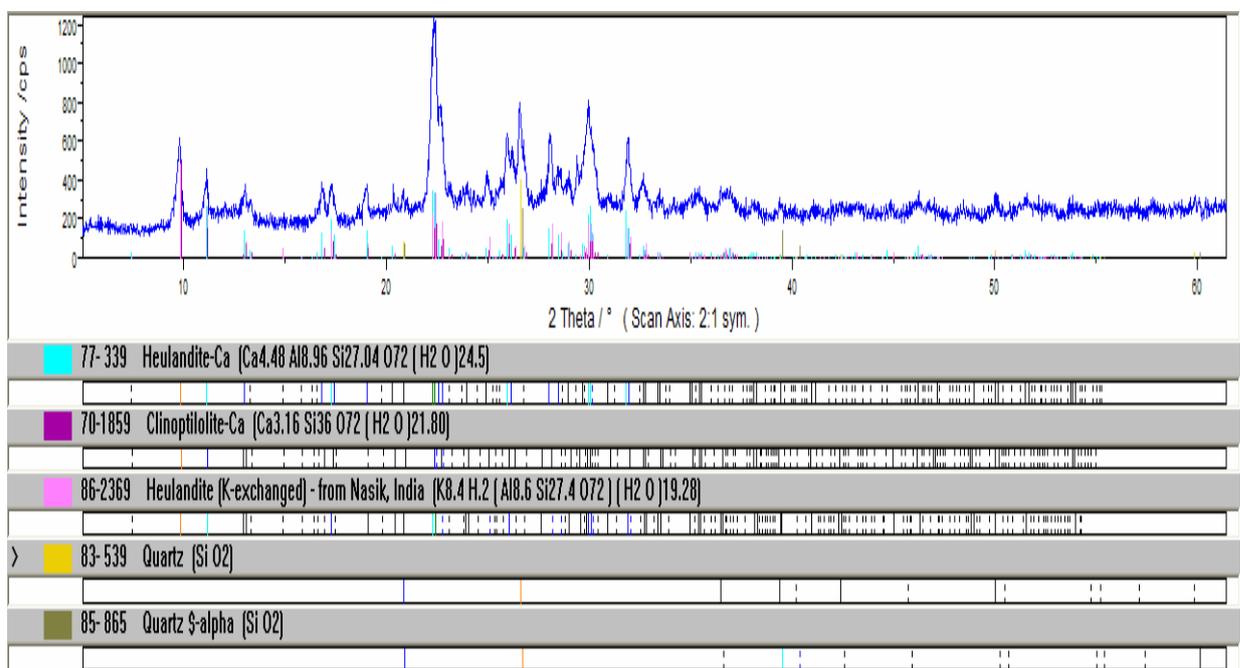


Figura III.1 Análisis cualitativo de la muestra inicial. (Software Analyze).

Las diferencias en la composición mineralógica de la muestra analizada en este trabajo con respecto a las investigaciones anteriores podrían explicarse porque la toma de la muestra se

realizó en el horizonte superior del corte geológico, que tiene bajo contenido de arcillas y mayor contenido de las fases zeolíticas en el yacimiento Caimanes.

III.2 Análisis cuantitativo de la muestra inicial

Los resultados apuntan a la presencia de minerales del grupo de las zeolitas de tipo heulandita-clinoptilolita con un contenido que oscila entre un 80 y 85%, con un error permisible de 5% en la determinación y el cuarzo tiene un contenido que varía entre el 14-15%, con un error del 1%. El reporte sobre la presencia y predominio de la heulandita es un resultado novedoso para este yacimiento que no se había reportado con anterioridad en investigaciones de otros autores, por vez primera se reporta en la figura III.2.

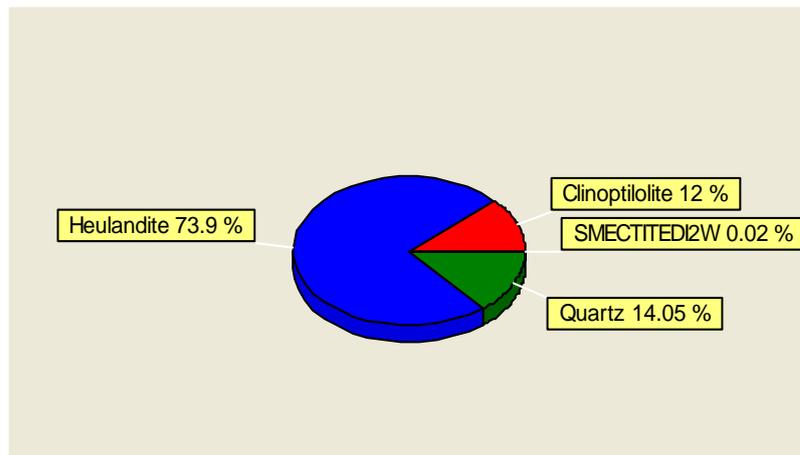


Figura III. 2 Resultado del análisis cuantitativo de la muestra inicial

El contenido de zeolita se corroboró con análisis cuantitativos realizados por otros métodos que dieron un contenido entre 78 - 83%. Al comparar ambos resultados se valoró positivo y aceptable al tener un margen de error del 5%, permisible para la confiabilidad de los mismos. Para comprobar la fiabilidad de los resultados cuantitativos del contenido del cuarzo se investigó una muestra de sílice pura, los resultados se observan en la figura III.3, donde solo se observan picos de cuarzo y los resultados cuantitativos obtenidos con el software Autoquan se dan un valor de 99,4 % de sílice, ver la figura III.4.

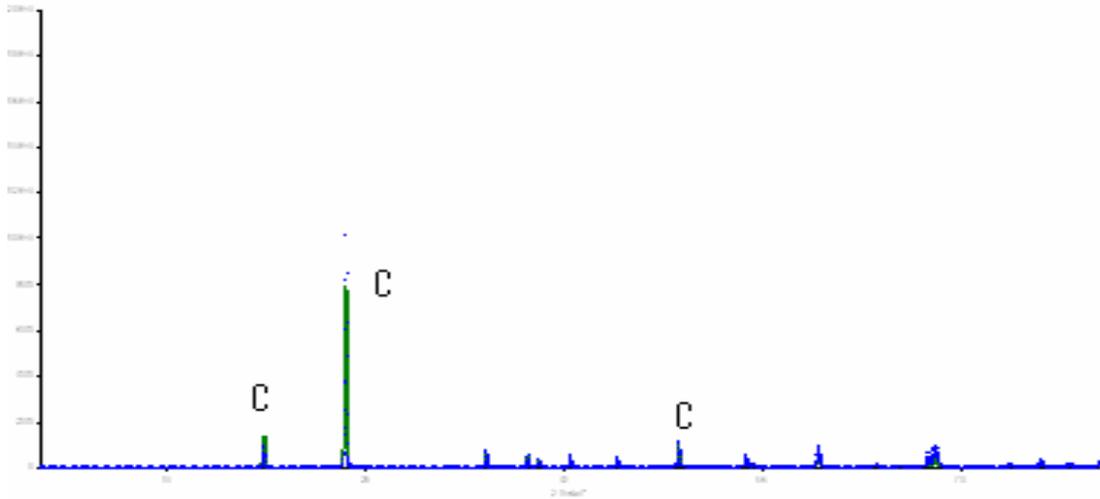


Figura III. 3 Difractograma de una muestra de sílice de alta pureza.

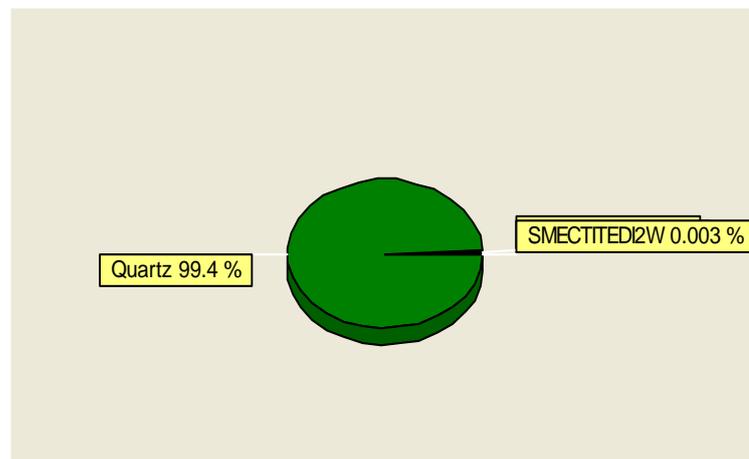


Figura III. 4 Resultado del análisis cuantitativo (software Autoquan).

III.3 Análisis Térmico diferencial y termogravimétrico.

Los resultados de los análisis térmicos se representan en las figuras III.5; III.6y III.7, correspondientes a fracciones granulométricas de la muestra inicial obtenidas por trituración previa. Las diferentes granulometrías investigadas fueron: 0-0,044; 0,044-0,074; 0,074–0,16 mm, respectivamente. Los datos experimentales se muestran en la tabla I.1 del anexo I.

En la figura III.5 la curva ATD muestra un pico endotérmico pronunciado en la región de los 300 °C que corresponde a la heulandita, resultado que corrobora los obtenidos mediante el análisis cuantitativo por DRX, los picos endotérmicos entre los 480 y 620 °C, revelan la presencia de arcilla tipo montmorillonita en pequeñas cantidades. La curva TG indica la

pérdida de masa a partir de 250 a 350 grados y hasta los 700 °C, debido a la extracción del agua absorbida en los canales de las zeolitas y entre las capas de la arcilla, (Nemecz, 1981; Boles, 1972).

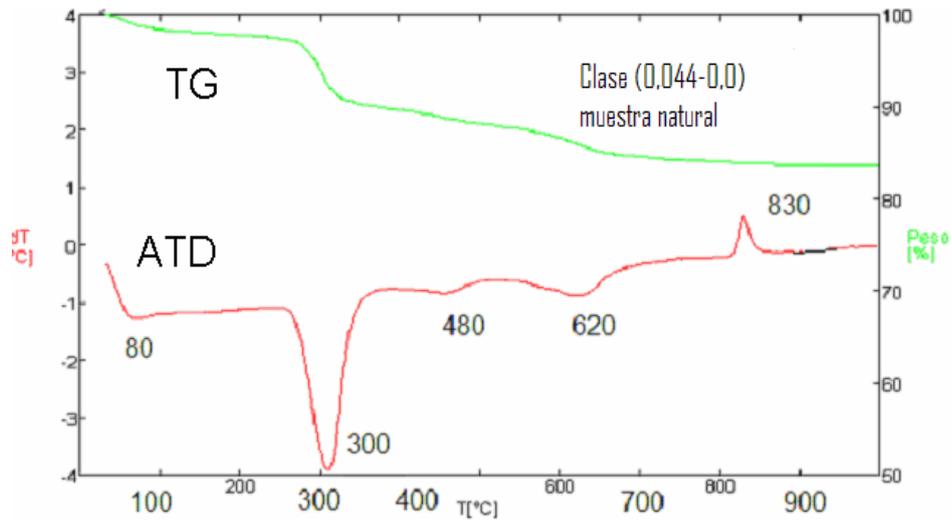


Figura III.5 Curvas TG y ATD de la muestra natural, en las clases 0,044 mm.

En la figura III.6 se observa la ausencia de los picos endotérmicos a los 420 y 680 °C correspondientes a la montmorillonita, indicando la disminución de su contenido con el aumento del tamaño de los granos. La curva termogravimétrica (TG) tiene un comportamiento característico para la heulandita con forma escalonada y acompañada de una pérdida de peso entre los 50-350 °C debido a la deshidratación cuando se eleva la temperatura.

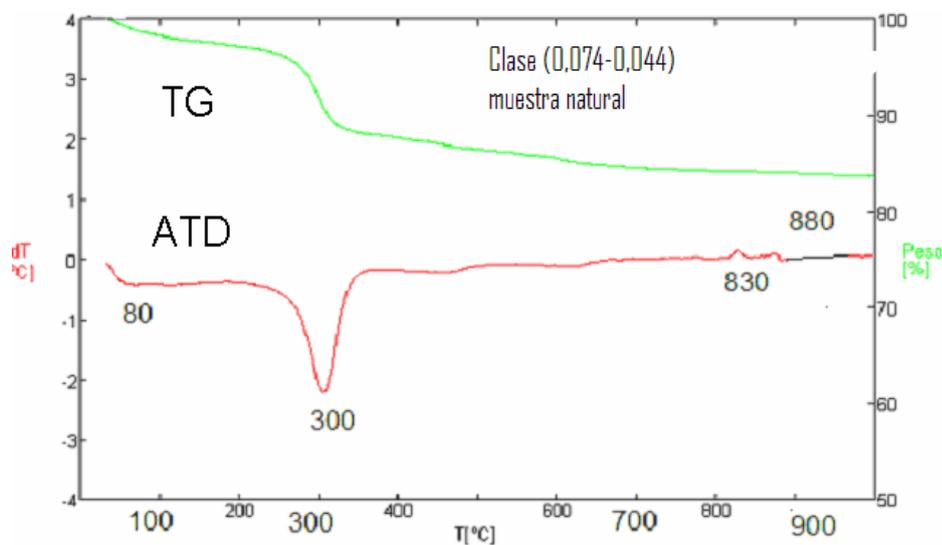


Figura III. 6 Resultado de análisis térmico de la muestra natural, clase 0,074–0,044 mm.

En la figura III.7 se aprecia un pico endotérmico pronunciado a los 300 °C debido a la presencia de la heulandita, no se observa picos de arcillas, al comparar las curvas térmicas de la heulandita de Caimanes con datos de la literatura se aprecia la similitud con la heulandita reportada por Gottardi y Galli (1985), de la región Mohos Rock Dam, USA, como se muestra en la figura III.8.

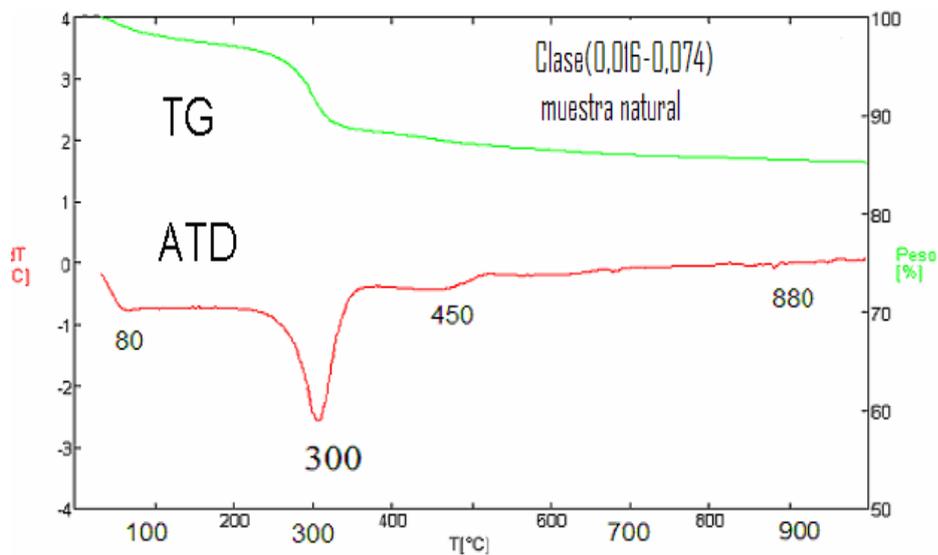


Figura III. 7 Curvas TG y ATD de la muestra natural, clase 0,016–0,074 mm.

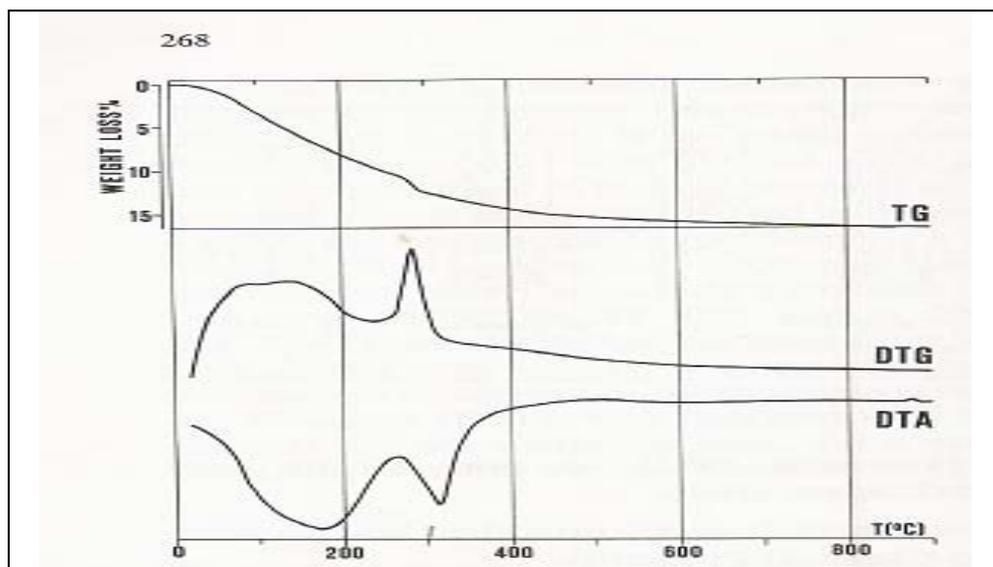


Figura III. 8 Heulandita de Mohos rock Dam, USA, (Gottardi y Gallí, 1985)

Durante el estudio del comportamiento térmico aparece un pico exotérmico a los 830°C que indica la recristalización de una nueva fase y la pérdida de cristalinidad de la zeolita a esta temperatura superior a 750 °C, resultados que se corroboran con los de (Gottardi, 1985; Blish, 2000). Se demuestra el predominio del cuarzo como la impureza principal a eliminar ya que por su estructura cristalina resiste temperaturas superiores a los 800 °C sin perder la cristalinidad, otras fases como plagioclasa, feldespato y ortoclasa reportados con anterioridad no aparecen reflejados en el difractograma de la muestra calcinada como se indica en la figura III.9. La amorfización de las fases zeolíticas por encima de los 800 °C se evidencia por la elevación del fondo del difractograma.

