

Ministerio de la Educación Superior
Instituto Superior Minero-Metalúrgico
Facultad: Metalurgia -Electromecánica
Departamento de Metalurgia

Trabajo de Diploma

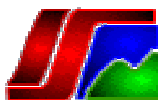
Título: Beneficio de las tobas básicas de Farallones de Moa para la concentración de fases zeolíticas.

Diplomante: Diadenis Cutiño Richardson

Tutores: Dr.C. Pedro Enrique Beyris Mazar
Departamento de Metalurgia

Dr.C. Gerardo A. Orozco Melgar
Departamento de Geología

Moa 2008



Ministerio de la Educación Superior
Instituto Superior Minero-Metalúrgico
Facultad: Metalurgia -Electromecánica
Departamento de Metalurgia

Trabajo de Diploma

Título: Beneficio de las tobas básicas de Farallones de Moa para la concentración de fases zeolíticas.

Firma

Diplomante: Diadenis Cutiño Richardson

Tutores: Dr.C. Pedro Enrique Beyris Mazar

Departamento de Metalurgia

Dr.C. Gerardo A. Orozco Melgar

Departamento de Geología



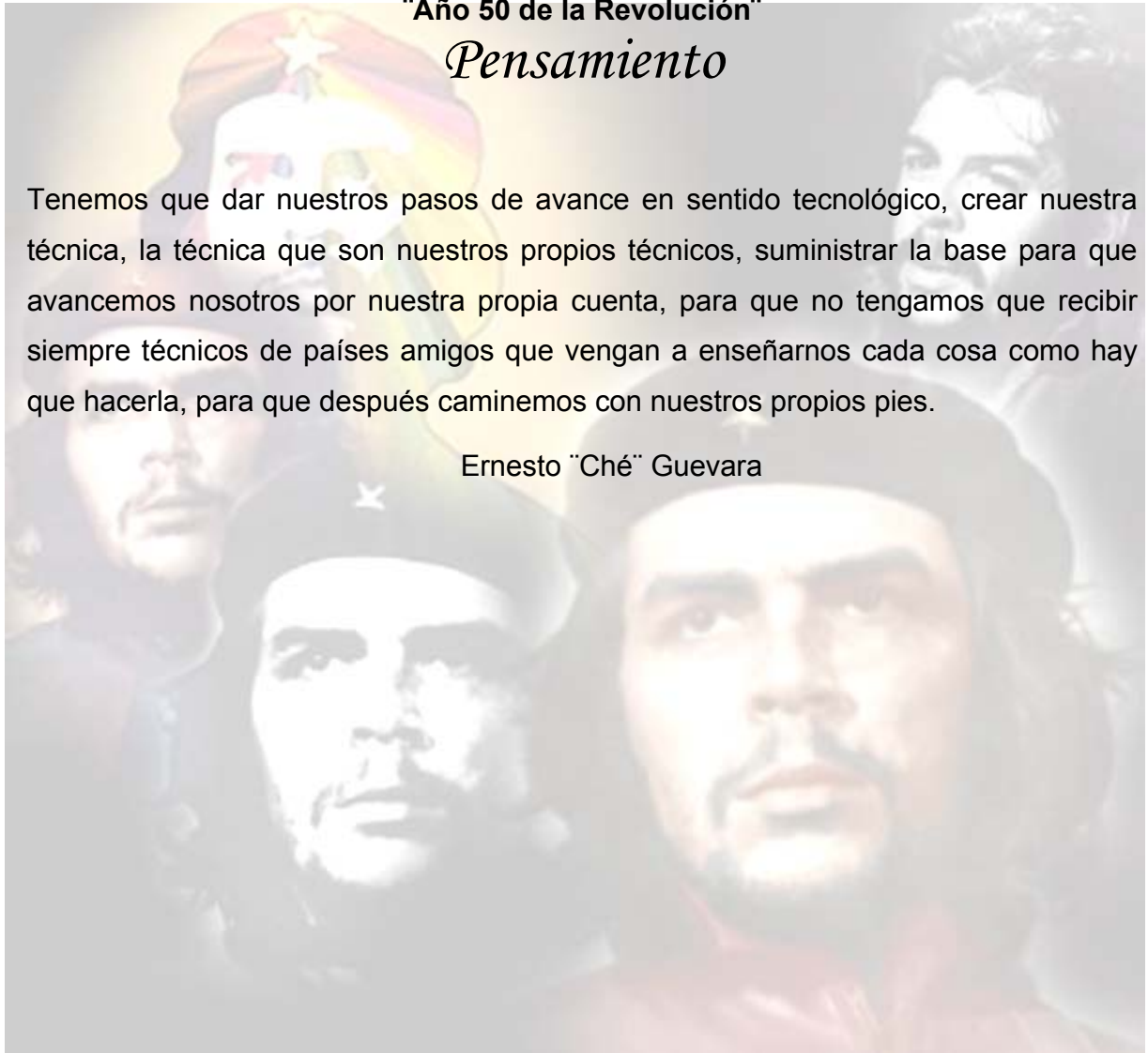
Moa 2008

"Año 50 de la Revolución"

Pensamiento

Tenemos que dar nuestros pasos de avance en sentido tecnológico, crear nuestra técnica, la técnica que son nuestros propios técnicos, suministrar la base para que avancemos nosotros por nuestra propia cuenta, para que no tengamos que recibir siempre técnicos de países amigos que vengan a enseñarnos cada cosa como hay que hacerla, para que después caminemos con nuestros propios pies.

Ernesto "Ché" Guevara





Dedicatoria

Quisiera dedicarles este trabajo a mi mamá Virgen Richardson y a mi papá Raúl Cutiño porque en el transcurso de mi vida siempre me han apoyado en todo momento y han consagrado su vida a mi formación, instrucción y educación. A mi hermano Rudi Cutiño por estar siempre a mi lado, a mi familia y a todas mis amistades. Para todos ellos va esta dedicatoria de todo corazón.

Agradecimientos



Ante todo quisiera expresarle mis más profundos agradecimientos a:

- Mis tutores Dr.C. Pedro Enrique Beyris y Dr.C. Gerardo Orozco por brindarme todos sus conocimientos para la culminación exitosa de este trabajo.
- A la revolución cubana por darme la oportunidad de poder estudiar una carrera universitaria.
- A Marcell Martínez Contrera porque en el transcurso de estos años de la universidad siempre estuvo apoyándome y ayudándome en todo momento para que saliera adelante.
- Al colectivo de profesores y trabajadores del centro, así como a todas aquellas personas que de una forma u otra contribuyeron a mi formación y a la realización de este trabajo.

A todos

Muchas Gracias.



Resumen

El presente trabajo está relacionado con las tobas básicas palagonitizadas de la región de Farallones de Moa, las cuales se caracterizan por presentar una coloración carmelita clara y contener además de la palagonita, zeolitas. A estas rocas se le realizó una caracterización mineralógica con el objetivo de determinar las fases zeolíticas presentes en ellas, para ello se emplearon las técnicas de difracción de rayos X, la microscopía electrónica de barrido y la microscopía óptica. Se diseñó un sistema de beneficio mediante la trituración, la separación magnética por vía seca y la separación densométrica. Como resultado de la caracterización mineralógica se estableció la presencia de la zeolita chabacita, hasta ahora no reportada para la zona Farallones. Producto de la separación electromagnética se logró una fracción no magnética enriquecida en zeolitas para una corriente de trabajo de 6 A.

Palabras claves: zeolita, palagonita y tobas básicas



Summary

The present work is related to the palagonitized basic tuffs of the region of Farallones de Moa, which are characterized to present/display a Carmelite coloration clear and to contain in addition to the palagonite, zeolites. To these rocks a mineralogical characterization with the objective was made to him to determine the present zeolitic phases in them, for it were used the techniques of x-rays diffraction, the electronic microscopia of sweeping and the optical microscopia. A system of benefit by means of the crushing, the magnetic separation by dry route and the densometric separation was designed. As result of the mineralogical characterization settled down the presence of the chabazite zeolite, until now not reported for the Farallones zone. Product of the electromagnetic separation was obtained an enriched nonmagnetic fraction in zeolites for a current of work of 6 A.

Key words: zeolite, palagonite and basic tuffs



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Problema científico	3
Objetivo General	3
Objetivos específicos	3
Tareas de investigación	3
Hipótesis	4
CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL Y METODOLOGICO	5
Introducción	5
1.1 Estado del arte	5
1.2 Propiedades de las zeolitas y su importancia económica e industrial	5
1.3 Estado del arte de la concentración de minerales	8
1.3.1 Concentración de minerales mediante la separación magnética por vía seca	9
1.4.2 Concentración de minerales mediante la separación densométrica	10
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	12
Introducción	12
2.1 Principales Métodos y equipos utilizados en la investigación	12
2.2 Muestreo y preparación de la muestra	12
2.2.1 Toma de las muestras y reducción de tamaño	12
2.2.2 Características constructivas y principio de funcionamiento de las trituradoras de mandíbula	15
2.2.3 Características tecnológicas de las trituradoras de mandíbula	15
2.2.3.1 Angulo de agarre de las trituradoras de mandíbula	15
2.2.3.2 Frecuencia de rotación del cigüeñal	17
2.3 Caracterización de la muestra inicial y los productos del beneficio	17
2.3.1 Análisis de DRX para determinar la composición mineralógica	17
2.3.2 Análisis cualitativo de las muestras iniciales y productos del beneficio	18
2.3.3 Estudio de las muestras por Microscopía Electrónica de Barrido(MEB)	18
2.4 Preparación mecánica	18
2.4.1 Determinación de la composición granulométrica	18
2.5 Procedimientos empleados en los estudios de beneficio del material	19
2.5.1 Metodología empleada en la separación magnética por vía seca	19
2.5.2 Metodología empleada para la separación densométrica	20
2.5.3 Esquema de preparación de la muestra y beneficio empleado en la investigación	21
CAPÍTULO III. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	23
Introducción	23
3.1 Análisis granulométrico	23
3.2 Composición mineralógica	24
3.2.1 Composición mineralógica por difracción de RX	24



3.3	Microscopia electrónica de barrido (MEB) y estudio de liberación del grano.....	24
3.4	Concentración de la fase zeolítica.....	26
3.4.1	Separación magnética por vía seca.....	26
3.4.1.1	Difracción de RX para la separación magnética.....	30
3.4.2	Separación densométrica.....	34
3.4.2.1	Separación magnética en la FL y FP obtenidas durante la separación densométrica.....	36
	CONCLUSIONES	38
	RECOMENDACIONES	39
	BIBLIOGRAFÍA	40
	ANEXOS	



INTRODUCCIÓN

Desde épocas antiguas el hombre necesita de los materiales terrestres. Las materias primas utilizadas por el hombre primitivo fueron sustancias no metálicas: pedernal, calcedonia, cuarzo y ciertas piedras duras y blandas, buscadas para emplearlas en armas, herramientas y utensilios. Todo esto nos confirma el interés que experimentaba el hombre hacia los minerales desde la aurora de la prehistoria de la humanidad. Sin embargo, los materiales no metálicos son, en su mayoría, sustancias comunes que probablemente encontró por casualidad y cuya búsqueda no estimuló en gran medida la curiosidad humana, ni creó conocimiento especializados respecto a sus yacimientos. Entre los materiales no metálicos se encuentra las zeolitas, las cuales se pueden encontrar asociadas a diferentes tipos de rocas como es el caso de las tobas básicas, como productos de diferentes procesos geológicos.

El término zeolita fue utilizado inicialmente para designar a una familia de silicatos conocida desde el siglo XVIII que presentaban como propiedades particulares el intercambio de iones y la desorción reversible del agua. Esta última propiedad dio origen al nombre genérico de zeolita, el cual deriva de dos palabras griegas, zeo: que ebulle y lithos: piedra. Este término fue designado por el barón sueco Cronstedt, en 1756, en el que hace referencia al hecho de que son los únicos silicatos que hierven al ser calentados. No obstante su diversa composición y diferentes estructuras, las zeolitas tienen tan numerosos caracteres semejantes que constituyen una familia natural; su parentesco se manifiesta en el aspecto externo, naturaleza química general, en el modo de unión del agua como consecuencia de su estructura reticular, en la reacción de los ácidos, en la clase de sus yacimientos geológicos y en su modo de formación.

Aunque las zeolitas se conocen desde 1756 cuando Cronstedt las describió por vez primera, su aplicación industrial solo comienza en 1950 al ser utilizadas como intercambiadores iónicos. A partir de ese momento, la síntesis de zeolitas tomó auge inusitado, hasta el punto de que hoy en día se conocen más de 10 000 patentes relacionadas con la síntesis de estos materiales. Impulsado por la síntesis de zeolitas, los geólogos iniciaron en la década de los 60 lo que se conoce como el



redescubrimiento de las zeolitas naturales. Para el mundo moderno las zeolitas abren múltiples aplicaciones en la agricultura, la industria química, la farmacéutica, en los materiales de la construcción, en los procesos de tratamiento de agua albañales, entre otras de gran interés.

En Cuba existen depósitos de zeolitas ubicados en casi todas las provincias y regiones geográficas. Los depósitos de zeolitas se vinculan a la secuencia de las cuencas de retroarco de Edad Cretácico y Paleoceno – Eoceno y a las secuencias superiores de la zona axial del arco, desarrollados éstos principalmente en la parte central de Cuba, se formaron por la transformación del vidrio volcánico contenido en las tobas. Las tobas son abundantes en la Sierra Maestra, así como en las regiones de Mayarí, Baracoa y Holguín. Las piroclastitas finas (tobas de vidrio y ceniza) están presentes en los cortes de toda Cuba Oriental. Al sur de Camaguey aparecen como intercalaciones finas de grano medio que por su contenido de cristales y vidrio volcánico se pueden clasificar desde tobas hasta tufitas, pero se desconocen hacia el resto del país. La región de Farallones, que se encuentra ubicada a unos 30 km al sur oeste del poblado de Moa, en el municipio del mismo nombre, provincia de Holguín, se caracteriza por tener diferentes tipos de formaciones en las cuales existe la presencia de tobas básicas. Estas tobas son vítreas, a menudo cineríticas, y están total o parcialmente alteradas a minerales del grupo de la montmorillonita (bentonitas) y zeolitas, son de colores claros y baja dureza y densidad y la potencia es de hasta 600 m. Las potentes capas de tobas se pronuncian más hacia la parte noreste de Farallones, en algunos casos estratificadas y en otras de forma masiva.

