

**BENEFICIO Y REFINACION DE UNA ARCILLA BENTONITICA NACIONAL
TIPO MONTMORILLONITA**

LUIS FRANCISCO DIAZ VILLAFANE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2007**

**BENEFICIO Y REFINACION DE UNA ARCILLA BENTONITICA NACIONAL
TIPO MONTMORILLONITA**

LUIS FRANCISCO DIAZ VILLAFANE

**Trabajo de Grado para optar al titulo de
Ingeniero Metalúrgico**

**Director:
GUSTAVO NEIRA ARENAS, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO – QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2007**

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1. MARCO TEORICO	5
1.1 Definición y clasificación de las arcillas	5
1.2 Minerales del grupo de la esméctita	6
1.3 Clasificación de Bentonitas	7
1.4 Propiedades de las arcillas	8
1.5 Hidratación: Sistema Arcilla- agua	10
1.6 Esmécticas en Colombia	11
1.7 Aplicaciones Industriales	13
1.8 Procesamiento y refinación de arcillas	16
2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	20
2.1 CARACTERIZACION DEL MINERAL	21
2.1.1 Caracterización Fisicoquímica	21
2.1.2 Caracterización Mineralógica	22
2.1.3 Caracterización Química	22
2.1.4 Caracterización metalúrgica	22
2.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO	23
2.2.1 Estudio de separación por malla	23
2.2.2 Estudio de dispersión	24
2.2.3 Estudio de sedimentación	26
2.2.4 Estudio de separación magnética vía seca	26
2.2.5 Estudio de separación magnética vía húmeda	27
2.3 Diseño y evaluación del sistema de beneficio	27

3.	RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSION	28
3.1	Caracterización del mineral	28
3.2	Desarrollo experimental de los proceso de beneficio	34
3.2.1	Separación por malla	34
3.2.2	Desarenamiento por sedimentación	37
3.2.2.1	Dispersión de la arcilla bentonítica	37
3.2.2.2	Consideraciones de potencial zeta	41
3.2.3	Ensayos de sedimentación	42
3.2.4	Separación magnética vía seca	45
3.2.5	Separación magnética vía húmeda	47
4.	PROPUESTA DEL SISTEMA DE BENEFICIO	50
4.1	Consideraciones básicas para proponer el sistema de beneficio	50
4.2	Definición de las condiciones del sistema de beneficio	53
4.3	Ensayo del sistema beneficio	58
4.3.1	Caracterización Final: bentonita beneficiada	58
4.4	Balance de masa general del sistema de beneficio propuesto	61
4.5	Índices metalúrgicos	63

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Fig. 1	Principales usos de las bentonitas	12
Fig. 2	Diagrama general para un sistema de beneficio de bentonita	18
Fig. 3	Planta de procesamiento de bentonita de Ejido, México.	19
Fig. 4	Metodología experimental	20
Fig. 5	Viscosidad del mineral a diferentes % de sólidos en pulpa	32
Fig. 6	Distribución granulométrica del mineral arcilloso natural	34
Fig. 7	Influencia de la separación granulométrica sobre la bentonita	36
Fig. 8	Altura de sedimento vs tiempo para un 20% de sólidos pulpa con Pirofosfato de sodio como dispersante	38
Fig. 9	Altura de sedimento vs tiempo para un 25% de sólidos pulpa con Pirofosfato de sodio como dispersante	39
Fig. 10	Altura de sedimento vs tiempo para un 20% de sólidos pulpa con Silicato de Sodio como dispersante	40
Fig. 11	Influencia del pH sobre la arcilla	42
Fig. 12	Influencia del tiempo de sedimentación sobre la bentonita	45

Fig. 13	Efecto de la separación magnética vía seca sobre la bentonita	47
Fig. 14	Efecto de la separación magnética en húmedo sobre la bentonita	49
Fig. 15	Efecto de cada proceso implementado sobre la fracción de montmorillonita y cuarzo	51
Fig. 16	Contenido de montmorillonita y cuarzo en la muestra original de bentonita respecto a la muestra beneficiada	60
Fig. 17	Balance de masa del circuito de beneficio	61
Fig. 19	Flujograma del sistema de beneficio propuesto	62

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de las arcillas	5
Tabla 2. Algunas formulas típicas de los minerales de la esméctica	6
Tabla 3. Capacidad de intercambio cationico de los minerales de arcilla	9
Tabla 4. Composición mineralógica de bentonitas nacionales	13
Tabla 5. Características de bentonitas para lodos de perforación	15
Tabla 6. Características de bentonitas para fundición	15
Tabla 7. Características de bentonitas usadas como material absorbente en efluentes industriales	16
Tabla 8. Esquema de ensayos para estudio de dispersión	24
Tabla 9. Condiciones de operación para separación magnética vía seca	26
Tabla 10. Condiciones de operación para separación magnética vía húmeda	27
Tabla 11. Composición química de la muestra inicial	28
Tabla 12. Especies mineralógicas presentes en la muestra original de	30

bentonítica

Tabla 13.	Resultados caracterización fisicoquímica muestra inicial	32
Tabla 14.	Distribución microgranulométrica de la bentonita natural	33
Tabla 15.	Especies mineralógicas presentes en el producto pasante del ensayo de separación por malla Tyler #200	35
Tabla 16.	Especies mineralógicas presentes en el producto sobrenadante del ensayo de sedimentación por un tiempo de 20 minutos	42
Tabla 17.	Especies mineralógicas presentes en el producto sobrenadante del ensayo de sedimentación por un tiempo de 60 minutos	43
Tabla 18.	Especies mineralógicas presentes en el producto sobrenadante del ensayo de sedimentación por un tiempo de 120 minutos	44
Tabla 19.	Resultados del ensayo de separación magnética en seco	46
Tabla 20.	Especies mineralógicas presentes en el producto no magnético del ensayo de separación magnética en seco	46
Tabla 21.	Resultados para el ensayo preliminar de separación magnética en húmedo	48
Tabla 23.	Especies mineralógicas presentes en el producto no magnético del ensayo de separación magnética en húmedo	49

Tabla 24.	Índices metalúrgicos de cada proceso	52
Tabla 25.	Condiciones generales de operación	57
Tabla 26.	Composición química de la muestra beneficiada	59
Tabla 27	Especies mineralógicas presentes en la bentonita refinada	59
Tabla 28	Variación en la capacidad de intercambio cationico entre la muestra original de bentonita y la bentonita beneficiada	60

TITULO: BENEFICIO Y REFINACION DE UNA ARCILLA BENTONITICA NACIONAL TIPO MONTMORILLONITA*

AUTOR: DIAZ VILLAFANE, Luis Francisco**

PALABRAS CLAVES: Arcillas, bentonita, montmorillonita, separación magnética, sedimentación.

RESUMEN:

Las bentonitas constituyen uno de los recursos minerales no metálicos mas apetecidos por la industria debido a sus diversas aplicaciones. Recientemente se ha demostrado su aplicación como material adsorbente para el tratamiento de efluentes industriales que contienen metales pesados. Para esta aplicacion se requiere un alto nivel de desempeño, donde las bentonitas son las más utilizadas especialmente cuando poseen cantidades elevadas de montmorillonita ya que este grupo mineral posee altas capacidades de intercambio iónico.

En este trabajo se propuso un sistema de beneficio que permitió concentrar la montmorillonita presente en una arcilla bentonitica procedente de Lérida (Tolima). Para esto se realizaron ensayos de caracterización, separación por malla, estudios de dispersión, desarenamiento por sedimentación, separación magnética en seco y en húmedo obteniéndose los mejores resultados para los procesos de sedimentación y separación magnética en seco. Alcanzando un aumento del 7% en el contenido de montmorillonita y un incremento de 17% en la capacidad de intercambio cationico en la bentonita refinada respecto al mineral original. Adicionalmente la determinaron la razón de concentración y el porcentaje de recuperación, como 1.63 y 86.8% respectivamente, que corresponden a los índices metalúrgicos del sistema de beneficio global.

*Trabajo de investigación

**Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: PhD. Ing. Gustavo Neira Arenas.

TITLE: BENEFIT AND REFINING OF A NATIONAL CLAY KIND MONTMORILLONITIC BENTONITE *

AUTHOR: DIAZ VILLAFANE, Luis Francisco**

KEYWORDS: Arcillas, bentonita, montmorillonita, separación magnética, sedimentación.

ABSTRACT:

Bentonites are one of the most non-metallic mineral resources desired by the industry because of its various applications. Recently, has shown its application as adsorbent material for the treatment of industrial effluents containing heavy metals. For this application requires a high level of performance, where bentonites are used the most in special if they have large amounts of montmorillonite due to this group has high mineral ion exchange capacities.

In this paper its proposed a beneficiation system that allowed concentrate montmorillonite present in a bentonite clay from Lérica (Tolima). For this, its tested for characterization, mesh separation, studies of dispersal, gravimetric separation, dry and wet magnetic separation to separate the quartz and the magnetic material present in the mineral, producing the best results for the processes of sedimentation and dry separation Magnetic. Reaching an increase of 7% in the content of montmorillonite and an increase of 17% in the cation exchange capacity in regard to the bentonite refined mineral original. Additionally identified the ratio concentration and the percentage of recovery, such as 1.63 and 86.8% respectively, corresponding to the metallurgical numbers.

*Degree Work

**Physical-chemical engineering faculty. Metallurgical engineering and materials science school. Director: PhD. Gustavo Neira Arenas

INTRODUCCION

Las arcillas constituyen uno de los recursos minerales no metálicos mas apetecidos por la industria, debido a sus diversas aplicaciones, principalmente en lodos de perforación, arenas de fundición, síntesis orgánicas, catalizadores para la refinación del petróleo, cerámica tradicional, cemento, entre otros.

En los últimos años, las arcillas han sido objeto de un interés renovado, gracias a sus propiedades físico-químicas y mineralógicas, demostrándose su aplicación como material adsorbente para el tratamiento de efluentes industriales que contienen metales pesados, cianuros, sustancias radiactivas y contaminantes orgánicas. Además, en vista de que esas propiedades se mantienen aun en tamaños nano y microscópico, las arcillas también son importantes para la producción de materiales compuestos y sustancias medicinales. En este tipo de aplicaciones las arcillas bentoníticas son las más utilizadas; especialmente cuando poseen cantidades elevadas de montmorillonita ya que este grupo mineral posee altas capacidades de expansión e intercambio iónico.

En el país actualmente se explotan diversos yacimientos de arcilla, pero debido a cierto desconocimiento de sus propiedades, aun no es posible aplicar este mineral a usos de alto nivel tecnológico. Esto conlleva a que las arcillas sean utilizadas solamente para fines convencionales, tales como materia prima para fabricación de ladrillos, cerámica, tejas, entre otros, que no requieren altos niveles de desempeño ni un riguroso tratamiento previo.

Al igual que con otros minerales, es necesario elevar los porcentajes de la fracción arcillosa presente para que el producto cumpla con los requerimientos necesarios para su uso en aplicaciones de alta calidad. Así, se podría vislumbrar en el futuro el abastecimiento del mercado nacional de arcillas para

ser usadas como materiales adsorbente, que de otra manera se importarían de de otros países a un alto costo.

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio de beneficio y refinación de una arcilla bentonítica nacional proveniente de un yacimiento en el departamento del Tolima, orientado a obtener la mayor cantidad de montmorillonita en el material, con las apropiadas características físicas y químicas para su posible uso en aplicaciones avanzadas. Estos ensayos de beneficio se realizaron a nivel de laboratorio.

El trabajo se desarrolló con el apoyo de la UIS y Colciencias, en el marco de los siguientes proyectos de investigación ejecutados por el grupo de investigación en minerales, biohidrometalurgia y ambiente:

- Producción de arcillas modificadas (Tipo montmorillonita) a partir de bentonitas colombianas. (DIEF de fisicoquímicas, UIS. Código: 5422)
- Desarrollo y aplicación de organoarcillas bentoníticas colombianas para la obtención de nuevos materiales poliméricos y filtros cerámicos (Colciencias, UIS. Código 1102 – 332 – 18536)

JUSTIFICACION

Las nuevas aplicaciones de los materiales tradicionales originan la necesidad de realizar trabajos de investigación, a nivel básico y aplicativo, referentes al estudio de los recursos arcillosos de nuestro medio.

En este proyecto se plantea la necesidad de identificar y probar métodos de beneficio que permitan aumentar la fracción arcillosa en un mineral que contenga bentonita preferiblemente sódica, cuya utilidad en muchas aplicaciones ha sido demostrada. Partiendo de un mineral arcilloso común de la región de Lérica (Tolima) se pretende obtener como producto un material con alto contenido de montmorillonita, útil en una variedad de aplicaciones industriales. Particularmente, en los procesos de obtención de arcillas bentoníticas con propiedades superficiales mejoradas, llamadas arcillas modificadas o activadas, es necesario disponer de materias primas con alto contenido de montmorillonita, con el fin de hacer el tratamiento más efectivo en todo el volumen de arcilla empleada. Con este requisito, es importante establecer cuales procesos de beneficio son mas apropiados y bajo que condiciones, ya que aunque los sistemas de beneficio de arcillas son en general similares, varían de acuerdo a la composición química y mineralógica propia de cada tipo de arcilla, por esto es necesario realizar un estudio que permita establecer los procesos de beneficio que alcancen los mejores resultados en la refinación de la arcilla.

Los resultados que se obtengan en este trabajo servirán como base para futuros desarrollos de la industria minera en nuestro país y también para el diseño de sistemas industriales que aprovechen las importantes propiedades de intercambio cationico que presentan las arcillas bentoníticas, las cuales en este momento en nuestro país son generalmente desaprovechadas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Proponer un sistema de beneficio que permita concentrar la mayor cantidad de montmorillonita presente en una arcilla procedente de Lérída (Tolima).

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer y aplicar un método de beneficio y refinación para obtener un producto con los mayores contenidos posibles de Montmorillonita, a partir de una arcilla del municipio de Lérída (Tolima).
- Determinar las características químicas, mineralógicas y granulométricas de la arcilla procesada y calcular los índices metalúrgicos correspondientes: razón de concentración, porcentaje de recuperación.

1. MARCO TEORICO

1.1 Definición y clasificación de las arcillas

Arcilla es una asociación de minerales arcillosos (silicatos complejos hidratados de aluminio), de pequeño tamaño de partícula, originada por la alteración hidrotermal de rocas ígneas (graitos, riolitas, dioritas, basaltos) que, bajo condiciones propias de presión, temperatura, acidez, etc., se descomponen produciendo minerales arcillosos, sílice libre y álcalis.¹

La naturaleza de la roca y el proceso de alteración fijan las características de los minerales que se forman, definiendo su estructura y composición química. Así, condiciones acidas producen minerales tales como la caolinita, mientras que medio básicos forman montmorillonita o talco. Por otro lado, las condiciones de presión y temperatura también influyen en la formación de los diferentes minerales de arcilla. En su estado natural, las arcillas están compuestas de uno o varios minerales arcillosos y de otros minerales, considerados algunas veces como impurezas, tales como cuarzo, feldespatos, plagioclasas, piroxenas, rutilo, limonita y materia orgánica. Sus propiedades son el resultado de su origen, mineralogía y tratamientos posteriores a su formación, que agregan nuevos minerales, transforman los ya existentes o, simplemente, los alteran mecánicamente.

Tabla 1. Clasificación arcillas

TIPO	DIOCTAEDRICOS		TRIOCTAEDRICOS	
T:O (Bilaminares)	KANDITAS	Caolinita Nuerita Dickita Haloisita Illita Flogopita Moscovita Paragonita Pirofilita	SERPENTINAS	Antigorita Crisotilo Lizardita Berthierita Flogopita Biotita Lepidolita Talco
	MICAS		MICAS	

¹ QUISPE A., Miguel. Las esmécticas: estructura, caracterización y aplicaciones. 2002.

T:O:T (Trilaminares)	2:1	ESMECTITAS (Expandibles) ATAPULGITAS (Fibroso)	Montmorillonita Beidelita Nontronita Vermiculita Paligorskita	ESMECTITAS ATAPULGITAS	Saponita Hectorita Sauconita Sepiolita
T:O:T:O	2:1:1	CLORITAS	Sudoitas	CLORITAS	Clinocloros Procloritas

Fuente: R. E. & Suárez B. M., 2002.

1.2 Minerales del grupo de la Esmectita

Esmectita es el nombre de un grupo de silicatos de sodio, calcio, magnesio, hierro, litio-magnesio, el cual incluye los minerales de montmorillonita sódica, montmorillonita cálcica, nontronita, saponita, sauconita y hectorita². La roca en la cual estos minerales esmectíticos son usualmente dominantes, se denomina bentonita. Las bentonitas en las cuales la montmorillonita sódica es el mayor constituyente mineral, tienen comúnmente una alta capacidad de hinchamiento.

Tabla 2. Algunas formulas típicas de los minerales de Esmectita

Mineral	CAS N° Registro	Fórmula ^a
Montmorillonita	{1318-93-01}	$\{Al_{1.57}Mg_{0.33}(Na_{0.33})\}Si_4O_{10}(OH)_2$
Beidelita	{12172-85-9}	$Al_{2.17}\{Al_{0.33}(Na_{0.33})Si_{3.67}\}O_{10}(OH)_2$
Nontronita	{12174-06-0}	$Fe(III)\{Al_{0.33}(Na_{0.33})Si_4\}O_{10}(OH)_2$
Hectorita	{12173-47-6}	$\{Mg_{2.67}Li_{0.33}(Na_{0.33})\}Si_4O_{10}(OH,F)_2$
Saponita	{1319-41-1}	$Mg_3\{Al_{0.33}(Na_{0.33})Si_{3.67}\}O_{10}(OH)_2$
Sauconita	{12424-32-7}	$\{Zn_{1.48}Mg_{0.14}Al_{0.74}Fe(III)_{0.4}\}$ $\{Al_{0.99}Si_{3.01}\}O_{10}(OH)_2X_{0.33}$

Fuente: Murray, 1986

Una bentonita es una roca compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmectitas, independientemente de cualquier connotación genética.³

² GARCIA R., Emilia: Las arcillas, propiedades y usos

³ GRIM, R. E. & GUVEN, N. "Bentonites: Geology, Mineralogy and Uses". New York. Elsevier. . (1978)

1.3 Clasificación de Bentonitas

Los criterios de clasificación utilizados por la industria se basan en su comportamiento y propiedades físico-químicas; así la clasificación industrial más aceptada establece tipos de bentonitas en función de su capacidad de hinchamiento en agua:

- *Bentonitas altamente hinchables o sódicas*
Constituidas por montmorillonita que contiene naturalmente iones intercambiables de sodio. Usada en lodos de perforación y como ligante en la pelletización de mineral de hierro.
- *Bentonitas poco hinchables o cálcicas*
Constituidas por montmorillonita que contiene naturalmente iones intercambiables de calcio. Este tipo de arcilla tiene menor capacidad de hinchamiento que la sódica. Usada en pastas cerámicas.
- *Bentonitas con activación alcalina*
Se obtienen por el intercambio de cationes alcalino-terreos por cationes alcalinos en la montmorillonita. Esta activación provoca una mayor plasticidad, viscosidad y tixotropía.
- *Bentonitas con activación ácida*
Constituidas por montmorillonitas cálcicas que han sido tratadas con ácido clorhídrico o sulfúrico para remover impurezas, incrementar su área superficial y mejorar propiedades de absorción y adsorción.
- *Bentonitas organofilicas*
Consisten de arcillas modificadas, tienen sus iones intercambiables reemplazados con iones orgánicos.⁴

⁴ ODOM, I. E. "Smectite Clay Minerals: Properties and Uses". Phil Trans. R. Soc. London. (1984).