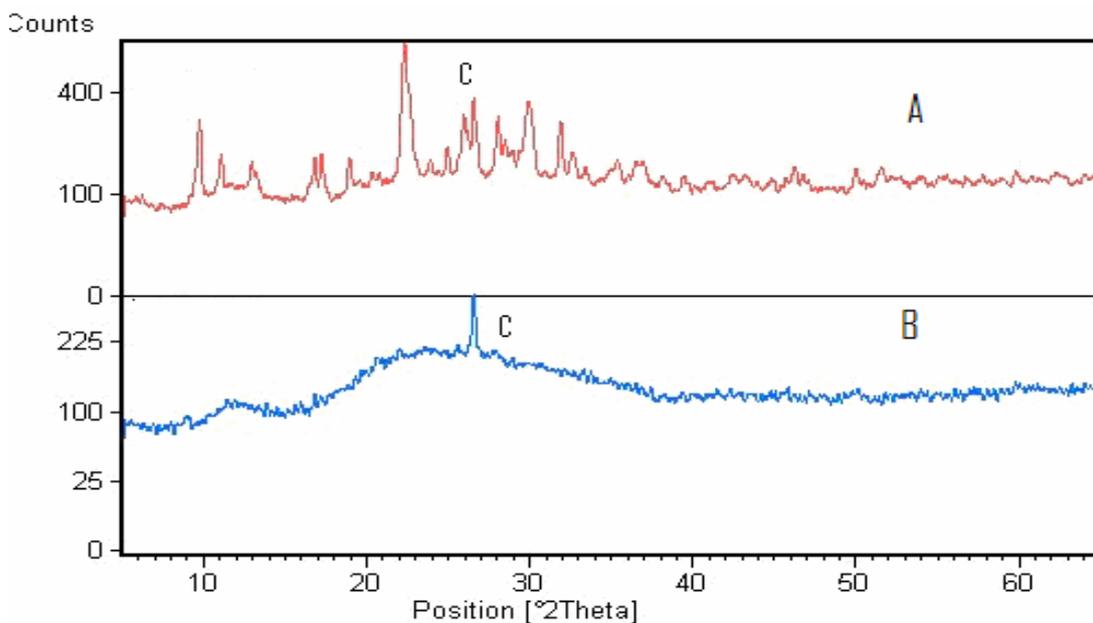


Figura III. 9 Difractogramas de la muestra, antes (A) y después (B) de calcinada

III.4 Análisis químico de la muestra

La composición química de la muestra de estudio se representan en la tabla III.1, donde se muestra que es de composición media ácida ya que el contenido de sílice es inferior a 66% Benvimdo, (1994). Los contenidos de los óxidos de hierro, magnesio y de sodio son mucho menor en comparación con los reportados por Orozco (1996); Aguirre (1999); Rodríguez-

Iznaga, (2000, 2001), mientras el contenido de alúmina es mucho mayor, la relación $Si/Al < 4$, es característico de la zeolita del tipo heulandita (Gottardi et al., 1985; Bish et al., 2000). Se distingue el contenido de calcio, que es superior en comparación con otros óxidos con una media de 5,03 %, lo que indica el carácter cálcico de las tobas estudiadas, resultado que corrobora los reportes de Orozco (1996) que con el empleo de diagramas ternarios para los óxidos evidenció las características cálcicas de las muestras del yacimiento Caimanes al comparar con otros cationes como el sodio y el potasio que aprecia en menores cantidades ver la figura III.10.

Tabla. III. 1 Resultados de la composición química reportados por diferentes autores

Compuesto Químico	Promedio de 7 análisis Orozco, 1996	Muestra puntual Aguirre, 1999	Muestras puntuales Iznaga, 2000, 2001	Trabajo actual del "Autor"
Si O ₂	59,8	63,2	63,2	57,9
Al ₂ O ₃	12,32	12,32	12,32	14,5
Fe ₂ O ₃	2,91	2,66	2,62	2,09
FeO	0,97	0,39	0,39	0,2
Ca O	6,32	3,92	3,92	5,99
Mg O	1,48	1,3	1,3	1,05
Na	1,42	0,93	0,93	0,36
K ₂ O	1,45	1,42	1,42	1,4
PPI	11	11	13	15,9
Total	97,67	97,14	99,1	99,39

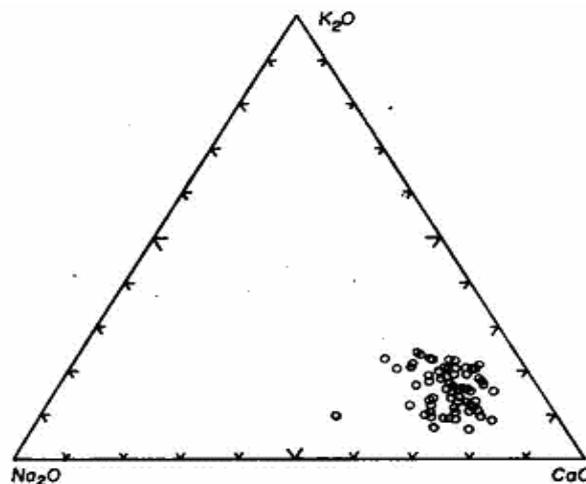


Figura III.10 Diagrama ternario del contenido de óxidos, del Yacimiento Caimanes según Orozco, (1996).

III.5 Microscopía electrónica de barrido (MEB).

En la figura III.11 se observa una diferencia pronunciada en la textura del material, existe material vítreo poco transformado o con menor grado de cristalización (**Zpc**) con predominio de granos muy finos y otra zona de alto grado de cristalización (**Zc**) y con agregados cristalinos de zeolitas bien definidos y con tamaños que varían desde 70 hasta 5 micrones.

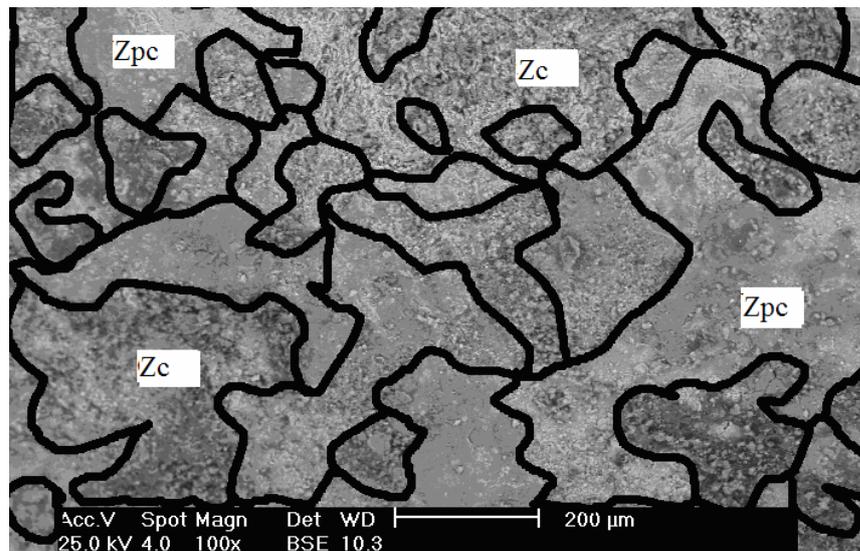


Figura III.11 Diferencias en la textura de cristalización en una porción de muestra superficial.

En la figura III.12, se muestra el carácter cálcico y ligeramente potásico de la muestra, el contenido de hierro (Fe), detectado se asume como impurezas presentes en grietas aunque puede estar dentro de la composición de algunos minerales no llegando a constituir una fase independiente y demuestran que las diferentes zonas están compuestas por zeolitas, la diferencia radica en el tamaño del grano.

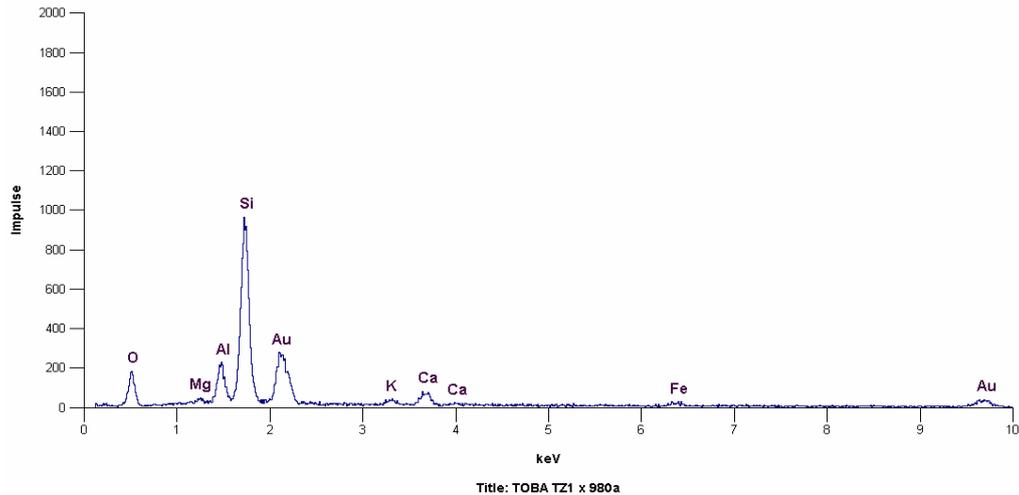


Figura III. 12 Análisis químico de la muestra de toba zeolitizada por EDX con MEB zona Zc.

Las figuras III.13 y III.14 son detalles de la figura III.11, donde se observa la textura vitroclástica con menor grado de cristalización, material de grano muy fino y cristales del orden hasta de los 5 μm para las zeolitas y el cuarzo.

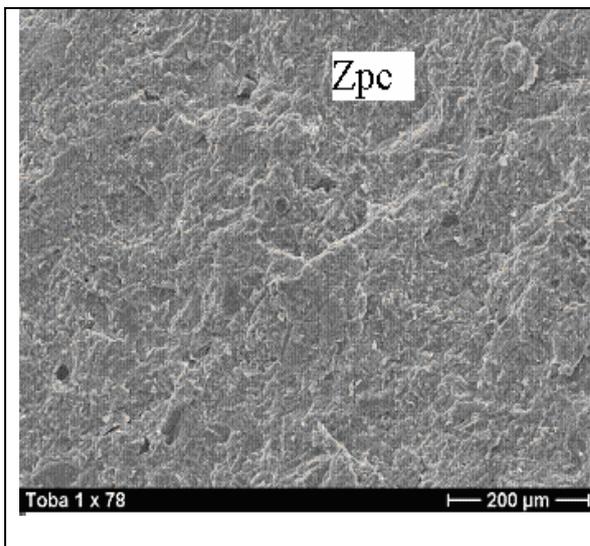


Figura III.13 Grano muy fino de (Zpc).

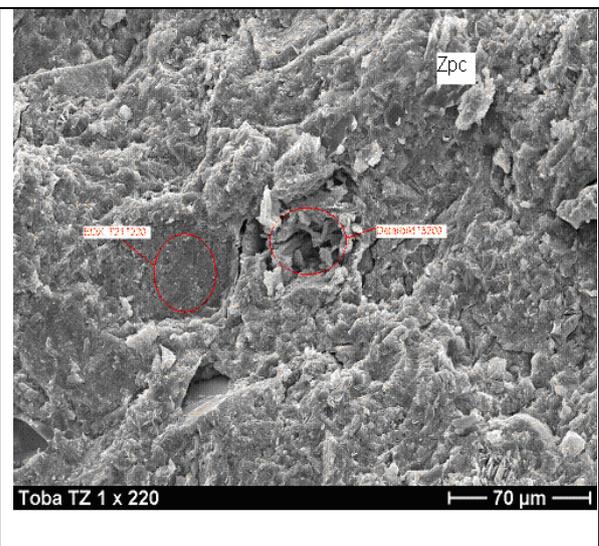


Figura III.14 Microporos y oquedades (Zpc)

En las oquedades y microfisuras se encuentran pequeñas cantidades de material arcilloso del tipo montmorillonítico con aspecto laminar formando enrejados apreciándose la formación de la arcilla a partir del vidrio volcánico como se muestra en la figura III. 15.

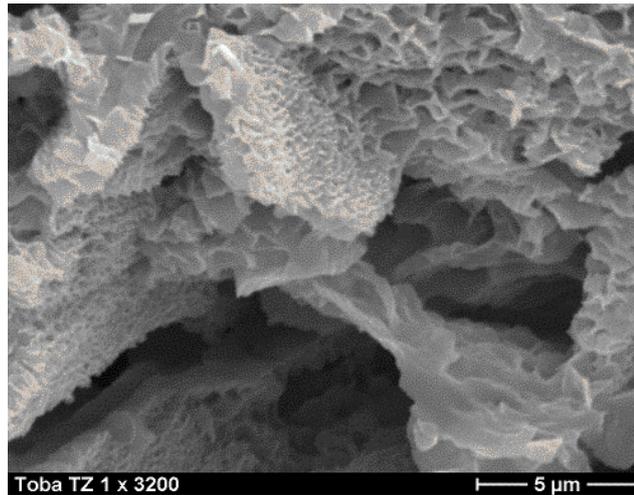


Figura III. 15 Aspecto fibroso de la montmorillonita presente en oquedades

En las figuras III.16 y III.17 se muestra la composición química de la zona de menor grado de cristalización (**Zpc**) y de las oquedades donde se identificó la montmorillonita respectivamente. En ambas se refleja las características de aluminosilicatos siendo el contenido de calcio mayor al de potasio. Se debe resaltar la afinidad del hierro al adsorberse por la fase arcillosa lo que no ocurre en otras áreas donde predominan las zeolitas.

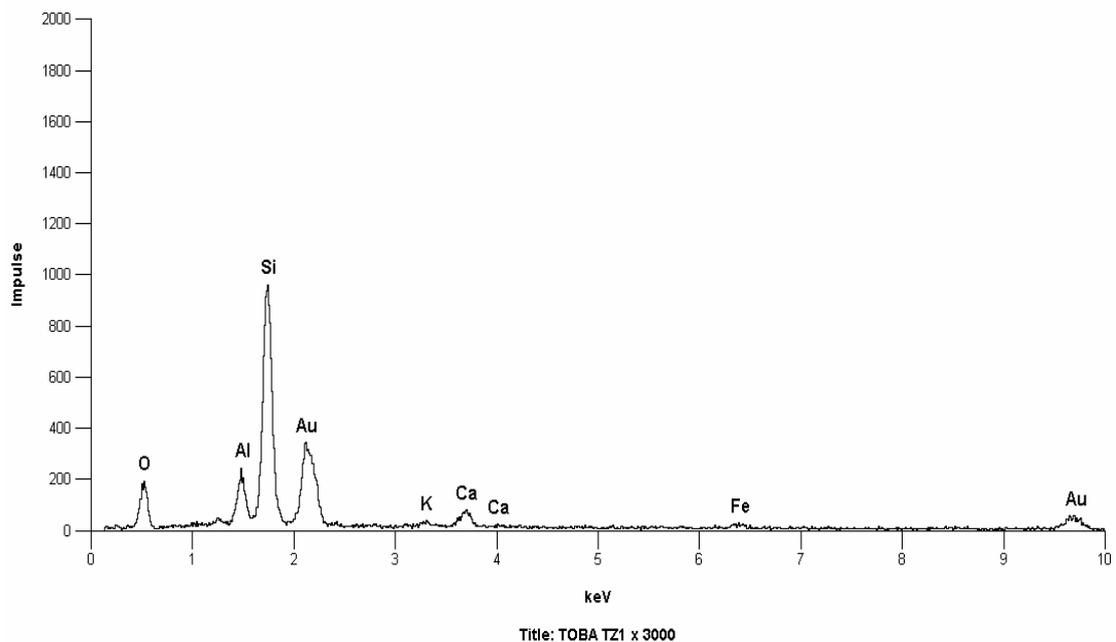


Figura III. 16 Composición sustancial de la zona de baja cristalización

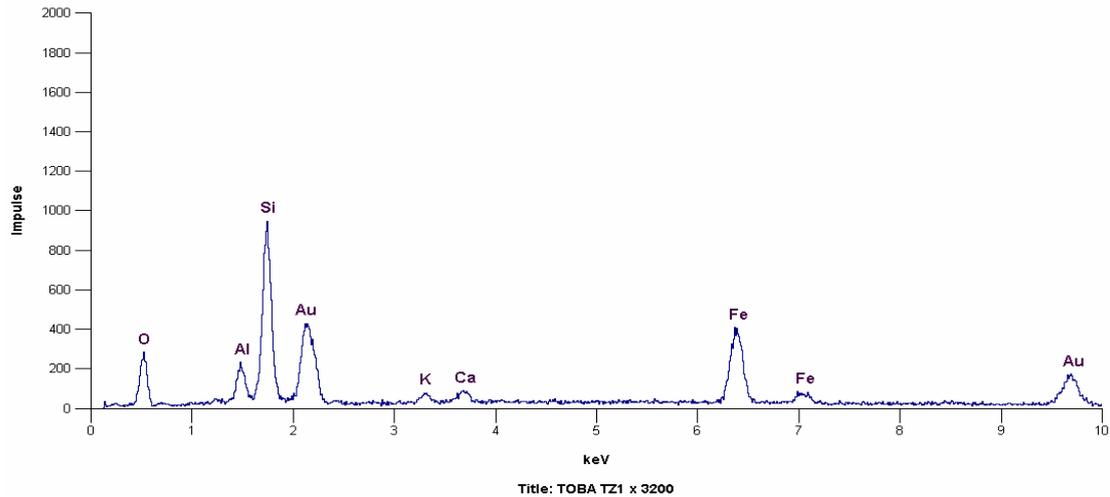


Figura III.17 Composición química de las oquedades rellenas con montmorillonita

Al detallar la zona con alto grado de cristalización (**Zc**), figura III.18 y III. 19, donde se aprecian cristales de heulandita-clinoptilolita con clivaje en dos direcciones de tipo monoclinico se observa que los cristales tabulares son de relativo gran tamaño al comparar con la zona de poca cristalinidad (**Zpc**), se aprecian otros de pequeños tamaños entre los 20 y 5 micrones ocupando las microgrietas. Las características de la heulandita se asemejan a las reportadas por Welton (1984), para una muestra de la región de Creek, de la formación Nova Scotia en Canadá que se indica en la figura III.20 y cristales tabulares como los del yacimiento Caimanes, de la figura III.21.