Las principales limitaciones de esta investigación es que la zona de estudio está poco estudiada geológicamente. Esto conllevó a realizar un estudio minucioso de la materia prima para que nos brinde todos los datos de la composición mineralógica necesaria de este yacimiento con el fin de realizar un estudio sobre la beneficiabilidad de las tobas básicas con el objetivo de concentrar las fases zeolíticas presentes.



Problema científico:

El conocimiento científico sobre el yacimiento de tobas básicas palagonitizadas de Farallones limita el desarrollo de un esquema tecnológico de beneficio para la concentración de las fases zeolíticas.

Objetivo General:

Evaluar alternativas tecnológicas que permitan la concentración de las fases zeolíticas presente en las tobas básicas de Farallones mediante el empleo de métodos de beneficio.

Objetivos específicos:

1. Realizar una caracterización de las tobas básicas de Farallones mediante el empleo de microscopía óptica, difracción de RX y microscopía electrónica de barrido que permita determinar alternativas para la concentración de las fases zeolíticas.
2. Evaluar la alternativa tecnológica de separación magnética y densométrica para la extracción de la palagonita presente en las fases zeolíticas de las tobas básicas de Farallones mediante el empleo de diseños experimentales.

Tareas de investigación:

1. Toma y preparación de la muestra.
2. Estudio mineralógico mediante: difracción de RX, microscopía óptica y electrónica.
3. Determinación de la composición granulométrica.
4. Determinación del tamaño del grano y grado de liberación.
5. Concentración de las fases zeolíticas por métodos de beneficio (separación magnética y densométrica).
6. Proposición de un esquema preliminar de beneficio.



Hipótesis:

Si se realiza un análisis mineralógico cualitativo de las tobas básicas de Farallones y se determina el tamaño de los granos y el grado de liberación de las partículas se pueden lograr diferentes alternativas que permitan la separación de la palagonita de las fases zeolíticas.



CAPÍTULO I: MARCO CONCEPTUAL Y METODOLOGICO

Introducción.

En este capítulo se realiza un análisis sobre los diferentes aspectos que se encuentran relacionados con los temas que son discutidos en la bibliografía consultada con el objetivo de disponer de los elementos básicos para la realización del presente trabajo. Donde lo primero que se expone es el estado del arte, posteriormente las propiedades de las zeolitas y su importancia económica e industrial y por último el estado del arte de la concentración de minerales mediante los métodos de separación magnética y densométrica.

1.1. Estado del arte.

Para el presente trabajo se realizó una investigación referente a las tobas básicas de Farallones que contienen zeolita y palagonita como principal impureza, con el objetivo de encontrar un punto de referencia para la realización del mismo. De acuerdo a la investigación realizada, se puede decir que el único trabajo realizado referente al tema es el siguiente.

En el año 2007 **Frazao** en su trabajo, "*Beneficio de las zeolitas naturales del yacimiento Caimanes de Moa*", realiza una caracterización mineralógica de estas tobas de coloración verde que contienen como impureza principal el cuarzo, con vistas a beneficiar y concentrar la fase zeolítica mediante la molienda diferencial. Donde emplea técnicas de difracción de rayos X, análisis químico, análisis térmicos, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido para determinar, en la muestra inicial, la composición mineralógica cualitativa y cuantificar las fases presentes, establecer la textura, el grado de intercrecimiento y el tamaño de los granos.

1.2. Propiedades de las zeolitas naturales y su importancia económica e industrial.

Aun en los últimos años del siglo XX las zeolitas naturales no han podido establecerse, con el valor que le corresponde como recurso natural. La escasa información científica técnica que evalúa su utilidad no ha sido suficiente como para



establecer una demanda justificada. Cualquiera que sean las zeolitas que se diseñen y/o desarrollen, su utilización estará basada en sus propiedades físico y químicas tales como: adsorción, intercambio iónico, reactividad, catálisis (**Giannetto, P., Montes, A., et al., 2000**), hidratación y deshidratación y como tamiz molecular (**Gonzáles, J., 1976**); (**Milovski, A., 1988**). Como características morfológicas de las zeolitas la tendencia a formación de caras vecinas, maclas mimétricas y polisintéticas, son incoloras o blancas, peso específico bajo, refrigerancia débil y poca biorrefrigerancia (**Klockman, F. y Ramdohr, P., 1995**). Estas propiedades han conducido a un mayor desarrollo de nuevas aplicaciones de la zeolita y su introducción acelerada en diferentes tipos de industria **Roskill (1995)**.

Las zeolitas deshidratadas adsorben de nuevo con facilidad el agua, así como absorben moléculas de diferentes sustancias: H_2S , hidrocarburos, alcoholes, amoniaco, etc., lo que permite que se utilice para secar gases, productos químicos, separar productos de la industria química entre otras aplicaciones de gran importancia (**Milovski, A. y Kónov, O., 1980**). En la construcción se utiliza como aditivo puzzolánicos del cemento (**Sarsale, R., 1985**) y hormigones, en la construcción de carreteras, acueductos y edificios, porque el contenido de silicio les permite reaccionar con la cal libre producida durante el fragüe y controlarla **Gonzáles, J., (1976)**. Como apacificador y pigmentos para cerámica y mortero debido a que se puede incorporar metales pesados en la estructura zeolítica, permitiendo que a temperaturas superiores a la de colapso de la fase zeolítica se formen los óxidos que le dan el color correspondiente a la cerámica así como en el recubrimiento de superficies (**Rodríguez, G., et al, ibid., 138**); (**Columbie, R. y Rodríguez, G., ibid., 216**).

Lo más importante de la zeolita es servir como tamiz molecular. La estructura cavernosa de estos minerales asegura una enorme área interior que permite el paso de moléculas con diámetros efectivos de varios angstromas, las cuales son adsorbidas en los espacios vacíos; esto explica el empleo de algunas zeolitas como adsorbentes industriales. Se pueda emplear en la alimentación de los animales, porque permite que la comida que contiene estos nutrientes sea retenida por un



mayor tiempo en el sistema digestivo. A su vez la capacidad de intercambio iónico de las mismas con iones de amonio, sugieren que estas actúen también en la alimentación de rumiantes, para controlar la humedad y olor del estiércol animal **(González, J., 1976)**, en la producción de fertilizantes y acondicionadores de suelos porque controla de manera efectiva la liberación de amonio y otros cationes de los fertilizantes, en la conservación de semillas, etc., **(Minato, 1968)**; **(González, J., 1976)**; **(Orozco, G., 1996)**; **(Rozic, M. et al., 2000)**; **(Febles et al., 2007)**. En forma de grava y polvo se utiliza en los procesos de filtración y floculación del agua **(McNair, D., Simios, R., et al 1987)**, donde estas pueden ser superficiales y subterráneas **(Fonseca, R., 1993)** así como para la limpieza de aguas de contaminación radioactivas de cesio, plata, estroncio y cerio **(Ames 1996)** y en el tratamiento del lodo albañal activado **(Sims, 1972)**. Su grano fino es utilizado en la industria fina del papel como aditivo de alta brillantez **(González, P., 1991)**. En la industria azucarera es utilizada con el objetivo de elevar el rendimiento, la clorificación y extracción de sólidos, calcio y desechos de la planta **(Rivero, A., 1991)**. También tiene importantes aplicaciones en el control ambiental para la eliminación de metales pesados en los residuos industriales de talleres galvánicos para la eliminación de Ni^{2+} , Cr^{3+} y Co^{2+} , de tenerías para la eliminación de Cr^{6+} , de procesos mineros para eliminar Ni, Co, Cu, Mn, y NH_4 , basándose fundamentalmente en las propiedades de intercambio iónico de la clinoptilolita **(Rodríguez, G., Picar, A., et al. 1982)**.

En la industria farmacéutica se ha modificado la clinoptilolita natural para obtener ingredientes o principios activos zeolíticos con propiedades terapéuticas **(Barrios, M., Rivero, A., et al., 1997)**. Estas son utilizadas para la producción de medicamentos tales como: antidiarreicos **(Rodríguez, G., et al., 1997)**, antiácidos **(Barrios, M., 1997)**, hipocalesterimiantes **(Simón, R., et al., 1997)**, anti-hiperglicemiantes **(Concepción, B., et al., 1997)** y antisépticos **(Perdomo, I., et al., 1998)**. La acción de estos fármacos se basa en las propiedades de intercambio iónico, adsorción y biocatálisis.



Varios trabajos recogen los resultados más importantes, fundamentalmente en la eliminación de Cs (**Mirth, G. y Lercher, J., 1991**) y Sr (**O'Connor, C., et al., 1972**) de residuos de baja actividad que se encuentren en los desechos de la práctica nuclear y otros radioactivos como el Co, Ca y Cr (**Ohtanis, S., et al., 1972**); (**Rodríguez, G., 1999**). También son intercambiados selectivamente por la clinoptilolita, la que posteriormente es trasformada en elemento de concreto, cerámica y vidrio (**Mercer, B., et al 1970**); (**Daier, C., et al., 1970**); (**IAEA, 1972**); (**Dyer, A. y Kent, D., 1984**); (**Robinson, S., 1995**); (**Hofstetter, J. y Hite, G., 1983**); (**British Nuclear Technology, 1987**) y (**Charles, G y Castillo, R., 1991**).

Su capacidad de deshidratación permite captar moléculas de cualquier tipo. Esto permite que se puedan introducir dentro de las formulaciones de goma, muchos agentes químicos que por ser activos o muy volátiles, no presentan utilidad de otra manera. También se tiene en cuenta el tamiz molecular (**Pérez, L., 1984**). Según **Walter, R., (1961)** en el año 1995 se comenzó a pensar en su utilización en la tecnología de elastómeros para la producción de goma en diferentes tipos de caucho tales como: de silicona, de policloropreno, butílicos, de nitrilo, de etilo propeno, regenerado de goma, polímeros poliacrílicos así como en distintos tipos de tecnología de goma tales como: industria de neumáticos, del recape, del calzado, de mangueras y como desecantes, en el moldeo o por transferencia evitando la pulverización y otras irregularidades del moldeo (vacío) en el material (**Walter, R., 1961**).

1. 3. Estado del arte de la concentración de minerales.

La búsqueda de métodos de aprovechamiento integral de la materia prima, así como la elaboración del esquema eficiente y económico de concentración, son tareas complicadas debido a la presencia de un conjunto de minerales heterogéneos, los cuales poseen variedades y distintas composiciones incluso dentro de los límites de un yacimiento. Teniendo en cuenta los análisis mineralógicos, granulométricos y de cribado, así como algunas de las determinaciones de las propiedades físicas de los minerales se pueden emplear diferentes métodos de concentración (**Mitrofanov, et al., 1982**). El objetivo de la clasificación y concentración es separar la mena de la



ganga. Los procedimientos de concentración se funden en los distintos valores que presentan algunas características, tales como el peso específico y las propiedades químicas y magnéticas de la mena y la ganga (**Sydney, 1970**) La escasa información relacionada con la separación de la zeolita y palagonita conllevó al estudio de las propiedades del mineral para determinar que método de concentración se puede utilizar de acuerdo a las características del mismo. Teniendo en cuenta la densidad del mineral así como la presencia de magnetita, palagonita y otros minerales se llevó a cabo de forma exploratoria la separación magnética por vía seca y la separación densométrica.

1. 3. 1. Concentración de minerales mediante la separación magnética por vía seca.

Los métodos especiales de enriquecimiento de los minerales y en particular los métodos magnéticos han obtenido en los últimos años una amplia aplicación en relación con el desarrollo de la técnica de enriquecimiento de los minerales y la incorporación a la explotación de nuevos yacimientos de metales ferrosos, no ferrosos y raros (**Dercach, 1981**). El método magnético de enriquecimiento de los minerales está basado en la utilización de la variedad de las propiedades magnéticas de los componentes del mineral o material que se somete a la separación. Al moverse este a través del campo magnético, el separador, bajo la influencia de la fuerza de atracción magnética, las partículas con distintas propiedades magnéticas se desplazan por diferentes trayectorias, lo que permite separar las partículas magnéticas en un producto magnético separado, y las partículas no magnéticas, en un producto no magnético separado (**Pryor, 1965**); (**Richards and Locke, 1940**); (**Dercach, 1981**). El rendimiento de la separación magnética se determina por muchos factores, donde los principales son: grosura del mineral, susceptibilidad magnética de las partículas extraídas y el contenido de estos en el mineral, la velocidad de desplazamiento del mineral a través de la zona de trabajo y la velocidad de evacuación de los productos de la separación (**Gaudin, 1939**); (**Pryor, 1965**); (**Dercach, 1981**). La susceptibilidad magnética de las partículas de mineral que deben ser extraídas al producto magnético, determina la elección de la intensidad del



campo magnético del separador con campo débil o fuerte (**Dercach, 1981**); (**Gaudin, 1939**). Los minerales extraídos por este método están representados por la magnetita, maghemita, pirrotita fuertemente magnética, manganeso, tungsteno, titanio (**Mitrafánnov, et al., 1982**); (**Dercach, 1981**); (**Gaudin, 1939**); (**Richards and Locke, 1940**), o por los óxidos, hidróxidos y carbonatos ferrosos y de otros minerales débilmente magnéticos (**Richards and Locke, 1940**). Las propiedades magnéticas de la magnetita dependen de la grosura de las partículas. Donde las investigaciones realizadas demostraron que al disminuir la grosura de las partículas aumenta la fuerza coercitiva y la susceptibilidad magnética específica, al contrario, disminuye. Durante la separación por vía seca, además de las fuerzas mecánicas (fuerza de gravedad, centrífuga y otras), se manifiesta la acción de la fuerza de atracción molecular entre las partículas, particularmente las finas, que tienen una superficie específica (**Dercach, 1981**). En este tipo de separación se enriquecen en lo fundamental minerales de magnetita, titanomagnetita, como también los minerales de metales raros. Estos minerales deben ser desmenuzados o granulados con un grosor superior a 50 μm (**Mitrofánnov, et al., 1982**).

1. 3. 2. Concentración de minerales mediante la separación densométrica.