1.4 Propiedades de las arcillas

A continuación se presenta una breve descripción de sus propiedades más importantes de las arcillas:

1.4.1. Capacidad de Intercambio Iónico

Los minerales de arcilla tienen la propiedad de absorber aniones y cationes, los cuales pueden ser intercambiados por otros iones, por tratamiento en una suspensión acuosa. La reacción de intercambio es estequiométrica, diferenciándose por lo tanto de una simple adsorción.⁵

Los iones intercambiables se mantienen alrededor de la parte externa de la unidad estructural de mineral de arcilla, y la reacción de intercambio generalmente no afecta la estructura de los paquetes de sílice-alúmina.

En los materiales arcillosos, los cationes intercambiables más comunes son Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , K^+ , NH^+ y Na^+ , y entre los aniones, el SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} y NO_3^- .⁶

La capacidad de intercambio catiónico de los minerales arcillosos está relacionada con los siguientes factores:

- *Rotura de enlaces o enlaces rotos* en torno a los bordes de las unidades sílice-alúmina que promuevan el surgimiento de cargas balanceadas, las cuáles serán contrarrestadas por la adsorción de cationes.
- *Sustituciones dentro de la estructura de la red*, deficiencias de carga que son balanceadas por la absorción de cationes
- *Hidrogeno de los hidroxilos expuestos* en las unidades estructurales, puede ser reemplazado por un catión, el cual puede también ser intercambiable.

⁵ODOM, I. E. "Smectite Clay Minerals: Properties and Uses". Phil Trans. R. Soc. London. (1984).

⁶ QUISPE A., Miguel. Las esmécticas: estructura, caracterización y aplicaciones. 2002.

Tabla 3. Capacidad de intercambio catiónico de algunos minerales de arcilla

MINERALES ARCILLOSOS	C.I.C. meq/100g
Caolinita	3-5
Halloysita	10-40
Illita	10-50
Clorita	10-50
Vermiculita	100-200
Montmorillonita	80-200

Fuente: Grimm, 1968

Esta propiedad de las arcillas, es primordial para la utilización de algunos de estos minerales como adsorbentes, pues estos pueden adsorber agua u otras moléculas en los canales estructurales o en el espacio ínter laminar. La capacidad de adsorción está directamente relacionada con las características de textura tales como superficie específica y porosidad. Aunque la capacidad del intercambio cationico de un tipo de mineral puede variar debido a muchos factores, los valores de capacidad son comparables solo si ellos han sido obtenidos por el mismo procedimiento estándar. Así mismo, la capacidad de adsorción se presenta cuando existe una interacción de tipo fisicoquímico entre el adsorbente, en este caso la bentonita, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato.⁷

La capacidad de intercambio catiónico de las arcillas esta muy ligada a sus características absorbentes. Los sólidos empleados como adsorbentes deben presentar características que permitan su utilización dentro de la operación industrial de manera adecuada y que además posean grupos superficiales activos o una fuerza electrostática que les permita retener sobre su superficie

⁷ BRAVO, Natalie. Utilización de adsorbentes para la eliminación de contaminantes en aguas y efluentes líquidos.2004

las especies de adsorbato requeridas o en su defecto que permitan su modificación para cumplir con tal fin.

1.4.2. Otras propiedades

- *Plasticidad*

Cuando las arcillas y, para nuestros fines, las bentonitas se mezclan con agua, son marcadamente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envoltura sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

- *Tixotropía y Viscosidad*

Este es un fenómeno conocido únicamente en suspensiones coloidales, y se dice que una sustancia presenta el fenómeno de la tixotropía, cuando la aplicación de un esfuerzo deformante reduce su consistencia, es decir cuando el grado de resistencia que ofrece la mezcla a fluir o a deslizarse se disminuye. Esta resistencia suele llamarse viscosidad.

1.5 Hidratación: Sistema Agua-Arcilla

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de algunos tipos de arcillas como las esmectitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.⁸

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de

⁸ Revista CERAMICA Y CRISTAL 138 - ABRIL 2006. www.ceramicaycristal.com.ar

hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlamina es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales.

Esto es importante para los posibles tratamientos vía húmeda que se implementen en las arcillas bentoníticas, ya que al presentarse mejores condiciones de disgregación y dispersión, el tratamiento sobre la mena tenderá a separar las especies arcillosas de interés de las impurezas.

1.6 Esmecticas en Colombia

Debido a la diversidad de los procesos de formación de las arcillas esmectitas, aparece generalizada en diversos ambientes, ya que puede originarse por alteración de rocas volcánicas, precipitación directa a partir de soluciones o por transformación de minerales preexistentes.

En el ámbito nacional, la variedad de la conformación geológica, topográfica y climática de Colombia explica, en gran medida, la diversidad de los minerales arcillosos en sus suelos. Las importaciones de arcillas especiales y productos derivados pueden ser suplidas en la medida que se identifique y caractericen los yacimientos, se tecnifique la exploración, explotación y beneficio de éstos minerales y se logre darles un verdadero valor agregado. Aunque se han realizado estudios sobre arcillas esmectíticas en Colombia desde hace varias décadas, como por ejemplo en los sectores de los departamentos del Valle del

Cauca y Tolima a través del Ministerio de Minas, estos son puntuales y escasos.⁹

El ambiente geológico más propicio para encontrar arcillas esmectíticas en Colombia, con interés económico, corresponde a las que sean formado por hidrólisis de rocas volcánicas o sedimentarias con aporte volcánico. En consecuencia, la Cordillera Central constituye la región más atractiva para prospeccionar este recurso, y de acuerdo con el conocimiento estratigráfico actual, la Formación Honda, en el Departamento del Tolima, conforma una de las unidades de mayor potencial para encontrar este recurso.¹⁰

En Colombia, los yacimientos explotados, de este tipo de arcilla, se asocian con capas de rocas de origen volcánico sedimentario, ejemplo de estas regiones son: Formación La Paila, en el Valle del Cauca y el grupo Honda - Lerida, en el Tolima.¹¹ En el sector de Lérída, procedencia de nuestra muestra de arcilla, se encuentran remanentes del grupo Honda expuestos por la erosión o ausencia de cobertura conformada por conos aluviales predominantes en esta zona. En la tabla 4, se presenta la composición mineralógica de arcillas bentoníticas colombianas, es posible observar que aunque tienen en común la misma ocurrencia presentan contenidos de especies mineralógicas particulares.

⁹ CAMACHO y CELADA. . Definición de Zonas Potenciales para Esmectitas en los Departamentos del Valle del Cauca, Tolima y Caldas. 2003

¹⁰ LAGUNA, O. ; MOLINA G. Naturaleza mineralógica de esmectitas provenientes de la formación Honda (Noreste de Tolima, Colombia) G.Universidad nacional de colombia. 2008.

¹¹ ESPITIA, Carlos J., Catalogo de propiedades físicas. Químicas y mineralógicas de las arcillas para cerámica roja en Medellín, Ibagué y la sabana de Bogotá. Ingeominas. 2003

Tabla 4. Composición Mineralógica de bentonitas Nacionales

MUESTRA	FASES CRISTALINAS						% AMORFOS
	% MONTMORILLONITA SÓDICA (M-Na)	% ILLITA (I)	% CAOLINITA (K)	% ALBITA (A)	% HALOISITA (H)	% CUARZO (Q)	
Arcicol®	20.08	42.29	9.75	10.35	----	9.03	1.25
SB-1*	X	X	---	X	----	X	X
LR-2	14.96	36.11	12.33	----	----	27.97	8.63
RR-3	18.96	31.40	21.07	----	N.D.**	19.28	9.29

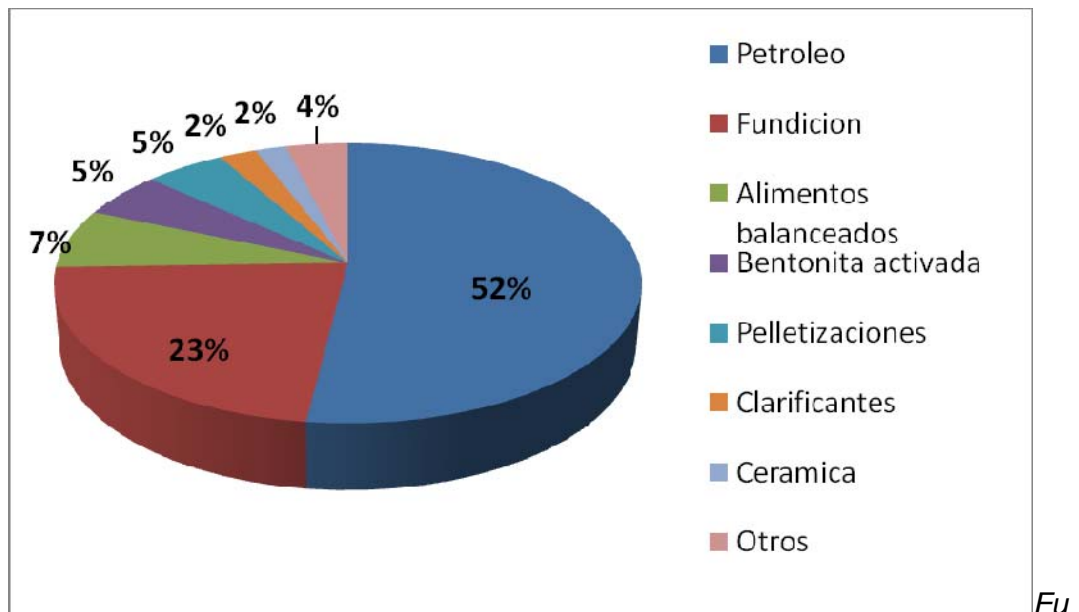
Fuente: Carreño, A.Y. Macías, J.F. 2007

1.7 Aplicaciones industriales

Teniendo en cuenta que las propiedades de la bentonita no dependen solo del mineral esmectítico predominante sino también de su grado de cristalinidad, del tamaño de los cristales, etc., las propiedades pueden variar enormemente, y por lo tanto el campo de las aplicaciones son amplias y las especificaciones para cada caso son muy particulares.

La bentonita es uno de los minerales industriales no metálicos que posee la mas amplia gama de aplicaciones y por la posibilidades de aumentar su valor agregado a través de su activación, puede alcanzar en casos puntuales valores de venta que superan a cualquier otro mineral no metálico. Se comercializa en diferentes formas: en bruto, triturada, molida en diferentes mallas según el destino final, o activadas. Una síntesis de los diferentes usos, en función del tipo de bentonita seleccionada, se expone en la siguiente tabla:

Figura 1. Principales usos de las bentonitas



ente: www.quiminex.com.mx

A continuación se especifica en detalle las principales aplicaciones de la arcilla bentonítica en Colombia:

- **Lodos de perforación:**

Para extraer crudo de los pozos petroleros es indispensable utilizar un fluido que cumpla las funciones: extraer el ripio de la perforación, refrigerar la herramienta de corte, sostener las paredes de la formación, estabilizar la columna y lubricar, entre otros. Este fluido es llamado lodo de perforación, que se define como una suspensión de arcilla en agua, con los aditivos necesarios. La bentonita se usa frecuentemente como aditivo que otorga propiedades específicas de viscosidad, plasticidad y densidad al denominado lodo elaborado. Un ejemplo de arcilla bentonítica con las características requeridas para este uso se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 5. Características de bentonitas para lodos de perforación

Parámetro	Unidad
Humedad	7,50 %
Viscosidad	24 mPa
Retenido en malla # 200	3%
Montmorillonita	Min 60%
CIC	60 meq/100gr.

Fuente: www.slb.com

- **Fundición**

Las arenas de moldeo están compuestas por arena y arcilla, generalmente bentonita, que proporcionan cohesión y plasticidad a la mezcla, facilitando su moldeo y dándole resistencia suficiente para conservar la forma adquirida después de retirar el molde y mientras se vierte el material fundido.¹² La proporción de bentonita en la mezcla varía entre el 5 y 10%, la bentonita sódica se usa en fundiciones de altas temperaturas siendo esta más estable que la bentonita cálcica. A continuación se muestra una bentonita para este uso:

Tabla 6. Características de bentonitas para fundición

Parámetro	Unidad
Humedad	10,00%
Viscosidad	20 mPa
Retenido en malla #200	2%
Montmorillonita	75 %
CIC	65 meq/100gr.

Fuente: www.scielo.cl

- **Efluentes industriales:**

Actualmente una considerable proporción de la industria genera efluentes con metales pesados. Diversas tecnologías permiten tratar este tipo de desechos tóxicos por remoción de iones presentes: precipitación, ultrafiltración, osmosis

¹²La minería no metálica en Perú. 2007. www.proinversion.gob.pe

inversa, entre otras. Por otro lado, la elevada superficie específica de la bentonita, le confiere una gran capacidad tanto de absorción como de adsorción¹³, propiedades importantes para su aplicación como material para tratar metales pesados en efluentes industriales. En la tabla 7 se muestra las características generales requeridas para esta aplicación.

Tabla 7. Características de bentonitas usadas como material absorbente en efluentes industriales

Parámetro	Unidad
Humedad	Min. 11 %
Montmorillonita	Min. 60 %
CIC	Min. 80 meq/100gr.

Fuente: Andrade L. Vega 2005

1.8 Procesamiento y Refinación de Arcillas

El grado de refinación de la arcilla se relaciona directamente con la cantidad o porcentaje de mineral arcilloso que contiene (montmorillonita, caolinita, etc.). De esta manera las arcillas, antes de su uso industrial, pueden someterse a diversos procesos de purificación. Así, la operación de beneficio tiene como finalidad separar los minerales no arcillosos que en forma de arenas están presentes como impurezas. Las arcillas beneficiadas son pues concentrados de minerales arcillosos.

El tipo de beneficio viene fijado por la naturaleza y uso a que se destine el mineral. Generalmente es sencillo, reduciéndose a una disminución de tamaño (trituration primaria), a la eliminación de humedad y finalmente, a una molienda hasta los tamaños de partícula deseados. La temperatura de secado depende de la utilización posterior de la arcilla.

¹³ BRADANOVIC, Tomás P. Arcillas y Bentonitas. 2002

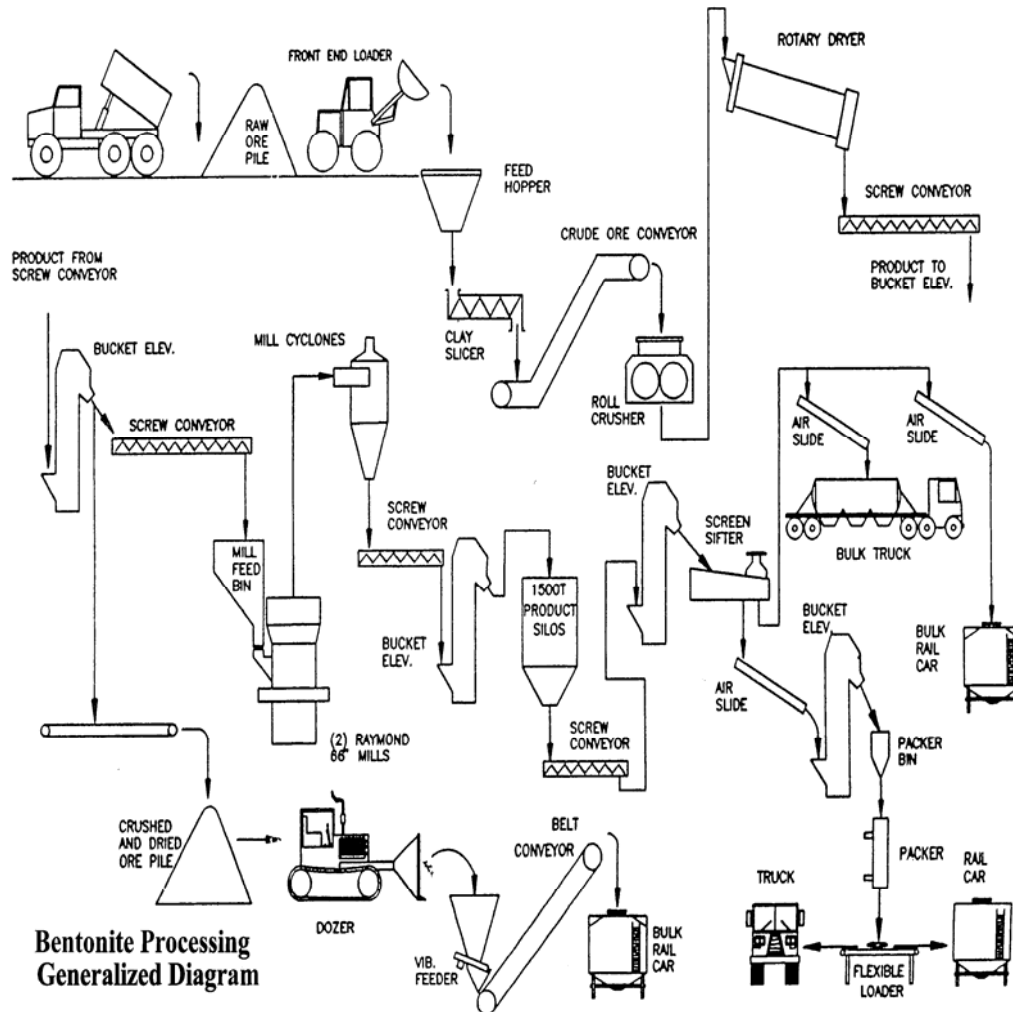
La extracción implica la formación de suspensiones acuosas que se refinan por procesos de elutriación o clasificación granulométrica en hidro-separadores (tanques de sedimentación, hidrociclones o combinaciones de los mismos). Sin embargo, el proceso de beneficio a emplear y sus operaciones unitarias, dependen del tipo de impurezas que se deseen eliminar¹⁴. Durante la refinación algunas propiedades como el color y las de flujo pueden ser mejoradas mediante operaciones tales como el tratamiento químico, la separación magnética de alta intensidad, la flotación por espumas, la floculación selectiva y la calcinación.