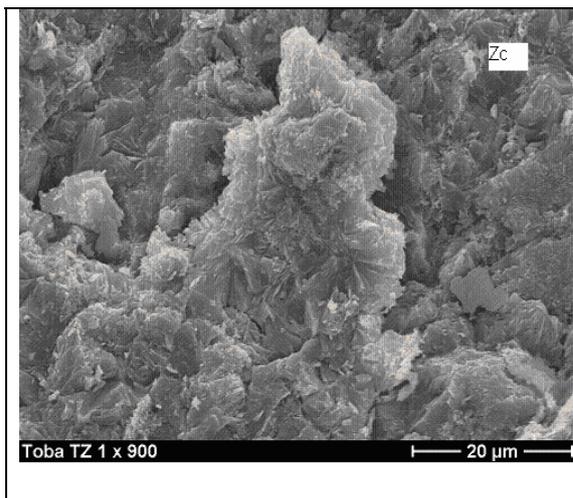


Figura III.18 Cristales de zeolitas en (ZC)

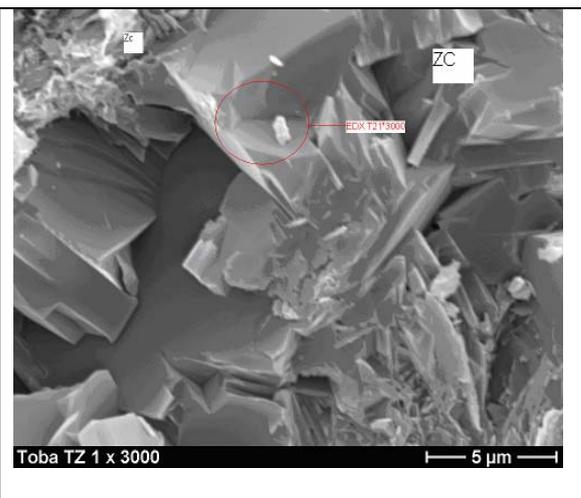


Figura III. 19 Cristales de zeolitas definidos, ZC

En las figuras III.22 se expone la clinoptilolita donde se observan cristales bien desarrollados en oquedades producto de la disolución del material vítreo original. También en la zona de alta cristalización se pueden observar microgrietas de tamaños variables, como se indica en la figura III. 23, éstas cavidades son de mayor dimensión al compararlas con las zonas menos cristalizadas llegando a medir 40 x 20 μm .

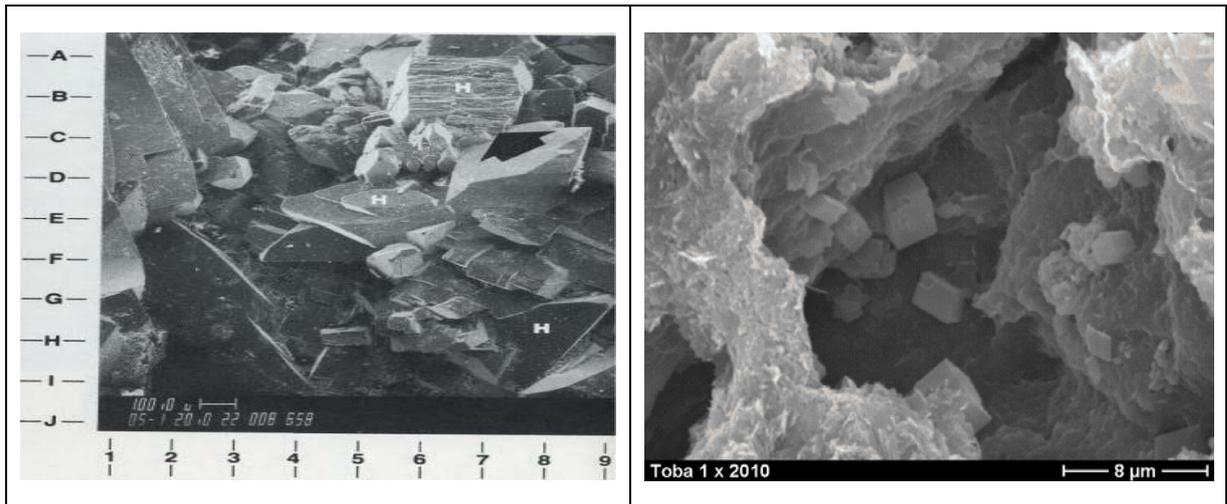


Figura III. 20 Cristales de heulandita de Creek, oquedades Canadá

Figura III. 21 Cristales de heulandita en en (ZC).

en su interior aparece clinoptilolita según su morfología de cristales perfectos y tabulares, con tamaños muy pequeños. Las características de la clinoptilolita con sus cristales tabulares son similares a la reportada por Gottardi y Galli, (1985), para una muestra en la región de Agoura en California.

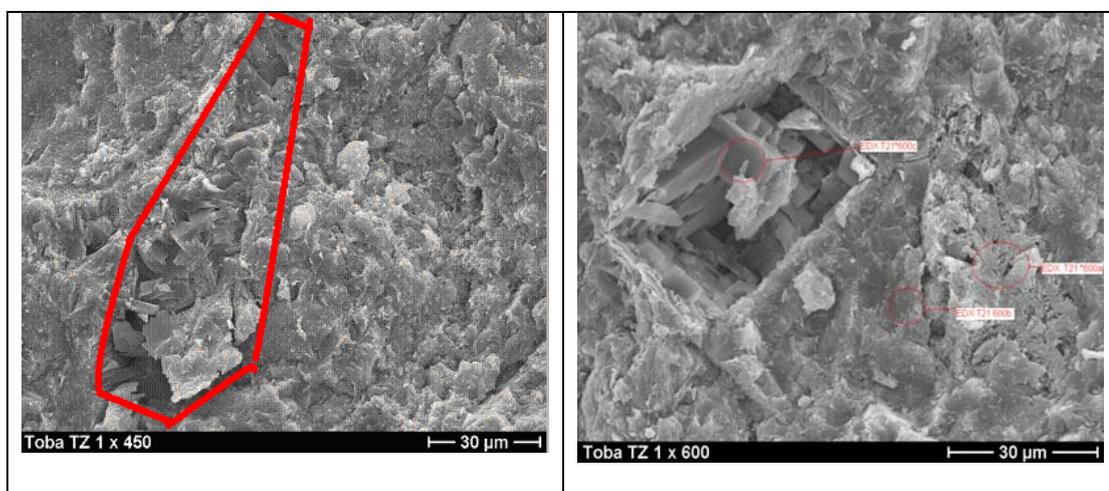


Figura III.22 Cristales de clinoptilolita

Figura III. 23 Oquedades con clinoptilolita Zc.

Conclusiones parciales.

1. Se reporta la presencia de minerales zeolíticos del tipo la heulandita-clinoptilolita y subordinado a estos el cuarzo, con predominio de la heulandita. Resultado no reportado con anterioridad constituyendo un aporte científico del trabajo.
2. Las muestras de rocas zeolitizadas son cálcicas y ligeramente potásicas, el contenido de la muestra inicial de la fase zeolítica varía entre un 80-85% y el cuarzo varía su contenido entre un 13-14%. Se identificó arcillas montmorillonita en pequeñas cantidades solo detectado por medio de los análisis térmicos y la MEB.
3. En cuanto a su textura la muestra inicial investigada está compuesta por un material de grano muy fino, los granos varían de 70 a los 5 micrones, el óxido de hierro está presente en grieta, pero no llega a constituir fase mineralógica.
4. En los estudio con la MEB no se observan granos de cuarzo debido a que éste se encuentra entrecrecido con la masa vítroclástica de bajo grado de cristalización.

CAPÍTULO IV. - DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO.

Introducción

En este capítulo se exponen los resultados de las operaciones de beneficio efectuadas: estudio granulométrico, molienda diferencial y grado de liberación, clasificación en hidrociclones, concentración de las fases mineralógicas mediante la flotación por espumas y en medio centrífugo mediante hidrociclones.

IV.1 Tamaño óptimo de molienda

En la figura IV.1 se muestra la composición granulométrica del producto alimentado al molino, el diámetro d_{80} corresponde a 2500 μm y los datos experimentales se muestran en la tabla I.1 del anexo I.

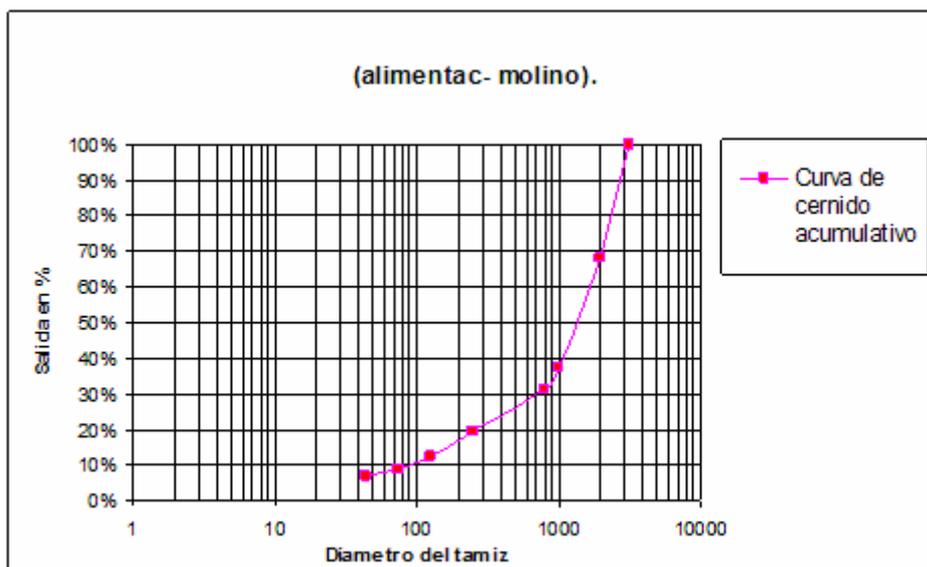


Figura IV.1 Composición granulométrica del producto alimentado al molino

La premisa fundamental para la definición del tamaño de molienda óptimo, parte de los resultados de la MEB, donde el tamaño determinado de los granos de las fases zeolíticas oscila entre 70-80 μm y hasta inferiores como se muestran en las figuras IV.2, IV 3 y IV .4.

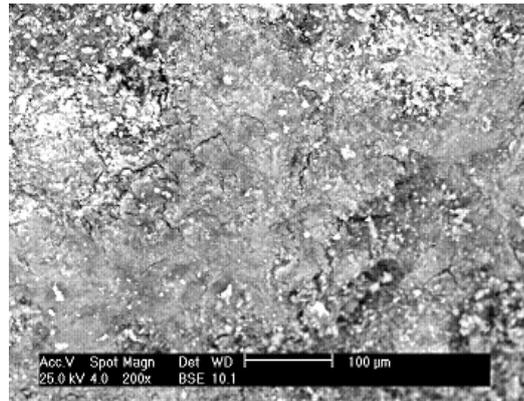


Figura IV. 2 Cristales de la roca zeolitizadas en el orden de 80-70 micrones



Figura IV. 3 Cristales de la roca zeolitizadas en el orden de 70-50 micrones

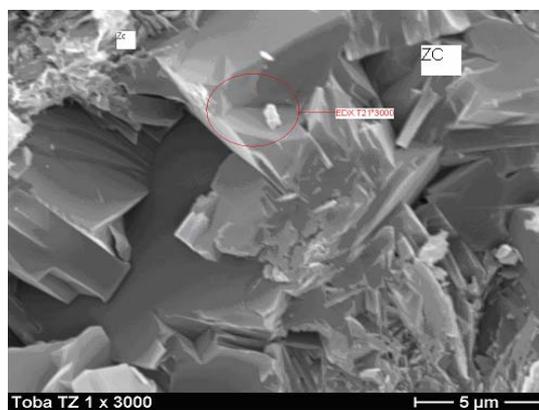


Figura IV. 4 Cristales de la roca zeolitizadas en el orden de 20-10 micrones

El estudio de la cinética de molienda, figura IV.5, muestra que se logra alcanzar más del 80 % de la roca zeolitizada en la fracción menor de 74 μm para un tiempo de molienda de 30 min, los datos de origen se muestran en el anexo I.

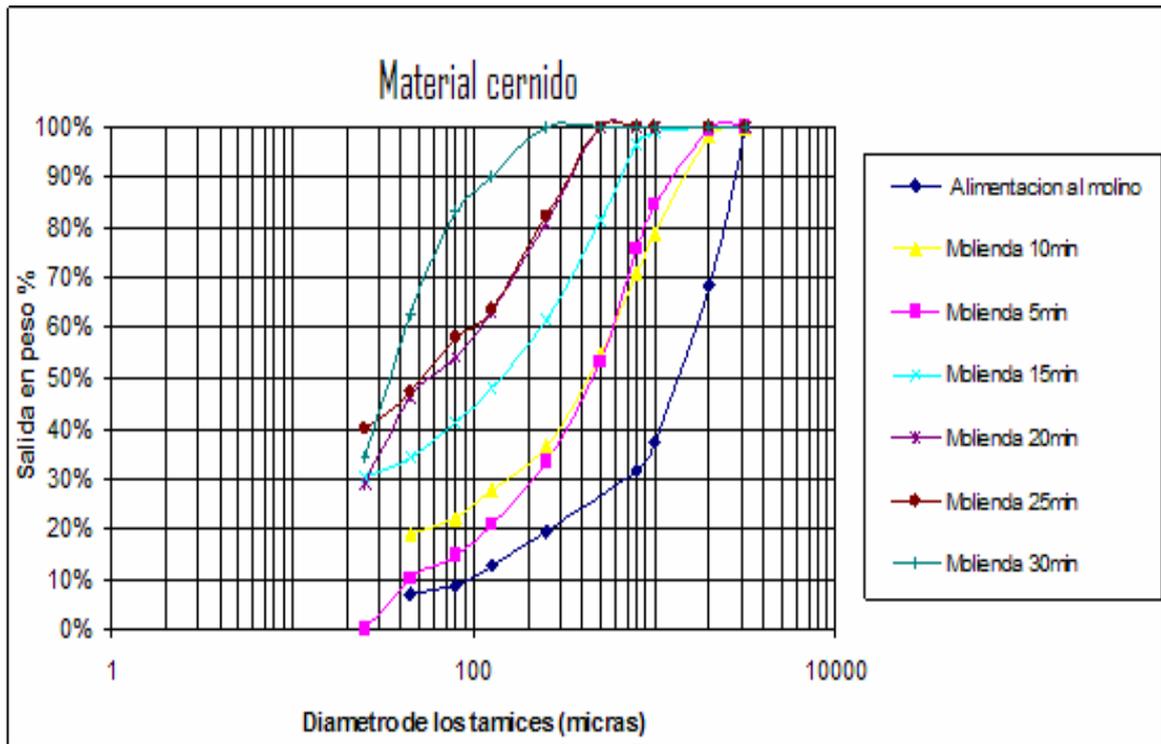


Figura IV. 5 Resultados de la cinética de molienda

Por otro lado, las fotografías obtenidas por la microscopía óptica que se representan en las figuras IV.6 y IV.7 muestran que para un tiempo de molienda de 25 min, la mayoría de los granos aún están entrecrecidos, donde los granos de zeolitas, cuarzo y óxidos de hierro forman agregados y el tamaño de ellos oscilan entre los 90 y 120 μm . Nótese que a este tiempo de molienda ya comienzan a observarse granos monofásicos, principalmente de las zeolitas.

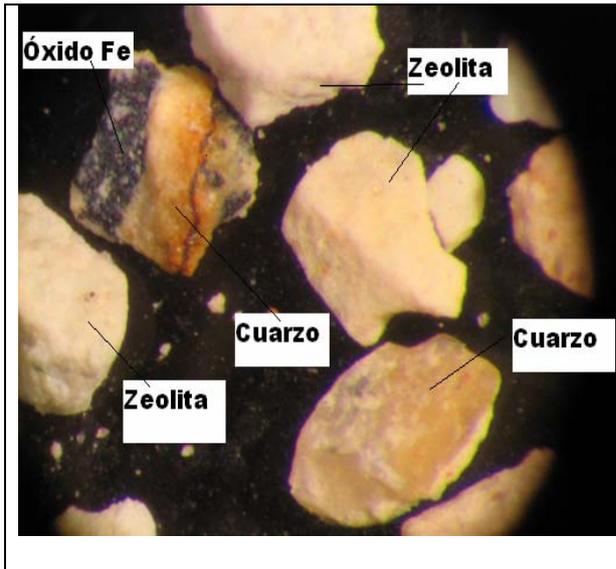


Figura IV. 6 Muestra molida a 25 min.

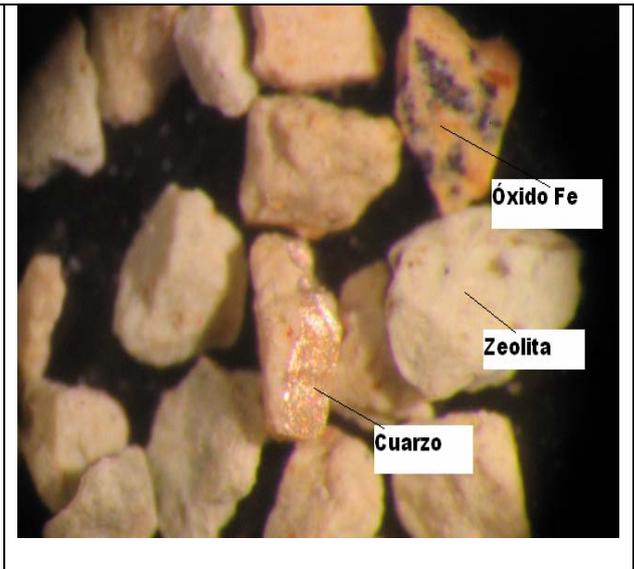


Figura IV.7 Muestra molida a 25 min.

Sin embargo, las figuras IV.8 y IV.9, muestran que para un tiempo de molienda de 30 min ya se alcanza la liberación de los granos, en la clase donde el 83 % es menor de 74 μm , observándose granos monofásicos de zeolitas, cuarzo y óxidos de hierro que aparece como fase independiente no cristalizada.