Los métodos de separación densométrica se usan para tratar una gran variedad de minerales y tamaños de partículas en algunos casos por debajo de 50 μm . La concentración densométrica separa minerales de diferentes densidades. Donde el empleo cada vez más creciente del método de separación por líquidos densos, tanto en el caso de minerales simples como complejos induce a tener en cuenta la distribución del mineral en la ganga, la regulación de la densidad del medio separador así como operación simple y bajo costo del tratamiento (**Zink y Floal, 207**). El enriquecimiento de minerales en medios densos se funde según su densidad (**Fomenko, 1980**). La separación de los minerales por el método densométrico es tanto más eficaz cuanto más alejados se encuentren esos minerales unos de otros según la escala de densidad (**Mitrofánnov, et al., 1982**). Si una mezcla de granos se introduce en un medio cuya densidad ocupa una posición intermedia entre los minerales ligeros y los pesados, sucederá la separación de dicha mezcla en sus



componentes. Los granos, cuya densidad es mayor que la del medio denso se hundirán, mientras que los más ligeros emergerán a la superficie. Como medios densos se utilizan líquidos orgánicos homogéneos (tricloroetano, tetracloruro de carbono, pentacloroetano, dibromoetano, etc.), soluciones de sales (cloruro de calcio, cloruro de zinc, entre otros) y suspensiones (**Fomenko, 1980**).



CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

Introducción.

En este capítulo se exponen los métodos y materiales utilizados en la toma y preparación de las muestras, los análisis granulométricos que permitieron definir las fases minerales y determinar sus propiedades físicas para ser empleadas en la evaluación de las diferentes fases mineralógicas presentes en las tobas básicas palagonitizadas y la selección de los métodos idóneos para el beneficio. Los ensayos analíticos y los experimentos se realizaron en el laboratorio de beneficio de minerales del ISMMM (Cuba).

2. 1. Principales Métodos y equipos utilizados en la investigación.

La realización de los ensayos a escala de laboratorio lleva consigo el empleo de varios equipos. Entre los principales equipos utilizados se encuentran las trituradoras de mandíbula TQ (320 x 165) mm y TQ (150 x 75) mm, las cuales fueron empleadas para la reducción del tamaño de las muestras de estudio con la ayuda del método de cono y anillo. Durante la realización del análisis granulométrico se empleó la escala de tamices de la serie Taylor (0. 044; 0. 074; 0. 16; 0. 25; 0. 51; 0. 85; 1. 25; 1. 6; 2 mm) por vía húmeda de forma manual, y para el pesado de las muestras se empleó una balanza técnica. En los análisis de difracción de RX y de microscopía electrónica de barrido se utilizó el microscopio electrónico de barrido ABT 55 (IST), y en la interpretación de los difractogramas se empleó el software Analyze. Para los ensayos beneficio fue utilizado un separador magnético de rodillo con alimentación inferior y el método densométrico para la concentración de las fases zeolíticas. Otros equipos auxiliares utilizados durante el desarrollo de la investigación fueron: lupa electrónica, microscopio, estufa, computadoras y cámaras digitales Canon y E-Rec System 1394 Digital Cámara 2.0 M, de fabricación china.

2. 2. Muestreo y preparación de la muestra.

2. 2. 1. Toma de las muestras y reducción de tamaño.

Para la realización de la investigación las muestras fueron tomadas en la región de Farallones, las cuales están constituidas por tobas básicas y compuestas



principalmente por palagonita (vidrio volcánico) y zeolita como un producto de la alteración de estas rocas. Para el muestreo se empleó el método por puntos aleatorios en un afloramiento de unos 10 m de largo X 4 m de altura aproximadamente. La cantidad de material utilizado para la trituración se determinó a través de la fórmula de la masa mínima de la fórmula 2.1.

$$Q_{\text{mínima}} = 0.02 \cdot (d)^2 + 0.5 \cdot d \dots \dots \dots (2.1)$$

Donde:

d- diámetro máximo de alimentación en (mm).

$Q_{\text{mínima}}$ – masa mínima en (kg).

Teniendo en cuenta lo antes dicho, la masa mínima es de 250 kg.

La muestra fue sometida en su totalidad a un proceso de reducción de tamaño mediante dos etapas de trituración. Donde en la primera etapa se utilizó la trituración por impacto de forma manual con una mandarina hasta lograr obtener fragmentos de 100 mm aproximadamente. Después de la trituración manual en que se obtienen tamaños máximos de 100 mm, se llevan a cabo dos etapas de trituración en trituradoras de mandíbulas; las cuales tienen un diámetro de alimentación de 100 y 20 mm y de descarga de 20 y 3.15 mm respectivamente. En la descarga de la segunda etapa del proceso de trituración se usó la operación de cribado de control con un tamiz de 3.15 mm, el material que es retenido por el tamiz es recirculado en la segunda etapa de la trituración. El material que se descarga en esta segunda etapa de la trituración con tamaño inferior a 3.15 mm fue sometido a homogenización a través del método del anillo y el cono, y de reducción como se muestra en el esquema 1 hasta obtener muestras de 600 g. Las muestras obtenidas fueron empaquetadas en bolsas de plástico para su caracterización y posterior análisis.

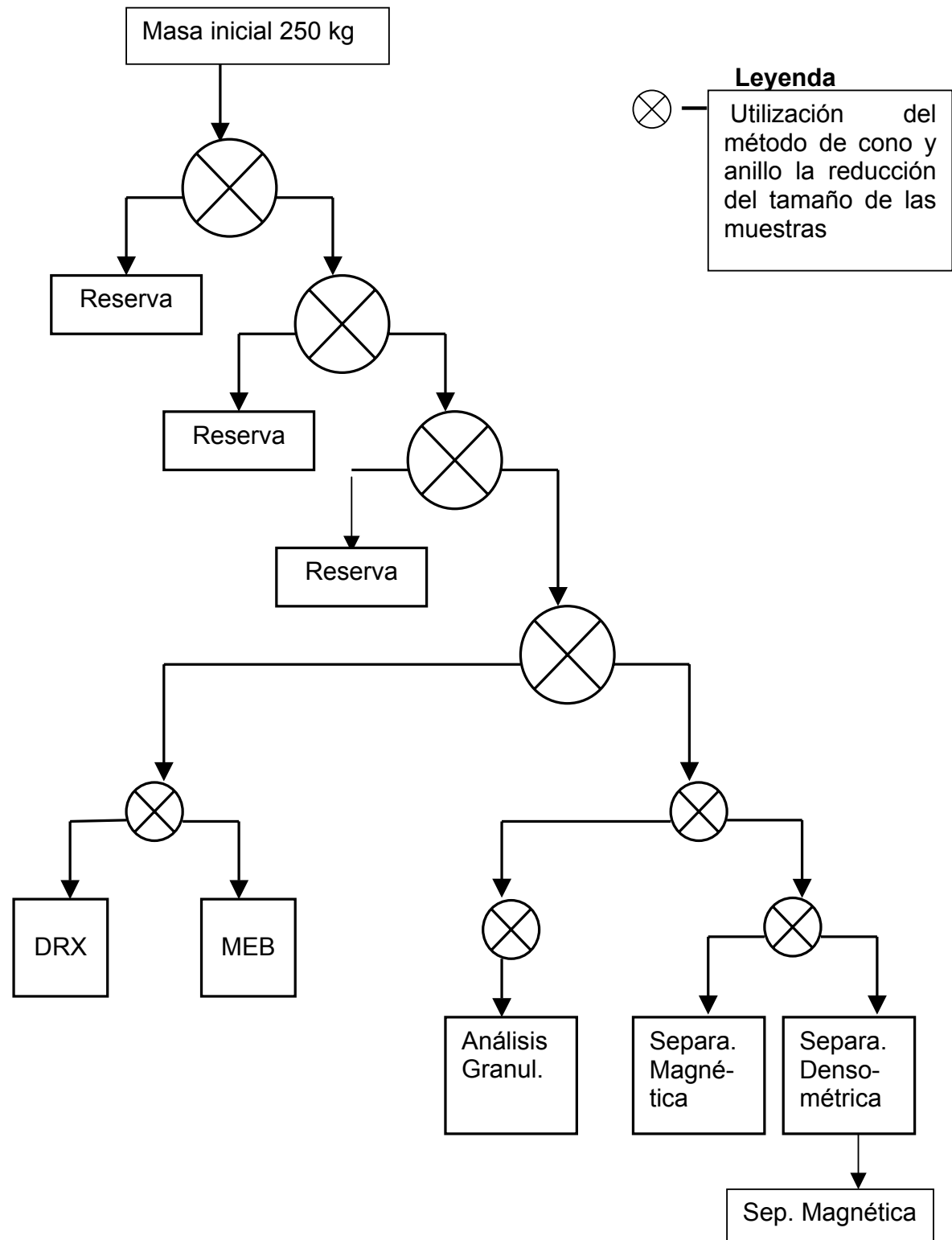


Figura 2. 1. Esquema de preparación mecánica y beneficio.



2. 2. 2. Características constructivas y principio de funcionamiento de las trituradoras de mandíbula.

Las trituradoras de mandíbula se encuentran compuestas por un bastidor (bancada) de la trituradora, volante, árbol excéntrico, biela, plancha tirante (delantera y trasera), casquillo de la plancha tirante, tope, mandíbula móvil e inmóvil, revestimiento de la mandíbula móvil e inmóvil, junta y revestimiento lateral de la cámara de trituración. El material inicial ingresa desde arriba al espacio entre las mandíbulas y el producto triturado se descarga abajo cuando se aleja la mandíbula móvil. Los pedazos máximos obtenidos en el producto se determinan por el ancho de la hendidura de salida entre las mandíbulas móvil e inmóvil.



Foto 1. Trituradora de mandíbula
320 x 165 mm



Foto 2. Trituradora de mandíbula
150 x 75 mm

2. 2. 3. Características tecnológicas de las trituradoras de mandíbula.

2. 2. 3.1. Angulo de agarre de las trituradoras de mandíbula.

En las trituradoras de mandíbula el ángulo entre las mandíbulas móvil e inmóvil se llama ángulo de agarre. El valor del ángulo de agarre cambia durante las regulaciones del ancho de la hendidura de salida. La disminución del ancho es acompañada por el aumento del ángulo de agarre y el aumento del ancho por su disminución. Por consiguiente, con el aumento del ángulo de agarre se debe aumentar el grado de trituración y disminuir el rendimiento de la trituradora.



El pedazo que se aplasta entre las mandíbulas se encuentra bajo la influencia de las fuerzas siguientes:

P – presión de la mandíbula móvil.

P_1 – reacción de la mandíbula inmóvil.

fP – fuerza de rozamiento del trozo por la mandíbula móvil.

fP_1 – fuerza de rozamiento del trozo por la mandíbula inmóvil.

f -----coeficiente de rozamiento de deslizamiento entre el trozo y las mandíbulas.

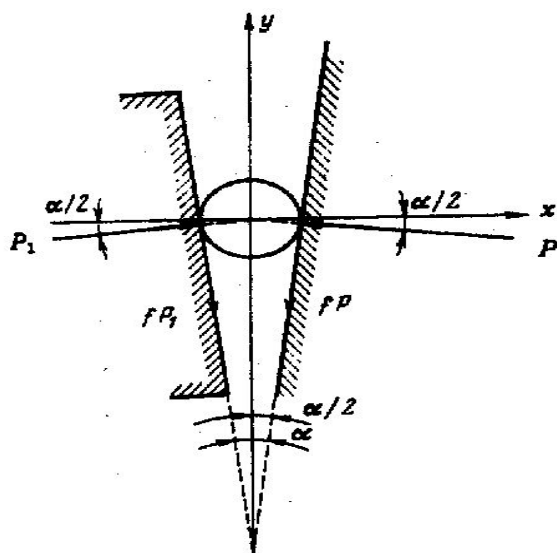


Figura 2. 2. Angulo de agarre de la trituradora de mandíbula.

Se puede descomponer la fuerza P en dos componentes: horizontal T y vertical N dirigida hacia arriba. La componente vertical trata de expulsar hacia arriba al trozo que se tritura obligándolo a deslizarse a lo largo de las superficies de las mandíbulas. Como resultado de esta expulsión aparecen las fuerzas de rozamiento fP y fP_1 que impiden la expulsión del pedazo. Y la componente vertical se determina por la igualdad:

$$N = P \cdot \sin \varphi$$

Donde:

φ – ángulo de agarre no mayor de 25° .



De aquí se deduce que el ángulo de agarre no puede superar un valor límite. Con ángulo de agarre que supere este límite la fuerza de expulsión es tan grande que las fuerzas de rozamiento del trozo sobre las superficies de las mandíbulas resultan insuficientes para retenerlo en la cámara de trituración y este se traslada hacia arriba. En estas condiciones las trituradoras no trituran. El ángulo de agarre límite será el ángulo bajo el cual la fuerza de expulsión se equilibra completamente por las fuerzas de rozamiento que surgen.

2. 2. 3. 2. Frecuencia de rotación del cigüeñal.

Durante el alojamiento de la mandíbula móvil el producto triturado bajo la influencia de la fuerza de gravedad cae libremente de la cámara de trituración a través de la hendidura de salida. El tamaño de los pedazos del material en cualquier sección horizontal será mayor que el ancho mínimo del orificio de descarga. Esta suposición lleva a limitar el periodo de descarga del producto triturado a un tiempo igual a media vuelta del cigüeñal. Prácticamente las dimensiones de pedazos a diferentes horizontales que cae pueden resultar menores que el tamaño determinado y el periodo de descarga del material será mayor que el tiempo de una media vuelta del árbol. Donde el tiempo de alejamiento de la mandíbula debe ser suficiente para que pedazos desde el horizontal del plano superior situado a la altura del horizontal del orificio de descarga tenga tiempo de recorrer esta distancia, cayendo debido a la fuerza de gravedad.

2. 3. Caracterización de la muestra inicial y los productos del beneficio.