En general, las arcillas poseen características comunes y por lo tanto los métodos de beneficio son muy similares sin importar el tipo de arcilla de interés en un yacimiento.

Dependiendo de estas características propias de cada mena arcillosa y de los requisitos en cuanto a composición química y mineralógica para su aplicación como materia prima, existen sistemas de beneficio que aumentan en complejidad de acuerdo al requerimiento en grado tecnológico de la arcilla procesada, tal como la planta de beneficio de bentonita de la Figura 2. Donde se observa un tratamiento inicial de trituración y secado, luego se somete a un proceso multietapa de molienda para disponer la muestra al proceso de separación granulométrica y neumática. Es importante resaltar que las colas en el proceso, son recirculadas o clasificadas directamente para usos industriales, tales como arenas.

¹⁴ GONZALEZ, José M. Las arcillas como minerales industriales, bentonitas, caolines y arcillas especiales.2000

Figura 2. Diagrama General para un sistema de beneficio de Bentonita

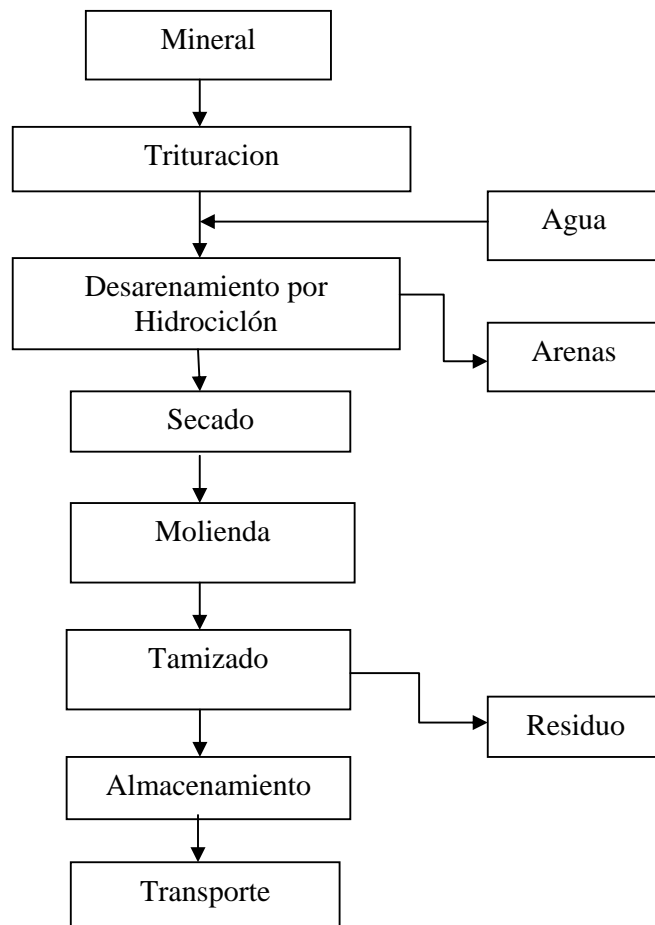


Fuente: www.wma-minelife.com

En la figura 3 se presenta un esquema de procesamiento de bentonita en una planta de México. Debido a que produce un mineral bentonítico como materia prima para la industria alimenticia y detergentes consta de un sistema de procesos sencilla que consiste elementalmente de una trituración previa, una etapa de Desarenamiento por hidrociclón que concentra los minerales arcillosos separándolos de impurezas, y un secado en hornos rotatorios para eliminar la humedad desde un 30 % hasta un 7 % aproximadamente. Debido a

la demanda de arcillas con mayor calidad la planta en los próximos años complementara el proceso con un etapa de activación acida, filtración y pulverizado que permitan un incremento en la porosidad, área superficial y capacidad de intercambio catiónico.

Figura 3. Planta de procesamiento de bentonita de Ejido, México.

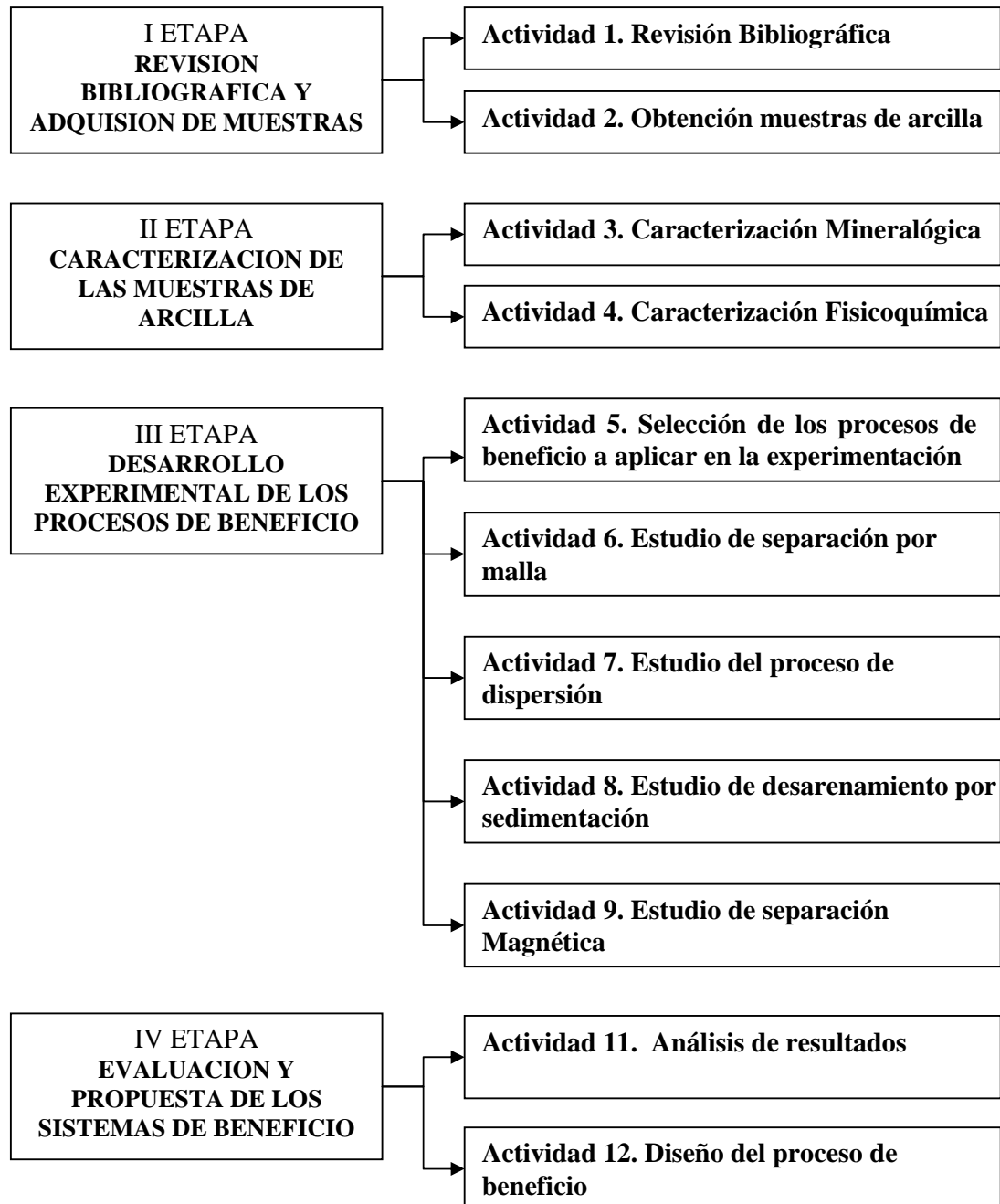


Fuente: RODAS, Magdalena. *Minerales industriales*. 2001.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En la figura 4 se muestra un esquema general del diseño metodológico empleado para el desarrollo del proyecto

Figura 4. Metodología experimental



2.1. CARACTERIZACION DEL MINERAL

Mediante la caracterización química y mineralógica de la muestra de arcilla, es posible determinar características que permitan clasificar, y establecer los procesos y tratamientos más apropiados para beneficiar la arcilla. Las muestras obtenidas procedentes de Lerida – Tolima, presentaron un tamaño de partícula menor a 74 μm . Aplicando cono y cuarteo se tomó una muestra representativa a partir de la muestra original para realizar los correspondientes ensayos de análisis químico, mineralógico y metalúrgico.

A continuación se presentan los procedimientos seguidos para la caracterización geoquímica, fisicoquímica y metalúrgica del mineral arcilloso.

2.1.1. Caracterización Fisicoquímica:

- En la determinación del porcentaje de humedad de la muestra, se realizó la norma ASTM 324-01 para la determinación de humedad libre de arcillas (anexo 2), conservándose las muestras en recipientes herméticamente sellados con objetivo de evitar una modificación de contenido de agua respecto a la muestra original de bentonita.
- La densidad real del mineral se determinó por el método picnométrico, según la norma ASTM C 329-88 para la determinación de la densidad real (anexo 3).
- La determinación del pH de la muestra se realizó mediante un pHmetro, en una muestra de bentonita, al 10% en peso de sólidos, en agua destilada.
- Se determinó la viscosidad de la muestra con el fin de determinar el porcentaje de sólidos más apropiado para su manejo, en ensayos vía húmeda, en el proceso de beneficio. Se tomó como referencia los

resultados obtenidos por Carreño y Macías¹⁵, que encontraron que a bajos porcentajes de sólidos, sin tratamiento previo de dispersión, las bentonitas presentan valores de viscosidad muy altos, por lo tanto los mejores resultados a partir de 10% de sólidos en pulpa. Para la determinación de la viscosidad se empleó un viscosímetro de agujas BROOKFIELD (Escuela de Ingeniería Química – Universidad Industrial de Santander)

2.1.2. Caracterización Mineralógica

Para la determinación de las especies mineralógicas presentes en la muestra se utilizó la técnica de análisis por Difracción de Rayos X, la cual fue realizada en el laboratorio de Difracción de Rayos X (Escuela de Química – Universidad Industrial de Santander). La metodología del ensayo se encuentra consignada en el anexo 1. El tipo de análisis realizado fue la determinación cuantitativa de las especies mineralógicas cristalinas presentes en la muestra. De acuerdo con la caracterización mineralógica, se procedió a clasificar la arcilla bentonítica con base en las fracciones arcillosas presentes.

2.1.3. Caracterización Química

Se determinó la composición química de la muestra de arcilla mediante Fluorescencia Rayos X, técnica que mediante irradiación y posterior generación de fotones de rayos X, característicos de cada elemento presente, determina la composición química de la muestra.

2.1.4. Caracterización metalúrgica

Se realizó análisis granulométrico encontrándose que la totalidad de la muestra de arcilla pasa la malla Tyler # 200 (74 µm). Este ensayo permitió establecer la distribución granulométrica y microgranulométrica de la muestra, criterio

¹⁵ CARREÑO, Agni. MACIAS, José F. Propuesta de un sistema de beneficio para un arcilla montmorillonítica nacional. UIS. 2007

importante para la implementación de posibles ensayos de separación granulométrica y gravimétrica. Se determinó la distribución microgranulométrica de la muestra mediante el análisis con fotosedimentador LUSOMED (escuela Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander).

2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO DE LA ARCILLA BENTONITICA

Los procesos de beneficio propuestos a continuación se seleccionaron de acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización de la muestra y con base en los procesos sugeridos por la literatura para el tratamiento de refinación de arcillas. Se evitó la aplicación de procesos como la lixiviación, debido a la reacción del ácido con algunas especies del mineral. Siendo la montmorillonita la especie mineralógica de interés principal para este proyecto, y el cuarzo la principal impureza a eliminar, por lo tanto estas concentraciones relativas fueron empleadas para analizar la efectividad de cada proceso de beneficio estudiado.

Los procesos de separación evaluados durante el desarrollo de este proyecto fueron: separación granulométrica, dispersión, desarenamiento por sedimentación y separación magnética en seco y en húmedo. Estos procedimientos de separación se ensayaron separadamente, para establecer directamente el efecto de cada proceso sobre la muestra original de bentonita.

2.2.1. Estudio de separación por malla

Esta actividad se realizó con el fin de establecer si es posible concentrar la fracción arcillosa de interés mediante separación por mallas. De acuerdo con los valores de distribución granulométrica de la muestra y teniendo como base que el cuarzo presenta mayor tamaño y densidad que las demás especies presentes en la muestra, con este tratamiento se separan las impurezas y eleva el porcentaje de fracción arcillosa contenida en la muestra beneficiada.

Esta separación granulométrica se realizó mediante la malla Tyler # 325 (44 μm).

2.2.2. Estudio de Dispersión de la muestra

Este estudio permite establecer las mejores condiciones para tratar la arcilla en el proceso de separación gravimétrica, según el tamaño y densidad del cuarzo respecto a la fracción arcillosa. En esta actividad se evaluaron las siguientes variables: porcentaje de sólidos en pulpa, Tipo de dispersante, Dosis del dispersante, y pH. La variable respuesta fue siempre la velocidad de sedimentación. Se estableció el rango de porcentaje de sólidos de pulpa en los ensayos de viscosidad, donde se seleccionaron el rango entre 20 y 30% de sólidos. Valores por encima de este rango presentan dificultad para ser transportados por su alta resistencia a fluir tendiendo a sedimentarse y adherirse en los recipientes.

La preparación de las muestras del mineral en forma de pulpas, se realizó disgregando por agitación mecánica el mineral en agua destilada, con adición progresiva de un tipo de dispersante, que actúa como defloculante concediendo un grado de repelencia entre las partículas arcillosas, para de esta forma lograr mantener en suspensión el mineral. De acuerdo a las variables mencionadas para la muestra de arcilla bentonítica, se ensayó de acuerdo al siguiente cronograma:

Tabla 8. Esquema de ensayos para estudio de dispersión

<i>% Sólidos</i>	<i>Agente Dispersante</i>	<i>Dosificación Dispersante</i>
10	Pirofosfato	0%
		0,1%
		0,3%
	Silicato de Sodio	0%
		0,3%

		0,5%
20	Pirofosfato	0,5%
		0,6%
		1%
	Silicato de Sodio	0,3%
		0,5%
		1%
30	Pirofosfato	0,5%
		0,8%
		1%
	Silicato de Sodio	0,5%
		1%
		1,5%
25	Pirofosfato	0,5%
		0,6%
		1%
	Silicato de Sodio	0,3%
		0,5%
		1%

Fuente. Autor

Luego de establecer las mejores condiciones de tipo y dosis del dispersante para determinado porcentaje de sólidos, se evaluó las mejores condiciones de pH mediante el uso del ZETA-METER (Laboratorio GIMBA – Universidad Industrial de Santander). En este ensayo se prepararon suspensiones diluidas de bentonita de 30 mg. en 30 ml. agua destilada. El pH de las suspensiones se ajusto con HCL 0,3M y NaOH 0,3M agitándose continuamente hasta estabilizar el pH de la solución.

2.2.3 Estudio de Sedimentación

Una vez establecidas las mejores condiciones de disgregación, porcentaje de sólidos de la pulpa, tipo de dispersante y pH, se realizó el tratamiento de desarenamiento por sedimentación, donde a un tiempo establecido se extrajo toda la solución sobrenadante a través de un sistema de sifón, se tomó el

cambio de color y textura en la interfase, que permite diferenciar el sedimento del sobrenadante, como referencia.

El ensayo de sedimentación se basa en el aprovechamiento del tamaño y densidad que caracteriza al cuarzo, el cual tendera a sedimentar primero que el resto de especies mineralógicas presentes en la bentonita ensayada. Se elaboró un cronograma de ensayos usando como variable el tiempo (20, 60 y 120 minutos), analizando en cada uno de ellos la altura de sedimento y su respectivo contenido de montmorillonita y cuarzo a partir de caracterización mineralógica por DRX.

2.2.4. Estudio de Separación Magnética en seco

Este estudio se realizo con la finalidad de separar la mayor cantidad posible de oxido de hierro, que según la caracterización química, reporto un 11,02 % de Fe_2O_3 . Para confirmar el posible carácter magnético de esta especie, se realizaron ensayos preliminares (ver Tabla 8) que además también permitieron establecer las mejores condiciones de operación del equipo (Laboratorio de Procesos de Minerales, Planta de Aceros – Universidad Industrial de Santander). Para esto se realizo una prueba bajo las siguientes condiciones:

Tabla 9. Condiciones de operación para Separación Magnética vía seca

<i>Tiempo de residencia (min)</i>	<i>Vibración (K Teslas)</i>	<i>Muestra (gr.)</i>
120	45	200
30	60	

Fuente: Autor

2.2.5. Estudio de Separación Magnética en Húmedo

Una vez se confirmo el carácter magnético del oxido de hierro en la muestra se realizo el proceso de separación magnética vía húmeda con el objetivo de extraer la mayor cantidad de esta especie de la muestra.

Se realizaron pruebas preliminares en el equipo de separación magnética de alta intensidad vía húmeda (laboratorio de procesos minerales, Planta de Aceros – Escuela de Ingeniería Metalúrgica, UIS) y se establecieron condiciones de operación y eficiencia del equipo analizando el balance de masa en cada recirculación. Para esto se realizó un ensayo preliminar de separación magnética vía húmeda con las siguientes condiciones:

Tabla 10. Condiciones de operación para separación magnética vía húmeda

<i>Porcentaje de sólidos en pulpa</i>	<i>Volumen de pulpa en el lecho</i>	<i>Flujo de pulpa [mL/s]</i>	<i>Voltaje aplicado [V]</i>	<i>Amperaje aplicado [A]</i>
20 %	200ml	3,5	5	0,6
			50	2,5
			80	4,3
			90	5

Fuente: Autor

2.3 Diseño y evaluación del sistema de beneficio

Con base en los resultados obtenidos se consideraron los procesos más efectivos en la refinación de la arcilla bentonítica y por consiguiente se diseñó un sistema de beneficio teniendo como criterio el incremento de montmorillonita de cada proceso. Se sometió una muestra original de bentonita a una circulación completa por el posible sistema de beneficio, posteriormente se realizaron las caracterizaciones mineralógica y química de la muestra de arcilla beneficiada con el objetivo de evaluar el incremento de montmorillonita en la muestra procesada.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Según la metodología descrita, a continuación se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de beneficio aplicados a la arcilla bentonítica.