Figura IV.8 Granos de zeolita y cuarzo liberados

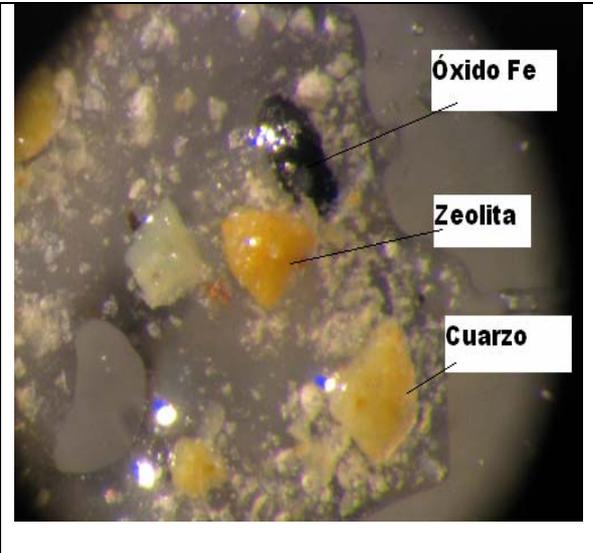


Figura IV.9 Detalle de la foto IV.6

Los resultados de los análisis térmicos muestran que para un tiempo de 5 min, en las fracciones menores de 74 μm , se concentra la fase clinoptilolítica como se muestra en la figura IV.10, en la clase mayor de 74 μm se concentran la heulandita, dado por la presencia del pico endotérmico alrededor de los 300 $^{\circ}\text{C}$ y la curva TG escalonada, representado en la

figura IV.11. Por primera vez se reporta este resultado, lo que constituye una novedad científica en esta investigación un aporte a la ciencia y para el mundo científico.

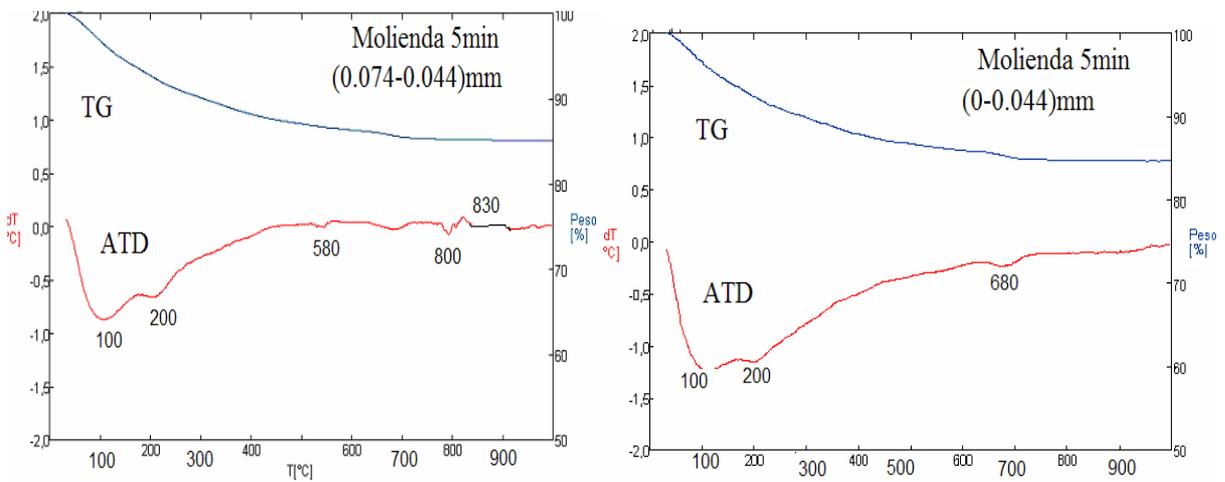


Figura IV. 10 Comportamiento clinoptilítico de la muestra molida a 5 min, fracción 0,0-0,044 y 0,074 -0,044 mm.

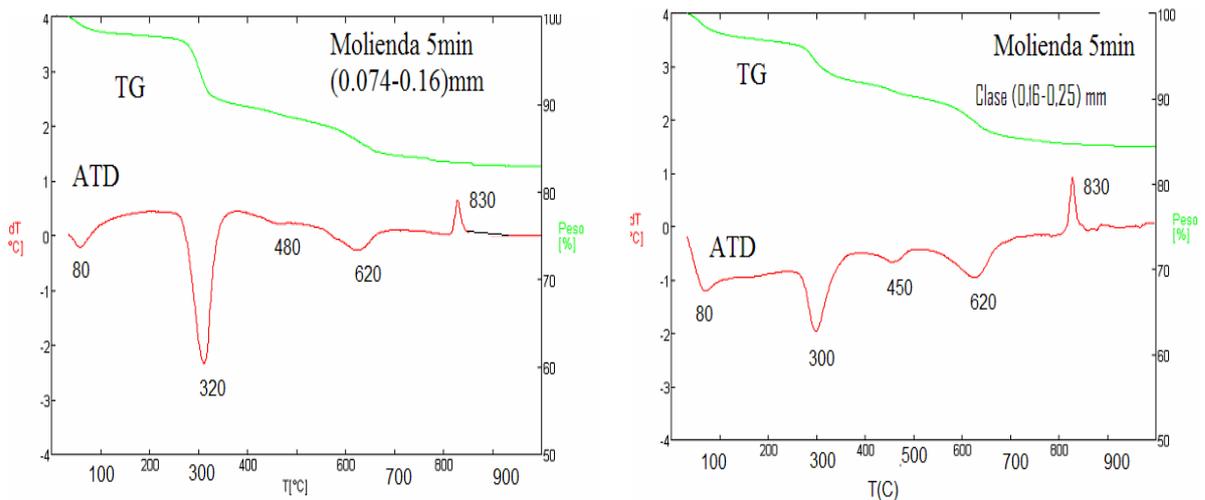


Figura IV.11 Comportamiento heulandítico, muestra molida 5 min y fracción 0,074-0,16 y 0,16- 0,25 mm.

El comportamiento clinoptilítico está referido a un pronunciado pico endotérmico registrado entre los 100 °C y 200 °C y la curva TG con pérdida de masa de forma continua, como se aprecia en la figura IV.10 muy similar a los resultados reportados por Gottardi y Gallí, (1985) para muestras de los yacimientos zeolíticos de Agoura en California, Alpi di Siusi, en Italia y Castle Creek, en Idaho como se representa en la figura IV.12.

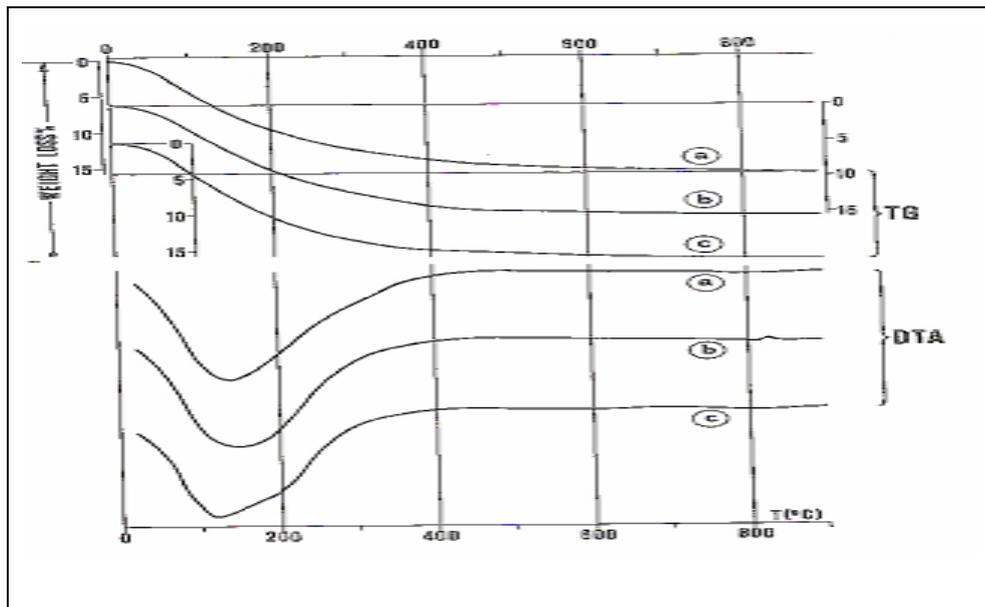


Figura IV. 12 Curvas térmicas de la clinoptilolita, a- Agoura, California; b- Alpi di Siusi; Italia, c- Castle Creek, Idaho, (Gottardi y Gallí, 1985).

Para el material molido en los tiempos 5, 10, 15, 20, 25, 30 min y sus respectivas fracciones granulométricas no se observa regularidad alguna en cuanto al contenido de las fases mineralógicas para la concentración del cuarzo. Resultado que difiere del que cabría esperarse según los resultados previos reportados por Benvimdo (2000), Gennaro (1997), Manser (1975) y Hutchison (1974) al emplear la molienda diferencial para concentrar rocas zeolitizadas. Esto se asocia al tamaño de grano que es muy fino y las diferencias en las menas zeolíticas, donde el grano natural de zeolitas y cuarzo es bastante similar a pesar de las diferencias en la dureza y molibilidad no se logra concentrar fases alguna en diferentes granulometría. Este resultado permitió descartar la molienda diferencial como método de concentración de las fases zeolíticas del yacimiento Caimanes.

IV.2 Resultados de la clasificación en hidrociclones

El proceso de clasificación en hidrociclón fue empleado con el fin de evitar el efecto negativo de las lamas en la etapa de concentración de fases mineralógicas principales según han

reportado (Willis, 1998, 2006; Austin y Concha, 1994; Lynch, 1977; Arteburn, 1982). Los resultados del análisis granulométrico para el reboso y las arenas aparecen en la tabla IV.1.

Tabla IV. 1 Análisis granulométrico del material clasificado en hidrociclones

Clase tamaño μm	Reboso Peso (g)	Arenas Peso (g)	Reboso Peso (%)	Arenas Peso (%)
100 /74	0	15	0	20.2
74/50	0	25.4	0	34.2
50/25	0	19.5	0	26.2
25/15	2.5	7	18.5	9.4
15/10.	5	5	37	6.7
10/0	6	2.4	44.4	3.2
Total	13.5	74.3	100	100

El 100 % del producto reboso tiene un tamaño menor a 25 μm mientras que las arenas son preferentemente más gruesas: el 68 % de este producto tiene un tamaño superior a 44 μm , mientras que solo el 6 % de las arenas tienen un tamaño menor de 25 μm . Teniendo en cuenta que los rendimientos en peso de reboso y arenas son, respectivamente, 13.5 % y 74 %, se puede proceder a calcular la curva de partición para dicha clasificación, figura IV.

13.

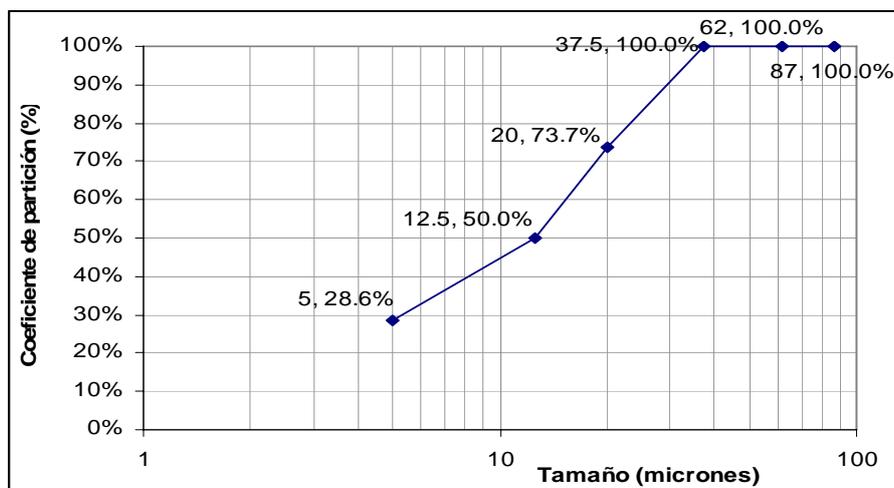


Figura IV. 13 Curva de partición de la operación de clasificación con hidrociclón.

La composición mineralógica del reboso no muestra variaciones apreciables manteniéndose en el mismo orden respecto a la alimentación reboso que aparece en la figura IV.14.

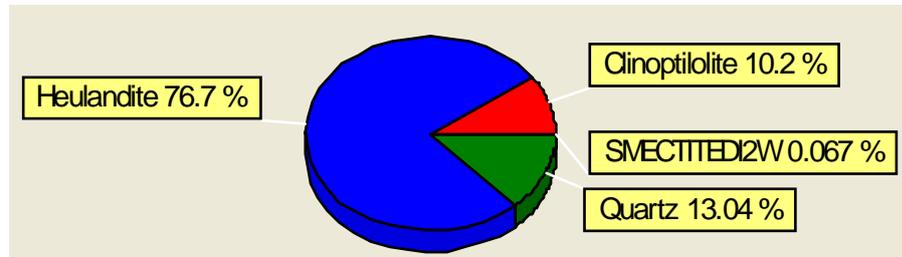


Figura IV.14 Gráfico del contenido mineralógico del reboso

IV.3 Resultados de los ensayos de flotación.

En el anexo 2 se muestran las tablas de los resultados de las funciones de salida del experimento empleado. A juzgar por los resultados de la figura IV.15 el consumo de dodecylamina influye positivamente sobre el contenido de zeolita en el concentrado alcanza un 94 % mientras el cuarzo 6% en el producto espumas, su efecto es mayor al variar de 200 g/t a 300 g/t de este reactivo.

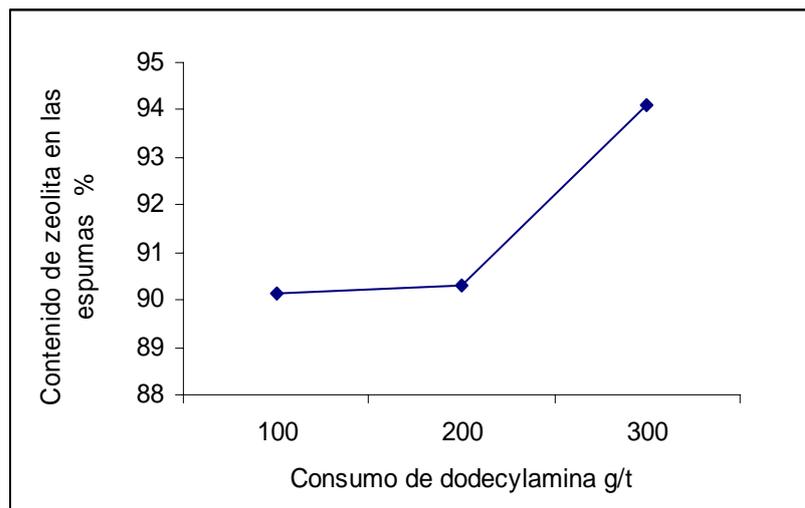


Figura IV.15 Influencia del consumo de dodecylamina para el contenido de zeolita en las espumas.

Por otra parte, este colector tiene un efecto diferente sobre el contenido de cuarzo en el mismo producto figura IV.16, al aumentar el consumo de dodecylamina de 100 a 200 g/t la variación

de la funciones de salidas es pequeña, sin embargo a los 300 g/t se reporta una disminución abrupta del contenido de cuarzo en el concentrado. El contenido de cuarzo en las colas aumenta al aumentar el contenido de dodecylamina figura IV. 17.

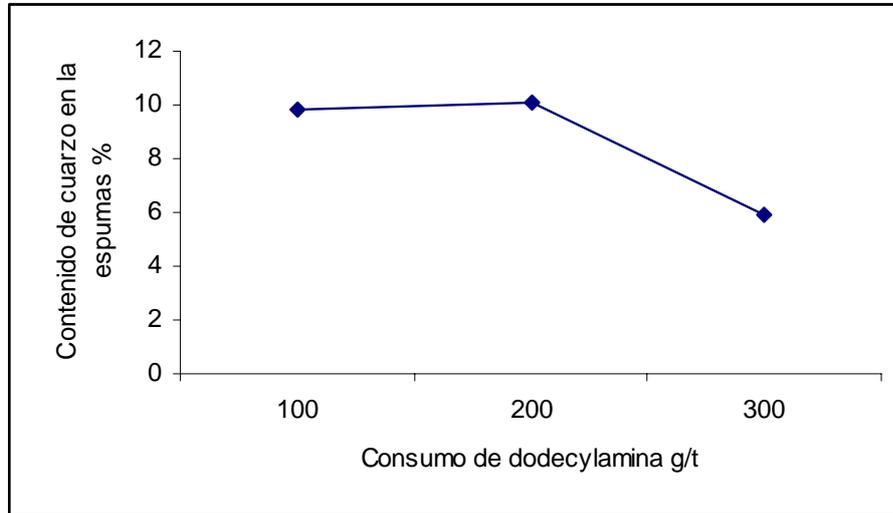


Figura IV. 16 Influencia del consumo de dodecylamina en el contenido de cuarzo en las espumas.

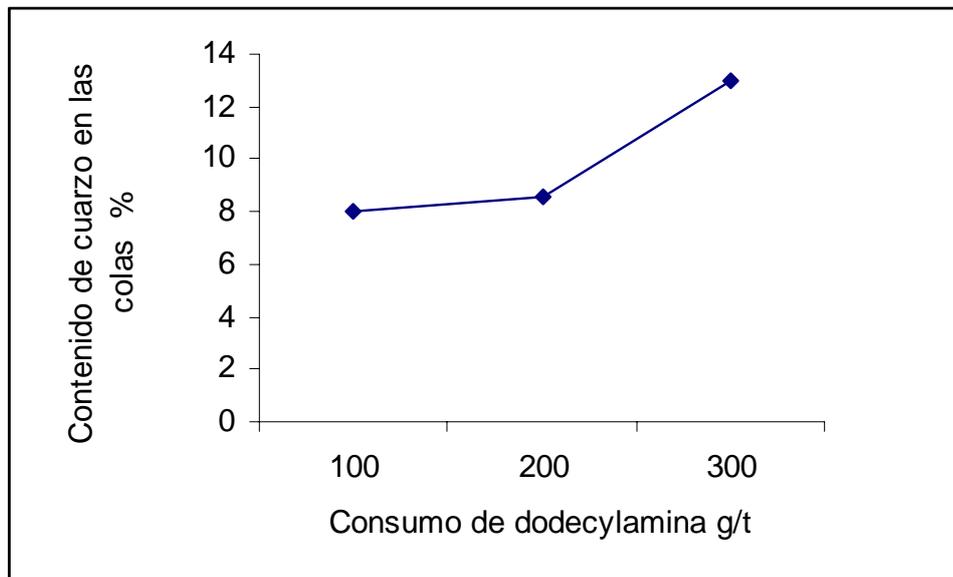


Figura IV.17 Influencia del consumo de dodecylamina en el contenido de cuarzo en las colas

Se debe resaltar que según los resultados expuestos en las figuras IV.16 y IV.16 que a concentraciones de 300 g/t de la dodecylamina se logra un contenido de zeolitas en las espumas del 94 % y el cuarzo en las colas alcanza un 5,27 %. La separación de la zeolita del cuarzo enriquece en un 8 % la fase zeolítica respecto a la alimentación y disminuye

considerablemente el contenido de cuarzo como se observa en figura IV.18, lo que representa una novedad científica, no reportada anteriormente en ninguna literatura consultada.

