

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE BENEFICIO POR VIA HUMEDA  
PARA LA CONCENTRACION DE ILLITA Y CAOLINITA EN UNA  
ARCILLA DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER**

**JORGE IVAN CARREÑO MENESES  
DIEGO FERNADO GALVAN MUÑOZ**

**UNIVESIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2006**

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE BENEFICIO POR VIA HUMEDA  
PARA LA CONCENTRACION DE ILLITA Y CAOLINITA EN UNA  
ARCILLA DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER**

**JORGE IVAN CARREÑO MENESES  
DIEGO FERNANDO GALVAN MUÑOZ**

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

**Director  
Julio Elías Pedraza Rosas  
Ingeniero Metalúrgico, M. Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2006**

*A Dios, que me ha dado el mejor regalo de todos; "LA VERDAD"*

*A Yolanda Muñoz, mi madre, Quien lo ha dado todo, por ver mis sueños hechos realidad.*

*A Jesús Alejo Galvan, ejemplo de dedicación y trabajo, sin su apoyo nada de esto hubiese sido igual. Mi gran héroe, gracias papá.*

*A mis hermanos, coherederos de cada triunfo familiar.*

*A mi familia, quienes con su cariño y aportes, han construido el hombre del que hoy se sienten orgullosos*

*A Agni Yamile Carreño, mi gran tesoro, su paciencia y cariño me enseñaron el verdadero valor de la amistad. Gracias querida amiga.*

**DIEGO FERNANDO**

*“Buscad primeramente el reino de Dios y todas las cosas serán dadas por añadidura”  
Lucas 12:31.*

*Dedico esta página primeramente a Dios ya que sin él nada podemos hacer, por ser nuestro creador, amparo y fortaleza, cuando más lo necesitamos. Él nos concede el privilegio de la vida y permite en su voluntad la oportunidad de lograr nuestras metas.*

*A mi padre por su tolerancia y apoyo constante.*

*A mi incomparable, bella y amorosa madre, por darme su cariño, paciencia, apoyo, consejos y, por sobretodo, valor para seguir adelante.*

*A mis hermanos quien con su gran amor y cariño han sido motivo de inspiración para ir en contra de las adversidades.*

*A mis amigos, en especial Agni Yamile por su afecto y ayuda incondicional, digno de una gran amiga.*

*A la Universidad Industrial de Santander, y profesores, que forman parte de este logro que abre puertas inimaginables en nuestro desarrollo profesional.*

*JORGE IVAN*

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestros sinceros agradecimientos a:

Profesor Julio Pedraza, director del proyecto por su colaboración y apoyo para la realización del presente trabajo de grado.

A todos los miembros del Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

Al Químico Olger Mendoza por sus valiosos aportes y constante colaboración en la realización de este proyecto de grado.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION	
1. PROBLEMA Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	3
1.1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA Y SU JUSTIFICACION	3
1.2. OBJETIVO GENERAL	9
1.3. OBJETIVOS ESPECIFICOS	9
2. ESTADO DEL ARTE	10
3. FUNDAMENTO TEÓRICO	14
3.1. GENERALIDADES SOBRE LAS ARCILLAS	14
3.2. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	18
3.3. EL SISTEMA AGUA – ARCILLA	20
3.4. CLASIFICACIÓN Y USOS DE LAS ARCILLAS	27
3.5. ARCILLAS COMO MATERIALES ADSORBENTES	31
3.6. PROCESOS DE BENEFICIO DE LAS ARCILLAS	32
3.7. PLANTAS DE BENEFICIO DE LAS ARCILLAS	43
4. DESCRIPCION DE LA MINA	49
4.1. LOCALIZACION DE LA MINA	49
4.2. RESERVAS DE LA MINA	50
4.3. MUESTREO DEL MINERAL	53
5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	55
5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MENA	57
5.1.1 Caracterización geoquímica y mineralógica.	57
5.1.2 Caracterización fisicoquímica.	57
5.1.3. Clasificación de la arcilla.	59