3.1 CARACTERIZACION DEL MINERAL

3.1.1 Caracterización Química

En la tabla 10 se presentan los resultados del análisis químico obtenidos mediante fluorescencia de rayos X.

Tabla 11. Composición Química de la muestra inicial

<i>Composición Química</i>	<i>Porcentaje</i>
SiO₂	51,88
Al₂O₃	19,47
Fe₂O₃	11,07
MgO	3,09
CaO	2,23
SO₃	1,31
TiO₂	1,27
Na₂O	0,87
K₂O	0,38
MnO	0,21
V₂O₅	0,09
ZnO	0,01
SrO	0,01
ZrO₂	0,01

Fuente: Autor

Como se puede observar, existen altos contenidos de SiO₂ (51,88%) en el mineral, lo cual sugiere que se debe aplicar un proceso de separación gravimétrica con el fin de extraer la mayor cantidad de cuarzo y concentrar las especies arcillosas. El contenido de óxido de hierro es del 11,07%, que posiblemente presente carácter magnético, o este ligado a especies amorfas

con carácter no magnético. En este caso, es importante recordar que la composición química, por fluorescencia de Rayos X, no determina este porcentaje como óxido de hierro de hierro en su totalidad, sino como la cantidad de hierro existente en la muestra. Por lo tanto es necesario realizar ensayos preliminares para confirmar el carácter magnético de esta especie, ya que podría presentarse hematita, magnetita o como componente de otra especie en la muestra. El contenido de TiO_2 es del 1.27%, que desde el punto de vista de aplicación de un proceso de beneficio para eliminar esta impureza de la muestra no es una cantidad significativa, para cuya eliminación sería necesario involucrar procesos tales como flotación y lixiviación. Este último proceso, sin embargo, se trata de evitar debido a los efectos negativos que se pueden producir en especies arcillosas, y por lo tanto en las propiedades de la arcilla.¹⁶

3.1.2 Caracterización Mineralógica

En la Tabla 11 se presentan los resultados de la caracterización mineralógica llevada a cabo en la muestra de arcilla mediante Difracción de Rayos X. Se empleó un difractómetro y las mediciones se hicieron bajo las condiciones consignadas en el anexo n° 1.

¹⁶CARREÑO M, Jorge. GALVAN M, Diego. Propuesta de un sistema de beneficio por vía húmeda para la concentración de Illita y Caolinita en una arcilla de Santander. UIS. 2006.

Tabla 12. Especies mineralógicas presentes en la muestra original de bentonita

Composición Mineralógica		Nombre	Cuantitativo
Cristalinos	SiO ₂	Cuarzo	9,5%
	Na Al Si ₃ O ₈	Albita	16,7%
	(Mg, Fe, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Clinocloro	6,5%
	Ca ₂ (Mg, Fe) ₄ Al(Si ₇ Al) O ₂₂ (OH, F) ₂	Magnesioblenda	7,4%
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	Caolinita	14,7%
	(Na, Ca) _{0,3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) XH ₂ O	Montmorillonita	16,8%
Amorfos			34,9%

Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos, el mineral muestra montmorillonita, como la principal especie arcillosa presente en la muestra de arcilla.

El difractograma de la muestra original de bentonita, consignado en el anexo 4, muestra que para la bentónica sódica se encuentran 3 picos característicos comparados con el patrón de montmorillonita a $2\theta = 6.5^\circ$, 20° y 63° . También contiene picos característicos en $2\theta = 23^\circ$ y 26° , que de acuerdo al patrón indican la presencia de cuarzo. La cantidad de SiO₂ en la muestra (9,5%) indica la necesidad de implementar procesos de remoción de cuarzo, con objetivo de obtener un producto con altos porcentajes de fracción arcillosa. La albita esta presente en la muestra, 16,7% , este feldespato no es considerado como especie de interés al igual que la Caolinita, 14,7%, que debido a su baja Capacidad de Intercambio Cationico no aporta las propiedades que en contraste la montmorillonita concede a la bentonita.

Los altos porcentajes de amorfos (34,9%), pueden estar asociada, en parte a la ocurrencia de materia orgánica, y otras especies en la muestra, las cuales no son reconocidas en el análisis DRX porque no presentan ningún sistema de cristalización. También se puede presentar cierta cantidad de amorfos debido a

una posible reacción acida en el yacimiento generando sílice procedente de la capa tetraédrica.¹⁷

El 51,88% de SiO₂ encontrado en la caracterización química, contrasta con el 9,5% de cuarzo determinado por la caracterización mineralógica de la muestra de bentonita, esto indica que el resto se encuentra presente como componente de caolinita, magnesioblenda y albita principalmente. No se detectó hierro, que es expresado Fe₂O₃ en el análisis químico, como fase cristalina en el análisis mineralógico, posiblemente este se encuentre como parte de la estructura cristalina de los minerales arcillosos o como fracción amorfa.

Comparados con los porcentajes de las especies mineralógicas presentes en arcillas bentoníticas nacionales consignados en la Tabla 4, nuestra arcilla posee montmorillonita relativamente inferior a estas bentonitas, 16.8%, a pesar de esto la muestra una cantidad de cuarzo del 9.1%, indicando que mediante una separación aprovechando la granulometría de las especies arcillosas respecto al cuarzo permitirá una concentración de la montmorillonita.

3.1.3 Caracterización Fisicoquímica

Los resultados de los ensayos de caracterización físico química (ver Tabla 13) permitieron establecer condiciones necesarias para la implementación de ensayos, tales como en el estudio de dispersión donde el pH natural de la muestra original de bentonita sirve como criterio para seleccionar la dosis y el tipo de dispersante.

¹⁷ GARCIA, Emilia. SUAREZ, Mercedes. Arcillas: propiedades y usos. Madrid.

Tabla 13. Resultados Caracterización fisicoquímica muestra inicial

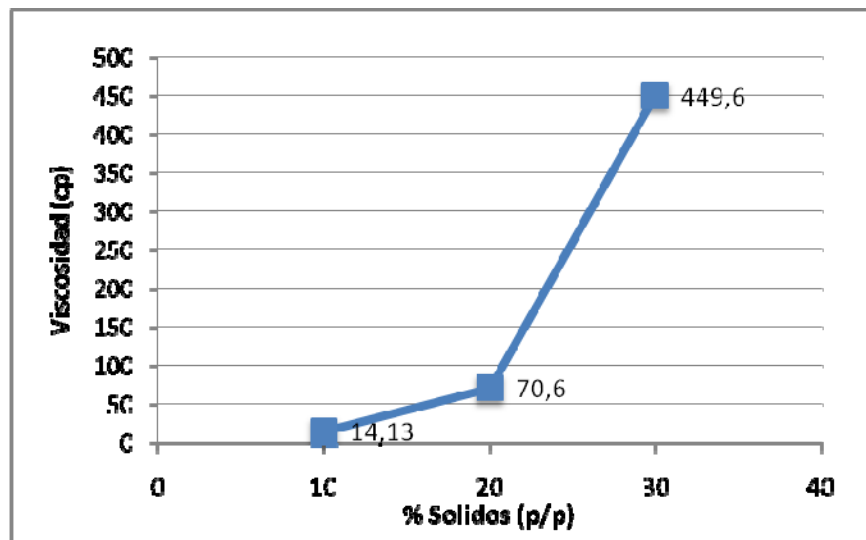
Parámetro	Valor
Humedad	8,92 %
Densidad Real	1,8 g/cm ³
pH	7.5
Perdidas por Calcinación	8.11 %

Fuente: Autor

- **Viscosidad**

Como se menciona antes, este ensayo permitió analizar el comportamiento de la pulpa del mineral durante los ensayos de beneficio vía por húmeda. Con este fin se prepararon 3 muestras al 10%, 20% y 30% en peso. En la figura 3 se observan los resultados de viscosidad de pulpa que se obtuvieron.

Figura 5: Viscosidad de la pulpa del mineral bentonítico a diferentes % de sólidos en pulpa



Fuente: Autor

Para los porcentajes en pulpa de 20 y 30 %, se observaron viscosidad adecuadas para su empleo en procesos vía húmeda, por encima de este valor resulta difícil el manejo debido a la resistencia, que estas presentan, a fluir y la

tendencia a sedimentar en el mineroducto. Además se tuvo en cuenta los rangos de trabajo con otras arcillas bentoníticas y caolines donde se encontró que las viscosidades también comprenden entre 20 y 40% de sólidos en pulpa.¹⁸

3.1.4 Caracterización metalúrgica

El mineral presentó un diámetro de partícula pasante de malla Tyler #200 (75 μm). Se realizó un análisis microgranulométrico de la muestra mediante el uso del fotosedimentador LUMOSSED, cuyos resultados se presentan en la Tabla 14.

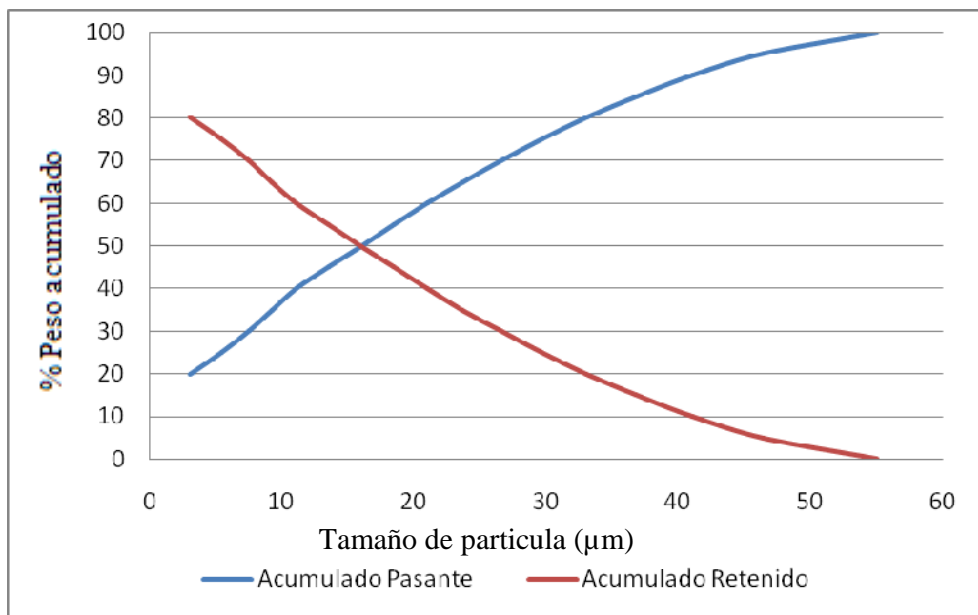
Tabla 14. Distribución granulométrica de la muestra inicial

Diámetro de Partícula (μm)	Acumulado Pasante (%)	Acumulado Retenido (%)	$F(x)$
55.0	100	0	1
46.5	95	5	0,91027067
41.1	90	10	0,84947052
36.8	85	15	0,79849403
33.1	80	20	0,75248972
29.7	75	25	0,70817486
26.6	70	30	0,66577979
23.7	65	35	0,62410257
21.0	60	40	0,58322979
18.5	55	45	0,54326667
16.0	50	50	0,50084586
13.6	45	55	0,45727629
11.1	40	60	0,40811049
9.2	35	65	0,36738217
7.5	30	70	0,32766587
5.4	25	75	0,27260725
3.1	20	80	0,19978342
-	0	100	

Fuente: Autor

¹⁸ MORA, Leidy. Propuesta de un proceso para la reducción de impurezas, presentes en los caolines de Oiba para la producción de cemento blanco. UIS. 2004.

Figura 6. Distribución granulométrica del mineral arcilloso natural



Fuente: Autor

De acuerdo con los resultados del ensayo de distribución microgranulométrica de la muestra de arcilla, el tamaño de las partículas oscila entre 3.1 – 56.0 µm. El D50 se sitúa para un diámetro de partícula de 18 µm aprox., para el propósito del proyecto indica que el 50% del material de la muestra de arcilla está por debajo de un tamaño de 18 µm, criterio importante para eventuales pruebas de separación granulométrica, ya que establece un tamaño de partícula para seleccionar la malla adecuada con el objetivo de separar la mayor cantidad de material grueso de la arcilla.

3.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO DE LA ARCILLA BENTONITICA

3.2.1 Estudio de separación por malla en húmedo

Gracias a los resultados de la caracterización metalúrgica, se confirma que la muestra proveniente de la mina ha sido tratada previamente, posiblemente un proceso de molienda, concediendo un tamaño de partícula muy fino. El ensayo

de separación por malla se aplicó con el objetivo de incrementar el contenido de fracción arcillosa del mineral. De acuerdo a los resultados de la microgranulométrica, esta separación se realizó mediante malla Tyler # 325. Después del ensayo, se procedió a caracterizar el mineral retenido en la malla, y los resultados del análisis mediante DRX se muestran en la Tabla 15.

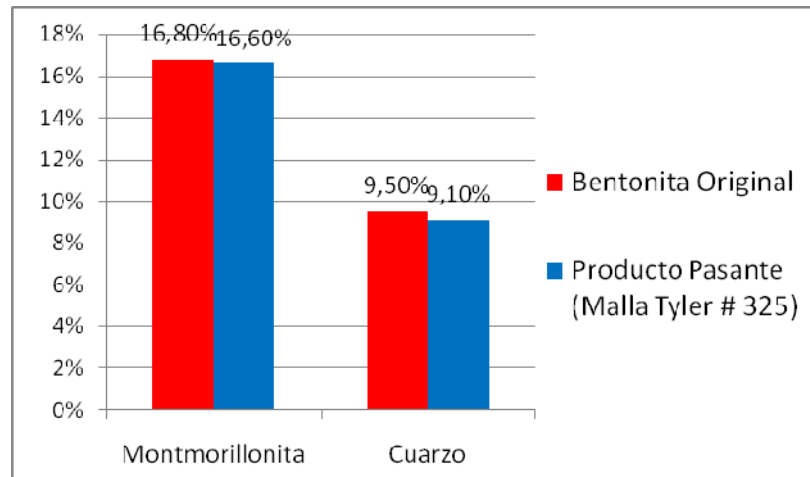
Tabla 15. Especies mineralógicas presentes en el producto pasante del ensayo de separación granulométrica por malla Tyler # 325.

<i>FASE Composición Mineralógica</i>		<i>Nombre</i>	<i>Cuantitativo</i>
Cristalinos	SiO ₂	Cuarzo	7,8%
	Na Al Si ₃ O ₈	Albita	15,1%
	(Mg, Fe, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Clinocloro	5,2%
	Ca ₂ (Mg, Fe) ₄ Al(Si ₇ Al) O ₂₂ (OH, F) ₂	Magnesioblenda	4,5%
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	Caolinita	15,6%
	(Na, Ca) _{0,3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) XH ₂ O	Montmorillonita	16,5%
Amorfos			30,6%

Fuente: Autor

El contenido de las fracciones arcillosas, montmorillonita y caolinita, dentro de la muestra proveniente del pasante del cribado cambiaron en cantidad. Para la montmorillonita, disminuye en un porcentaje de inferior al 1% respecto a la muestra original. Mientras, la caolinita aumenta alrededor de un 1%. El contenido de cuarzo varió en una cantidad de alrededor del 2%, es decir la especie arcillosa no logra concentrarse en un solo producto, tanto en el pasante como en el retenido habrá un porcentaje de montmorillonita similar, posiblemente por que esta especie se encuentra dispersa dentro de otras partículas de mayor tamaño pertenecientes a otras especies mineralógicas.

Figura 7. Influencia de la separación por malla sobre la bentonita



Fuente: Autor

En el ensayo de separación granulométrica por malla a partir de un alimento de arcilla bentonítica natural se obtuvieron dos productos: Pasante que corresponde al 81% de la muestra original, cuya concentración de montmorillonita es del 16,5 % y 7,8 % de cuarzo, por balance de masa se calcula que el mineral retenido, 19% de la alimentación contiene un 17,7 % de montmorillonita, además de un 7,3 % de cuarzo.

Es interesante observar que la cantidad de montmorillonita en el retenido, puede deberse a que partículas que contienen esta fracción arcillosa estén aun adheridas a partículas gruesas que no permiten sobrepasar la malla Tyler # 325 cuya abertura es 45 μm . En el retenido, 19% del alimento, se observó un incremento leve de montmorillonita, inferior al 1%, respecto a la bentonita natural, esto sumado a que tanto en el retenido como en el pasante existe un porcentaje similar de montmorillonita presente en las muestras, se considero estudiar otros procesos que posiblemente permitan una concentración y una recuperación mas alta del mineral.

3.2.2 Desarenamiento por Sedimentación

Para establecer las mejores condiciones para la separación gravimétrica del mineral bentonítico se evaluó la necesidad de implementar un dispersante sobre la muestra de bentonita que permita mejorar la dispersión de las partículas de la muestra en agua destilada. Se encontró que bajo las condiciones en la celda de atricción con tiempos de agitación entre 10 y 15 minutos con velocidades de agitación entre 1500 y 2500 rpm, la interacción aspa-partícula y partícula-partícula alcanzó un alto valor permitiendo la mayor disgregación de las partículas que componen la arcilla; después de este tiempo esta disgregación es relativamente constante.¹⁹

Bajo estas condiciones de celda se realizaron ensayos obteniendo que la muestra de bentonita en solución acuosa se aglomeró y se adhirió al recipiente, esto conllevó a concluir la necesidad de utilizar dispersante. Se seleccionó, con base en los estudios de CARREÑO y MACIAS, los dispersantes: Silicato de Sodio y Pirofosfato de Sodio. Estos dos son comunes por su economía y su eficiencia como dispersante en arcillas. Para establecer un criterio de selección adecuado se realizaron pruebas simultáneas en similares condiciones donde se examinó el dispersante de mejor comportamiento respecto al proceso de sedimentación de la fracción arcillosa. A continuación se explica el procedimiento aplicado establecer las condiciones en el ensayo de sedimentación.