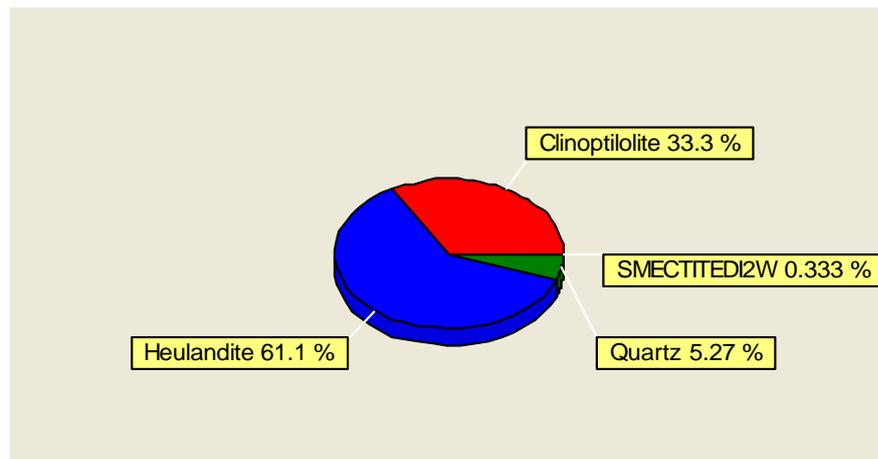


Figura IV. 18 Contenido mineralógico en las espumas

En las figuras IV.19 y IV.20, se muestra una relación similar entre el consumo de dodecylamina en la recuperación de de zeolitas y cuarzo en las espumas con un máximo en 200 g/t de la concentración del colector.

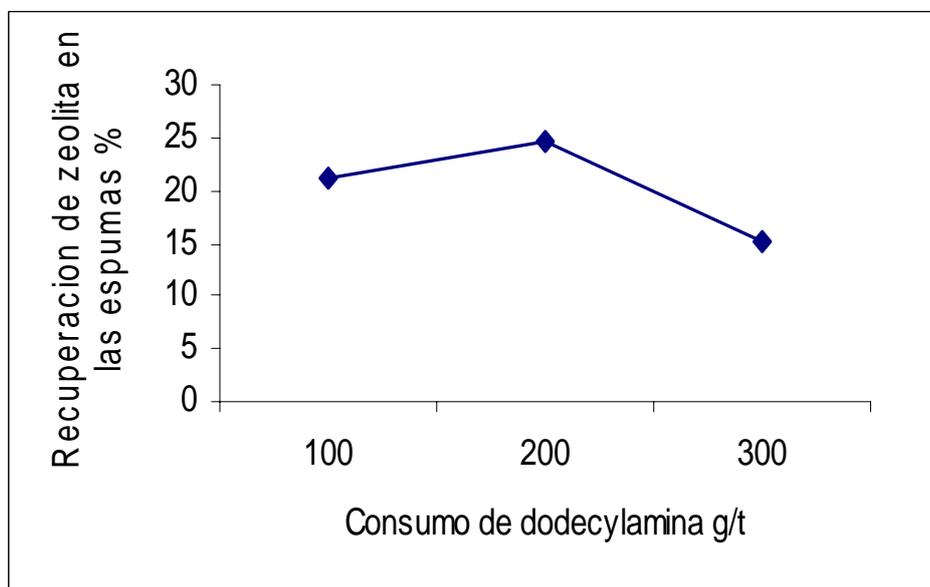


Figura IV.19 Influencia del consumo de dodecylamina en la recuperación de zeolita en las espumas.

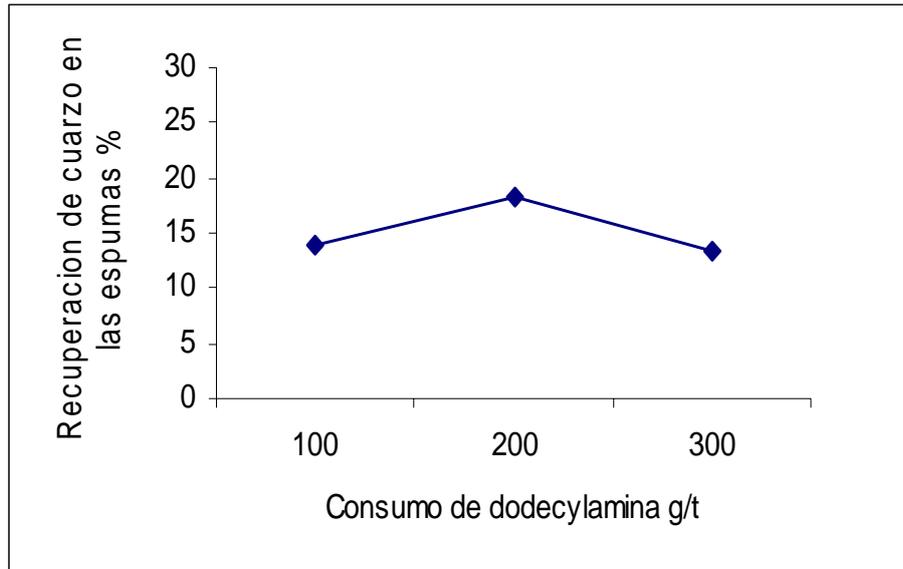


Figura IV. 20 Influencia del consumo de dodecylamina en recuperación de cuarzo espumas

La influencia del depresor, cloruro de calcio es favorable para la concentración de las fases zeolíticas en el producto espumas para zeolitas y colas para el cuarzo; mientras se aprecia una influencia negativa para el caso del contenido de cuarzo en el producto de las espumas y las colas, al incrementar el consumo de este reactivo de 5 a 10 kg/t como se muestra en las figuras IV.21 hasta IV.24.

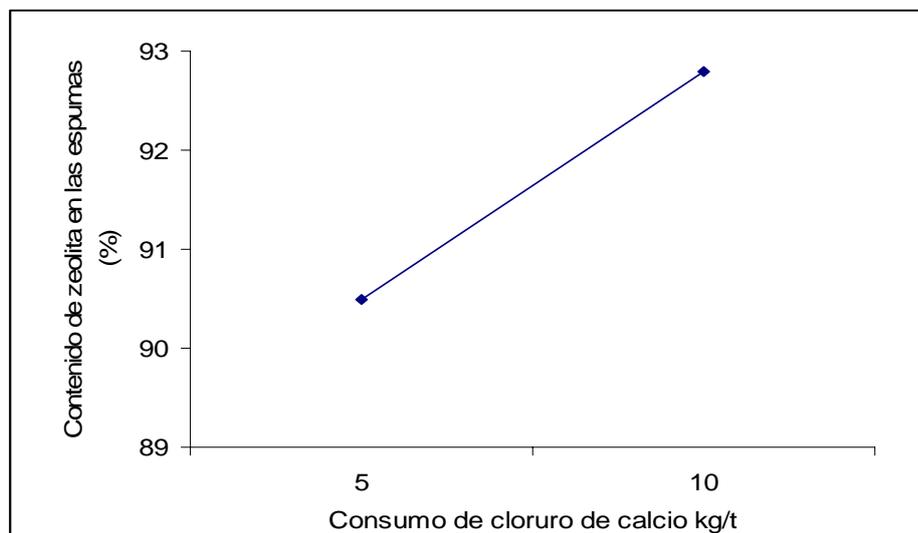


Figura IV. 21 Influencia del consumo de cloruro de calcio en el contenido de zeolita en espumas

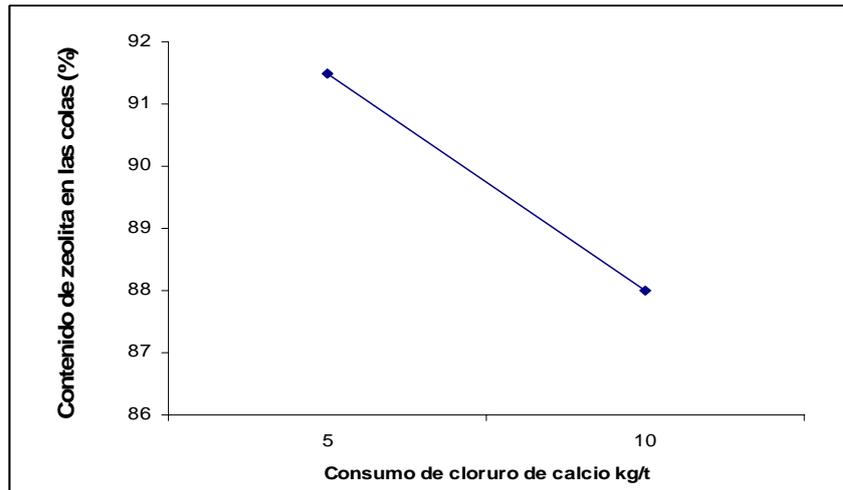


Figura IV. 22 Influencia del consumo de cloruro de calcio en el contenido de zeolita las colas

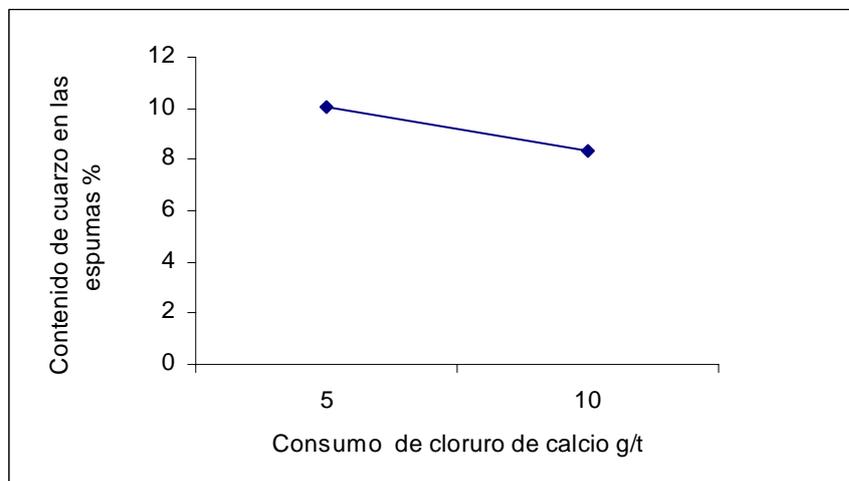


Figura IV. 23 Influencia del consumo de cloruro de calcio en el contenido de cuarzo en las espumas

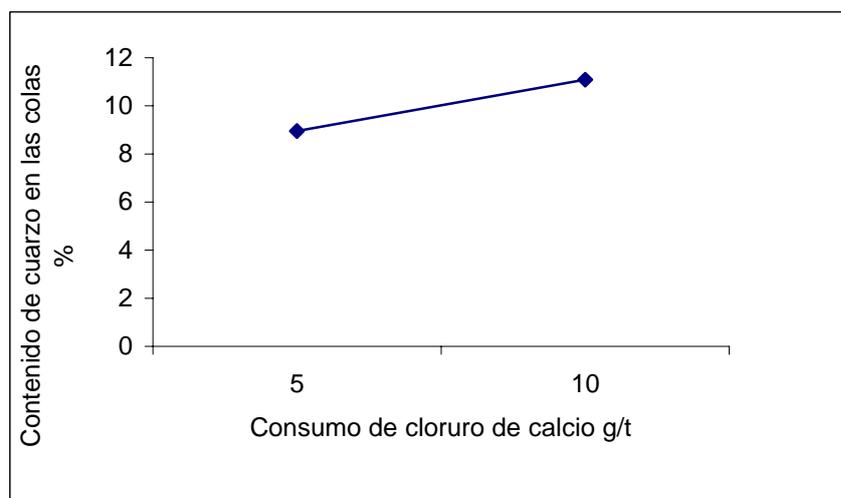


Figura IV. 24 Influencia del consumo de cloruro de calcio en el contenido de cuarzo en las colas

El comportamiento de los espumantes ensayados metil isobutil carbinol (MIBC) y Oreprep 3030 en los contenidos y la recuperación de las fases zeolíticas y de cuarzo en colas y espumas es muy similar no ofreciendo diferencias significativas, los gráficos correspondientes a estas variables se reflejan en el anexo II.

IV.4 Resultados del experimento factorial completo (EFC), para diferentes diámetros de hidrociclones.

Los resultados del experimento factorial completo aparecen en el anexo III. A juzgar por los resultados, al margen de la diferencia en los diámetros de los hidrociclones empleados, es posible la concentración de la fase zeolítica en un 10 %. El contenido de este componente alcanza hasta 94 - 95 % en el reboso. El contenido de cuarzo alcanza valores de 5-6 % en el mismo producto, reduciéndose en más de dos veces su contenido respecto el producto alimentado, como se muestra en la figura IV.25. Este es un resultado relevante de esta investigación que constituye una novedad científica y aporte a la ciencia, por primera vez se reporta resultados de separación del cuarzo de las fases zeolíticas y por vez primera se emplea los hidrociclones para la concentración de dichos minerales.

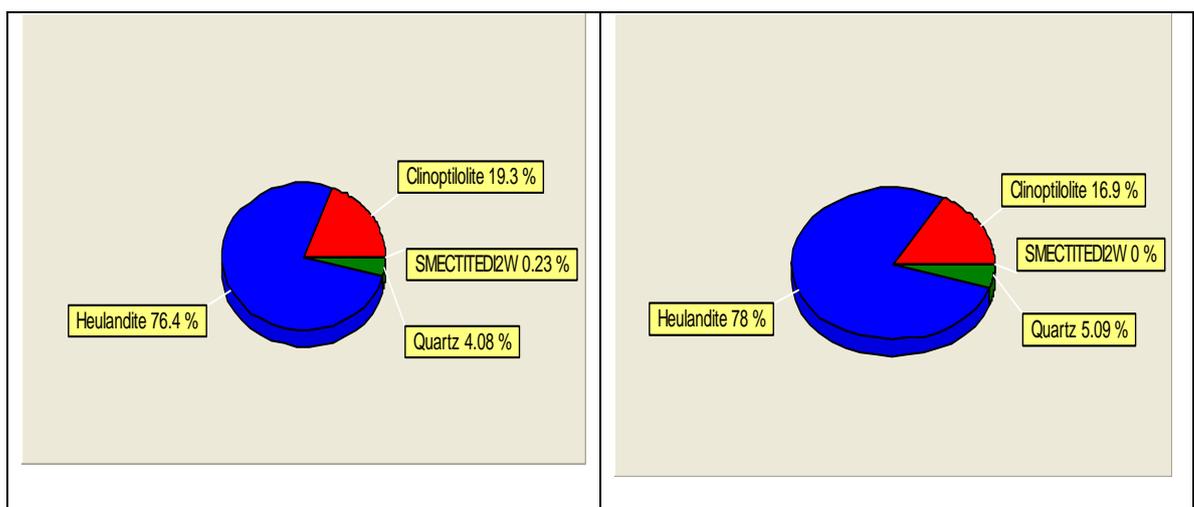


Figura IV. 25 Contenido de zeolita y cuarzo del producto reboso en hidrociclones

En el anexo IV, se muestran los resultados del análisis estadístico y los datos de la reproducibilidad de los experimentos. Los valores de los coeficientes de variación se encuentran en los rangos permisibles; su valor medio disminuye con el aumento del diámetro del hidrociclón, lo cual nota una mejor reproducibilidad en la separación. En cierta medida esto avala los reportes sobre la calidad de separación en los hidrociclones de 50,8 mm y fondo plano. Respecto a la diferencia de comportamiento en los hidrociclones de tipo convencional de 10 mm y 25,4 mm, la explicación puede relacionarse con la variación propia del tipo de bomba (helicoidal Mono Merlin), en la regulación de la presión de trabajo que sería más acentuada en los ciclones de menor diámetro.

Los valores del criterio de Cochran (G), en todos los casos son menores que el criterio de Cochran de la tabla ($G = 0,173$). Esto refleja la calidad del experimento en general, el error cometido en la investigación es homogéneo a partir del concepto de que no hay diferencias significativas en las varianzas de cada ensayo realizado. Esto implica que los flujos de la separación son también homogéneos lo que decididamente favorece la toma de muestra y su intervalo de muestreo.

IV.4.1 Hidrociclón con diámetro 10 mm.

Los datos estadísticos correspondientes a este análisis se reflejan en el anexo V, los resultados del análisis de varianza se muestran en la tabla IV.2. En la recuperación y contenido de cuarzo en las arenas influyen significativamente las mismas variables e interacciones: en el reboso, el diámetro de la descarga de las arenas y las interacciones resultadas de las combinaciones de los factores diámetros del tubo de reboso y la descarga de las arenas. En los gráficos de Pareto se pueden apreciar con claridad estos elementos representados en la figura IV.26.