5.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO DE LA ARCILLA	59
5.2.1. Capacidad de intercambio catiónico de las arcillas.	59
5.2.2. Separación en húmedo por malla.	62
5.2.3. Estudio de Dispersión.	63
5.2.3.1. Estudio de dispersión usando agitación mecánica a 2700 rpm.	63
5.2.3.2. Estudio de dispersión usando ultrasonido con agitación mecánica a 750 rpm.	64
5.2.4. Estudio de Desarenamiento.	65
5.2.4.1. Estudio de desarenamiento por sedimentación.	66
5.2.4.2. Estudio de desarenamiento por hidrociclón.	67
5.2.5. Prueba De Separación Magnética.	69
5.2.6. Estudio Del Proceso De Lixiviación.	69
5.3. PROPUESTA DEL SISTEMA DE BENEFICIO	71
6. RESULTADOS Y ANALISIS	72
6.1. CARACTERIZACION DE LA ARCILLA	72
6.1.1. Caracterización Geoquímica.	72
6.1.2. Caracterización Fisicoquímica.	73
6.1.3. Clasificación de la mena.	77
6.2. PROCESOS DE BENEFICIO APLICADOS A LA ARCILLA	77
6.2.1. Estudio de Separación por Malla.	77
6.2.2. Estudio de Dispersión.	80
6.2.2.1. Estudio de dispersión usando agitación mecánica a 2700 rpm.	80
6.2.2.2. Estudio de dispersión usando ultrasonido con agitación mecánica a 750 rpm.	83
6.2.3. Estudio de desarenamiento por sedimentación.	86
6.2.4. Estudio de Desarenamiento por Hidrociclón.	93
6.2.5. Prueba de separación magnética.	97
6.2.6. Estudio del Proceso de Lixiviación.	97

7. PROPUESTA DEL SISTEMA DE BENEFICIO	104
7.1. DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO PROPUESTO	104
7.2. PRUEBA DE BENEFICIO FINAL	106
7.3. DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE LOS PROCESOS	108
7.4. ELABORACIÓN DEL BALANCE DE MASA Y EL DIAGRAMA DE FLUJO DETALLADO	111
CONCLUSIONES	116
RECOMENDACIONES	118
BIBLIOGRAFIA	129
ANEXOS	123

## LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
<b>Gráfica 1.</b> Curva índice alumina/ sílice del producto flotado y índice de azul del producto flotado vs. Tiempo de sedimentación.	61
<b>Gráfica 2.</b> Variación de la viscosidad de pulpas del mineral en función de los porcentajes de sólidos.	74
<b>Gráfica 3.</b> Distribución granulométrica del mineral arcilloso natural.	75
<b>Gráfica 4.</b> Curva Distribución granulométrica respecto al acumulado pasante y al acumulado retenido vs. Diámetro de partícula.	76
<b>Gráfica 5.</b> Curva de Relación $Al_2O_3/SiO_2$ e índice de azul de metileno Vs. Tiempo de agitación a 60 % de sólidos y 14000 rpm del producto retenido en la malla Tyler 270 #.	78
<b>Gráfica 6.</b> Curva del efecto del % de silicato de sodio vs. Potencial zeta de la arcilla a pH 5.	81
<b>Gráfica 7.</b> Curva del efecto del % de silicato de sodio vs. Potencial zeta de la arcilla a diferentes pHs.	83
<b>Gráfica 8.</b> Curva % de silicato de sodio vs. Potencial zeta a pH 5.	84
<b>Gráfica 9.</b> Curva del efecto del % de silicato de sodio vs. Potencial zeta de la arcilla a diferentes pHs.	85
<b>Gráfica 10.</b> Curva del índice de azul de metileno Vs. Tiempo de sedimentación a 0.6 % de silicato de sodio y pH 10.	87
<b>Gráfica 11.</b> Curva del índice de azul de metileno Vs. Tiempo de sedimentación a 0.6 % de silicato de sodio y pH 5.	91
<b>Gráfica 12.</b> Curva de relación alumina/sílice en el producto arcilloso del hidrociclón vs. Presión a 22.5 % de sólidos.	94