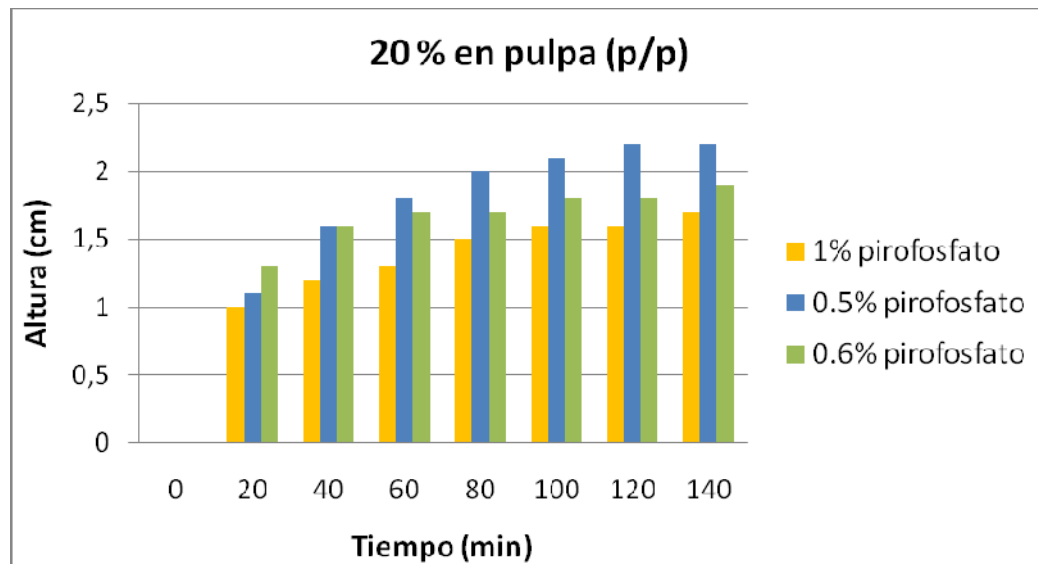
3.2.2.1 Dispersión de la arcilla bentonítica

De acuerdo con la caracterización mineralógica, sería posible la separación de las partículas partiendo de la diferencia de densidad y de su tamaño. En la muestra de arcilla original, tanto el cuarzo como la caolinita presentan mayores valores, tanto en densidad como en tamaño que la montmorillonita.

¹⁹ MORA ROMERO, Leidy. Propuesta de un proceso para la reducción de impurezas, presentes en los caolines de Oiba para la producción de cemento blanco. UIS. 2004.

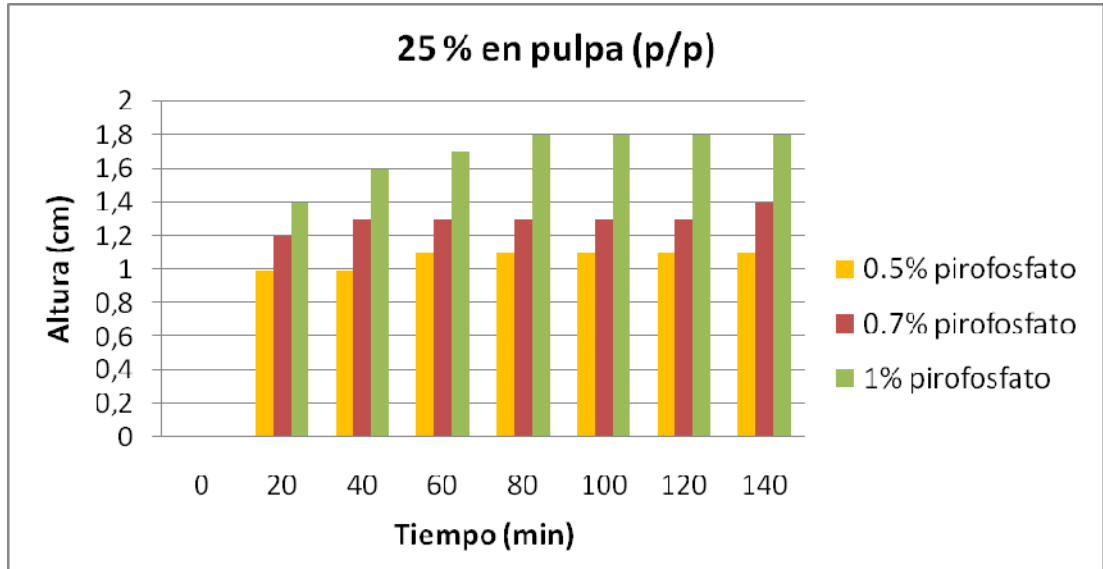
Con base en esto, se realizaron ensayos de sedimentación donde se tomaron como variables el tiempo de sedimentación, tipo de dispersante, dosis de dispersante y porcentaje de sólidos en pulpa (ver tabla 8). Se tomo como variable respuesta la altura de sedimento, ya que el cuarzo, y en menor medida la caolinita, tenderán a sedimentar primero que la montmorillonita, que posiblemente estará suspendida en la solución como sobrenadante a determinado tiempo. Por esto, se analiza cuales de estos ensayos presentan alturas de sedimento mayor para posteriormente establecer mediante el análisis del potencial Zeta, bajo que condiciones de pH se presenta la mejor disgregación de las partículas de arcilla. Los mejores resultados de acuerdo a la altura de sedimento respecto al tiempo se presentan a continuación:

Figura 8. Altura de sedimento vs Tiempo para un 20% de sólidos en pulpa con Pirofosfato de Sodio como dispersante



Fuente: Autor

Figura 9. Altura de sedimento vs Tiempo para un 25% de sólidos en pulpa con Pirofosfato de Sodio como dispersante

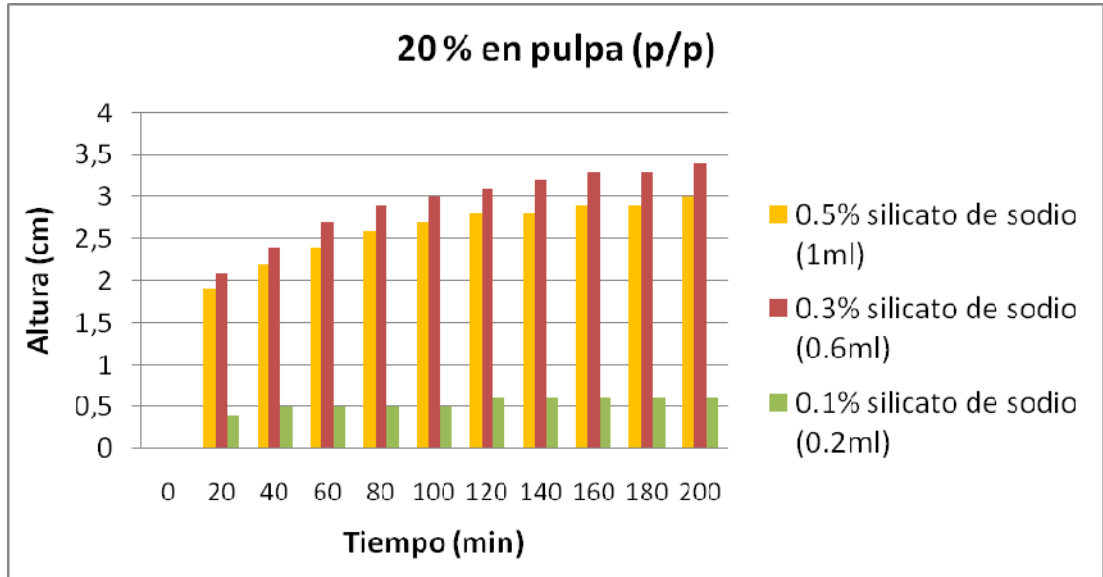


Fuente: Autor

En la fig. 8 se observa que para un tiempo de 140 minutos, para tres dosis de Pirofosfato de Sodio se obtienen alturas de sedimento con un incremento a través del tiempo similar, pero se destaca la altura alcanzada (2,2 cm) utilizando un 0,5% de dispersante.

En la fig. 9 se muestra el incremento de altura de sedimento con tres dosis de Pirofosfato de Sodio sobre la muestra de bentonita, destacándose la altura alcanzada (1,8 cm) utilizando un 1% de dispersante.

Figura 10. Altura de sedimento vs Tiempo para un 20% de sólidos en pulpa con Silicato de sodio como dispersante



Fuente: Autor

Para el ensayar el Silicato de sodio como dispersante, (ver figura 10) se tomo 200 min. de tiempo de sedimentación donde se obtuvieron alturas superiores a las alturas presentadas usando Pirofosfato de sodio. Para comparar correctamente, a los 140 minutos con un 0,3% de Silicato de Sodio en la muestra se obtiene una altura de 3,2 cm, que sobrepasa notablemente las alturas alcanzadas por cualquier ensayo usando como dispersante Pirofosfato.

Para un porcentaje de sólidos del 30% en la pulpa, se realizaron 4 ensayos: 0.5% ,0.8%, 1.0% y 1.5% de Pirofosfato de sodio como dispersante, en los cuales ninguno presento alturas para considerarlas dentro del estudio. Además debido a sus mínimas alturas de sedimento respecto al ensayo anterior, para un tiempo de 140 minutos, no se consideran dentro de las condiciones deseadas para un posterior análisis debido a que además de la baja disgregación de partículas alcanzada se presentaron formación de floculos.

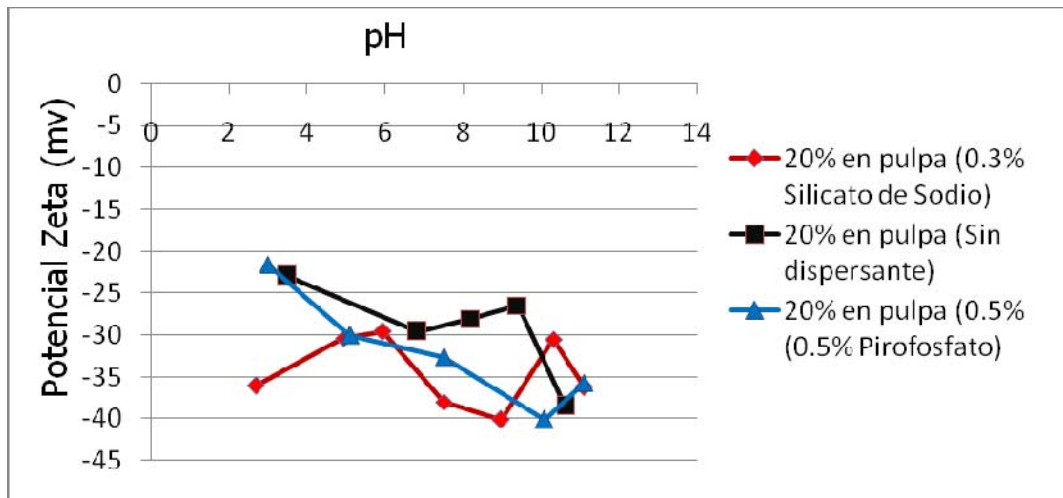
De acuerdo con los resultados registrados se puede observar que las mejores condiciones de sedimentación se obtuvieron en las figuras 8 y 10, para un porcentaje de sólidos en pulpa 20% con 0,5% de pirofosfato de sodio y 0,3% silicato de sodio, respectivamente.

3.2.2.2 Valores de potencial zeta en función de la dosificación del dispersante

Las mejores condiciones en porcentaje en pulpa (20%), tipo de dispersante y dosificación (silicato de sodio 0,3%, pirofosfato de sodio 0,5%) fueron evaluadas mediante el criterio de potencial Zeta, que consiste en observar el grado repelencia entre partículas bajo las determinadas condiciones de pH. Esto se cuantifica mediante los valores de potencial característica para cada tipo de arcilla a determinado valor de pH. Para el rango <-30 mv, se presenta la región de estabilidad, donde la fase dispersa de mayor densidad tendera a sedimentar primero que las otras, por la acción de gravedad. El objetivo es encontrar los valores mínimos en el rango de estabilidad, expresados en mili voltios, para cada porcentaje en pulpa variando el pH; esto indica que en ese punto las partículas tienen mayor tendencia a disgregarse, evitando la floculación.

De acuerdo con los resultados presentados en figura 11, los valores de potencial zeta son negativos para las tres soluciones con una tendencia ligera a disminuir hasta un pH de 8 aproximadamente donde tienden a incrementar. En base al pH natural de la arcilla: 7,5, se determina que la muestra de arcilla dispersada con pirofosfato de sodio presento un valor de -33,1 mv a este pH, en contraste la muestra arcilla dispersa con silicato de sodio muestra un potencial zeta de -38,2 mv, siendo esta ultima como la que mejor condición de disgregación presento. Debido a que los mínimos valores de potencial zeta alcanzados están cercanos al pH natural de la arcilla, se decidió implementar éste como el pH de ensayo para el proceso de sedimentación.

Figura 11. Influencia del pH sobre la arcilla



Fuente: Autor

3.2.3 Ensayos de sedimentación

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de viscosidad de la muestra y en el estudio de disgregación se determinó que 0,3% de Silicato de Sodio en 20% de sólidos en pulpa ofrecía mejores propiedades de dispersión para la muestra original de bentonita.

Una vez se establecieron las anteriores condiciones se realizó la separación gravimétrica por sedimentación. Se realizaron tres ensayos a 20, 60 y 120 minutos para establecer a partir de que tiempo se obtenía un producto sobrenadante con mayor concentración de montmorillonita. Los resultados de caracterización se exponen a continuación:

Tabla 16. Especies mineralógicas presentes en el producto sobrenadante del ensayo de sedimentación gravimétrica en un tiempo de 20 minutos.

Composición Mineralógica		Nombre	Cuantitativo
Cristalinos	SiO ₂	Cuarzo	4,4 %
	Na Al Si ₃ O ₈	Albita	18,4 %

	$\text{Ca}_2 (\text{Mg}, \text{Fe})_4 \text{Al}(\text{Si}_7 \text{Al}) \text{O}_{22} (\text{OH}, \text{F})_2$	Magnesioblenda	3,5 %
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2\text{O}_5) (\text{OH})_4$	Caolinita	14,9 %
	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3} (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH}) \text{XH}_2\text{O}$	Montmorillonita	21,9 %
Amorfos			35,1 %

Fuente: Autor

Con base en los resultados del DRX correspondientes al producto sobrenadante para un tiempo de sedimentación de 20 minutos se muestra un incremento de 6% aproximadamente en el contenido de montmorillonita en la muestra procesada con respecto a la muestra original de bentonita. Esto se puede explicar con la disminución del contenido de cuarzo, que por ser una partícula de mayor tamaño y peso respecto a la montmorillonita se sedimentó primero que la fracción arcillosa. También se nota un incremento en el contenido de albita en el producto sobrenadante, posiblemente debido a que permaneció suspendida junto a la montmorillonita.

Tabla 17. Especies mineralógicas presentes en el producto sobrenadante del ensayo de sedimentación gravimétrica en un tiempo de 60 minutos.

<i>Composición Mineralógica</i>		<i>Nombre</i>	<i>Cuantitativo</i>
Cristalinos	SiO_2	Cuarzo	3,0 %
	$\text{Na Al Si}_3 \text{O}_8$	Albita	18,3 %
	$\text{Ca}_2 (\text{Mg}, \text{Fe})_4 \text{Al}(\text{Si}_7 \text{Al}) \text{O}_{22} (\text{OH}, \text{F})_2$	Magnesioblenda	2,2 %
	$\text{Al}_2 (\text{Si}_2\text{O}_5) (\text{OH})_4$	Caolinita	12,8 %
	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0,3} (\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH}) \text{XH}_2\text{O}$	Montmorillonita	19,8 %
Amorfos			39,9 %

Fuente: Autor

Como se muestra en la Tabla 17, en el producto sobrenadante para un tiempo de sedimentación de 60 minutos de sedimentación, se tiene un incremento del 3% aprox. en el contenido de montmorillonita en la muestra, y el cuarzo

alcanza una disminución de 6% aproximadamente. Es un contraste interesante, donde se nota que también la fracción arcillosa empieza a sedimentar luego de los 20 minutos, donde alcanza un máximo, esto se confirma en la disminución de contenido de montmorillonita desde un 21%, muestra original de bentonita, hasta un 19% en un tiempo de 60 minutos de sedimentación. Se nota un descenso del 2% en el contenido de caolinita en la muestra, esto indica que esta especie se sedimenta a partir de los 20 minutos.

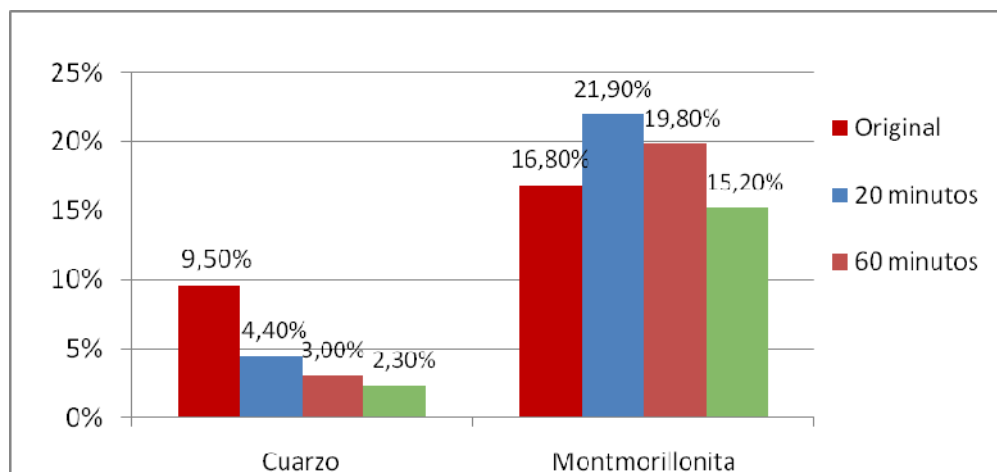
Tabla 18. Especies mineralógicas presentes en el producto sobrenadante del ensayo de sedimentación gravimétrica en un tiempo de 120 minutos.

<i>Composición Mineralógica</i>		<i>Nombre</i>	<i>Cuantitativo</i>
Cristalinos	SiO ₂	Cuarzo	2,3 %
	Na Al Si ₃ O ₈	Albita	16,3 %
	(Mg, Fe, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Clinocloro	1,1 %
	Ca ₂ (Mg, Fe) ₄ Al(Si ₇ Al) O ₂₂ (OH, F) ₂	Magnesioblenda	2,2 %
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	Caolinita	9,9 %
	(Na, Ca) _{0,3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) XH ₂ O	Montmorillonita	15,2 %
Amorfos			49,2 %

Fuente: Autor

Para un tiempo de 120 minutos, es posible notar que el contenido de cuarzo en la muestra alcanza un mínimo de casi 2%, pero a su vez el contenido de montmorillonita también presenta un descenso que alcanza hasta un 15% aproximadamente. Se observa que la caolinita pierde un 5% respecto a la cantidad de muestra respecto a la bentonita original. Esto indica que después de 20 minutos, empieza a suceder la precipitación también de fracciones arcillosas.