Tabla IV.2 Resultados del análisis de varianza para el cuarzo en hidrociclón de 10 mm

Función De Salida	Valor de la probabilidad de la variables independiente y sus interacciones								
	Diámet reboso	Diámet arenas	Presión Alimentac						
	A	B	C	AA	AB	AC	BB	BC	CC
Arenas									
Recuperac	0,517	0,000	0,578	0,003	0,026	0,542	0,014	0,000	0,192
Contenido	0,360	0,000	0,065	0,266	0,000	0,370	0,174	0,030	0,846
Reboso									
Recuperac	0,112	0,050	0,064	0,000	0,040	0,102	0,014	0,001	0,072
Contenido	0,053	0,853	0,615	0,63	0,572	0,545	0,168	0,822	0,738

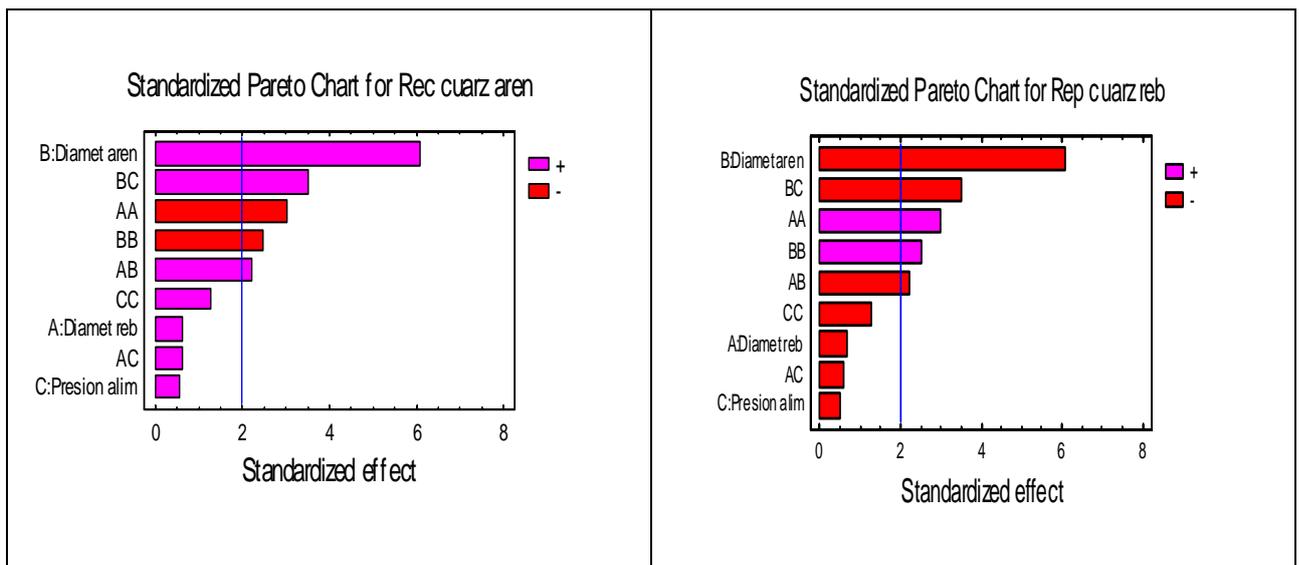


Figura IV. 26 Gráficos de Pareto para la recuperación de cuarzo en arenas y reboso

A continuación se muestra los modelos de regresión múltiple en el hidrociclón de 10 mm, donde se muestra la influencia de las variables operacionales e independientes sobre las funciones de respuestas: recuperación (ξ), contenido (β) del producto en las colas y el reboso para el cuarzo y las zeolitas, en el estudio realizado en hidrociclones:

$$\xi_{\text{cuarzo arenas}} = 0,3670 + 0,0677D.\text{arenas} + 0,0087 D.\text{reboso} - 0,0044 \text{ Presión}; \mathbf{R^2=46,74}$$

$$\xi_{\text{cuarzo reboso}} = 0,5861 - 0,0966 D.\text{arenas} - 0,0103D.\text{reboso} - 0,0088 \text{ Presión}; \mathbf{R^2=51,38}$$

$$\xi_{\text{zeolita reboso}} = 0,3670 + 0,067D.\text{arenas} + 0,0087 D.\text{reboso} - 0,0044 \text{ Presión}; \mathbf{R^2=46,74}$$

$$\xi_{\text{zeolita arenas}} = 0,3670 + 0,0677 D.\text{arenas} + 0,0087 D.\text{reboso} - 0,0044 \text{ Presión}; \mathbf{R^2=46,74}$$

$$\beta_{\text{cuarzo arenas}} = 10,0893 + 0,6914 D.\text{arenas} - 0,180 D.\text{reboso} + 0,3661 \text{ Presión}; \mathbf{R^2= 40,39}$$

$$\beta_{\text{cuarzo reboso}} = 8,7503 - 0,0427 D.\text{arenas} - 0,4536 D.\text{reboso} + 0,1161 \text{ Presión}; \mathbf{R^2= 8,75}$$

$$\beta_{\text{zeolita arenas}} = 88,37 - 1,7988 D.\text{arenas} + 0,2257 D.\text{reboso} - 1,4620 \text{ Presión}; \mathbf{R^2= 14,45}$$

$$\beta_{\text{zeolita reboso}} = 91,417 + 0,1011 D.\text{arenas} + 0,4077 D.\text{reboso} - 0,3359 \text{ Presión}; \mathbf{R^2= 51,52}$$

A juzgar por los resultados de los modelos de regresión, la variable presión de alimentación influye negativamente tanto en la recuperación como en el contenido para las dos fases para el producto reboso y arenas con excepción del contenido de cuarzo en los mencionados productos. El diámetro del tubo del reboso como norma influye positivamente sobre las funciones de salida, salvo sobre las variables recuperación y contenido de cuarzo en el reboso y el contenido de cuarzo en las arenas para el caso del tubo de las arenas es bastante irregular.

En la tabla IV.3, aparecen los resultados del análisis de varianza para la zeolita, ninguna de las variables ejerce una influencia significativa sobre el contenido de zeolitas en los productos del hidrociclado. Solo el diámetro de la descarga de las arenas y sus interacciones consigo misma y en la presión de alimentación ejercen una influencia significativa en la recuperación de la fase zeolítica en ambos productos como se muestra en la figura IV.27. El grado de dependencia entre las variables analizadas es moderadamente alta al analizar el R^2 , para experimento de tipo continuo, excepto para el modelo del contenido de zeolita en ambos productos.

Tabla IV.3 Resultados del análisis de varianza para la zeolita en hidrociclón de 10 mm

Función De Salida	Valor de la probabilidad de la variables independiente y sus interacciones								
	Diámetro reboso	Diámetro arenas	Presión Alimentac	AA	AB	AC	BB	BC	CC
	A	B	C						
Arenas									
Recuperac	0.558	0.000	0.764	0.023	0.001	0.446	0.001	0.002	0.438
Contenido	0.856	0.151	0.242	0.143	0.723	0.977	0.372	0.206	0.528
Reboso									
Recuperac	0.118	0.001	0.102	0.000	0.001	0.213	0.001	0.000	0.218
Contenido	0.128	0.708	0.209	0.818	0.561	0.242	0.242	0.967	0.785

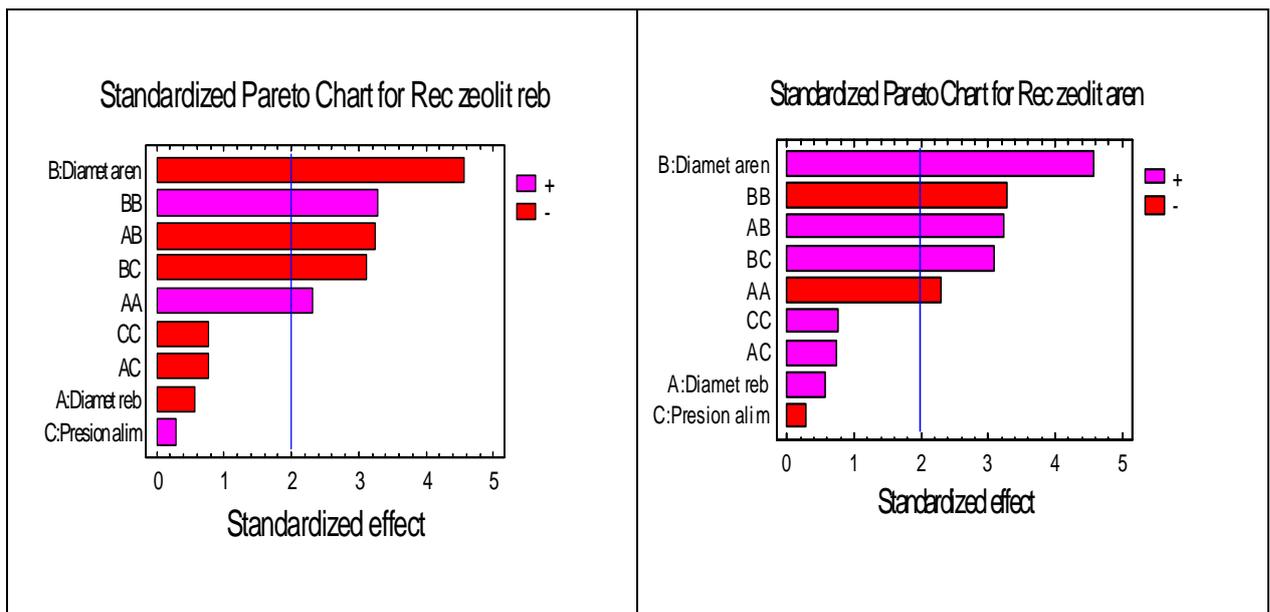


Figura. IV. 27 Gráficos de Pareto para la recuperación de zeolita en las arenas y reboso.

IV.4.2 Hidrociclón con diámetro 25,4 mm.

Los datos experimentales se exponen en el anexo 6. Los resultados en la tabla IV.5 muestran que sobre la recuperación del cuarzo en las arenas influye significativamente el diámetro de los tubos de reboso y de descarga de las arenas y la interacción, resultado de la combinación

del diámetro del reboso y la presión en la alimentación como se muestra en la figura IV.27.

Para el caso de la recuperación del cuarzo en el producto de reboso las tres variables operacionales influyen significativamente y las interacciones generadas de la combinación de los diámetros de reboso y arenas y la del diámetro de arenas y la presión de alimentación. En la variable contenido de cuarzo en el reboso e las arenas no influyen significativamente ningún factor.

Tabla IV.5 Resultados del análisis de varianza para el cuarzo en hidrociclón de 25,4 mm

Función De Salida	Valor de la probabilidad de la variables independiente y sus interacciones								
	Diámetro reboso A	Diámetro arenas B	Presión alimentac C	AA	AB	AC	BB	BC	CC
	Arenas								
Recuperac	0.005	0.000	0.083	0.000	0.094	0.542	0.042	0.125	0.527
Contenido	0.355	0.231	0.066	0.051	0.277	0.684	0.388	0.521	0.468
Reboso									
Recuperac	0.003	0.000	0.011	0.000	0.017	0.156	0.303	0.011	0.815
Contenido	0.507	0.559	0.037	0.827	0.022	0.078	0.576	0.672	0.054

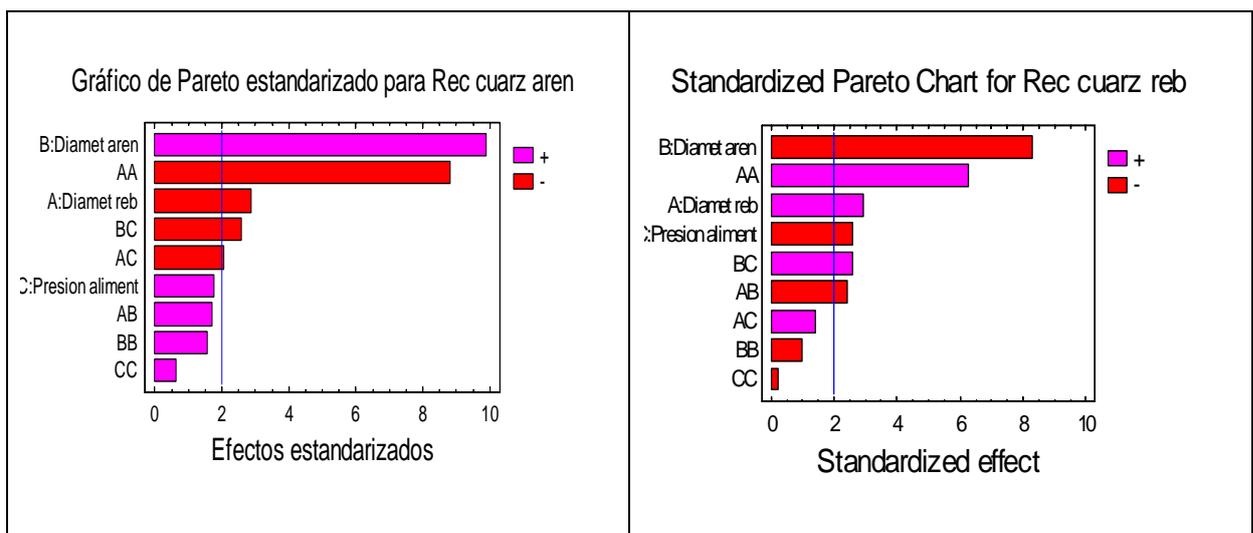


Figura IV. 27 Gráficos de Pareto para la recuperación de cuarzo en arenas y reboso

Los resultados que del análisis de los modelos de regresión para las variables independientes y su influencia sobre las variables de salida ó índices tecnológicos del beneficio de minerales para el cuarzo en el hidrociclón de 25,4 mm se reflejan en las ecuaciones que a continuación describimos:

$$\xi_{\text{cuarzo arenas}} = 0,4087 + 0,1324 D.\text{arenas} - 0,0472 D.\text{reboso} - 0,0422 \text{ Presión}; R^2 = 67,56$$

$$\xi_{\text{cuarzo reboso}} = 0,5908 - 0,1324 D.\text{arenas} - 0,0477 D.\text{reboso} - 0,0416 \text{ Presión}; R^2 = 67,61$$

$$\beta_{\text{cuarzo arenas}} = 10,4396 + 0,1440 D.\text{arenas} - 0,284 D.\text{reboso} + 0,3979 \text{ Presión}; R^2 = 24,66$$

$$\beta_{\text{cuarzo reboso}} = 8,4321 - 0,0981 D.\text{arenas} + 0,111 D.\text{reboso} - 0,354815 \text{ Presión}; R^2 = 22,89$$

Los resultados que se muestran en los modelos reflejan que es positiva la influencia de la presión de alimentación y el diámetro de las arenas para los productos que se descarga en las arenas y negativa para el producto del reboso, mientras el diámetro del tubo de reboso influye de forma contraria. Los resultados que aparecen en la tabla IV.6, indican que en el modelo de recuperación de la fase zeolítica en el producto de las arenas son significativos las variables diámetro de las arenas y reboso así como las combinaciones diámetro del reboso-presión de alimentación y diámetro de las arenas-presión de alimentación.

Tabla IV.6 Resultados del análisis de varianza para la zeolita en hidrociclón de 25,4 mm

Función De Salida	Valor de la probabilidad de la variables independiente y sus interacciones								
	Diámetro reboso A	Diámetro arenas B	Presión alimentac C	AA	AB	AC	BB	BC	CC
	Arenas								
Recuperac	0.005	0.000	0.087	0.000	0.087	0.039	0.015	0.112	0.516
Contenido	0.229	0.280	0.040	0.033	0.277	0.706	0.864	0.878	0.494
Reboso									
Recuperac	0.005	0.004	0.112	0.000	0.105	0.032	0.205	0.001	0.214
Contenido	0.720	0.632	0.091	0.851	0.075	0.101	0.851	0.867	0.192

Para el caso del contenido de zeolita en ambos productos, ninguna variable independiente tiene una influencia significativa sobre las los índices tecnológicos, como se representa en la figura IV.28.

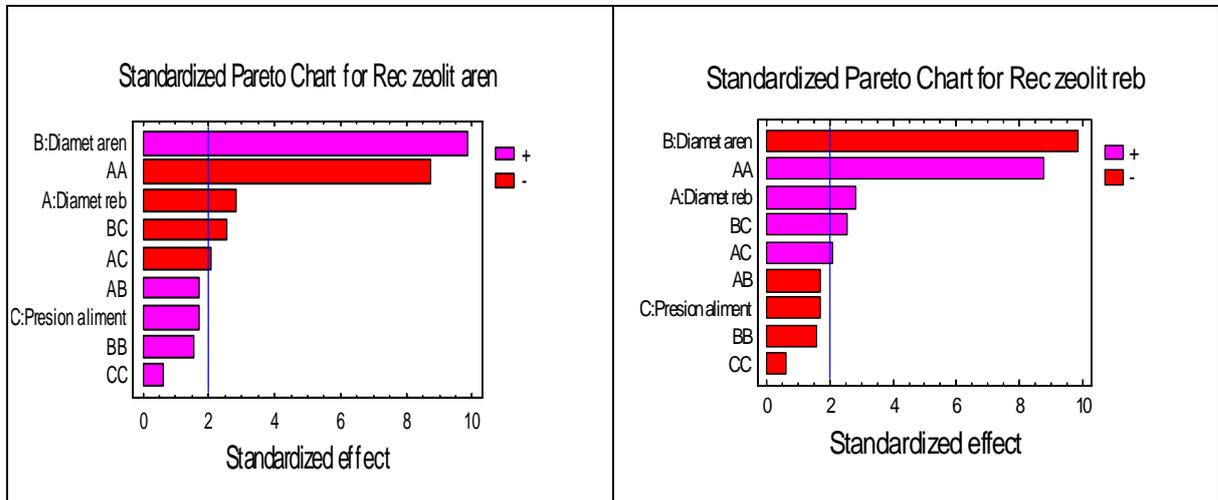


Figura IV. 28 Gráfico de Pareto para la recuperación de zeolita en hidrociclón de 25.4mm

A juzgar por los resultados de la interpretación de los modelos de regresión múltiple de la influencia de las variables operacionales en las dependientes, para el caso de la zeolita en el hidrociclón de 25,4 mm. Se muestra que la presión de alimentación y el diámetro de las arenas influyen negativamente para los indicadores del producto reboso principalmente. El diámetro del tubo de reboso influye negativamente en los indicadores para el producto de las arenas.

$$\xi_{\text{zeolita reboso}} = 0,6472 - 0,1275 \text{ D.arenas} + 0,0370 \text{ D.reboso} - 0,0224 \text{ Presión}; \mathbf{R^2 = 74,75}$$

$$\xi_{\text{zeolita arenas}} = 0,3527 + 0,1275 \text{ D.arenas} - 0,0370 \text{ D.reboso} + 0,0224 \text{ Presión}; \mathbf{R^2 = 74,75}$$

$$\beta_{\text{zeolita arenas}} = 89,1021 - 0,2512 \text{ D.arenas} + 0,2805 \text{ D.reboso} - 0,4838 \text{ Presión}; \mathbf{R^2 = 20,91}$$

$$\beta_{\text{zeolita reboso}} = 91,7679 - 0,1037 \text{ D.arenas} - 0,0777 \text{ D.reboso} - 0,3703 \text{ Presión}; \mathbf{R^2 = 15,89}$$

Tesis en opción del grado científico Doctor en Ciencias Técnicas al Ing. Mafefe Frazao Ndumba

Resulta interesante que el grado de dependencia entre las variables de operación y las recuperaciones de los productos hidrociclonados es relativamente alto. Sin embargo, para el caso del contenido en ambos productos el grado de dependencia es bajo. Lo que indica que esto guarda relación con la forma constructiva del hidrociclón, como norma estos hidrociclones son más efectivos para la clasificación, (Napier-Munn et al., 1996; Lynch et al., 1975; Austin y Concha, 1994; Wills, 1998, 2006).