<b>Gráfica 13.</b> Curva de relación alumina/sílice en el producto arcilloso del hidrociclón vs. % de sólidos a 10 psi.	95
<b>Gráfica 14.</b> Curva de remoción de hierro vs. Concentración del lixivante para 12 horas de agitación a 500 rpm.	98
<b>Gráfica 15.</b> Curva de hierro removido e índice de azul vs. Concentración de ácido para 12 horas de agitación a 500 rpm y 25 °C.	99
<b>Gráfica 16.</b> Curva de hierro removido e índice de azul vs. Velocidad de agitación para 12 horas de agitación a 0.3 M de ácido oxálico y 25 °C.	100
<b>Gráfica 17.</b> Curva de hierro removido e índice de azul vs. Tiempo de contacto para 0.3 M de ácido oxálico a 1500 rpm y 25 °C.	101
<b>Gráfica 18.</b> Curva de hierro removido e índice de azul vs. Temperatura para 12 horas de agitación a 1500 rpm y 0.3 M de ácido oxálico.	102

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Clasificación de los minerales arcillosos más comunes.	17
<b>Tabla 2.</b> Área específica de algunas arcillas.	19
<b>Tabla 3.</b> Capacidades de intercambio catiónico de algunas arcillas.	20
<b>Tabla 4.</b> Relación entre la estabilidad y el potencial zeta.	27
<b>Tabla 5.</b> Mecanismos de actuación de algunos desfloculantes.	36
<b>Tabla 6.</b> Reservas explotables de los tres sectores.	50
<b>Tabla 7.</b> Reservas explotables del Sector 1.	52
<b>Tabla 8.</b> Comprobación de la técnica de azul de metileno mediante índice sílice/alumina para diferentes tiempos de sedimentación.	61
<b>Tabla 9.</b> Diámetros de descarga y rebalse de los hidrociclones evaluados.	68
<b>Tabla 10.</b> Composición química del mineral.	72
<b>Tabla 11.</b> Composición mineralógica del mineral.	72
<b>Tabla 12.</b> Viscosidad para pulpas a diversos porcentajes de sólidos.	74
<b>Tabla 13.</b> Distribución granulométrica del mineral arcilloso natural.	75
<b>Tabla 14.</b> Distribución microgranulométrica del mineral arcilloso natural.	76
<b>Tabla 15.</b> Efecto del tiempo de preagitación a 60 % de sólidos y 14000 rpm del producto retenido en la malla Tyler 270 #.	78
<b>Tabla 16.</b> Composición química del mineral pasante en malla Tyler # 270 con preagitación de pulpa a 60 % de sólidos y 14000 rpm.	79
<b>Tabla 17.</b> Efecto del % de silicato de sodio sobre el potencial zeta la arcilla a pH 5.	81
<b>Tabla 18.</b> Efecto del % de silicato de sodio sobre el potencial zeta de la arcilla a diferentes pHs.	82
<b>Tabla 19.</b> Efecto del % de silicato de sodio sobre el potencial zeta de la arcilla a pH 5.	84

<b>Tabla 20.</b> Efecto del % de silicato de sodio sobre el potencial zeta de la arcilla a diferentes pHs.	85
<b>Tabla 21.</b> Efecto del tiempo de sedimentación en el índice de azul de metileno a 0.6 % de silicato de sodio y pH 10.	87
<b>Tabla 22.</b> Composición química del mineral suspendido en sedimentación, disperso con agitación mecánica de 2700 rpm.	88
<b>Tabla 23.</b> Composición química de las colas o material sedimentado con dispersión con agitación mecánica a 2700 rpm.	89
<b>Tabla 24.</b> Efecto del tiempo de sedimentación en el índice de azul de metileno a 0.6 % de silicato de sodio y pH 5.	90
<b>Tabla 25.</b> Composición química del mineral suspendido en sedimentación, disperso con agitación mecánica de 750 rpm asistida por ultrasonido.	92
<b>Tabla 26.</b> Composición química de las colas o material sedimentado con dispersión por agitación mecánica de 750 rpm asistida por ultrasonido.	92
<b>Tabla 27.</b> Efecto de la variación de la presión en la separación en hidrociclón a 22.5 % de sólidos.	94
<b>Tabla 28.</b> Efecto de la variación de % de sólidos en la separación en hidrociclón a 10 psi.	95
<b>Tabla 29.</b> Composición química del mineral desarenado por hidrociclón.	96
<b>Tabla 30.</b> Efectos del lixiviante y su dosificación en la remoción de hierro durante 12 horas de agitación a 500 rpm.	97
<b>Tabla 31.</b> Efecto de la remoción de hierro sobre el poder adsorbente de la arcilla.	98
<b>Tabla 32.</b> Efecto del grado de agitación sobre la remoción de hierro y el poder adsorbente del residuo de lixiviación a 0.3 M de ácido oxálico, 12 horas de contacto y 25 °C.	100
<b>Tabla 33.</b> Efecto del tiempo de contacto sobre la remoción de hierro y el poder adsorbente del residuo de lixiviación a 0.3 M de ácido oxálico, 500 rpm y 25 °C.	101