2. 3. 1. Análisis de DRX para determinar la composición mineralógica

Para el análisis de difracción de RX las muestras analizadas fueron pulverizadas mediante el empleo de un mortero de ágata. Los análisis de DRX fueron realizados en el laboratorio del Instituto de Mineralogía y Yacimientos Minerales de la Universidad Técnica de Clausthal, Alemania. Se utilizó un difractómetro marca PHILIPS, modelo PW 3710, con el empleo de un tubo de cobre ($\text{CuK}_\alpha = 1,54060 \text{ \AA}$). Además se empleó un generador ajustado con valores de tensión de 45 kV y



corriente de 35 mA. Los registros fueron realizados en un intervalo de exposición de 5° a 60° en 2 θ .

2. 3. 2. Análisis cualitativo de las muestras iniciales y productos del beneficio.

Para la determinación de la composición y las fases mineralógicas presentes en las diferentes muestras analizadas se empleo el difractograma obtenido por la técnica de RX, el cual fue interpretado mediante la utilización de los software Analyze, de la firma alemana Seifert con la base de datos de la ICDP (Internacional Center for Diffraction Data) de 1998

2. 3. 3. Estudio de las muestras por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

Con el objetivo de llevar a cabo un estudio sobre el tamaño real de los granos minerales de las fases presentes, el grado de intercrecimiento, la textura y morfología de las tobas básicas palagonitizada se empleó la técnica de MEB. Donde mediante las imágenes en la superficie, fisuras, grietas y microgrietas permiten caracterizar los minerales. La metodología empleada para la realización de este análisis consiste en tomar un fragmento de la toba básica y cubrirla con una fina capa de oro que permite la conductividad de los electrones. Este análisis fue realizado en la Universidad Técnica de Clausthal, Alemania, donde se empleó equipo y software: microscopio electrónico de barrido ABT 55 (IST), voltaje de aceleración 20 kV, distancia de trabajo 14 mm, con equipo EDX (Energía dispersa), Eumex con detector de Si/Li y con ventana de hidrocarbón ultrafina (0. 001 mm), detección de elementos de rango desde el Carbono al Uranio, ángulo de encuentro 30 grados. Las mediciones se realizaron sin standard; Software: Sistema de rastreo de imagen digital 2. 3, Firma Point Elektronik.

2. 4. Preparación mecánica.

2. 4. 1. Determinación de la composición granulométrica.

La composición granulométrica se determinó mediante el análisis de tamices por vía húmeda. La escala de tamices se seleccionó teniendo en cuenta el tamaño máximo del producto en la descarga de la segunda etapa de la trituración y la serie de Taylor con módulo de $\sqrt{2}$. En esta etapa de la trituración se empleó la trituradora TQ (150 x



75) y se realizó un control de la descarga con un tamiz de 3. 15 mm, el cual se tomó como tamiz superior en la operación de cribado y seguidamente se reemplaza la serie de Taylor $\sqrt{2}$ para la obtención de los sucesivos diámetros de tamices que se debe emplear, quedando de la siguiente manera: (3. 15; 2; 1. 6; 1. 25; 0. 85; 0. 51; 0. 25; 0. 16; 0. 074; 0. 044) mm.

Como estamos en presencia de un material más fino de 5 mm la muestra seleccionada para la realización del análisis granulométrico se debe encontrar de 500 a 1000 g. Por lo que la cantidad de material utilizado para el análisis granulométrico es de 600 g y teniendo en cuenta las replicas (3) se tomó un total de 1800 g. Cada muestra es tamizada por vía húmeda de forma manual con un suministro ininterrumpido de agua durante 12 min. Luego el material tamizado en clases de tamaño, es secado en una estufa durante 30 minutos aproximadamente con un rango de temperatura que varía entre (90 - 100) °C. Una vez que la muestra se encuentre seca en su totalidad es pesado de forma independiente. Para el pesaje se utilizó una balanza técnica.

2. 5. Procedimientos empleados en los estudios de beneficio del material.

2. 5. 1. Metodología empleada en la separación magnética por vía seca.

Para la separación magnética por vía seca de las tobas básicas palagonitizadas lo primero que se tuvo en cuenta fue los minerales presentes en ellas. Luego se realizó la selección de las granulometrías que reunían las condiciones necesarias, las cuales fueron: 44 - 74 μm ; 74 - 160 μm y 160 - 250 μm y se pesaron muestras de 20 g aproximadamente. Posteriormente para dicha separación se utilizó el separador de rodillos de laboratorio con las siguientes características: alimentación inferior, rodillo 100 mm de diámetro y 80 mm de longitud. Sus dimensiones exteriores son: longitud 900 mm, anchura 250 mm y altura 545 mm. Las condiciones de trabajo que se establecieron para la separación magnética son: 1 A (0. 22 tesla) y 8 V ; 2 A (0. 44 tesla) y 10 V; 4 A (0. 7 tesla) y 25 V; 6 A (0. 8tesla) y 35 V, con el objetivo de lograr la separación de los granos de palagonita y de zeolita. Los resultados obtenidos en las fracciones magnéticas (FM) y en la fracción no magnéticas (FNM) a 6 A son analizados mediante microscopía óptica y DRX, y el resto de las FM y FNM son



analizadas solamente por la microscopía óptica. El microscopio utilizado es de la marca NOVEL, la escala de las fotos tomadas es de 3 mm a diferentes tipos de aumento y la cámara empleada es E-Rec System 1394 Digital Cámara 2.0 M

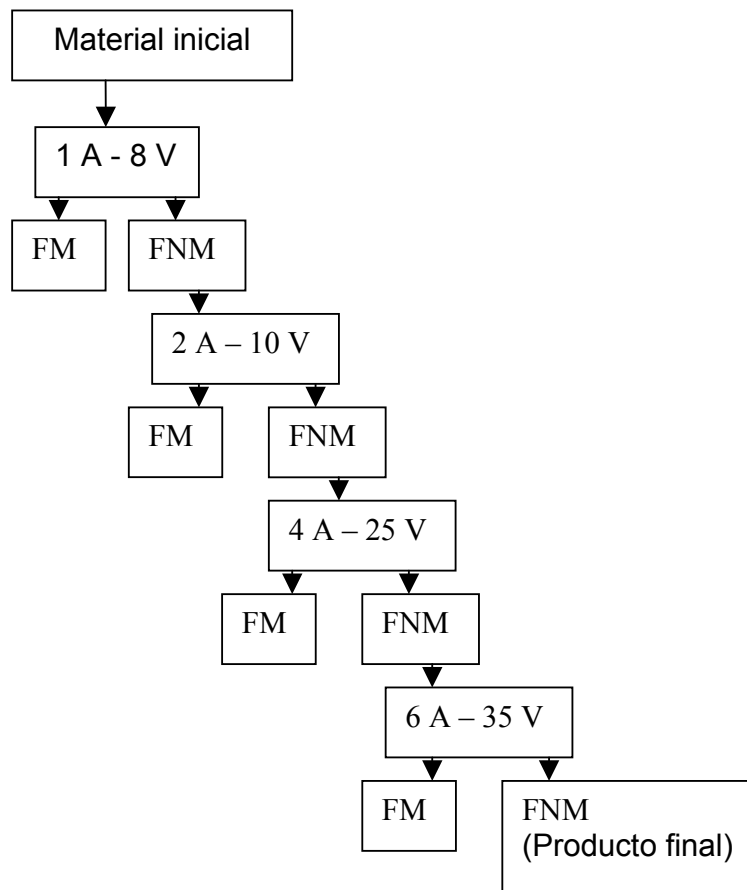


Figura 2. 3. Esquema utilizado en la separación magnética.

2. 5. 2. Metodología empleada para la separación densométrica.

Para la realización de la separación densométrica lo primero que se realizó fue un análisis mineralógico con el objetivo de poder determinar cual era la granulometría que reunía las mejores condiciones según el tamaño de los granos presentes en la misma. Teniendo en cuenta esto se selecciono la granulometría que se encontraba entre 0. 16 – 0. 25 mm y se determinó el peso específico del mineral mediante el método del picnómetro, el cual es calculado por la siguiente expresión 2. 2:



$$\text{Peso específico} = \frac{C - A}{B + C - A - D} \dots\dots\dots(2. 2)$$

Donde:

A- peso del picnómetro vacío (g).

B- peso del picnómetro con agua destilada (g).

C- peso del picnómetro con mineral (g).

D- peso del picnómetro con mineral y agua destilada (g).

Como resultado del cálculo anterior se tiene que la densidad del mineral es de (2. 3 g/cm³). Luego se realiza la selección del reactivo a utilizar que en este caso es el tetrabromoetano y la disminución de su densidad de (2. 9 g/cm³) a (2. 1 g/cm³), producto de la utilización del etanol absoluto. Posteriormente se pesaron varias muestras de 30 g aproximadamente para la realización de los análisis a diferentes densidades (1. 6 g/cm³; 2. 1 g/cm³ y 2. 6 g/cm³). Después de estar creada todas las condiciones de trabajo, el tetrabromoetano es vertido en una probeta de 250 mL (poco reactivo) bajo campana, se le adiciona la muestra pesada y se realiza un proceso de agitación manual para lograr que este se distribuya a lo largo de toda la probeta. Al cabo de una hora es separada la fracción ligera (FL) de la fracción pesada (FP) mediante la decantación.

Separadas ambas fracciones, son lavadas con el etanol absoluto y secadas en una estufa durante 25 minutos para ser pesadas y analizadas mediante la técnica de DRX y análisis microscópico. También se le realizó una separación magnética por vía seca a estas fracciones obtenidas a 6 A y 35 V.

2. 5. 3. Esquema de preparación de la muestra y beneficio empleado en la investigación.

El siguiente esquema es sobre la preparación mecánica de la materia prima inicial y las etapas del proceso de beneficio empleado en la investigación de las tobas básicas palagonitizadas de la región de Farallones como propuesta para la concentración de la fase zeolita en dichas tobas.

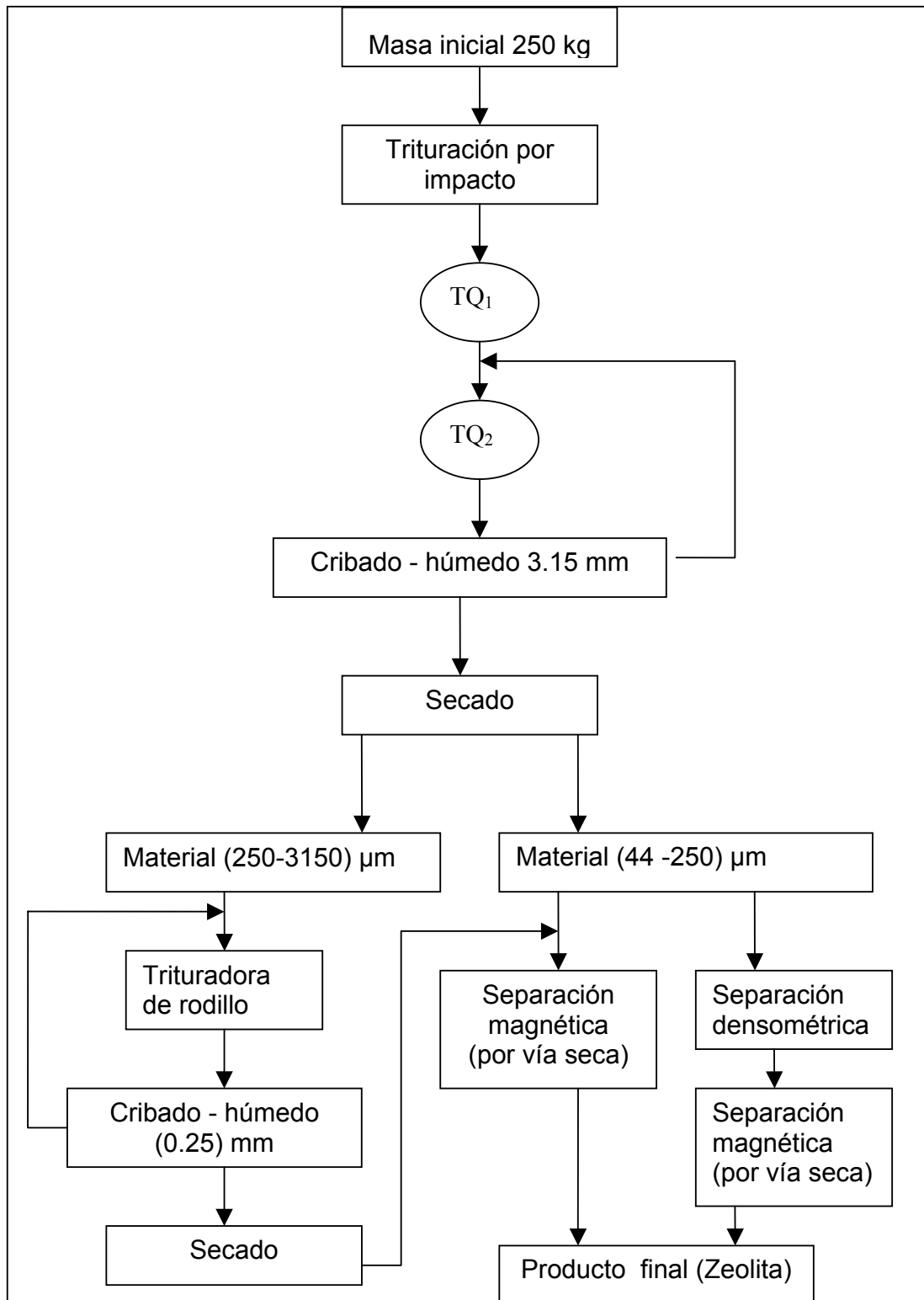


Figura 2. 4. Esquema de preparación mecánica y beneficio empleado en la Investigación.



CAPÍTULO III. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Introducción.

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos durante la investigación realizada sobre las tobas básicas palagonitizadas de Farallones mediante diferentes técnicas de análisis y operaciones de beneficio tales como: análisis granulométrico, de DRX y de microscopia óptica, concentración de las fases mineralógicas (por separación magnética por vía seca y densométrica). Donde los mismos fueron tabulados o graficados para una mejor discusión e interpretación, con el apoyo de una búsqueda bibliográfica que permitió poder profundizar en las valoraciones científicas de estos resultados alcanzados.

3. 1. Análisis granulométrico.

Mediante el proceso de trituración se logran importantes resultados en la liberación de los granos de zeolita y palagonita. También se logra la obtención de una buena cantidad de la fracción menor de 44 micrones, la cual es importante porque en ella se encuentra presente todos los minerales de las tobas básicas. Los resultados del análisis granulométrico realizado aparecen reflejados en la tabla 3. 1 y en los anexos 1 y 2.