IV.4.3 Hidrociclón con diámetro 50,8 mm.

En el anexo 7, se reflejan los datos estadísticos del experimento y en la tabla IV.9 se muestra una síntesis de los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para los indicadores de la concentración en cada producto del hidrociclón (arenas y reboso).

Tabla IV.9 Resultados del análisis de varianza para el cuarzo para el hidrociclón de 50,8 mm

Función De Salida	Valor de la probabilidad de la variables independiente y sus interacciones								
	Presión alimentac	Diámetro reboso	Diámetro Arenas						
	A	B	C	AA	AB	AC	BB	BC	CC
Arenas									
Recuperac	0.000	0.000	0.095	0.000	0.000	0.131	0.000	0.873	0.92
Contenido	0.107	0.083	0.000	0.007	0.000	0.281	0.58	0.011	0.267
Reboso									
Recuperac	0.000	0.000	0.057	0.001	0.01	0.467	0.000	0.053	0.003
Contenido	0.000	0.001	0.788	0.000	0.018	0.071	0.436	0.116	0.029

En la recuperación del cuarzo para ambos productos influyen significativamente la presión de la alimentación y el diámetro del tubo de reboso. Son significativas además las interacciones resultado de la combinación de estos mismos factores, como se representa en la figura IV. 29, esto significa que las variables presión de alimentación y diámetro del reboso introducen un

efecto no lineal sobre la recuperación del SiO₂ en las arenas y en el reboso; algo similar ocurre con la interacción generada por ambos factores.

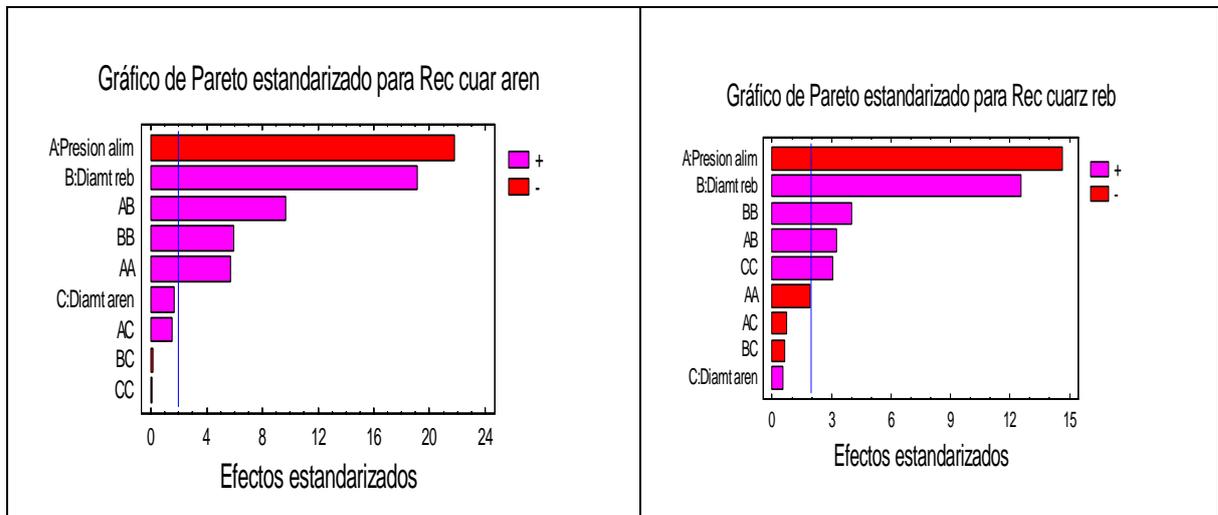


Figura IV. 29 Gráficos de Pareto para la recuperación de cuarzo en arenas y reboso

Los resultados del análisis de los modelos de regresión que a continuación se subscribe, indican que la presión de alimentación influye negativamente en la recuperación del cuarzo, mientras que el diámetro del diámetro del tubo de reboso y la arena influye positivamente. Los valores del coeficiente de regresión múltiple indican el alto grado de dependencia entre las variables para ambos casos. Para el contenido de cuarzo en las arenas y reboso el cuadro es diferente. Para el primer caso, la única variable que influye significativamente es el diámetro del reboso del hidrociclón y su interacción con la presión de alimentación. Resulta interesante que el diámetro del tubo de reboso tiene un efecto cuadrático sobre está función de salida; lo cual de alguna manera influye sobre el valor del coeficiente de regresión lineal múltiple, o sea sobre la linealidad del modelo; el valor del coeficiente de regresión múltiple es de 0.76.

$$\xi_{\text{cuarzo arenas}} = 0,6143 + 0,0168D.\text{arenas} + 0,1900 + D.\text{reboso} - 0,2170 \text{ Presión}; \mathbf{R^2 = 93,58}$$

$$\xi_{\text{cuarzo reboso}} = 0,4816 + 0,0059 D.\text{arenas} + 0,132 D.\text{reboso} - 0,1548 \text{ Presión}; \mathbf{R^2 = 85,71}$$

$$\beta_{\text{cuarzo arenas}} = 12,5405 + 0,1440 D.\text{arenas} + 0,174D.\text{reboso} + 0,1616 \text{ Presión}; \mathbf{R^2 = 57,16}$$

$$\beta_{\text{ cuarzo reboso}} = 8,4321 + 0,0412 \text{ D.arenas} - 0,5122 \text{ D.reboso} + 0,6464 \text{ Presión}; \mathbf{R^2 = 52,27}$$

Para el caso del contenido de cuarzo en reboso del hidrociclón influye significativamente la presión de alimentación. Aún cuando los valores de coeficiente de determinación son los que se representados en los modelos anteriores son menores para el modelo de regresión del contenido respecto a la recuperación, para el primero, puede considerarse que el grado de dependencia entre las variables es relativamente alto, o moderadamente alto (R^2 - 52%); el coeficiente de regresión múltiple es de 0.72. Esta linealidad se ve afectada por la significación de la interacción generada por la presión de alimentación y el diámetro del tubo de reboso, el efecto cuadrático de la variable de entrada y la presión de alimentación. Resulta interesante que para la recuperación de la fase zeolítica en los productos hidrociclados se muestra la misma regularidad que para la recuperación del cuarzo para la zeolita y resultados de ANOVA de la tabla IV.10.

Tabla IV.10 Resultados del análisis de varianza la zeolita para el hidrociclón de 50,8 mm

Función De Salida	Valor de la probabilidad de la variables independiente y sus interacciones								
	Presión alimentac A	Diámetro reboso B	Diámetro Arenas C	AA	AB	AC	BB	BC	CC
	Arenas								
Recuperac	0.000	0.000	0.159	0.000	0.000	0.353	0.000	0.979	0.502
Contenido	0.253	0.227	0.030	0.252	0.000	0.164	0.061	0.089	0.252
Reboso									
Recuperac	0.000	0.000	0.018	0.000	0.000	0.143	0.000	0.918	0.402
Contenido	0.000	0.000	0.659	0.000	0.017	0.005	0.485	0.046	0.164

En la función de salida el contenido de zeolita en las arenas influye significativamente el diámetro del tubo de las arenas y la interacción de la presión de alimentación y el diámetro del

tubo del reboso que introduce cuadrático en esta función de respuestas. Por otra parte, en el contenido de zeolita en el reboso influyen de manera significativa dos factores: la presión de alimentación y el diámetro de reboso del hidrociclón. Estas dos variantes tienen efectos diferentes sobre la función de salida; el primero tiene un efecto positivo, mientras que el segundo lo hace negativamente, su influencia es mucho mayor que el efecto de la presión de alimentación. En este caso la linealidad del modelo se ve afectado por el efecto cuadrático de la presión de alimentación y las interacciones generadas por los efectos generados por la combinación de las variables, presión de alimentación – diámetro del tubo de reboso y los diámetros del tubo de reboso y las arenas ($R = 0.69$) resultados que se muestran en los modelos que a continuación exponemos.

$$\xi_{\text{zeolita reboso}} = 0,4209 - 0,0124 D. \text{ arenas} - 0,1835 D. \text{ reboso} + 0,2137 \text{ Presión}; \mathbf{R^2 = 94,42}$$

$$\xi_{\text{zeolita arenas}} = 0,5790 + 0,0103 D. \text{ arenas} + 0,1122 D. \text{ reboso} - 0,2007 \text{ Presión}; \mathbf{R^2 = 92,11}$$

$$\beta_{\text{zeolita arenas}} = 86,201 - 0,2712 D. \text{ arenas} - 0,1492 D. \text{ reboso} - 0,1411 \text{ Presión}; \mathbf{R^2 = 47,84}$$

$$\beta_{\text{zeolita reboso}} = 92,5802 + 0,6111 D. \text{ arenas} - 0,8518 D. \text{ reboso} + 0,07407 \text{ Presión}; \mathbf{R^2 = 51,52}$$

Las variables que ejercen una influencia significativa en la recuperación y contenido de zeolita son la presión en la alimentación y el diámetro del tubo del reboso como se muestra en las figuras IV. 30 y IV. 31.

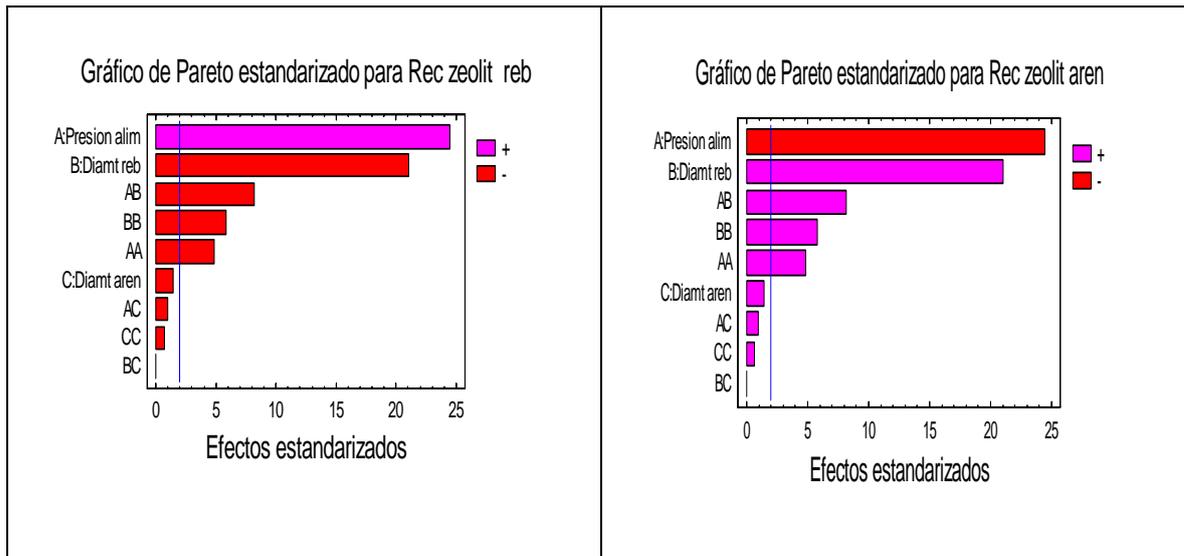


Figura IV. 30 Gráficos de Pareto para la recuperación de zeolita en arenas y reboso

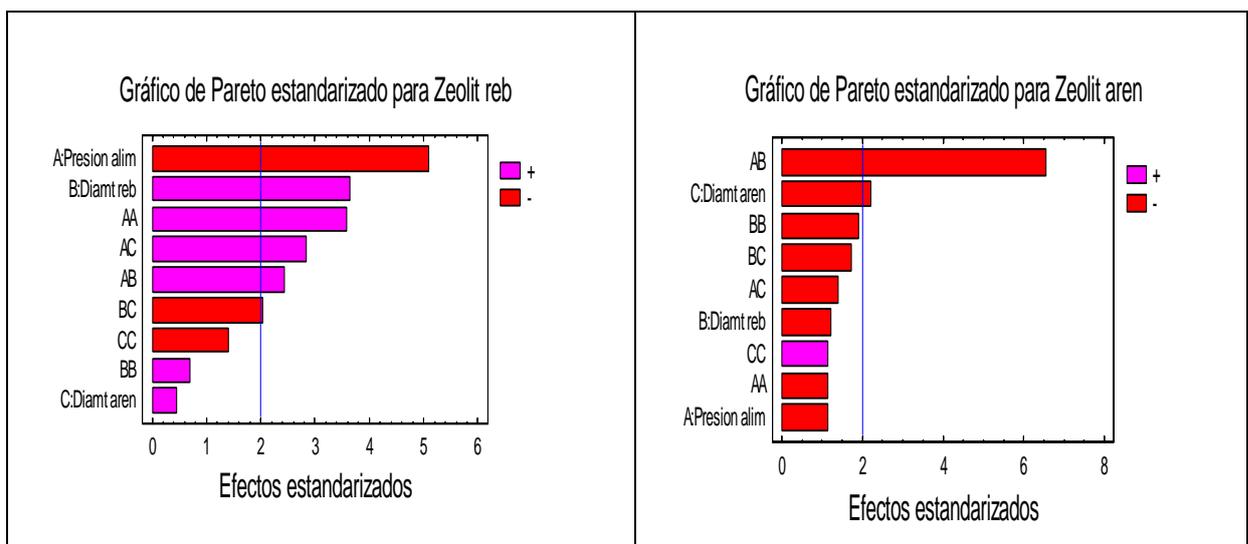


Figura IV. 31 Gráficos de Pareto para el contenido de zeolita en arenas y reboso

Los resultados del análisis de varianza reflejan que al empelar el hidrociclón de 50,8 mm de fondo plano, las variables operacionales ejercen una influencia significativa sobre la recuperación pero también sobre el contenido de cuarzo y zeolita reflejando las ventajas de este tipo de hidrociclón para la concentración de minerales, a pesar que los dos grupos trabajen en régimen de sedimentación contrariada donde aumenta el efecto del corte en la fracción gruesa y ejerce mayor influencia la densidad de mineral resultados de otros

investigadores en otros tipos de menas, (Sripriya y Rao, 1999; Lynch y Bailey, 1975; Bouso, 1998, 1999 y 1990). Lo que demuestra mejores resultados en la separación del cuarzo de las fases zeolíticas en hidrociclón de fondo plano.

Al comparar los resultados de los experimentos para cada diámetro del hidrociclón se puede establecer que con el aumento del diámetro del hidrociclón los valores del coeficiente de determinación y de los modelos de regresión para las funciones de salidas sea recuperación o contenido aumentan linealmente como se muestra en las figura IV. 32 a IV.35.

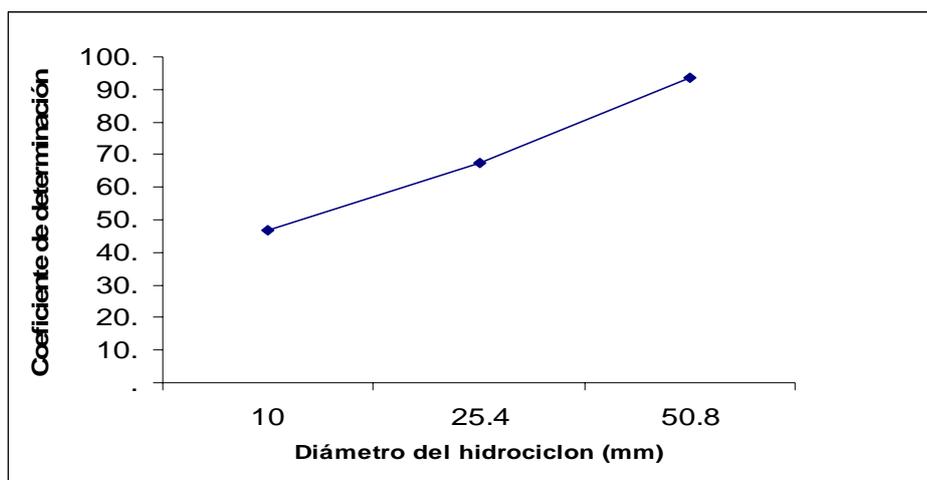


Figura IV. 32 Dependencia del coeficiente de determinación del modelo para recuperación de cuarzo arenas

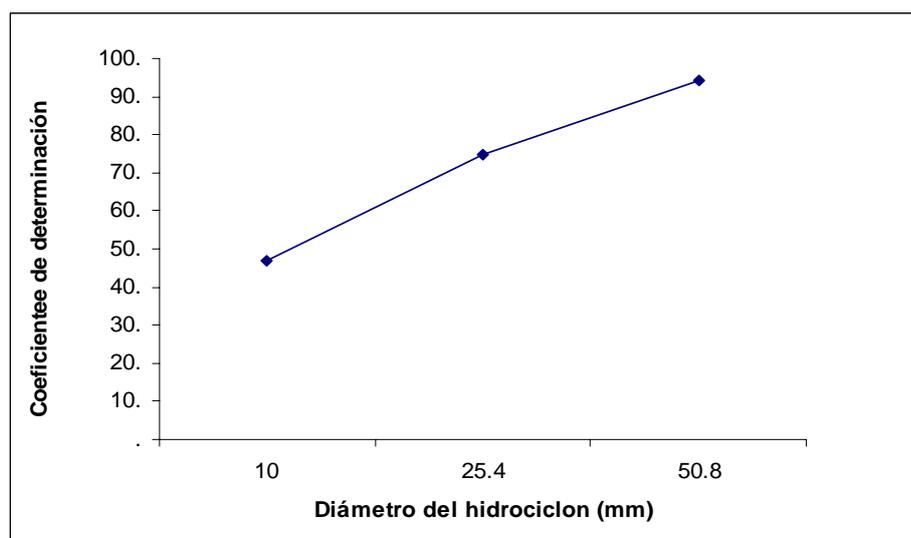


Figura IV. 33 Dependencia del coeficiente de determinación del modelo para recuperación de zeolita en reboso