<b>Tabla 34.</b> Efecto de la temperatura sobre la remoción de hierro y el poder adsorbente del residuo de lixiviación a 0.3 M de ácido oxálico, 12 horas de contacto y 1500 rpm.	102
<b>Tabla 35.</b> Composición química del material arcilloso después de lixiviado.	103
<b>Tabla 36.</b> Análisis químico del mineral beneficiado de la ladrillera Cootrasalba según el sistema propuesto.	107
<b>Tabla 37.</b> Composición mineralógica del mineral beneficiado.	107
<b>Tabla 38.</b> Características generales de la planta de beneficio para la obtención de un producto arcilloso para la industria de los materiales adsorbentes.	111

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Diagrama causa – efecto planteado para el problema.	8
<b>Figura 2.</b> Estructura elemental de la Caolinita.	15
<b>Figura 3.</b> Estructura elemental de la Illita.	16
<b>Figura 4.</b> Modelo de la doble capa eléctrica.	22
<b>Figura 5.</b> Potencial Zeta contra Potencial Superficial.	24
<b>Figura 6.</b> Curva de energía neta de interacción.	26
<b>Figura 7.</b> Flujograma general simplificado del beneficio en húmedo de arcillas caoliníficas.	33
<b>Figura 8.</b> Flujograma de beneficio de caolín – CADAM. Adaptado (TRAWINSKI, 1980; ALMEIDA, 1988; MONTE, 2000).	45
<b>Figura 9.</b> Planta de procesamiento de caolin de Sandersville-Geórgia-EUA.	46
<b>Figura 11.</b> Planta de procesamiento de caolin de Reedy Creek, Geórgia-EUA.	47
<b>Figura 12.</b> Localización del sector.	49
<b>Figura 13.</b> Mapa cartográfico de los sectores de explotación.	51
<b>Figura 14.</b> Columna litológica del depósito.	53
<b>Figura 15.</b> Metodología de trabajo experimental.	56
<b>Figura 16.</b> Mecanismo de agitación de una celda de flotación DENVER.	63
<b>Figura 17.</b> Equipo Zetameter System 3.0+.	64
<b>Figura 18.</b> Montaje de la dispersión usando ultrasonido con agitación mecánica.	65
<b>Figura 19.</b> Esquema del sistema sifón empleado para la recuperación de suspendidos.	66
<b>Figura 20.</b> Equipo y esquema de dirección de flujo de la pulpa dentro del hidrociclón.	68

<b>Figura 21.</b> Difractograma de la arcilla natural.	73
<b>Figura 22.</b> Diagrama de bloques de la planta propuesta para el mineral arcilloso de la ladrillera Cootrasalba.	105
<b>Figura 23.</b> Difractograma de la arcilla beneficiada.	108
<b>Figura 24.</b> Balance de masa de la propuesta de beneficio.	114
<b>Figura 25.</b> Diagrama de flujo de la planta propuesta para el beneficio de la arcilla común de Barranca (Santander).	115

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Metodología de los ensayos de caracterización.	124
<b>Anexo B.</b> Especificaciones requeridas para la industria cerámica.	133

**TITULO:** PROPUESTA DE UN SISTEMA DE BENEFICIO PARA LA CONCENTRACION DE ILLITA Y CAOLINITA EN UNA ARCILLA DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER\*

**AUTORES:** CARREÑO MENESES, Jorge Ivan  
GALVAN MUÑOZ, Diego Fernando\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Arcillas, dispersión, sedimentación, capacidad de intercambio catiónico, azul de metileno, Procesos de beneficio.

**RESUMEN:**

Debido al desconocimiento de la composición química, mineralogía y otras propiedades específicas de la arcilla extraída de la mina de la Ladrillera Cootrasalba, se desconocen sus posibles aplicaciones tecnológicas y por ende el beneficio metalúrgico apropiado.