Tabla 3. 1. Composición granulométrica del producto triturado en la TQ (150x75).

Clase de tamaño (mm)	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso 3 (g)	Peso promed. (g)	Salida (%)	Retenido (+)	Cernido (-)
							100,0
-3.15+2	131.9	134.1	134.7	133,6	22,3	22,3	77,7
-2+1.6	42.5	37.2	46.2	42,0	7,0	29,3	70,7
-1.6+1.25	43.6	45.8	45.4	44,9	7,5	36,7	63,3
-1.25+0.85	50.0	48.2	44.3	47,5	7,9	44,7	55,3
-0.85+0.51	52.6	51.3	50.0	51,3	8,6	53,2	46,8
-0.51+0.25	81.2	78.9	81.6	80,6	13,4	66,6	33,4
-0.25+0.16	34.1	35.7	33.4	34,4	5,7	72,4	27,6
-0.16+0.074	27.8	29.2	28.3	28,4	4,7	77,1	22,9
-0.074+0.044	26.6	28.2	27.4	27,4	4,6	81,7	18,3
-0.044+0	109.7	111.4	108.7	109,9	18,3	100,0	0,0
Total(g)	600.0	600.0	600.0	600,0	100,0		



3. 2. Composición mineralógica.

3. 2. 1. Composición mineralógica por difracción de RX.

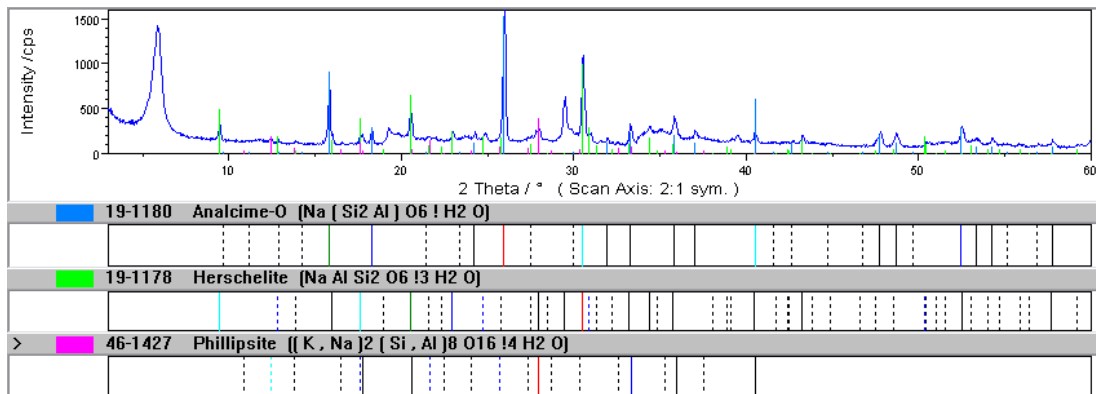


Figura 3. 1. Difractograma de la fracción menor de 44 micrones producto de la trituración, sin separación magnética, ni densométrica.

El pico de $15,02 \text{ \AA}^\circ$ al inicio del difractograma indica la presencia de Ca-montmorillonita, lo cual es un resultado lógico, ya que arcillas pueden surgir como producto de la transformación del vidrio volcánico básico. La zeolita predominante en esta fracción es la analcima y en segundo lugar la Herschelite (Na-chabacita), de manera subordinada puede haber algo de phillipsita. El pico a los $29,48$ grados ($d = 3,027 \text{ \AA}^\circ$) puede corresponder a la fase calcita, aunque no fue determinada por el software.

3. 3. Microscopia electrónica de barrido (MEB) y estudio de liberación del grano.

En las fracciones obtenidas desde 3150 hasta $250 \text{ \mu m}$, se pudo observar que la liberación de los granos de zeolita y palagonita no ocurre en su totalidad debido a que todavía existen los aglomerados. Sin embargo, en el caso de las fracciones que se encuentran desde 44 hasta $250 \text{ \mu m}$ se observó que los granos de zeolita se encuentran bien liberados de la palagonita (vidrio volcánico). La fracción que se encuentran desde $44 - 74 \text{ \mu m}$ es analiza mediante la MEB, y las que están desde $74 - 160 \text{ \mu m}$ y $160 - 250 \text{ \mu m}$ son analizadas por la microscopía óptica. Teniendo en cuenta las diferentes observaciones realizadas para cada granulometría, se tomaron



varias fotos con cámaras digitales que aparecen a continuación como fotos 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

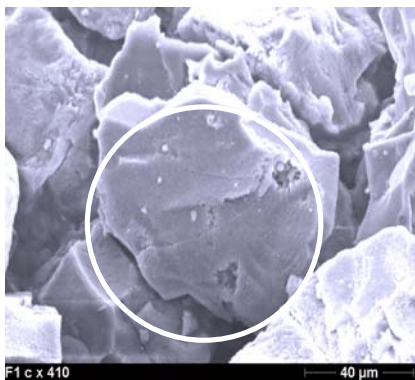


Foto 1. Fracción 44 - 74 μm

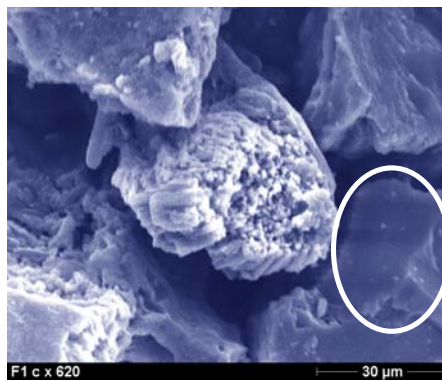


Foto 2. Fracción 44 - 74 μm

En las fotos 1 y 2 se puede observar que ocurre la liberación de los granos de zeolita y palagonita en la granulometría que se encuentra desde 44 – 74 μm según los resultados de la MEB. Donde los granos que se encuentran señalados son de palagonita (vidrio volcánico alterado) que tienen una superficie bien definida, además se observan oquedades muy pequeñas con productos de cristalización.

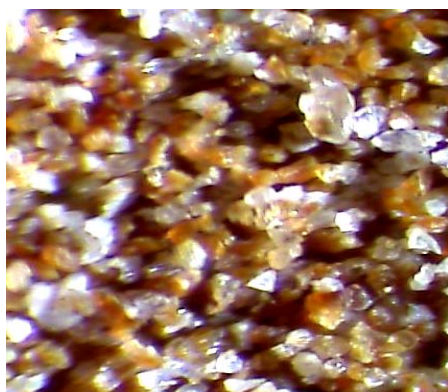


Foto 3. Fracción de 44 - 74 μm
Aumento: 1 x 10

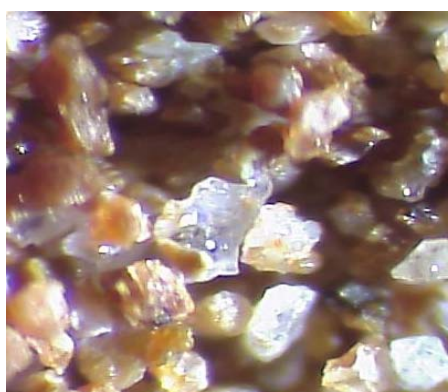


Foto 4. Fracción de 74 - 160 μm
Aumento: 2. 5 x 10

En las fotos 3 y 4 se puede ver la liberación de los granos de zeolita y palgonita por las diferentes coloraciones que presentan los minerales. Donde la palagonita está representada por los granos de color pardo (amarillo quemado) y el resto de los granos de coloración oscura son de piroxenos y magnetita. Los granos que tienen un



color claro son de diferentes minerales tales como: la zeolita, los carbonatos, los feldespatos y algunas plagioclasas.

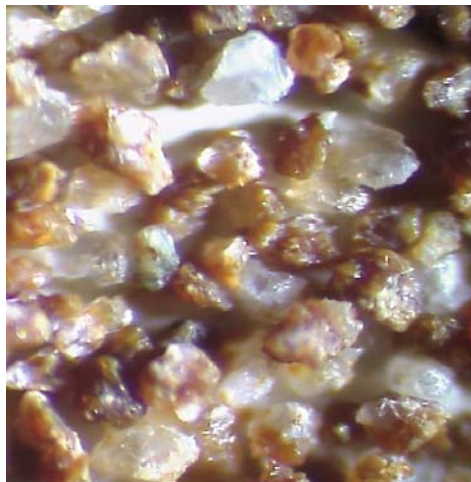


Foto 5. Fracción de 160 - 250
µm Aumento: 1.5 x10

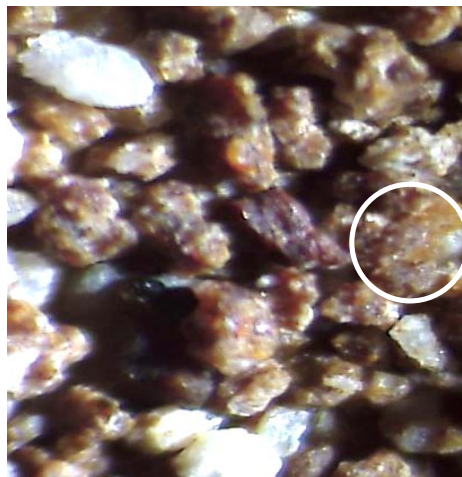


Foto 6 Fracción de 250 - 510
µm Aumento: 2x10

En la foto 5 también ocurre la liberación de los granos de zeolita y palagonita, porque los granos de color claro continúan separados de los que tienen una coloración oscura. Sin embargo en la foto 6 no ocurre lo mismo que en las anteriores porque todavía existen algunos aglomerados en esta fracción, un ejemplo de esto es el grano que se encuentra señalado en la foto. En el cual se observa que aun no se ha logrado la separación de los minerales de color claro y los de color oscuro.

3. 4. Concentración de la fase zeolítica.

3. 4. 1. Separación magnética por vía seca.

La separación magnética fue realizada en el separador magnético de rodillo que aparece en el anexo 3, mediante el cual se obtienen fracciones magnéticas (FM) y fracciones no magnéticas (FNM) en las diferentes granulometrías. Los resultados obtenidos aparecen en las tablas de los anexos 4, 5 y 6. En la figura 3. 2 se encuentra graficado las FM obtenidas en las diferentes condiciones de trabajo.

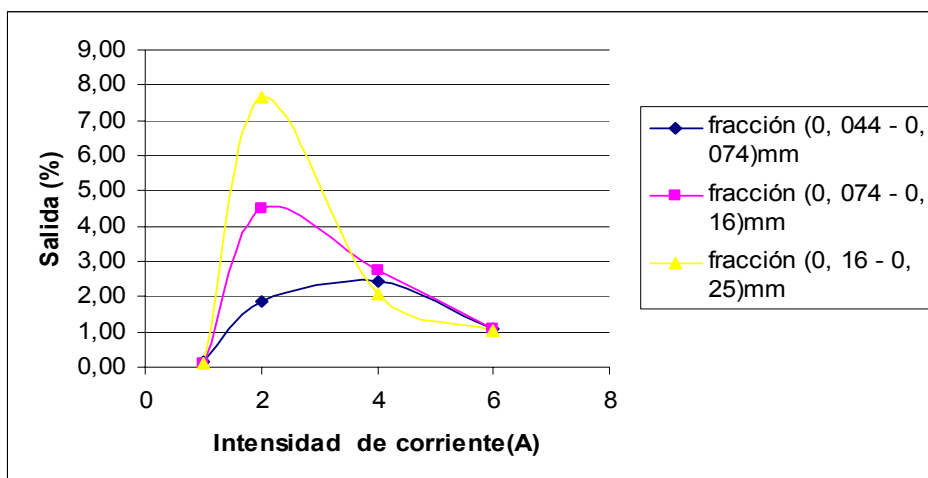


Figura 3. 2. Gráfico de las fracciones magnéticas obtenidas durante la separación magnética por vía seca

En esta figura se puede observar que a 2 A se logra la mayor extracción del mineral magnético. Donde las fracciones que se encuentran desde (0.074 - 0.16) mm y de (0.16 - 0.25) mm se obtienen los mejores resultados con relación a la que está entre (0.044 - 0.074) mm.

Luego de obtenidas las fracciones magnéticas y no magnéticas con las diferentes condiciones de trabajo empleada para cada granulometría, fueron analizadas ambas fracciones mediante el análisis microscópico y de MEB. Donde los resultados obtenidos indican que la mejor concentración de las fases zeolíticas se logra cuando se emplea una intensidad de corriente de 6 A. Esto se demuestra mediante las fotos 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15 que se encuentran a continuación y que fueron tomas solamente para la granulometría que está entre (0.074 - 0.16) mm, porque el comportamiento de esta con relación las demás fracciones es el mismo.



Foto 7. Fracción magnética
Condición de trabajo: **1 A**
Aumento: 2. 5 x 10

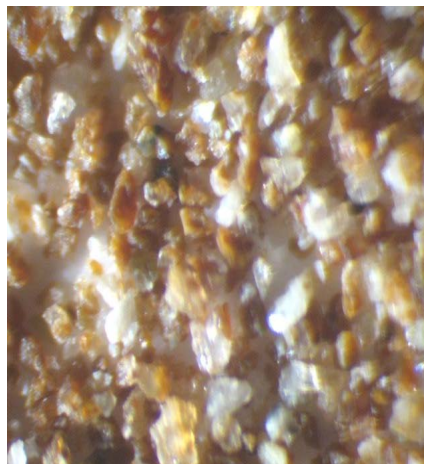


Foto 8. Fracción no magnética
Condición de trabajo: **1 A**
Aumento: 2. 5 x 10

En la fracción magnética predominan los minerales oscuros (magnetita y palagonita) y en la no magnética se incrementa el contenido de minerales claros (zeolitas).