Figura 12 .Influencia del tiempo de sedimentación sobre la bentonita



Fuente: Autor

Con base en los resultados del estudio de separación gravimétrica por sedimentación se determina que la bentonita original sometida a sedimentación en un tiempo de 20 minutos se obtiene un producto sobrenadante en solución acuosa que después del proceso de filtración y secado se obtiene un producto que corresponde al 66.2 % del alimento, que contiene un 21,9% de montmorillonita; el producto sedimentado no representa interés práctico ya que corresponde al 33.7% del alimento con un contenido de montmorillonita del 6,4%. Según los resultados, se logró la disgregación de muestra bentonítica en la alimentación, y esto permitió la separación del material grueso que corresponde a cuarzo en su gran mayoría. El contenido de montmorillonita en el producto sobrenadante indica la concentración de esta especie en el producto sobrenadante.

3.2.4 Separación Magnética en seco

En este ensayo de separación magnética en seco se establecieron las siguientes condiciones para el equipo, con base en el estudio preliminar y según condiciones normales de trabajo para el equipo.

Tabla 19. Resultados: Ensayo de separación magnética en seco

Tiempo de residencia [min]	Producto Magnético	Producto No Magnético
150	12,1%	87,9%

Fuente: Autor

Para este ensayo se estableció que un tiempo de residencia de 150 minutos era apropiado, teniendo en cuenta que un menor tiempo, es decir un valor de vibración mayor, aumenta la velocidad del recorrido de la muestra desde el silo de alimentación hasta el contacto con el tambor, y se produce un arrastre de material magnético junto con el no magnético, como consecuencia de esto se impide la adherencia del producto magnético al magneto. El material recuperado como producto no magnético de la muestra corresponde en total a un 87,9 %, estos resultados indicaron la presencia de hierro magnético. A pesar de la lentitud del proceso, este ensayo arrojó excelentes resultados. Como muestra la Tabla 21, el contenido de montmorillonita en el material no magnético es de 20,6 %, lo cual indica un incremento de aproximadamente 5% de esta especie mineralógica respecto a la muestra original de bentonita. Considerando las características de este proceso vía seca se deduce que es una buena alternativa para concentrar montmorillonita en los procesos de beneficio estudiados.

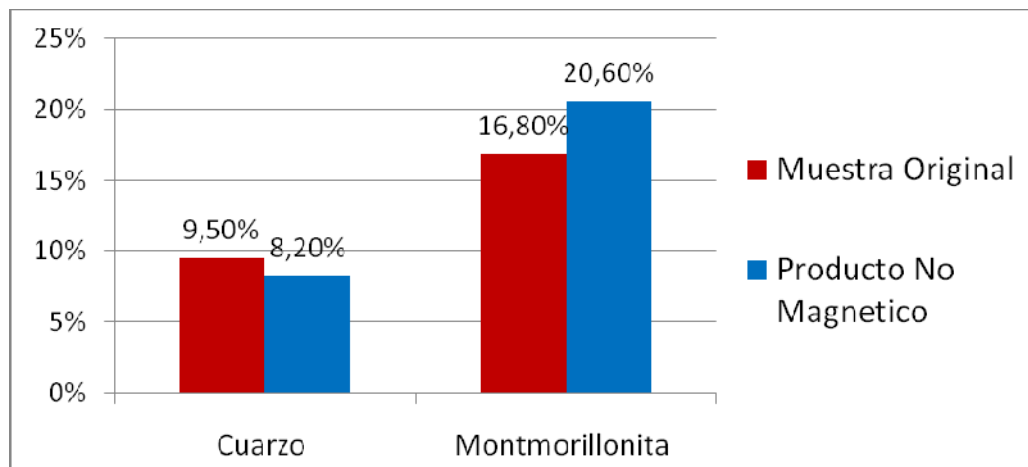
Tabla 20. Especies mineralógicas presentes en el producto No Magnético del ensayo de Separación magnética en seco

Composición Mineralógica		Nombre	Cuantitativo
Cristalinos	SiO ₂	Cuarzo	8,2 %
	Na Al Si ₃ O ₈	Albita	10,4 %
	Ca ₂ (Mg, Fe) ₄ Al(Si ₇ Al) O ₂₂ (OH, F) ₂	Magnesioblenda	7,4 %
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	Caolinita	12,5 %
	(Na, Ca) _{0,3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) XH ₂ O	Montmorillonita	20,6 %

Amorfos	34,0 %
----------------	---------------

Fuente: Autor

Figura 13. Efecto de la separación magnética vía seca sobre el contenido de bentonita



Fuente: Autor

Mediante el empleo de separación magnética en seco, como se menciona antes se logró un incremento en el porcentaje de montmorillonita presente del 4% aproximadamente con respecto a la muestra original de bentonita.

3.2.5 Separación Magnética en Húmedo

Continuando con la metodología establecida, se determinaron las siguientes condiciones (ver Tabla 21), para el ensayo de separación magnética en húmedo, con base en ensayos preliminares que mostraron que se aumentaba la eficiencia en el proceso de separación realizando 5 recirculaciones del alimento.

Tabla 21. Resultados: ensayo preliminar de separación magnética en húmedo

<i>Muestra [gr.]</i>	<i>Sólidos en pulpa</i>	<i>Potencia [W]</i>	<i>Corriente [Amp]</i>	<i>Producto magnético</i>
200	20 %	5	0,6	0,03 %
		50	2,5	0,36 %
		80	4,3	0,60 %
		90	4,5	0,67 %

Fuente: Autor

Con el fin de mejorar la eficiencia del proceso se realizó recirculación del producto no magnético 5 veces, lo cual permitió un aumento en la recolección del producto magnético por parte del magneto, esto es posible porque el material al estar como suspensión en solución acuosa tiende a superar las fuerzas de atracción por la turbulencia del fluido, es decir que a pesar del carácter magnético que presente, la especie tiende a escapar del campo magnético establecido en la celda.

Tabla 22. Resultados: ensayo de separación magnética en húmedo

<i>Potencia [V]</i>	<i>Amperaje [Amp]</i>	<i>Circulación</i>	<i>Producto magnético</i>	<i>Producto No magnético</i>
90	5	1	3,5 %	96,5%
		2	1,1 %	98,9%
		3	1,0 %	99,0 %
		4	0,5 %	99,5%
		5	0,3 %	99,7%

Fuente: Autor

Se obtuvo un total de producto magnético correspondiente al 6,9% del alimento, la caracterización del producto no magnético mostró una pérdida leve de la fracción arcillosa, presuntamente debido a la formación de aglomerados con carácter magnético que atrapan montmorillonita dentro del producto

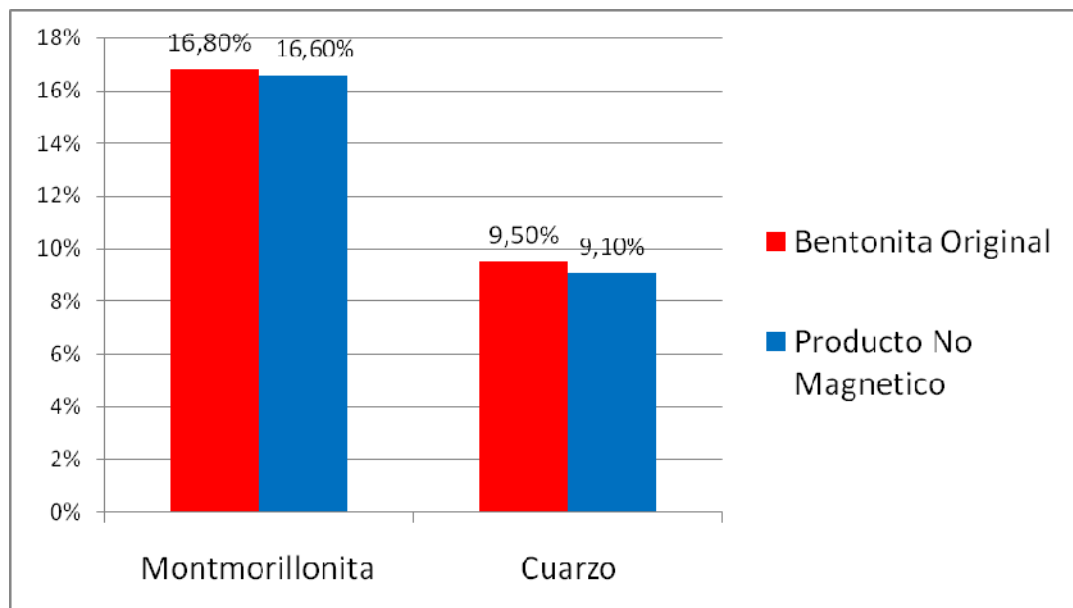
atraído. Esto sugiere que en el material magnético además de óxido de hierro también están presentes especies arcillosas y sílice.

Tabla 23. Especies mineralógicas presentes en el producto No magnético del ensayo de separación magnética en húmedo

Composición Mineralógica		Nombre	Cuantitativo
Cristalinos	SiO ₂	Cuarzo	9,1 %
	Na Al Si ₃ O ₈	Albita	4,0 %
	(Mg, Fe, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Clinocloro	5,3 %
	Ca ₂ (Mg, Fe) ₄ Al(Si ₇ Al) O ₂₂ (OH, F) ₂	Magnesioblenda	2,8 %
	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄	Caolinita	9,7 %
	(Na, Ca) _{0,3} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) XH ₂ O	Montmorillonita	16,6 %
Amorfos			46,9 %

Fuente: Autor

Tabla 14. Efecto de la Separación magnética vía húmeda sobre la bentonita



Fuente: Autor

A partir de los resultados de la caracterización mineralógica, se encontró que la especie con mayor interés, montmorillonita, pierde una cantidad inferior al 1 % , siendo el objetivo del ensayo concentrar esta fracción arcillosa y además teniendo en cuenta la preparación de la muestra para este ensayo, implica una posterior etapa de filtrado y secado, se determina que el producto no ofrece las un producto con las características buscadas, tales como las obtenidas en la separación magnética en seco.

4. PROPUESTA DEL SISTEMA DE BENEFICIO

Con base en los resultados de la etapa de experimentación se establecieron los criterios para la propuesta del sistema de beneficio. Para la correcta evaluación y selección de un sistema de beneficio de la arcilla bentonítica proveniente de Lérida – Tolima, se realizaron pruebas independientes a partir de la muestra original, con objetivo de obtener información acerca del nivel de concentración de fracción arcillosa del producto de cada etapa, y de esta manera diseñar un proceso que involucrara las etapas con mejores resultados.

Seguidamente, se analizó y calculó la razón de concentración, así como el porcentaje de recuperación general, que son indicativos de la posible efectividad del proceso diseñado.

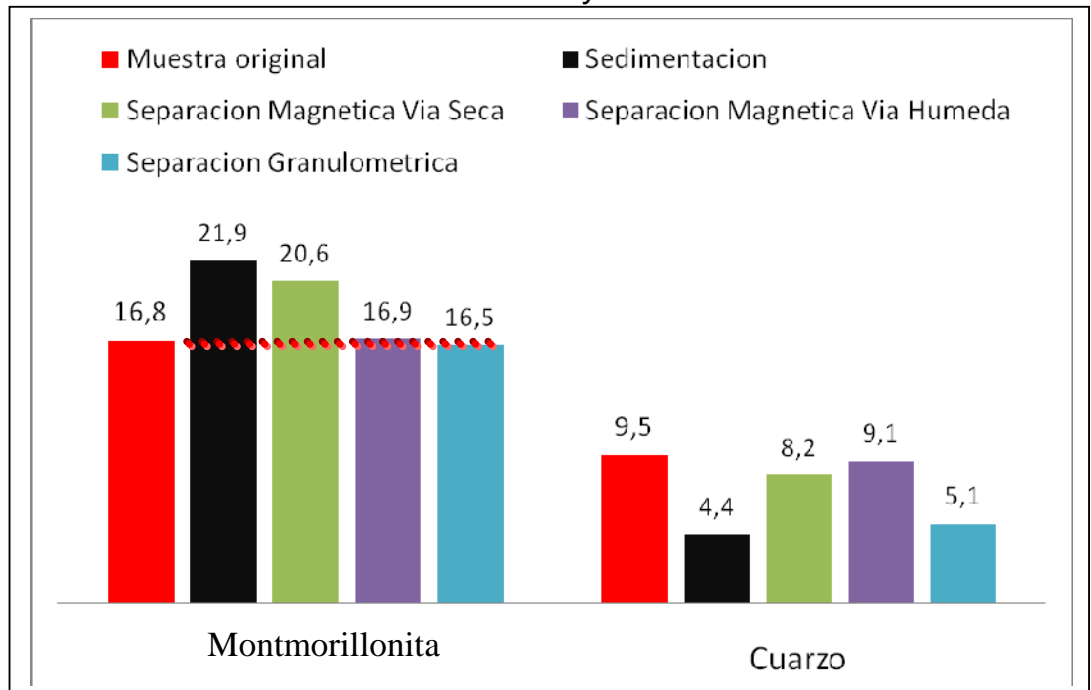
4.1 Consideraciones básicas para proponer el sistema de beneficio

A partir de los ensayos realizados y de sus respectivos resultados individuales, se estableció el diseño de un posible sistema de beneficio para este mineral en particular, teniendo en cuenta dos criterios principales de selección: el balance de masa y la composición mineralógica de los productos cada tipo de ensayo.

En la figura 15, se observa un grafica comparativa respecto al efecto de los procesos implementados sobre los valores de las especies mineralógicas: cuarzo y montmorillonita. Se obtienen los mejores resultados en eliminación de

cuarzo y por consiguiente incremento de montmorillonita presentes en la muestra en los ensayos de sedimentación y separación magnética en seco.

Figura 15. Efecto de cada proceso implementado sobre la fracción de montmorillonita y el cuarzo



La composición mineralógica determino la concentración de las especie arcillosa de interés: montmorillonita, de acuerdo al incremento en las muestras producto de cada etapa, se establecieron cuales ensayos eran viables para considerarlos parte de un posible sistema de beneficio. Fue importante el rol que desempeño la gran cantidad de especies amorfas dentro de la muestra, este oscilo en un rango entre 30 y 40 % dentro de la bentonita para todas las muestras durante el proceso, parte de esta cantidad se puede explicar por la materia orgánica presente en la muestra.

El balance de masa permitió establecer cuantitativamente la cantidad de material beneficiado y recuperado, a partir de la relación entre alimentación, producto concentrado y colas en los procesos. En la tabla 24 se presentan los

índices metalúrgicos razón de concentración y porcentaje de recuperación para cada proceso implementado, a partir de las ecuaciones expuestas a continuación:

<ul style="list-style-type: none"> • Razón de concentración: $R_c = \frac{F}{C}$ <ul style="list-style-type: none"> • Índice global de concentración: $IC = \left(\frac{R_m}{R_c} \right) \times \left(\frac{c}{t} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de Recuperación $R_m = \left(\frac{C_c}{F_f} \right) \times 100$ <p>Donde :</p> <p>F: Peso de Alimentación</p> <p>C: Peso de Concentrado</p> <p>f: % de Montmorillonita en Alimentación</p> <p>c: % de Montmorillonita en Concentrado</p> <p>t: % de Montmorillonita en Colas</p>
---	---

Tabla 24. Índices metalúrgicos de cada proceso estudiado

Proceso	Razón de concentración	Porcentaje de recuperación	Índice Global de concentración
Separación granulométrica	1,2	79,6 %	65,16
Desarenamiento por sedimentación	1,5	85,9 %	179,4
Separación magnética en seco	1,1	93,1 %	348,6
Separación magnético en húmedo	1,1	90,9 %	68,5

Fuente: Autor

La razón de concentración indica las unidades de alimentación requeridas para obtener una unidad de concentrado. Se puede observar que el ensayo que mayor cantidad de alimentación requiere es el desarenamiento por sedimentación ya que pierde en un 50% del material inicial en colas o relaves, en contraste, es el que mayor incremento de montmorillonita reporta. A su vez, la separación magnética presenta un pérdida de solamente el 10% de alimentación. El porcentaje de recuperación indica la cantidad de la especie concentrada, montmorillonita, que es recuperada luego del proceso implementado respecto a la cantidad en la alimentación. Se observa un 93% de recuperación de montmorillonita en el proceso de separación magnética en seco, revelando que solo el 7% de esta fracción arcillosa se pierde en el producto no magnético. En contraste se observa un 79,6% de recuperación en la separación por malla, es decir que en el retenido de la muestra se conserva un 20% aproximadamente de contenido de montmorillonita, indicando una gran pérdida de material de interés. El índice global de concentración es utilizado para comparar diferentes sistemas de beneficio, a medida que aumente el valor presentara mejores condiciones de concentración, se determinó que los mayores valores de este índice se observan para los ensayos de separación magnética en seco y desarenamiento por sedimentación.

El proceso de desarenamiento por sedimentación arrojó los mejores resultados de remoción de cuarzo, produciendo un aumento en el contenido de la fracción arcillosa, montmorillonita. En este orden, se determinó que el mejor agente dispersante es el Silicato de Sodio, que permite eliminar mayor cantidad de SiO_2 presente en la muestra. Gracias a los buenos resultados en la remoción de material magnético por separación magnética en seco, considerándose dentro de sistema de beneficio como la adecuada para remover esta especie.

En el ensayo de separación magnética en húmedo, el incremento de la cantidad de la montmorillonita presente en el producto, respecto a la muestra original de bentonita, fue mínimo (inferior al 1%), además este proceso es vía

húmeda que implica un posterior secado. Respecto a la separación granulométrica, al igual que en el caso anterior, no produjo incremento notables, comparados con ensayos como el desarenamiento por sedimentación, de la montmorillonita por lo tanto estas dos etapas no estuvieron incluidas dentro del sistema de beneficio.

4.2 Definición de las condiciones del sistema de beneficio propuesto

Con base en el criterio de análisis de los resultados de cada etapa se elaboro el siguiente conjunto de procesos para concentrar la mayor cantidad de montmorillonita de la arcilla bentonitica estudiada. Es importante aclarar que los ensayos de beneficio realizados corresponden a pruebas a nivel de laboratorio solamente, de acuerdo con esto se obtuvo la información necesaria para establecer cual secuencia de operaciones son necesarias para lograr el aumento de la cantidad de montmorillonita en el material beneficiado. El sistema esta integrado por los circuitos de beneficio y recuperación que comprenden las etapas en este orden:

- Trituración
- Disgregación/dispersión
- Desarenamiento por Sedimentación
- Filtrado
- Secado
- Separación Magnética en Seco

4.2.1 Molienda:

Aunque la muestra de arcilla bentonitica obtenida presento un tamaño de partícula inferior a 75 μm , es decir fue tratada previamente, se sugiere realizar el tratamiento de molienda. El circuito de beneficio requiere un tratamiento previo que disponga el mineral para la etapa de dispersion, es decir, reducir el tamaño mediante un proceso de molienda / clasificacion. Basados en las

condiciones del mineral ensayados en los procesos de beneficio implementados, el producto de este proceso deberá ser pasante de malla 200# es decir presentara un tamaño inferior a 75 μm .