El objetivo del proyecto fue experimentar, con la arcilla trabajada por esta ladrillera, diversos procesos de beneficio por vía húmeda, una vez caracterizada la mena, con el fin de proponer un sistema de beneficio para incrementar el porcentaje illita y caolinita, para así obtener un producto que pueda ser usado como material adsorbente.

El trabajo de laboratorio se inició con la caracterización del mineral tanto geoquímica como fisicoquímicamente; luego se aplicaron diversos procesos de beneficio que permitieran la concentración de las especies arcillosas, tales como la separación en húmedo por malla, la concentración en hidrociclón, la concentración magnética, la sedimentación y la lixiviación. La capacidad de adsorción se determinó utilizando la técnica de adsorción de azul de metileno, junto con el índice de capacidad de intercambio catiónico

En esta mena se determinó la presencia de illita (~31%), de caolinita (~23%) y de cuarzo (~27%), además de un contenido significativo de hierro (~6%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Dentro de los procesos de beneficio aplicados, la sedimentación presentó los mejores resultados. La cantidad de alúmina, índice de la cantidad de especies arcillosas, se incrementó de un 26.09% hasta un 38.24%; al mismo tiempo se logró incrementar la adsorción de azul de metileno de 10.5 meq/100g hasta 22 meq/100g equivalente a un aumento del 109%; igualmente para la capacidad de intercambio catiónico la cual se incrementó de 14 meq/100g hasta 26 meq/100g, lo que significa un aumento del 86%. Finalmente con base en los mejores resultados se propuso un sistema de beneficio, el cual incluye la sedimentación como proceso de concentración de illita y caolinita en esta mena arcillosa.

---

\* Trabajo De Investigación

\*\* Facultad De Ingenierías Físico Químicas, Escuela De Ingeniería Metalúrgica Y Ciencia De Materiales, Director Ing. Julio Elías Pedraza Rosas.

**TITLE:** PROPOSAL OF A BENEFIT SYSTEM FOR THE CONCENTRATION OF ILLITE AND KAOLINITE IN A CLAY FROM THE DEPARTMENT OF SANTANDER\*

**AUTHORS:** CARREÑO MENESES, Jorge Ivan  
GALVAN MUÑOZ, Diego Fernando\*\*

**KEYWORDS:** Clay, dispersion, sedimentation, cation exchange capacity, blue metilen, benefit processes.

**SUMMARY:**

Because of the unknown chemical and mineralogical composition and other properties of the clay extracted from the mine of the Cootrasalba brick factory, its possible technological applications and therefore the correct metallurgical benefit are unknown too.

The objective of the project was to experiment several wet benefit processes with a clay from that factory after the respective characterization in order to propose a benefit system to increase the percent of illite and kaolinite, and then obtain a product that could be used as a sorbent material.

The laboratory work began with the geo-chemical and physical-chemical characterization of the mineral; then were applied several processes of benefit that could allow the increase of the concentration of the clay fraction like hydrocyclone, magnetic concentration, sedimentation and lixiviation. The sorption capacity was determined using the metilen blue method as well as the cation exchange capacity.

Illite (~31%), kaolinite (~23%) and silica (~27%), and a significative content of iron oxide (~6%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) were found in this mineral. Among the applied benefit processes, sedimentation presented the best results. The quantity of alumina, indicator of the clay species, was increased from 26.09% to 38.24%; at the same time the metilen blue sorption was increased from 10.5 meq/100g to 22 meq/100g, equivalent to a total increase of 109% as well as the cation exchange capacity that increased from 14 meq/100g to 26 meq/100g, this is, an increase of 86%. Finally, based in the best results a benefit system was proposed including sedimentation as concentration process for illite and kaolinite in this clay mineral.

---

\* Research work

\*\* Physical-chemical faculty; Metallurgical Engineering and Materials Science School, Director MSc. Julio Elías Pedraza Rosas.

## INTRODUCCION

La minería Santandereana representa un gran potencial en la explotación de minerales arcillosos, para ser usados en numerosas aplicaciones, entre las cuales están, la industria cerámica, del papel, de materiales adsorbentes y del cemento. Sin embargo, los minerales extraídos directamente de las minas no poseen la composición química, física y mineralógica requerida como materia prima en estas industrias. Por tal motivo, es necesario aplicar procesos de beneficio de minerales, para su aprovechamiento en este tipo de industrias de base tecnológica.