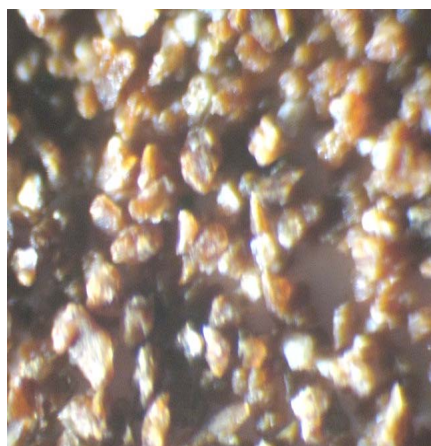


Foto 9. Fracción magnética
Condición de trabajo: **2 A**
Aumento: 2. 5 x 10

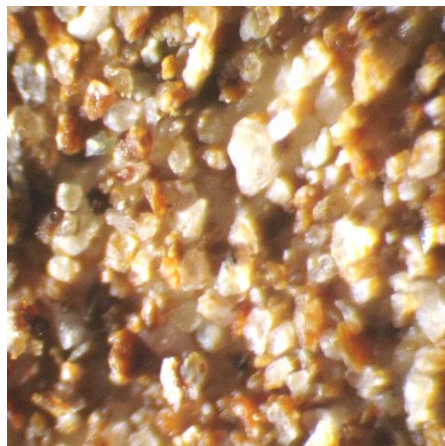


Foto 10. Fracción no magnética
Condición de trabajo: **2 A**
Aumento: 2. 5 x 10

En esta separación se pudo observar que en la fracción magnética predomina la palagonita y hay escasos piroxenos. Mientras que para la no magnética, se incrementa significativamente los minerales claros (zeolitas) pero quedan impregnaciones de palagonita.



Foto 11. Fracción magnética

Condición de trabajo: **4 A**
Aumento: 2. 5 x 10

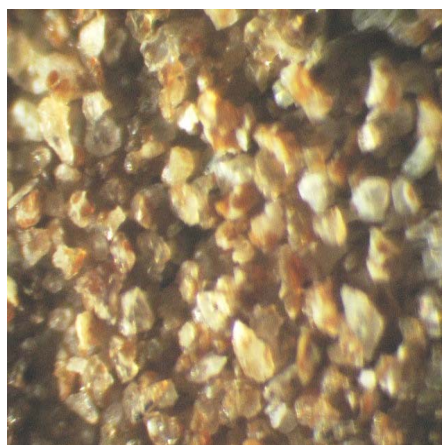


Foto 12. Fracción no magnética

Condición de trabajo: **4 A**
Aumento: 2. 5 x 10

Para la fracción magnética existe un predominio de la palagonita y de algunos minerales claros impregnados en esta. Y la no magnética es rica en minerales claros (zeolita y feldespatos), algunos impregnados con palagonita.

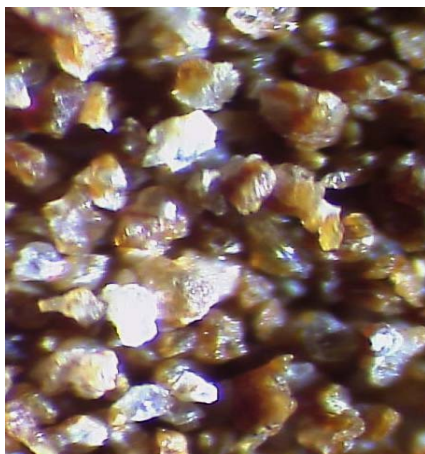


Foto 13. Fracción magnética

Condición de trabajo: **6 A**
Aumento: 1. 5 x 10

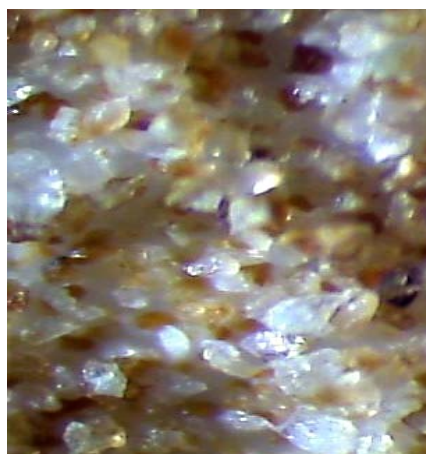


Foto 14. Fracción no magnética

Condición de trabajo: **6 A**
Aumento: 1. 5 x 10

Como producto de esta separación se obtiene una fracción magnética (figura 13) y una no magnética (figura 14). Donde en la fracción magnética se logra obtener abundantes minerales claros con impregnaciones de palagonita y en la no



magnética se logra la obtención de fracciones muy ricas en minerales claros (zeolita y feldespato) con ligeras impregnaciones de palagonita.

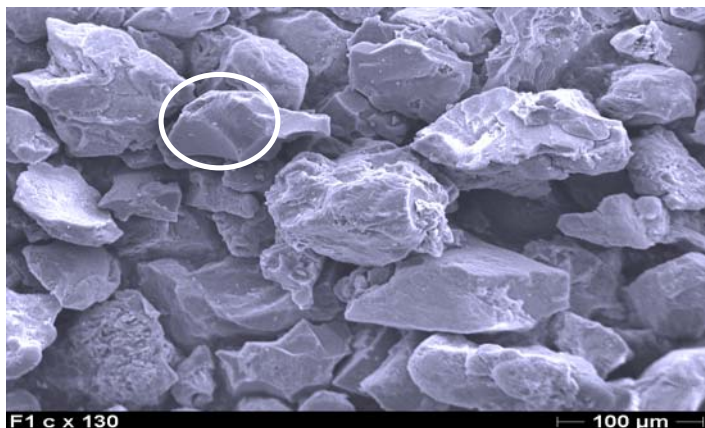


Foto 15. Fracción no magnética obtenida a 6 A.

La foto 15 que es obtenida mediante el análisis de la MEB se puede observar bien detalladamente la concentración de los granos de las fases zeolíticas con la presencia de tenues impregnaciones de palagonita, como es el caso del grano que se encuentra señalado en la misma. Donde esta foto también confirma que los mejores resultados son obtenidos a una intensidad de corriente de 6 A.

3. 4. 1. 1. Difracción de RX para la separación magnética.

Los resultados del análisis de difracción de RX realizado para todas las fracciones granulométricas obtenidas en la separación a 6 A y 35 V aparecen a continuación.

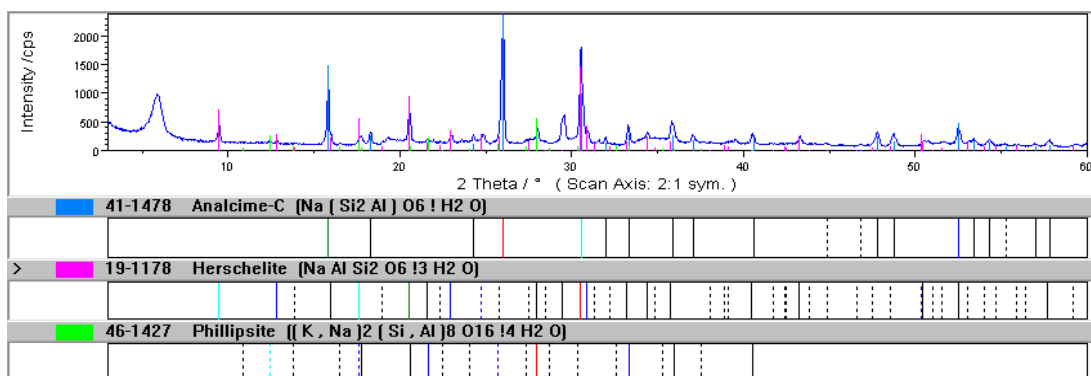


Figura 3. 3. Digractograma de la fracción 44 - 74 μm, no magnética.



Predomina la analcima sobre la herschelita (Na-chabacita). Hay trazas de phillipsita. El pico de arcilla es mucho menos intenso que en la fracción magnética. La analcima es la zeolita que se concentra en esta fracción.

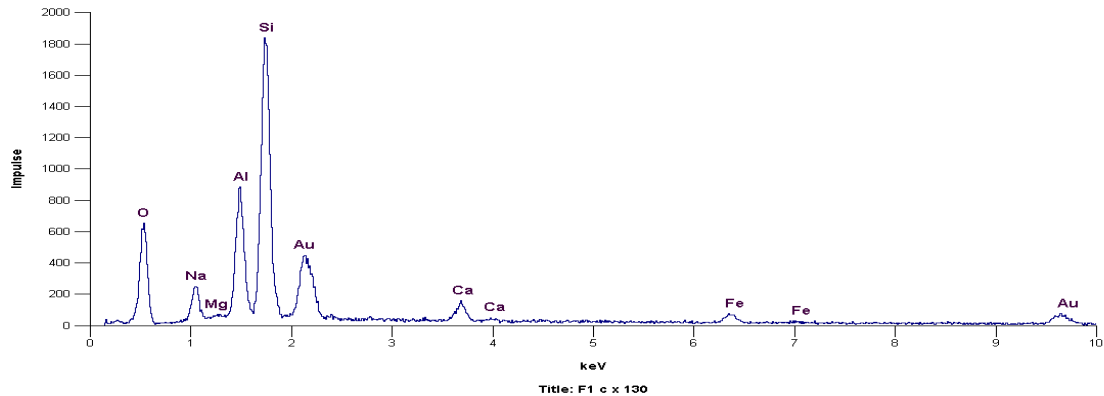


Figura 3. 4. Difractograma de la fracción **44 – 74 μm , no magnética.**

En la figura 3. 4 se puede ver la intensidad de los elementos químicos presentes en la FNM. Donde se puede decir hay una gran intensidad del silicio y aluminio en comparación con el resto de los elementos, lo que me demuestra que las tobas de Farallones son básicas.

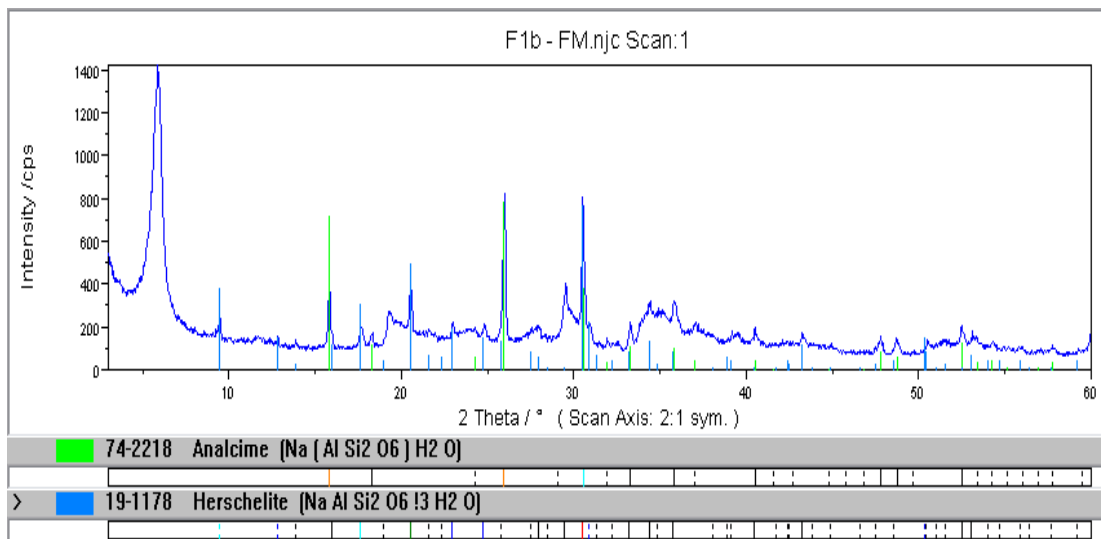


Figura 3. 5. Difractograma de la fracción **44 - 74 μm , magnética.**



Predomina la analcima sobre la herschelita (Na-chabacita). El pico de arcilla es importante y se debe probablemente a que la arcilla está muy vinculada al material del vidrio básico que es rico en Fe y por tanto más magnético que las zeolitas.

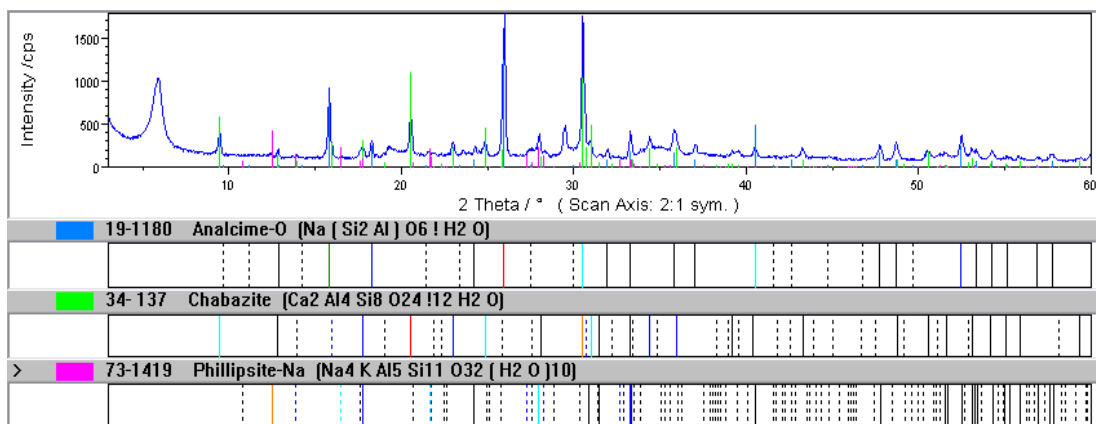


Figura 3. 6. Difractograma de la fracción de **74 - 160 μm, no magnética**.

Predomina la zeolita analcima. En segundo lugar está en importancia la chabacita y muy subordinada la phillipsita. El pico de arcilla ($d = 14,99 \text{ \AA}$) es moderado y aparece el pico de $d = 3,027 \text{ \AA}$ que puede corresponder a la fase calcita.