4.2.2 Dispersión

Partiendo del mínimo tamaño de partícula del producto, 75 μm , se somete a la etapa de dispersión/disgregación. Este proceso involucra tanques de atricción, que permitan el manejo de una alta producción, contando con una banda transportadora para introducir el mineral seco en el recipiente y dispositivos que agreguen los aditivos requeridos: agua hasta alcanzar un 20% de sólidos en pulpa, Silicato de Sodio (0,3%) que actúa como dispersante.

4.2.3 Sedimentación

Partiendo de la solución con 20% de sólidos obtenida del proceso anterior se efectúa la etapa de desarenamiento por sedimentación. Para este proceso se sugiere la implementación de un espesador, debido a que los volúmenes procesados a nivel industrial requieren un recipiente de estas características, esto se basa en procesos de desarenamiento por sedimentación efectuados en plantas de concentración de caolines. Este espesador constara de un descargue a una altura apenas superior a la zona de interface entre suspendidos y sedimentos, de esta manera se extraerá el material sobrenadante que contienen las fracciones arcillosas. El tiempo de residencia es de 20 minutos de acuerdo a los resultados obtenidos en este proceso donde se determino que a este tiempo la montmorillonita alcanzaba el mayor incremento en la bentonita procesada.

4.2.4 Filtración

Esta etapa contara con filtros que mediante presión permitirán extraer la mayor cantidad de humedad presente en la muestra. El alimento ingresara con un contenido de aproximadamente el 10% de sólidos en solución acuosa, el objetivo es obtener una torta con contenido de humedad inferior al 20 %.

4.2.5 Secado

Al material proveniente del filtrado se someterá a un secado en estufa hasta obtener una muestra con contenido de humedad inferior al 15%. La temperatura máxima aplicada en esta etapa es de 105°C, con objetivo de no afectar con tratamiento térmico ninguna de las especies contenidas en la arcilla.

4.2.6 Separación Magnética

Para este ensayo vía seca, se requiere de banda transportadora que permita controlar el contenido de alimento que ingresa al tambor. La alimentación y la potencia se deben establecer mediante ensayos preliminares ya que la eficiencia es propia de cada equipo.

Respecto a las condiciones de operación, para aplicación industrial, sería necesario establecer una relación de cantidad de muestra procesada, consumo energético y transporte de la arcilla. A continuación se registran las condiciones de operación fijadas para el circuito de beneficio propuesto:

Tabla 25: Condiciones generales de operación

DISGREGACION/DISPERSION	
PARAMETRO	
Dispersante	Silicato de Sodio
Dosificación de Dispersante	0.3% (v/p)
Porcentaje de sólidos en pulpa	20% (p/p)
SEDIMENTACION	
PARAMETRO	
Tiempo de Sedimentación	20 minutos
pH de sedimentación	7,5
Porcentaje de sólidos en pulpa	Alimentación: 20% (p/p) Salida: 15% aprox. (p/p)
SECADO	
PARAMETRO	
Temperatura	<105°C
SEPARACION MAGNETICA EN SECO	
PARAMETRO	
Tiempo de Residencia	150 minutos
Vibración	45 Kteslas

Fuente: Autor

4.3 Ensayo del sistema de beneficio

El diagrama general del proceso (ver figura 16) se realizo con objetivo de determinar el balance de masa general y la caracterización de la muestra refinada.

4.3.1 Caracterización Final: Bentonita beneficiada

4.3.1.1 Caracterización Química

De acuerdo a la composición química de la bentonita beneficiada (ver Tabla 26) se observa una eliminación cercana al 7 % en el contenido de SiO_2 respecto a la muestra original de bentonita, esto confirma los buenos resultados obtenidos en el proceso de Desarenamiento por sedimentación donde además de cuarzo, se disminuye la cantidad de albita y caolinita, que contienen Si como componente, esta relación debido a que se expresa como SiO_2 en el análisis químico. También es importante resaltar el incremento en alrededor del 6% de Al_2O_3 en la muestra de bentonita beneficiada, esto se relaciona directamente con el aumento de la cantidad de montmorillonita en el mineral. Se obtuvieron buenos resultados en la separación magnetica en seco, específicamente para la remoción de hierro. Los análisis por DRX del mineral original no evidenciaron la presencia de alguna especie de hierro magnetica debido seguramente a la pequeña cantidad de muestra empleada en el análisis. Sin embargo, el ensayo de separación magnetica si mostro la presencia de un material magnetico susceptible de ser separado por este método, y que tal vez se encuentre disuelto como oxido con otro mineral o dentro de las especie amorfas. Es importante señalar que el caracterización por Fluorescencia de Rayos X expresa el contenido de hierro como Fe_2O_3 , pero no significa que esta especie este efectivamente presente, en esa forma, en el mineral como se observa en la caracterización por difracción de rayos x.

Tabla 26. Composición Química de la muestra beneficiada

Composición Química	Porcentaje
SiO₂	45,18
Al₂O₃	25,03
Fe₂O₃	7,79
MgO	3,97
CaO	1,93
TiO₂	1,21
Na₂O	1,12
K₂O	0,45
MnO	0,16
V₂O₅	0,05
SrO	0,01
ZrO₂	0,01
LOI (CO₂)	8,11

4.3.1.2 Caracterización mineralógica

Una vez establecido un posible sistema de beneficio, se procedió a someter una muestra de arcilla en una circulación secuencial de los procesos contemplados en este sistema. Luego se realizó la caracterización mineralógica y química para obtener valores que permitieron su evaluación.

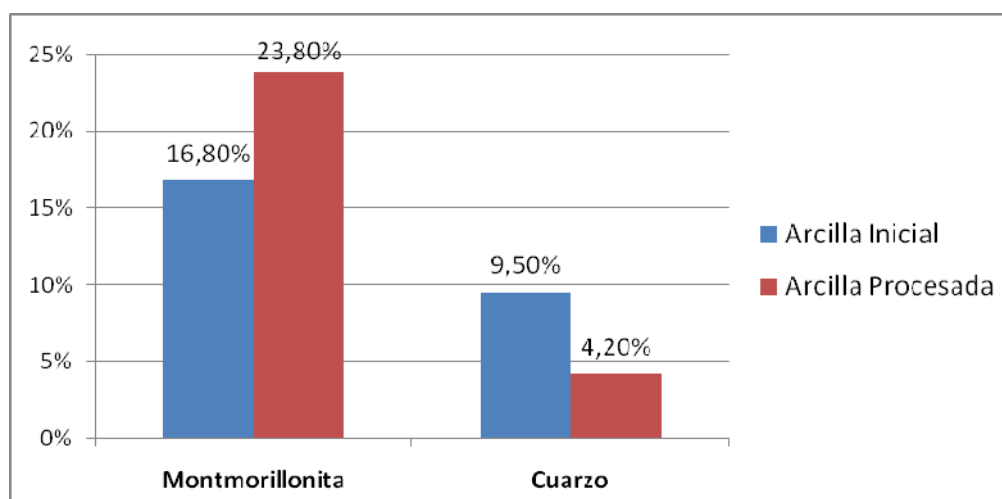
Tabla 27. Especies mineralógicas presentes en la bentonita refinada

Composición Mineralógica		Nombre	Cuantitativo
Cristalino	SiO ₂	Cuarzo	4,2%
	Na Al Si ₃ O ₈	Albita	15,8%
	Ca ₂ (Mg, Fe) ₄ Al(Si ₇ Al) O ₂₂ (OH, F) ₂	Magnesioblenda	6,9%

	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	Caolinita	10,8%
	$(Na, Ca)_{0,3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)XH_2O$	Montmorillonita	23,8%
Amorfos			32,0%

Fuente: Autor

Figura 16. Contenido de Montmorillonita y Cuarzo en la muestra original de bentonita respecto a la bentonita beneficiada



Fuente: Autor

Como se observa en la figura 17 se obtuvo un incremento global del 7% en el contenido de la montmorillonita de la muestra, y se logro eliminar un total de 5,3% del cuarzo inicial de la arcilla. Para confirmar el mejoramiento tecnológico de la arcilla luego del beneficio se determino la capacidad de intercambio catiónico de las dos muestras, como se muestra a continuación:

Tabla 28. Variación de CIC entre la muestra original de bentonita y la bentonita beneficiada

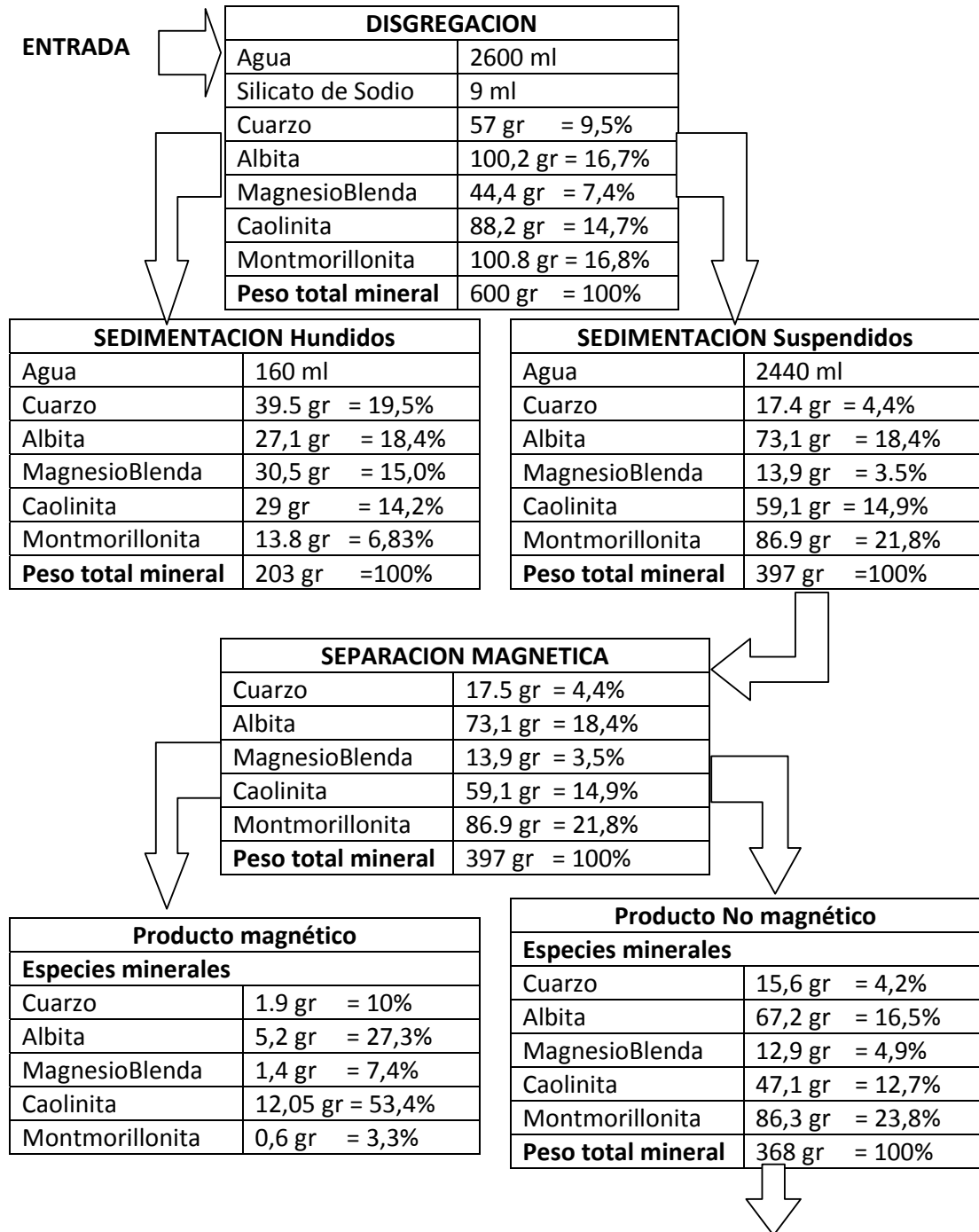
Bentonita inicial	Bentonita beneficiada
41,4 meq/100gr.	49,6 meq/100gr

Fuente: Autor

Esto indica un incremento del 17 % en la capacidad de intercambio cationico.

4.4 Balance de masa general del sistema de beneficio propuesto

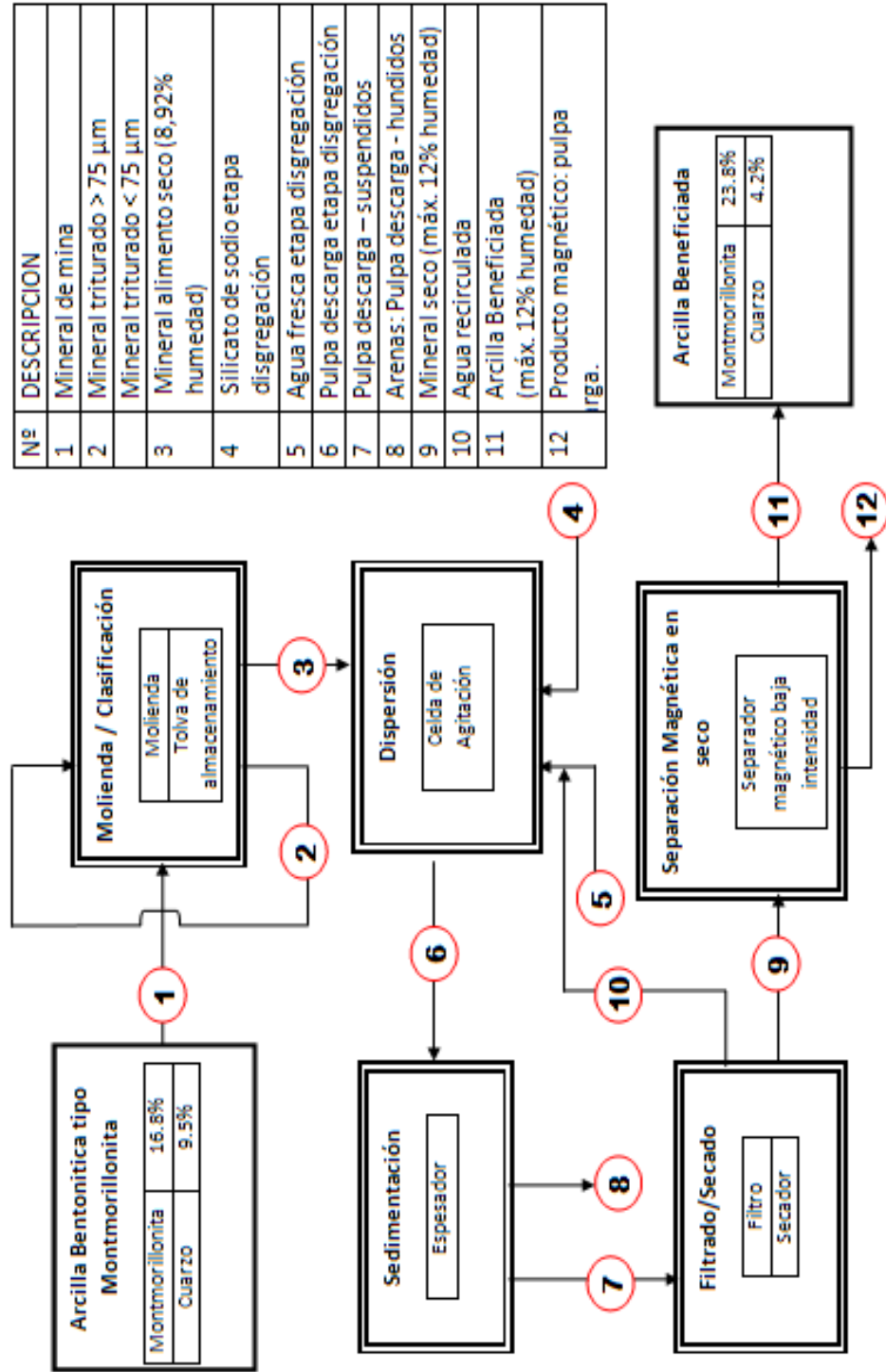
Figura 17: Balance de masa del circuito de beneficio



Peso total mineral	19 gr.
---------------------------	--------

ARCILLA BENEFICIADA

Figura 19. Flujiograma del sistema de beneficio propuesto



Nº	DESCRIPCION
1	Mineral de mina
2	Mineral triturado > 75 µm
	Mineral triturado < 75 µm
3	Mineral alimento seco (8,92% humedad)
4	Silicato de sodio etapa disagregación
5	Agua fresca etapa disagregación
6	Pulpa descarga etapa disagregación
7	Pulpa descarga – suspendidos
8	Arenas: Pulpa descarga - hundidos
9	Mineral seco (máx. 12% humedad)
10	Agua recirculada
11	Arcilla Beneficiada (máx. 12% humedad)
12	Producto magnético: pulpa rfga.

4.5 Índices Metalúrgicos

De acuerdo con los objetivos iniciales del proyecto, una vez establecido un posible sistema de beneficio para la arcilla bentonítica tipo montmorillonita se procedió a cuantificar los índices metalúrgicos de este diseño. De acuerdo con el método consignado en el anexo 5, se calculó tanto la razón de concentración como el porcentaje de recuperación global del sistema de beneficio.

- **Razón de concentración:**

$$Rc = \frac{600}{368} = 1,63$$

Esto indica que por cada 1,63 unidades de alimento se recupera 1 unidad es decir, el resto se pierde en el circuito como colas.

- **Porcentaje de Recuperación**

$$Rm = \frac{(368 \times 0,238)}{(600 \times 0,168)} \times 100 = 86,89 \%$$

Este cálculo se basa en el componente de interés contenido en el mineral, en la montmorillonita. El resultado indica que toda la cantidad de montmorillonita que ingresa al circuito de refinación se recupera el 86,89 %, el resto estará contenido en las colas o relaves. Es decir que las pérdidas de montmorillonita corresponden aproximadamente a un 13 % de la cantidad total ingresa en el sistema de beneficio.