En la mina de la Ladrillera Cootrasalba ubicada en el municipio de Barrancabermeja (Santander), actualmente se esta explotando la arcilla sólo para su aplicación en la industria del ladrillo y la teja, sin realizar ningún proceso de beneficio metalúrgico. Este hecho posiblemente se deba a la falta de conocimiento de varias características específicas importantes de la mena, tales como su composición química, composición mineralógica y a propiedades tecnológicas; lo cual también conlleva al desconocimiento de las posibles aplicaciones de base tecnológica y por ende a no saber cuál sería el sistema de beneficio metalúrgico más apropiado para esta mena. Entre las más recientes aplicaciones de las arcillas está la de utilizarse como material adsorbente de metales que se puedan encontrar en muchos efluentes industriales, tal es el caso de la industria de los electrorecubrimientos metálicos.

En este proyecto que hace parte del macroproyecto "Desarrollo de materiales adsorbentes como una alternativa tecnológica para la reducción de la carga contaminante en vertimientos generados en la industria de los

electrorecubrimientos" se estudió la factibilidad de obtener una arcilla beneficiada, apta para su utilización directa o con modificaciones, como materia prima en la industria de los materiales adsorbentes. Con el fin de disminuir los niveles de cuarzo y concentrar la illita y la caolinita en la arcilla natural, se aplicaron diferentes procesos de desarenamiento, seguido de la aplicación de procesos de remoción de hierro.

Para el desarenamiento del mineral natural se aplicaron procesos de sedimentación, fuerza centrífuga en hidrociclón y tamizado en húmedo, encontrándose que la sedimentación proporcionó los mejores resultados en la reducción de cuarzo. Lo anterior se vio reflejado en un notable mejoramiento de la capacidad de adsorción de la arcilla, denotado por el incremento del índice de azul de metileno, por encima del 100 %, y en la capacidad de intercambio catiónico, aumentada en un 87 %.

La lixiviación y la separación magnética se emplearon como procesos de remoción de hierro. La separación magnética no mostró reducción de esta impureza, sin embargo, con el empleo de la lixiviación se logró eliminar hasta un 70% del hierro presente en la arcilla natural. En contraposición a este resultado, el índice de azul de metileno y la capacidad de intercambio catiónico disminuyeron notablemente, en relación a los encontrados para la arcilla natural.

Finalmente, como era el objetivo de este trabajo, con base en los mejores resultados se propuso un sistema de beneficio de la arcilla de la mina que trabaja actualmente la Ladrillera Cootrasalba en Barrancabermeja, el cual incluye el desarenamiento por un proceso de sedimentación, que concentra la illita y la caolinita presentes en esta mena arcillosa.

## **1. PROBLEMA Y OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y SU JUSTIFICACIÓN**

Las arcillas son unos de los minerales industriales con mayor uso, teniendo aplicaciones en campos como la cerámica tecnológica, cemento, artículos refractarios, medicinas, cosméticos, insecticidas, industria del petróleo, purificantes y blanqueadores y otras muchas aplicaciones. Para su uso requiere del cumplimiento de determinados requisitos especialmente de sus características físicas, químicas y mineralógicas.

Debido a sus propiedades físico – químicas y a su bajo costo, las arcillas naturales están siendo estudiadas como materiales adsorbentes para el tratamiento de efluentes industriales que contienen metales pesados, sustancias radiactivas y contaminantes orgánicos como pesticidas, herbicidas, fertilizantes y otras sustancias sintéticas. Estos estudios han demostrado que las arcillas son unas buenas candidatas para ser modificadas en busca de mejores propiedades para la adsorción de cationes debido a su composición superficial y capacidad de intercambio catiónico; donde en la mayoría de los casos los responsables de esta capacidad de adsorción son los minerales arcillosos (illita, montmorillonita, caolinita, etc.).