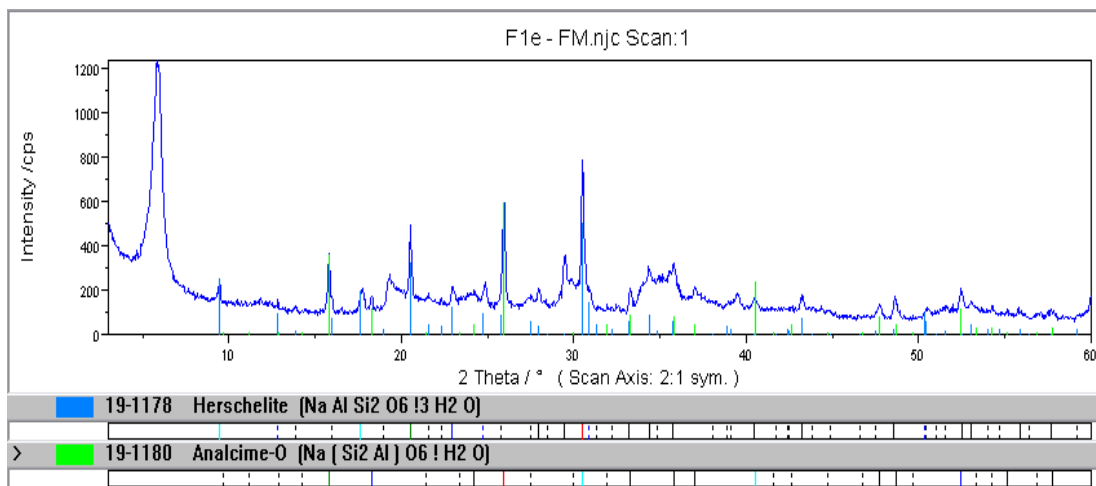


Figura 3. 7. Difractograma de la fracción **74 -160 μm, magnética**.



Se incrementa fuertemente el pico de la arcilla en relación a la fracción no magnética. Se incrementa el contenido de Herschelite (Na-chabacita) por encima de la analcima, lo cual es interesante. Aparece el pico de la calcita $d = 3,027 \text{ \AA}$. Esto puede indicar que la arcilla se ha quedado adherida a fragmentos de vidrio volcánico básico que como tienen mayor contenido de Fe pasan a la fracción magnética.

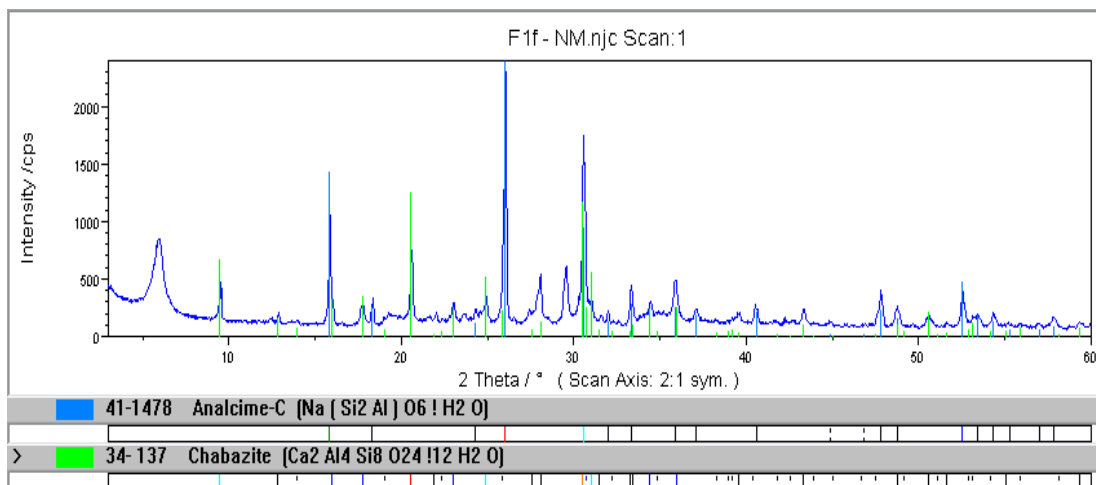


Figura 3. 8. Difractograma de la fracción de **160 - 250 μm , no magnética.**

El pico de arcilla es débil en esta fracción. Predomina la analcima sobre la chabacita. Hay algo de calcita, pico $d = 3,022 \text{ \AA}$. Pudiera haber algo de plagioclasas (pico $d = 3,176 \text{ \AA}$).

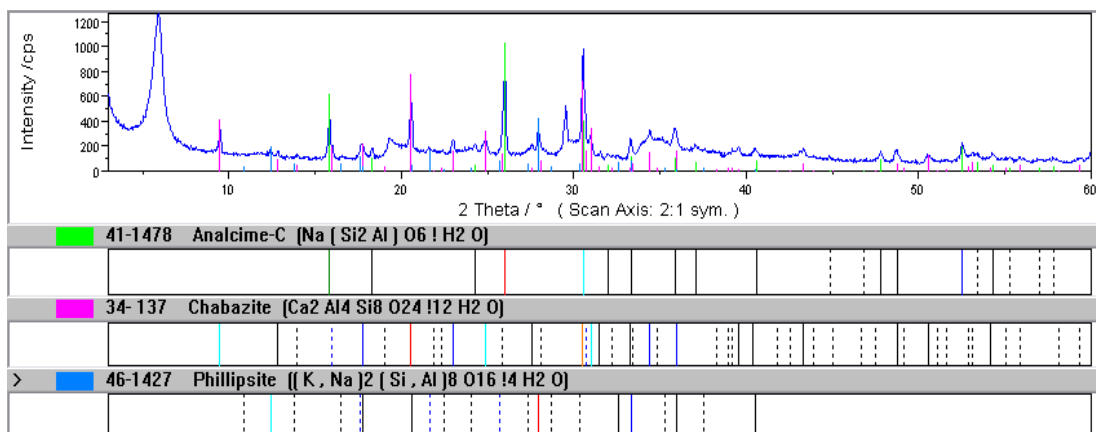


Figura 3. 9. Difractograma de la fracción de **160 - 250 μm , magnética.**



El pico de arcilla de esta fracción magnética se incrementa fuertemente con relación a la fracción no magnética. Hay contenidos análogos de analcima y chabacita y se incrementa algo la presencia de phillipsita. Sigue apareciendo el pico de $d = 3,0236 \text{ \AA}$ de la fase calcita.

3.4.2. Separación densométrica.

Los resultados de la separación densométrica aparecen expuestos en la tabla 2 que se encuentra a continuación.

Tabla 3. 2. Resultados de la separación densométrica.

Fracción	Condiciones de trabajo			
	M- 1	M-2	M- 3	M- 2
	1, 6 (g/cm ³)	2, 1 (g/cm ³)	2, 6 (g/cm ³)	γ %
0, 16 - 0, 25 mm				
FL (g)	---	18, 23	30, 45	59, 36
FP (g)	30, 25	12, 48	---	40, 64
Total	30, 25	30, 71	30, 45	100. 00

En la tabla anterior se puede observar que solamente ocurre la separación de la FL y FP cuando se trabaja a una densidad de 2, 1 (g/cm³) producto de la densidad que tiene cada mineral presente en las tobas básicas. Partiendo de los resultados obtenidos en la separación densométrica y en los DRX se tienen los distintos difractogramas para cada fracción, los cuales están representados por la figura 3. 10 y 3. 11.

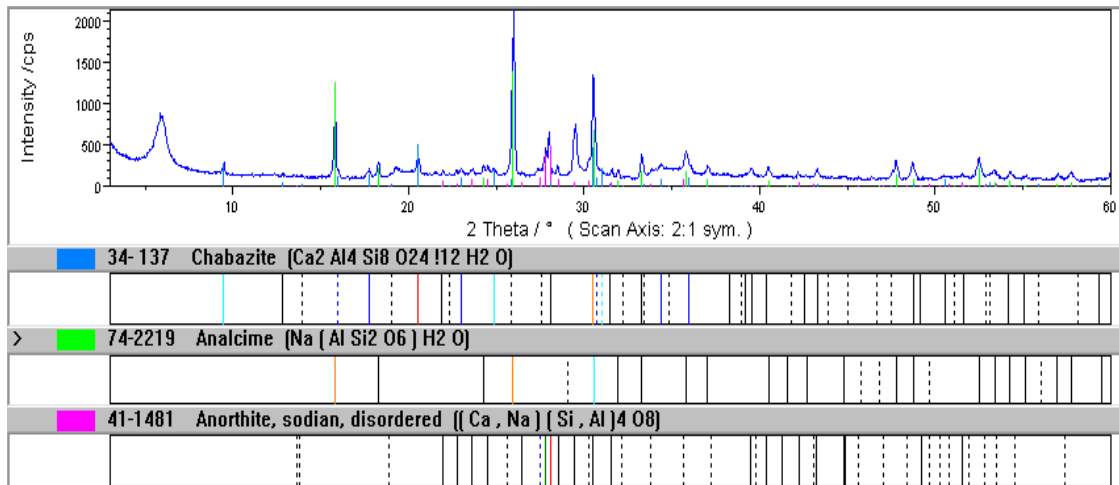


Figura 3. 10. Difractograma de la muestra de **160 - 250 μm, fracción pesada.**

Predomina la analcima en relación a la chabacita, y se incrementa el pico de la calcita ($d = 3,0262 \text{ \AA}$, lo que es lógico) y los picos correspondientes a plagioclasas. El pico de arcilla es mínimo.

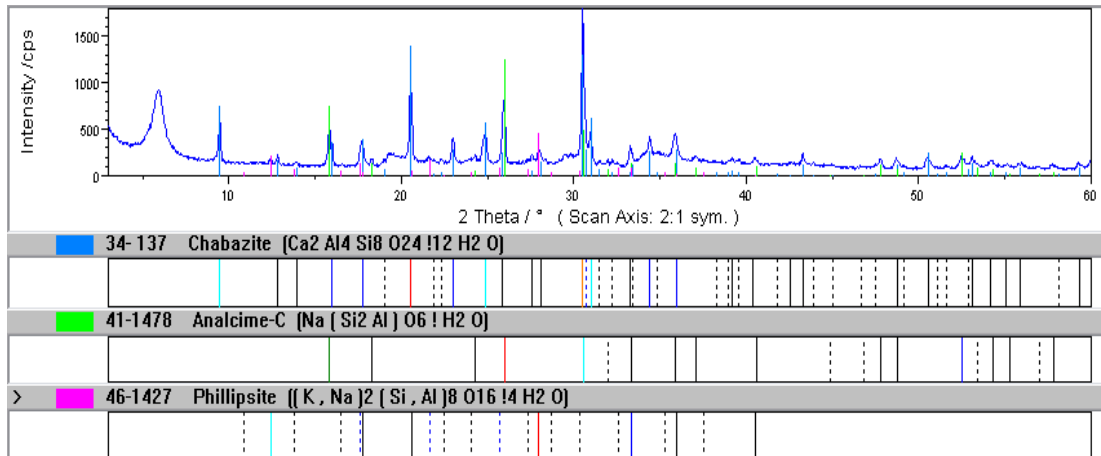


Figura 3. 11. Difractograma de la muestra de **160 - 250 μm, fracción ligera.**

El contenido de arcilla es similar a la fracción pesada, un poquito mayor que en aquella. Aquí se incrementa el contenido de la chabacita en relación con la analcima y aparece algo de phillipsita. El pico de la calcita desapareció lo que es correcto ya que la calcita es un mineral pesado.



3. 4. 2. 1 Separación magnética en la FL y FP obtenidas durante la separación densométrica.

Los resultados obtenidos en la separación magnética realizada a la FL y a la FP aparecen en la tabla 3. 3 que se encuentra a continuación.

Tabla 3. 3. Resultados de la separación magnética de los productos de la separación densométrica

FL	0, 16 - 2, 25 mm	∑%	FP	0, 16 - 2, 25 mm	∑ %
FM (g)	12, 11	66, 43	FM (g)	5, 17	41, 42
FNM (g)	6, 12	33, 57	FNM (g)	7, 31	58, 58
Total	18, 23	100, 00	Total (g)	12, 48	100, 00

Con la realización de una separación magnética después de la densométrica para la fracción que se encuentra entre 0, 16 - 2, 25 mm se logran mejores resultados con relación a los obtenidos solamente con la separación densométrica en la concentración de la fase zeolítica. Una prueba de esto son las fotos 16, 17, 18 y 19 en las que aparecen las fracciones ligeras y pesadas con fracciones magnéticas y no magnéticas.

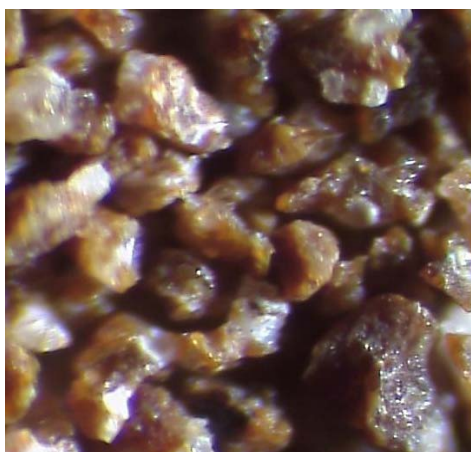


Foto 16. Fracción ligera magnética
Aumento: 2x10

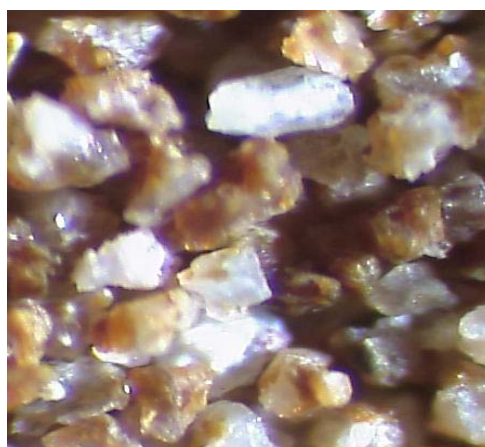


Foto 17. Fracción ligera no magnética
Aumento: 2x10



En la fracción magnética (foto 16) se concentra la palagonita y en la no magnética (foto 17) se logra un predominio de los minerales claros con impregnaciones de palagonita.