CONCLUSIONES

- A partir de los resultados de la caracterización, fue posible clasificar la muestra de arcilla como una bentonita sódica, con un contenido de montmorillonita de 16,8%, siendo la especie mineralógica de interés en este proyecto.
- De acuerdo con los resultados se estableció que el sistema de beneficio mas apropiado para la arcilla evaluada debe constar de etapas de sedimentación y separación magnética vía seca.
- La caracterización del producto sobrenadante en el proceso de desarenamiento por sedimentación, presento los mejores resultados en la eliminación de cuarzo presente en el mineral bentonítico. Según el análisis mineralógico el cuarzo contenido en la muestra refinada en este proceso se redujo en un 5% respecto al mineral bentonítico original.
- Teniendo en cuenta que los ensayos realizados corresponden a pruebas a nivel de laboratorio, fue posible proponer un método de beneficio, permite obtener un mineral con mayor contenido de montmorillonita. Se calculo, el valor de 1,63 como la razón de concentración y un porcentaje de recuperación del 86,89 %, que corresponden a los índices metalúrgicos del proceso global.
- El circuito de beneficio propuesto permitió obtener un mineral bentonítico con un capacidad de intercambio catiónico de 49,6 meq / 100gr, es decir incremento del 17% con relación al material original. Esto se confirma la refinación lograda con el incremento de un 7% en el contenido de

montmorillonita en la muestra procesada en el circuito de beneficio respecto a la muestra original de bentonita.

RECOMENDACIONES

- De acuerdo con los resultados obtenidos en el aumento de la capacidad de intercambio catiónico en la bentonita beneficiada se sugiere un estudio donde se evalúe el posible uso en aplicaciones alto nivel tecnológico como en lodos de perforación y como material absorbente de metales pesados.
- Debido a que el sistema propuesto se desarrollo a nivel de laboratorio, se requiere realizar experimentación a mayor escala con el fin de corroborar los resultados. Con el fin de establecer condiciones de operación, necesarias para su posible aplicación como circuito de beneficio a nivel industrial.
- Se recomienda realizar un estudio a profundidad con el fin de establecer el papel que juegan los minerales con carácter magnético y las especies amorfas durante el beneficio y su relación con la fracción arcillosa del mineral.

BIBLIOGRAFIA

- [1] QUISPE A., Miguel. Las esmécticas: estructura, caracterización y aplicaciones. 2002.
- [2] GARCIA, Emilia..Las arcillas, propiedades y usos. 2003.
www.uclm.es/user/higueras/yym/arcillas/htm.
- [3] GRIM, R. E. & GUVEN, N. "Bentonites: Geology, Mineralogy and Uses".
New York.
Elsevier. . (1978)
- [4] ODOM, I. E. "Smectite Clay Minerals: Properties and Uses". Phil Trans.
R. Soc. London. (1984).
- [5] ODOM, I. E. "Smectite Clay Minerals: Properties and Uses". Phil Trans.
R. Soc. London. (1984).
- [6] QUISPE A., Miguel. Las esmécticas: estructura, caracterización y aplicaciones. 2002.
- [7] BRAVO, Natalie. Utilización de adsorbentes para la eliminación de contaminantes en aguas y efluentes líquidos.2004
- [8] Revista CERAMICA Y CRISTAL 138 - ABRIL 2006.
www.ceramicaycristal.com.ar
- [9] CAMACHO y CELADA. . Definición de Zonas Potenciales para Esmectitas en los Departamentos del Valle del Cauca, Tolima y Caldas. 2003

- [10] LAGUNA, O. ; MOLINA G. Naturaleza mineralgica de esmectitas provenientes de la formación Honda (Noreste de Tolima, Colombia) G.Universidad nacional de colombia. 2008.
- [11] ESPITIA, Carlos J., Catalogo de propiedades físicas. Químicas y mineralógicas de las arcillas para cerámica roja en Medellín, Ibagué y la sabana de Bogotá. Ingeominas. 2003
- [12] La minería no metálica en Perú. 2007. www.proinversion.gob.pe
- [13] BRADANOVIC, Tomás P. Arcillas y Bentonitas. 2002
- [14] GONZALEZ, José M. Las arcillas como minerales industriales, bentonitas, caolines y arcillas especiales.2000
- [15] CARREÑO, Agni. MACIAS, José F. Propuesta de un sistema de beneficio para un arcilla montmorillonitica nacional. UIS. 2007
- [16] CARREÑO, Agni. MACIAS, José F. Propuesta de un sistema de beneficio para un arcilla montmorillonitica nacional. UIS. 2007
- [17] GARCIA, Emilia. SUAREZ, Mercedes. Arcillas: propiedades y usos. Madrid.
- [18] MORA ROMERO, Leidy. Propuesta de un proceso para la reducción de impurezas, presentes en los caolines de Oiba (Santander), para la producción de cemento blanco. Escuela Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. UIS. 2004.

- [19] CARREÑO M., Jorge. GALVAN M., Diego. Propuesta de un sistema de beneficio por vía húmeda para la concentración de Illita y Caolinita en una arcilla del departamento de Santander. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales. 2006.
- [20] ALVARADO C., Jaime. Análisis del comportamiento de una arcilla bentonítica tipo montmorillonita en la adsorción de los iones cobre, níquel y zinc de soluciones acuosas. Escuela ingeniería Química. UIS. 2006.
- [21] BERNAL, I., H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica & J. Quintero: Análisis próximo de arcillas para cerámica. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 27 (105): (<http://www.accefyn.org.co/PubliAcad/Periodicas/Volumen27/105/7 analisis.pdf>).
- [22] AMADO D, Elmy, RUEDA G, Sonia. Aplicación de arcillas bentoníticas modificadas a la adsorción de iones cobre y zinc disueltos en efluentes cianurizados. 2007.
- [23] CARRIAZO, José G, Empleo de dos arcillas naturales colombianas en la eliminación de iones metálicos en solución acuosa. 2005.
- [24] DELGADO B, Elizabeth. Modificación de arcillas tipo ball clay empleando soluciones de electrolitos para mejorar la captación de zinc en solución acuosa. 2005
- [25] MOLINA, M., y MORENO, S., 2007. Caracterización de las Arcillas Esmectíticas de la Formación Honda al Noreste del Tolima y su Potencial Aplicación como Catalizadores. XI congreso de Geología.

ANEXOS

1. PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS DRX

- **Preparación y Montaje de las Muestras**

Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata y llevadas a un tamaño de 38 μ m (400mallas). El espécimen seleccionado de la muestra fue montado en un porta muestra de aluminio mediante la técnica de llenado lateral.

- **Toma de Datos de Difracción**

Se realizó en un difractómetro de polvo marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB bajo las condiciones que se muestran a continuación.

Voltaje		40(kV)
Corriente		20(mA)
Rendijas (Slits)	DS	1.0°
	RS	0.3mm
	SS	1.0°
Muestreo		0.02° 2theta
Rango de Medición		2-70° 2theta
Radiación		CuK α 1
Monocromador		Grafito
Identificación de fases		
Tipo de barrido		a pasos
Velocidad de Barrido		2 segundos
Cuantificación de fases		
Tipo de barrido		a pasos
Tiempo de muestreo		2 segundos

- **Análisis por Difracción de Rayos-X**

Identificación de Fases

El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del Internacional Centre for Diffraction data (ICDD) y, teniendo en cuenta las condiciones presentadas en la Tabla 1.

ii. Cuantificación de Fases

El análisis cuantitativo de las fases encontradas, igualmente se efectuó considerando las condiciones que se reportan en la Tabla 1, mediante el refinamiento por el Método de Rietveld del perfil observado, habiéndole agregado a la muestra una cantidad conocida de un estándar interno (Aluminum oxide, - 100mesh, 99%; Corundum, a-phase. Aldrich N° 23, 474-5) correspondiente al 20%.

2. MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD LIBRE EN ARCILLAS (ASTM C 324-01_{e1})

- **Materiales y Equipos**
Balanza analítica, Estufa, Desecado, Vidrio Reloj.
- **Procedimiento**
Pesar 1.00g de la muestra
Calentar a una temperatura entre 105 y 110°C hasta peso constante (dejar enfriar la muestra en un desecador)

Registrar la pérdida de peso como contenido de humedad

$$W = \frac{W_m - W_{ms}}{W_m} \times 100$$

Donde

W_m : Peso de la muestra (gr)

W_{ms} : Peso de la muestra seca (gr)

3. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL (ASTM C 329-88)

Procedimiento

- Secar la muestra a una temperatura de 110±5°C.
- La granulometría del mineral debe ser <4.75mm.
- Pesar el picnómetro vacío, M_f , previamente limpio y seco (secar en estufa de laboratorio).
- Introducir dentro del picnómetro el mineral en estudio (ocupando entre la mitad y las $\frac{3}{4}$ partes del volumen del picnómetro) y pesar, restar la masa del picnómetro vacío (M_f), y así determinar el peso de la muestra seca (M_o) (para muestras con partículas de tamaño máximo de 2mm el peso mínimo de la muestra es de 20g, para tamaños máximos de 4.75mm son 100g).
- Adicionar líquido para humectar completamente el sólido y sacar todas las burbujas de aire que están presentes. El líquido elegido debe humectar

completamente el mineral de tal forma que penetre fácilmente en el interior de los poros y además no presente ninguna reacción con el sólido.

- Completar con el líquido hasta llenar el picnómetro (tener en cuenta la tapa y el capilar) y pesar, M_b .
- Vaciar el picnómetro y limpiarlo
- Llenar el picnómetro con el líquido elegido y pesar, M_a
- Introducir el termómetro en el agua y registrar la temperatura, con 0.5°C de precisión.

$$Dr = \frac{Mo + Dliq}{Mo + (Ma - Mb)}$$

Donde

Dr : Densidad real del mineral

Mo : Peso de la muestra sólida seca

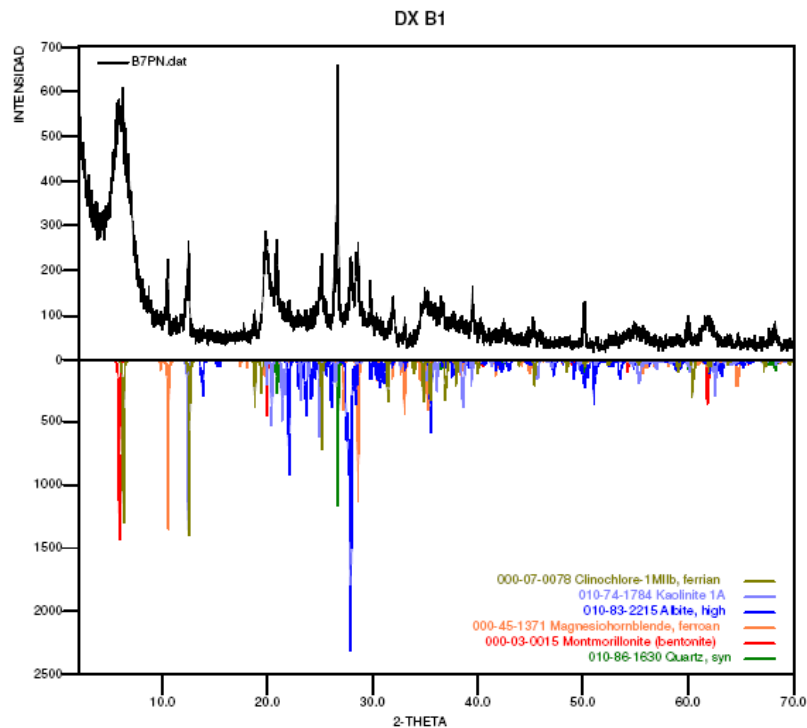
$Dliq$: Densidad del líquido

Ma : Peso del picnómetro lleno de agua

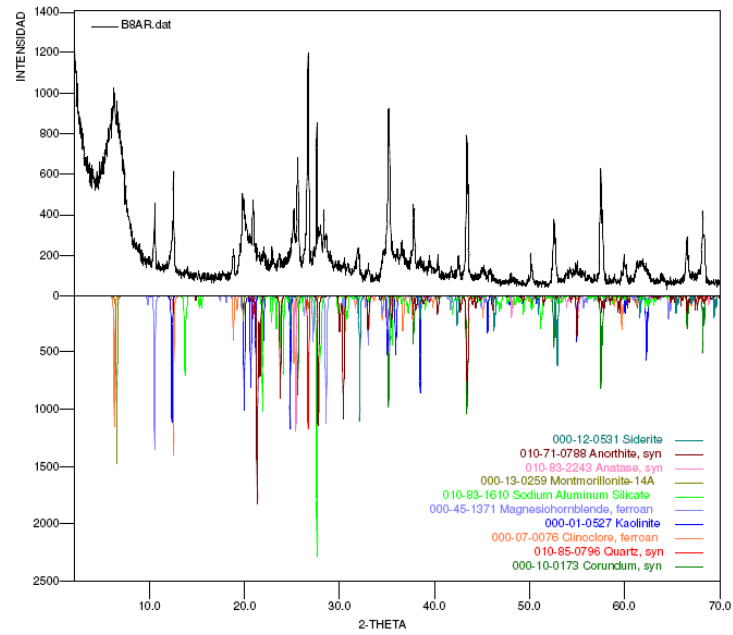
Mb : Peso del picnómetro con agua más muestra.

4. Resultados caracterización mineralógica por DRX

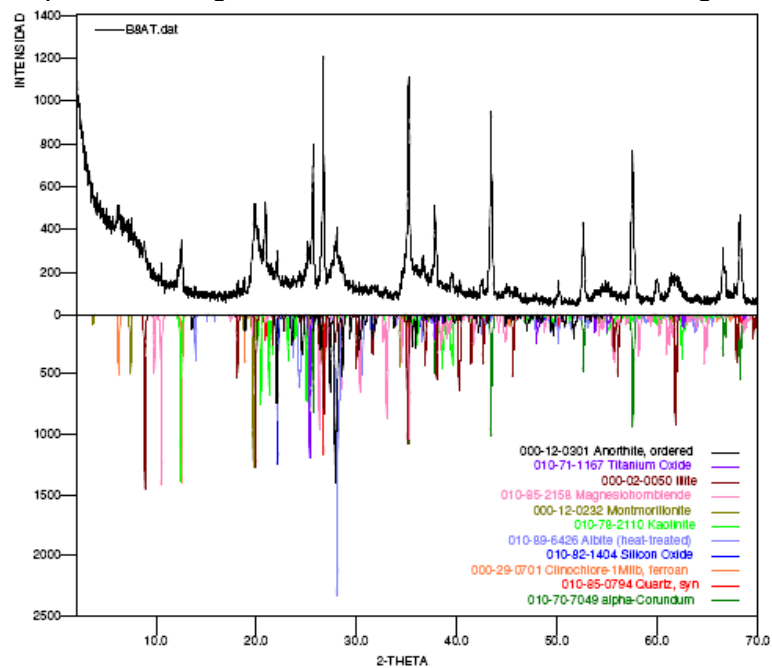
Muestra original de bentonita proveniente de Lérída- Tolima



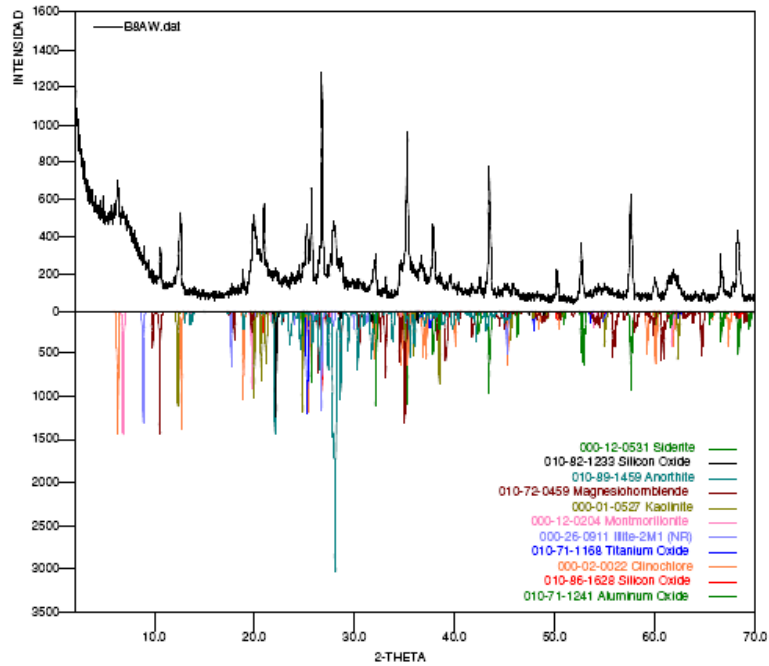
Separación Magnética en seco: Producto no magnético



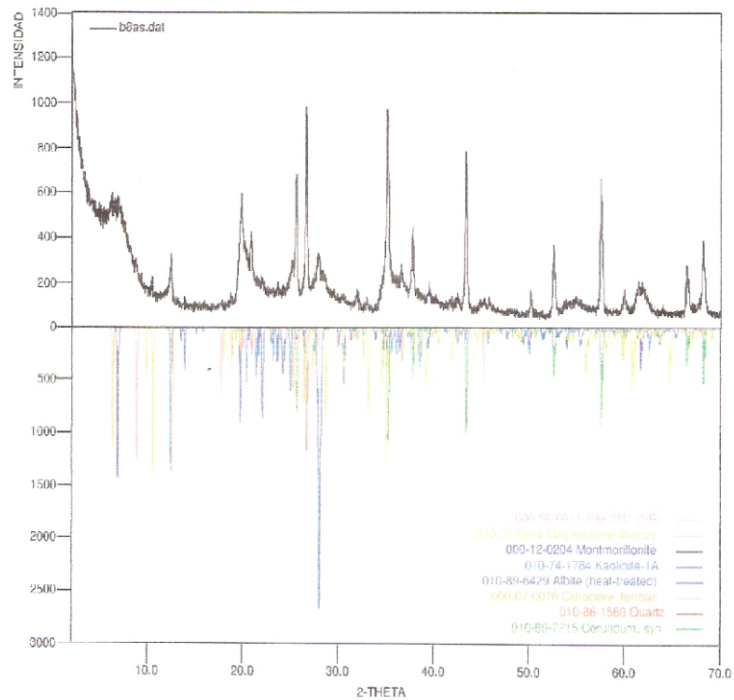
Separación Magnética en húmedo: Producto no magnético



Separacion granulometrica: Producto pasante malla #325



Sedimentación: Producto sobrenadante en 20 minutos



Sistema de beneficio: bentonita procesada