Estas características hacen que el mercado para una arcilla en particular este limitado a unos pocos usos, debido a que estas recién extraídas, son mas bien silíceas, con elevado contenido de impurezas (compuestos de hierro, manganeso, materia orgánica y otros), siendo en general el porcentaje de mineral arcilloso inferior incluso al 20%. Únicamente después de ser beneficiada, la composición química de este material puede incrementar en

cuanto a minerales arcillosos; así por ejemplo mediante un proceso de beneficio se puede incrementar el porcentaje de  $Al_2O_3$  desde un 28% hasta un 40 % como resultado de la reducción de arena y otros contaminantes. Esto prueba que un sistema de beneficio puede aumentar el valor agregado de las arcillas naturales, debido a que estos minerales al ser tratados incrementan la proporción de minerales arcillosos en su composición, incrementado con esto su calidad y en consecuencia su precio.

Santander ocupa el cuarto lugar a nivel nacional en cuanto a reportes de explotaciones de arcilla se refiere. En el catálogo de yacimientos "Prospectos y Manifestaciones Minerales de Colombia", elaborado por el ingeniero Vicente Mutis Jurado Y publicado por INGEOMINAS (1983), aparecen reportadas 14 mineralizaciones de arcillas, las cuales se relacionan a continuación.

En la finca el tejero de la vereda San Francisco se han calculado unas 500.000 Ton de arcilla para cerámica, reportada en 1978.

En la finca la Victoria del municipio de Lebrija hay un banco de más de 8 metros de espesor, al cual se le estiman unas 30.000 Ton de arcilla, reportada en 1978.

Al norte de Barrancabermeja se reporta un yacimiento con un espesor de 2.50 metros, con unas 8.200 metros cuadrados de arcilla, reportada en 1978.

En la mina el portillo del municipio de Guaca se reportan arcillas con espesores de hasta 9.50 metros, reportada en 1975.

En el Playón se encuentra un banco de 7 metros de espesor, reportada en 1978.

En el barrio 11 de marzo del municipio de Socorro, hay una explotación en una capa de mas de tres metros de espesor, reportada en 1978.

En Charala, Oiba, Gámbita, San Vicente de Chucurí, Floridablanca, Girón, Lebrija y Málaga hay reportes sobre licencias de explotación del Minminas.

El sistema empleado para la extracción de arcillas es a cielo abierto, en donde se abre una serie de zanjas para analizar la calidad del material; luego, algunas de estas zanjas se convierten en los frentes de explotación que se van profundizando en la medida en que los niveles arcillosos muestren la calidad exigida para su aprovechamiento. En todos los chircales, como se denominan a las ladrilleras artesanales, el nivel de integración llega a la transformación de la arcilla en los productos que requiere el mercado local y nacional. Lo mismo ocurre con las grandes ladrilleras de Girón que tienen un nivel tecnológico más alto, en cuanto al tipo de equipos utilizados para la extracción y transformación de las arcillas. El nivel tecnológico de las empresas ladrilleras grandes es más alto en cuanto a la extracción y transformación de arcillas. El arranque se realiza por medio de buldózer caterpillar D4, el cargue por medio de cargadores y se transporta hasta el sitio de acopio (donde se realiza el proceso de "pudrimiento" de la arcilla), para luego ser transportada hasta la planta de extrusión y moldeo, para finalmente pasar a la etapa de secado y horneado. Los chircales emplean métodos manuales y hornos rudimentarios para la extracción y la transformación del material.

El proceso actual de explotación y beneficio de la arcilla en Santander, de cierta manera es adecuado para la aplicación que se le esta dando

actualmente en el departamento (ladrillos, tubo de gres, tejas, etc.), pero no es el adecuado para lograr un producto que cumpla la exigencias necesarias para su uso en aplicaciones de alta calidad; incluyendo la de material adsorbente, por sus bajos porcentajes en cuanto a minerales arcillosos se refiere. Esto hace que los requerimientos de materiales adsorbentes de este tipo se suplan en su mayoría del exterior, generalmente a elevados precios.

La mayoría de las empresas mineras no tienen ningún conocimiento sobre las características físicas, químicas y mineralógicas de sus minas. En general todo el proceso se efectúa empíricamente debido a la carencia de esa información, aspecto indispensable para la formulación de alternativas del mejoramiento de los procesos. A esto se suma las precarias condiciones socioeconómicas y de salubridad que enfrenta la población minera, debido a la utilización generalizada de equipo artesanal, procesos obsoletos y no optimizados.