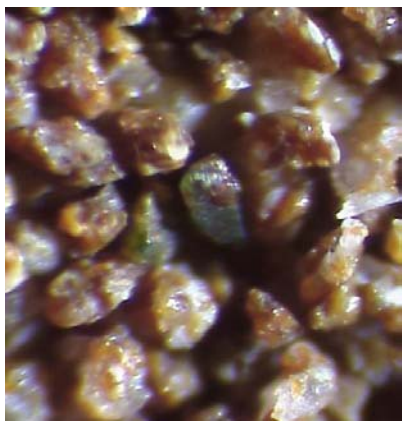


Foto 18. **Fracción pesada magnética**
Aumento: 2x10

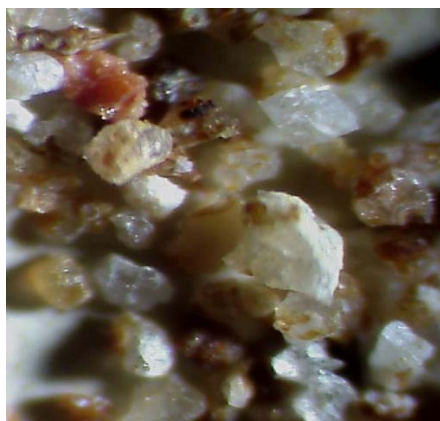


Foto 19. **Fracción pesada no magnética**
Aumento: 2x10

En la fracción pesada magnética (foto 18) predomina la palagonita con pocos minerales oscuros (magnetita y piroxeno) y alguna plagioclasa con inclusiones de magnetita. Mientras que en la fracción no magnética (foto 19) predomina la plagioclasa y los carbonatos.



CONCLUSIONES

1. Durante la caracterización mineralógica de las tobas básicas de Farallones se estableció que están compuestas principalmente por las zeolitas analcima, herschelita (Na-chabacita) y phillipsita, cuyos picos característicos aparecen reflejadas en los difractogramas obtenidos mediante el análisis de difracción de RX de diferentes fracciones granulométricas de la muestra procesada.
2. La herschelita (Na-chabacita) se reporta por primera vez para la zona de Farallones de Moa, Cuba.
3. La liberación de los granos de zeolita y palagonita ocurre en las fracciones que se encuentran entre los 0.044 y 0.25 mm, según los resultados obtenidos por la microscopía electrónica de barrido (MEB) y el análisis microscópico, estas fracciones ocupan el 33 % del material triturado.
4. La concentración de las fases zeolíticas es más efectiva por medio de la separación electromagnética con el empleo de diferentes intensidades de campos, concentrándose las zeolitas principalmente en las fracciones no magnéticas.
5. La montmorillonita se concentra junto con la palagonita en las fracciones magnéticas, lo que puede indicar una estrecha relación de esta fase con el vidrio volcánico palagonitizado.



RECOMENDACIONES

1. Realizar análisis de difracción de RX a cada fracción magnética y no magnética obtenida durante la separación electromagnética por vía seca, con el objetivo de ver el comportamiento de ambas fracciones durante las diferentes intensidades del campo magnético aplicado a las diferentes granulometrías analizadas.
2. Realizarle un análisis químico a las tobas básicas para determinar su composición elemental.
3. Hacer un estudio más detallado sobre la realización de una separación electromagnética y luego una densométrica de las fracciones no magnéticas para lograr una mayor concentración de las fases zeolíticas presentes en estas tobas básicas de Farallones.
4. Estudiar los métodos que permitan la separación de las arcillas tanto de las fracciones ricas en palagonita como en zeolitas.



Bibliografía

1. Andréiev, S., Perov, V., et al., *Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales*, Editorial Pueblo y Educación, (1980).
2. British Nuclear Technology, *British Nuclear Teach.*, Risley, Warrington, U. K., Paper 9, (1997).
3. Charles, G. y Castillo, R., *Memorias 3ra. Conf. Internacional sobre Ocurrencias, Propiedades y Usos de las zeolitas Naturales '91*, (G. Rodríguez – Fuentes y J. A. Gonzalez – Morales, Eds.), Palacio d las Convenciones Pub., La Habana, Parte II (1991) 241.
4. Columbie, R. y Rodríguez – Fuentes, G., *ibid.*, 216.
5. Concepción – Rosabal, B., Rodríguez – Fuentes, G. y Sims, R., *Zeolitas*, 17 (5 – 6), (1997) 47.
6. Daierv, C., Delcher, G., Zhelyazkov, V., Gradev, G. y Simov, S., *Symp. Management of Low - & Intermediate – Level Radioactive Wastes*, Int. Atom. Energy Agency, Vienna, (1970) 739.
7. Dercach, G., *Métodos especiales de enriquecimiento de minerales*. Impreso en la URSS, (1981), p 419.
8. Dyer, A. y Kent, D., *Zeolites*, 4 (1984) 215.
9. Enciclopedia Labor, Editorial Labor, Barcelona, Tomo I, (1979), p (745 – 746).
10. Fomenko, G., *Procesos de enriquecimiento de minerales por gravitación*, Editorial Mir, Moscú, (1980), p (107-125).
11. Gaudin, M., *Principles of Mineral*. McGraw- Hill Book Company, Inc. New York and London, (1940), p (424-461).
12. Giannetto, P., Giuseppe, R., et al., Gerardo. *Zeolitas. Características, Propiedades y Aplicaciones Industriales*, Editorial Innovación Tecnológica, Caracas, (2000).



13. Gonzáles, J., *Aplicaciones de la Zeolita*, Revista La Minería en Cuba, 2,2, (1976).
14. Hernández, M., *Petrografía de las rocas sedimentarias*, Editorial Pueblo y Educación, (1986), p 62.
15. Hofstetter, J. K. y Hite, G. H., *Sep. Sci. Technol.*, 18 (1983) 1747.
16. IAEA, *Teach. Rep. Ser. IAEA*, 136, 68, (1972) 97.
17. Klockman F., Ramdohr, P. *Tratado de Mineralogía*. Editorial Gustavo Geli, Barcelona, S.A., (1995), p (659 – 667).
18. Mafefe, *Beneficio de las zeolitas naturales del yacimiento Caimanes de Moa*, Departamento de Metalurgia, Moa, ISMMM, Doctor en Ciencias, (2007).
19. McNair, D. R., Sims, R. C., Sorensen, D. L. y Hulbert, M., *J. Am. Water Works. Assoc.*, 79 (1987) 74.
20. Melgarejo, J., *Atlas de Asociaciones de Minerales en Lámina Delgada*, Ediciones de la Universidad de Barcelona, (1997).
21. Mercer, B.W., Ames Jr, L. L. y Smith, R. W., *Nuclear App. Teach*, ECL – 152, (1970) 62.
22. Milovski, A., Kónonov O., *Mineralogía*, Editorial Mir, (1988).
23. Minato, H, Koatsugasu, 5 (1968) 536.
24. Mirth, G. y Lercher, J.A., *J Catal.*, 132 (1991) 244.
25. Mitrofanóv, I., Barski, L., et al., *Investigaciones de la capacidad de enriquecimiento de los minerales*, Editorial Mir, Moscú, (1982), p 435.
26. O'Connor, C. T., Van Steen, E. y Dry, M.E., en: *Recent Advances and New Horizons in Zeolites Science And Technology*, Ch. Chon et al. Eds), *Stud. Surf. Sci. Catal.*, Elsevier, Amsterdam, 102 (1996) 323.
27. Ohtani, S., Iwamura, T., Sando, K. y Matsumura, K, patente Japonesa 72, 046, 667 (1972).



28. Orozco, G., *Caracterización Geólogo – mineralógica del yacimiento de las tobas zeolíticas Caimanes*, Revista Minería y Geología, (1996).
29. Orozco, G., Rizo, R. *Depósitos de zeolitas naturales en Cuba*, Acta Geológica Hispánica. 33 (1-4), 335-349, (1998).
30. Perdomo, I., Tesis Doctoral, Facultad de Farmacia y Alimentos, Universidad de La Habana, (1998).
31. Perez, L., *Utilización de las zeolitas en la Tecnología de los Elastómeros*, Revista Tecnológica, XIV, (1984).
32. Pryor, E., *Mineral Processing*. Third Edition, (1965), p (571-583).
33. Rázumov, K., Perov, V., *Proyectos de fábricas de preparación de minerales*, Editorial Mir, Moscú, (1985).
34. Richards Robert H. and Locke Charles E. McGraw- Hill Book Company, Inc. New York and London, (1940), p (288-300).
35. Rivero A., *Resumenes 3ra Conf. Internacional sobre Ocurrencias, Propiedades y Usos de las zeolitas Naturales '91*, (G. Rodríguez – Fuentes y J. A. Gonzalez – Morales, Eds.), Palacio d las Convenciones Pub., La Habana, Parte II (1991).
36. Robinson, S. M., Kent, T. E. y Arnold, W. D., *Natural Zeolites '93: Occurrence, Properties, Uses*, (D. W. Minino and F. A. Mumpton Eds), Int. Comn. Nat. Zeolites, Brockport, N. Y., (1995) 579.
37. Rodríguez – Fuentes, G., Instituto de Nutrición e Higiene de los alimentos, Registro Nacional República de Cuba, Licencia Sanitaria No. 009/ 99 – II/ 99 (1999).
38. Rodríguez – Fuentes, G., Prieto, J.J. y Victorero, A., *ibid.*, 138.
39. Rodríguez – Fuentes, G., Rivera, A., Concepción, C., Barrios, M.A. y Perdomo, I., *Abstracts 5th Int. Conf. Natural Zeolites, FEZA, Ischia, Naples*, (1997) 258.
40. Sarsale, R., *Rend Accad. Sci. Fis. Mat. Naples.*, 25 (1995) 181.



41. Simón, R., Fleitas, A., Hernández, J. A. y Rodríguez – Fuentes, G., *Abstracts 5th Int. Conf. Natural Zeolites, FEZA, Ischia, Naples*, (1997) 106.
42. Sydney, A., *Introducción a la Metalurgia Física*, Instituto del Libro, La Habana, 1970), p (496-507).
43. Zink, M., Floal, S., *Tratamiento de minerales por separación de líquidos densos*, Informe N° 295, Sociedad Minera Suizo-Peruana, (2007).



ANEXO 1

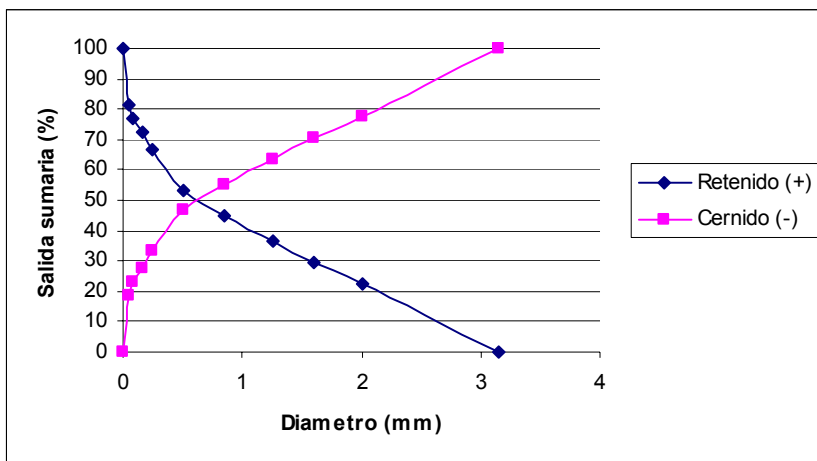


Figura.1 Gráfico de característica acumulativa.

ANEXO 2

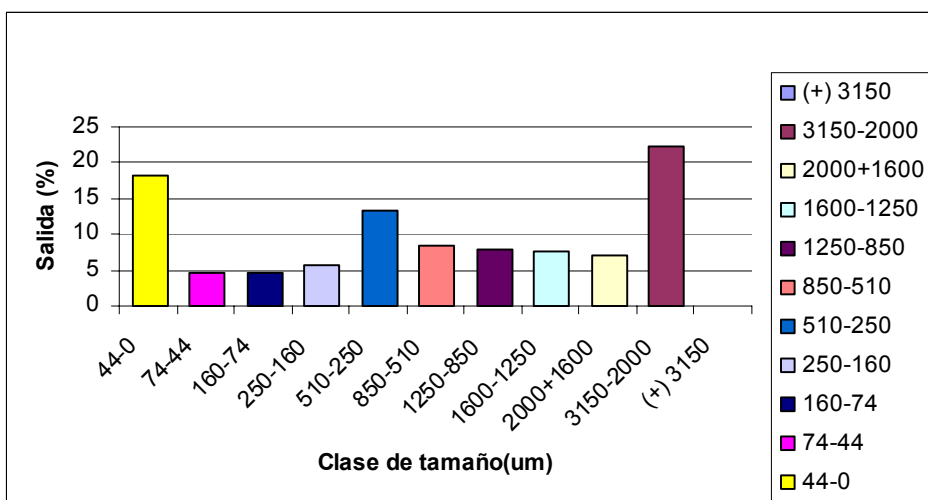


Figura 2. Gráfico de característica parcial.



ANEXO 3



Figura 3. Separador magnético por vía seca

ANEXO 4

Tabla 1. Separación magnética de la fracción de 44 – 74 μm .

Condición de trabajo	Para la fracción de (44-74) μm , de (20,14)g				
	FM	FNM	Total (g)	FM (%)	FNM (%)
1 A - 8 V	0,18	19,97	20,14	1	99
2 A - 10 V	1,88	18,09	19,97	10	90
4 A - 25 V	2,45	15,64	18,09	14	86
6 A - 35 V	1,06	14,58	15,64	7	93
Total (g)	5,57	14,58	20,14	27,63	72,37

ANEXO 5

Tabla 2. Separación magnética de la fracción de 74 - 160 μm .

Condición de trabajo	Para la fracción de (74-160) μm , de (20,72)g				
	FM	FNM	Total (g)	FM (%)	FNM (%)
1 A - 8 V	0,11	20,61	20,72	1	99
2 A -10 V	4,52	16,09	20,61	22	78
4 A -25 V	2,74	13,35	16,09	17	83
6 A - 35 V	1,06	12,29	13,35	8	92
Total (g)	8,44	12,29	20,72	41	59

ANEXO 6

Tabla 3. Separación magnética de la fracción de 160 - 250 μm .

Condición de trabajo	Para la fracción de (160-250) μm , de (20,34)g				
	FM	FNM	Total (g)	FM (%)	FNM (%)
1 A - 8 V	0,09	20,25	20,34	0	100
2 A -10 V	7,66	12,59	20,25	38	62
4 A -25 V	2,05	10,54	12,59	16	84
6 A - 35 V	1,04	9,50	10,54	10	90
Total (g)	10,84	9,50	20,34	53,30	46,70