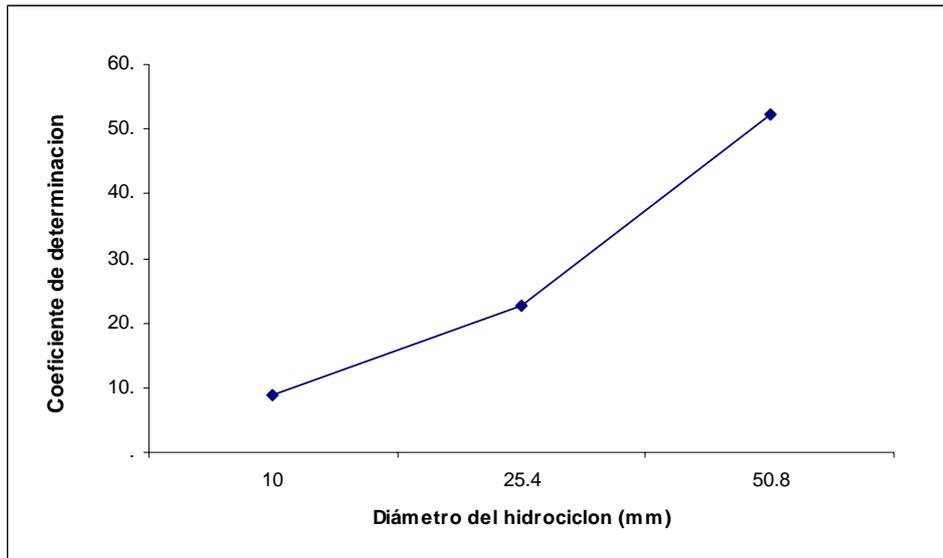


Figura IV. 34 Dependencia del coeficiente de determinación del modelo para contenido de cuarzo en reboso

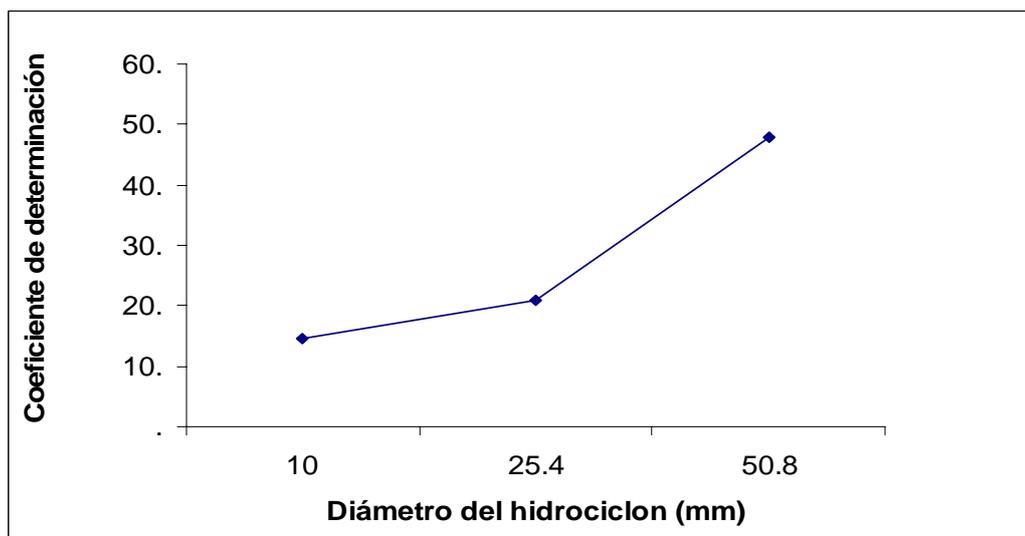


Figura IV. 35 Dependencia del coeficiente de determinación del modelo para contenido de zeolita en arenas

El máximo valor del coeficiente de determinación del modelo de regresión múltiple se acentúan en el hidrociclón de fondo plano donde estos valores superan el valor de 0.96 para la funciones de recuperación en ambos productos y componentes, está función de salida aumenta la linealidad de los modelos.

IV.5 Valoración económica de las alternativas tecnológicas

Para conocer la viabilidad económica de la inversión propuesta es necesario contabilizar la inversión inicial y los flujos de caja generados, todo ello teniendo en cuenta el período estimado de explotación, que en este caso se ha fijado para la evaluación de las alternativas de flotación por espumas y hidrociclonado en 10 años.

Determinación de los gastos: Para realizar el cálculo de los flujos de caja de la inversión en su período se debe considerar primeramente aquéllos apartados económicos que se pueden clasificar como gastos; se diferenciarán por tanto los gastos debidos a los costes de capital de los debidos a los costes de operación, se emplea en el estudio la metodología de Mular y Bhappu (1980), seleccionando para el caso de ambas variantes el menor de los valores recomendados tabla IV.13.

Tabla IV.13 Coste inicial de los equipos básicos CEB

Alternativa 1			Alternativa 2		
Flotación			Hidrociclones fondo plano		
Equipo	Uds.	Precio (\$)	Equipo	Uds.	Precio (\$)
Trituradora 1 ^a	1	20000	Trituradora 1 ^a	1	40000
Trituradora 2 ^a	1	15000	Trituradora 2 ^a	1	30000
Criba	1	12000	Criba	1	20000
Molino de bolas	1	30000	Molino de bolas	1	50000
Tanques	8	24000	Hidrociclones	27	270000
Celdas	5	120000			
Total		289000	Total		410000

Gastos derivados de medios propios: son los gastos derivados del proceso de explotación, que incluyen los salarios, suministros de mantenimiento, suministros de operación, energía y combustibles y el coste de materia prima; éste último englobaría todos los costos de minado, al estimarse como el costo de entrega de la materia prima en la cabeza de la planta.

Salarios: se establece en ambos casos que la planta operará 6 días a la semana (24 días al mes), en dos turnos de 8 horas cada uno, por lo cual el personal tiene distintos turnos de trabajo, se ha estimado una necesidad total de personal de 6 trabajadores, con un coste anual asociado de 18000 \$.

Suministros de mantenimiento: debidos al mantenimiento y reparación de los equipos y a la sustitución de elementos en caso de avería, se considera en ambos casos que supone el 5 % del Calculo del Equipamiento Básico (CEB), para un total de 31790 \$/año para la alternativa 1 y 45100 \$/año para la alternativa 2.

Suministros de operación: se refiere en este caso a los reactivos que se utilizan en el proceso. En el caso de la alternativa 2 este coste es nulo, mientras que para la alternativa 1 su estimación se apoya en la tabla IV.14.

Tabla IV.14 Costo de los reactivos

Reactivos	Consumo (kg/t)	Precio (\$/kg)	Total unitario (\$/t)	Total anual (\$)
MIBC	0.1	20	2	36864
Dodecylamina	0.3	60	18	331776
Cloruro cálcico	5	10	50	921600
Hidróxido cálcico	5	10	50	921600
				2211840

Los gastos generados en consumo de energía se representan en la tabla IV.15, el consumo eléctrico se puede estimar a partir de la potencia de los equipos utilizados.

Tabla IV.15 Consumo de energía para los equipos seleccionados

	Energía	Potencia kW	Consumo kWh/día	Consumo kWh/año
Alternativa 1	Trituradora 1ª	6	48	14976
	Trituradora 2ª	2	32	9984
	Criba	2	32	9984
	Molino de bolas	10	160	49920
	Tanques	8	128	39936
	Celdas	6	96	29952
	Total			496
Alternativa 2	Trituradora 1ª	6	48	14976
	Trituradora 2ª	2	32	9984
	Criba	2	32	9984
	Molino de bolas	10	160	49920
	Hidrociclones	6	96	29952
	Total			368

Si se considera un costo de 0,11 \$/kWh, se obtiene un costo total es de 1 7023 \$/año para la alternativa 1 y 1 2630 \$/año para la alternativa 2. Los costos de los suministros de la materia prima en ambos casos en 1,65 \$/t, lo que supone un coste anual en ambas alternativas de 30413 , los costos derivados de este capítulo ascienden a un total de 2309067 \$/año para la alternativa 1 y 10 6145 \$/año para la alternativa 2.

Determinación de los ingresos: Los ingresos provienen de la venta del concentrado zeolítico, dado que la producción anual en ambos casos es igual, y se estima un precio de venta en el mercado de 90 \$/t, resultan ingresos anuales iguales para ambas alternativas de 17 97120 \$/año.

Financiamiento: Se considera que la financiación del proyecto se realiza mediante un préstamo concedido por una entidad bancaria, a un interés anual del 1 %. El periodo de devolución del préstamo es de 5 años. Este préstamo deberá cubrir tanto los gastos iniciales como los del primer año de explotación, que ascienden a un total de 29 44868 \$ para la alternativa 1 y 10 08147 \$ para la alternativa 2 los resultados se muestran en la tabla IV.16.

Tabla IV.16 Cálculo de las cuotas anuales para ambas alternativas.

Alternativa 1	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Capital restante	2944868	2355894	1766921	1177947	588974
Intereses	353384	282707	212030	141354	70677
Amortización	588974	588974	588974	588974	588974
Cuota	942358	871681	801004	730327	659650
Alternativa 2	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Capital restante	1008147	806517	604888	403259	201629
Intereses	120978	96782	72587	48391	24196
Amortización	201629	201629	201629	201629	201629
Cuota	322607	298411	274216	250020	225825

Los índices de rentabilidad existen diferentes criterios para evaluar esta rentabilidad, basándose en la inversión realizada, los flujos de caja generados por un proyecto y el tiempo necesario para lograrlos. Estos criterios decidirán si el capital invertido será recuperado y si el proyecto es rentable. El objetivo por tanto es averiguar si la puesta en marcha del proyecto es viable técnicamente y remunera el capital invertido en cuantía suficiente.

Para evaluar esta inversión se deben determinar los flujos de caja (cash flow) a lo largo de la vida del proyecto. Las cuantías de dichos flujos, una vez actualizados para compensar el encarecimiento anual de los bienes de consumo (y con ello la devaluación del dinero con el tiempo), determinan la viabilidad económica del proyecto.

Criterios de evaluación: Los criterios de evaluación económica pueden ser clasificados en algunos de los siguientes parámetros económicos:

Valor actualizado neto (VAN): Los flujos de caja son actualizados hasta conocer su valor en el momento de inicio de la inversión, de forma que puedan ser comparados con el desembolso inicial. Para llevar a cabo esta actualización se le exigirá al proyecto una rentabilidad mínima. Cuanto mayor sea esta rentabilidad más beneficiosa será la inversión. Para calcular la rentabilidad mínima exigida habrá que tener en cuenta el coste de oportunidad de invertir el capital en otros proyectos de inversión.

Un primer criterio de elección de una inversión consiste en la elección de aquel proyecto que tenga un VAN mayor, desechando proyectos que proporcionen valores negativos.

La fórmula que permite actualizar los flujos de caja es la siguiente:

$$Q_{\text{actual}} = Q_n / (1+i)^n$$

Q_n = Flujo de caja obtenido en el periodo n de tiempo.

Q_{actual} = Valor actual del flujo de caja Q_n .

i = Tasa de descuento.

n = Periodo de tiempo.

En el caso de que la tasa de descuento sea constante en el tiempo la expresión utilizada será:

$$\text{VAN} = -A + \sum_j^n (Q_j / (1+K)^j)$$

A = Desembolso inicial

K = Rentabilidad exigida

n = Período de tiempo

Para el análisis comparativo realizado se consideró en ambos casos un valor de $K=4\%$

Tasa interna de rentabilidad (TIR): representa la tasa de descuento que iguala el desembolso inicial de una inversión con los flujos de caja que genera esa inversión. De esta manera al final del periodo considerado se recupera la inversión realizada y los intereses abonados. Los flujos se actualizan al momento inicial con esa misma tasa.

El cálculo de la TIR se realiza igualando el desembolso inicial con los flujos de caja actualizados a la tasa TIR, es decir, igualando el VAN a cero. En caso de que el VAN sea positivo desde el primer año, no tiene sentido el cálculo del TIR. Conocida la TIR, el criterio de decisión será el de considerar viable económicamente todo proyecto cuya TIR sea mayor que la rentabilidad mínima.

Plazo de recuperación: en las fases iniciales de un proyecto suele verificarse flujos de caja negativos, mientras que en las siguientes fases de desarrollo del proyecto se tenderá a flujos positivos. Esto lleva a que en un determinado momento ambos se compensan y la inversión comienza a ser rentable. El período que tarda en recuperarse esa inversión se denomina plazo de recuperación.

Tiene en cuenta el tiempo que tarda en recuperarse el desembolso inicial con los flujos de caja, que deberán ser actualizados al momento inicial. Este criterio aconseja seleccionar las inversiones que tengan menor plazo de recuperación. El inconveniente de este criterio como método de decisión es que no considera los flujos de caja posteriores al plazo de recuperación. Muchas empresas, sobre todo medianas y pequeñas, no tienen capacidad financiera suficiente para superar un plazo de recuperación largo, aunque se trate de un proyecto muy rentable. Por ello se suelen preferir los proyectos que se reembolsan en un máximo de tres o cuatro años.

IV.5.1 Cálculo de los índices de rentabilidad

En la tabla IV.17 se muestran los cálculos realizados para llevar a cabo la determinación de los flujos de caja actualizados en ambos casos analizados.

Tabla IV.17 Determinación del flujo de caja actualizada

Alternativa 1 (Flotación)					
Año	Costes	Ingresos brutos	Préstamo	Flujos de caja	Flujos actualizados
0	635801				
1	2309067	1797120	942358	-1454304	-1454304
2	2309067	1797120	871681	-1383627	-1279241
3	2309067	1797120	801004	-1312951	-1167208
4	2309067	1797120	730327	-1242274	-1061901
5	2309067	1797120	659650	-1171597	-962967
6	2309067	1797120		-511947	-404599
7	2309067	1797120		-511947	-389037
8	2309067	1797120		-511947	-374074
9	2309067	1797120		-511947	-359687
10	2309067	1797120		-511947	-345853
Alternativa 2 (Hidrociclonado)					
Año	Costes	Ingresos brutos	Préstamo	Flujos de caja	Flujos actualizados
0	902002				
1	106145	1797120	322607	1368368	1368368
2	106145	1797120	298411	1392564	1287504
3	106145	1797120	274216	1416759	1259494
4	106145	1797120	250020	1440955	1231734
5	106145	1797120	225825	1465150	1204247
6	106145	1797120		1690975	1336402
7	106145	1797120		1690975	1285002
8	106145	1797120		1690975	1235579
9	106145	1797120		1690975	1188057
10	106145	1797120		1690975	1142362

De las tablas anteriores se deducen los índices económicos representados en la tabla IV.18.

Tabla IV. 18 Resultados de la valoración económica de las alternativas evaluadas

Alternativa 1		
VAN (\$)	TIR	R
-7798872	-	-
Alternativa 2		
VAN (\$)	TIR	R
12538750	-	0

Como se puede observar, existe una evidente diferencia en el comportamiento de la inversión, ya que en la alternativa 1 el valor negativo del VAN define la inversión como no viable económicamente, no llegándose a alcanzar a lo largo de los 10 años de vida del proyecto flujos de caja positivos en ningún año. Sin embargo, la alternativa 2 no sólo sí permite obtener un VAN positivo, sino que desde el primer periodo los flujos de caja son positivos (R=0), lo que impide el cálculo del TIR, que por otro lado en estas condiciones se hace innecesario.

Tesis en opción del grado científico Doctor en Ciencias Técnicas al Ing. Mafefe Frazao Ndumba

Se concluye que la alternativa 1 no es viable económicamente mientras que la alternativa 2 sí lo es; además el hecho de obtener un periodo de retorno nulo permite decir que la inversión es viable.

Conclusiones parciales

1. Se establece que para un tiempo de molienda en seco de 5 min, se concentra la zeolita del tipo Clinoptilolita en la fracción menor de 74 μm y en la fracción mayor de 74 μm se concentra la Heulandita. Para los demás tiempos estudiados no se observa regularidad alguna en cuanto al contenido de las fases mineralógicas. Este resultado permitió descartar la molienda diferencial como método de concentración del cuarzo.
2. Se establece que para un tiempo de molienda en seco de 30 min, se alcanza un porcentaje del material superior al 80% en la clase inferior a 0,074 mm, lo que permite la liberación de los granos de las fases de zeolitas y del cuarzo.
3. Se demuestra la posibilidad de concentración de las fases zeolíticas por flotación. Se obtienen concentrados cuyo contenido puede alcanzar hasta 94 % de zeolita, pero la recuperación es solo de un 10-15% respecto a la alimentación lo que es considerado muy bajo.
4. Se demuestra la viabilidad de la separación del cuarzo de las zeolitas en hidrociclones de fondo plano, alcanzado 94 - 95 % de zeolitas en reboso y un contenido de cuarzo de 5-6 %, y se establece que con el aumento del diámetro del hidrociclón el valor del coeficiente de determinación y de correlación aumentan y con ello la linealidad de los modelos.
5. Se demuestra que las variables operacionales del hidrociclón no son significativa para el contenido de zeolita y cuarzo en los hidrociclones de 10 y 25,4 mm, corroborando su efectividad en la clasificación, pero sí son para el hidrociclón de 50,8 mm y fondo plano para la concentración de rocas zeolitizadas.

CONCLUSIÓN GENERAL

Se establece la viabilidad de la separación del cuarzo de la roca zeolitizada en hidrociclones de fondo plano, alcanzando en el reboso 94-95 % de zeolita en reboso y un contenido de cuarzo de 5-6 %. Se establece que con el aumento del diámetro del hidrociclón el valor del coeficiente de determinación y el de correlación aumentan y con ello la linealidad de los modelos. Además se demostró que:

- ❖ Existe presencia y predominio de la zeolita del tipo heulandita sobre la clinoptilolita en la zona investigada sureste del yacimiento Caimanes.
- ❖ Para un tiempo de molienda en seco de 5 min se concentra la clinoptilolita en la fracción menor de 74 μm y en la fracción mayor de 74 μm se concentra la heulandita.
- ❖ La valoración económica de la molienda diferencial, la flotación y la concentración en hidrociclones realizada confirma que el empleo de los hidrociclones de fondo plano es la variante más favorable.

Recomendaciones

1. En caso de que se empleen rocas zeolíticas de un horizonte inferior, u otras zonas del yacimiento así como de otros yacimientos se recomienda una previa caracterización de las muestras para luego utilizar la tecnología propuesta.
2. Estudiar la posibilidad de aplicación de las colas de la flotación y arenas del hidrociclón del producto zeolítico obtenido como aditivo y carga en la industria de papel y como componente de hormigones y morteros para material ligero.