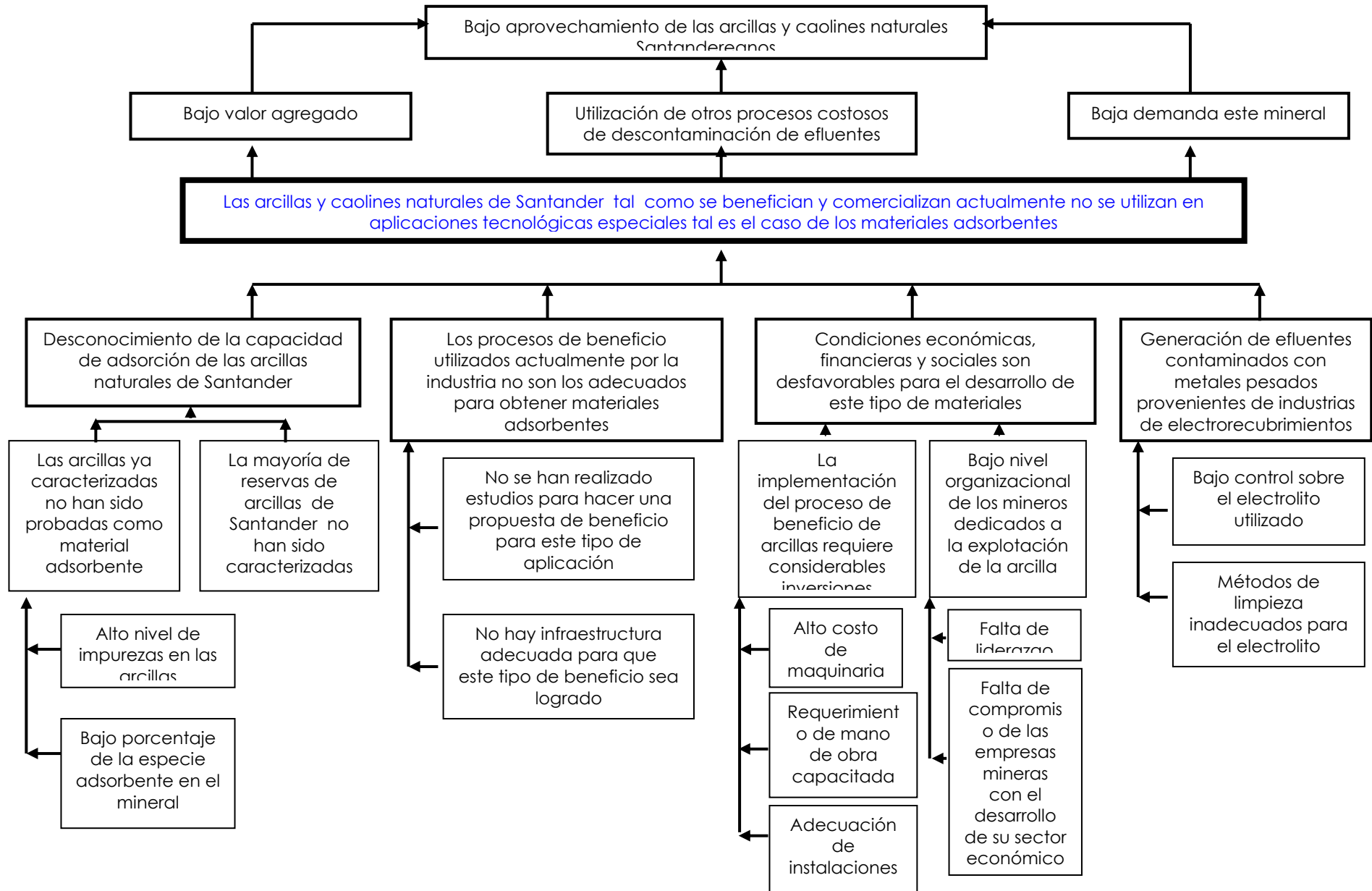
En vista de lo anterior, la dificultad que presenta el sector minero de la arcilla a nivel departamental, radica principalmente en el atraso tecnológico en el que se encuentra inmerso. La tecnología utilizada actualmente es rudimentaria, fruto de una tradición minera poco sistemática que no permite un aprovechamiento adecuado del mineral extraído.

Actualmente las industrias de electrorecubrimientos ubicadas en Bucaramanga, poseen dificultades con sus efluentes debido a la contaminación generada por los metales pesados que van dentro de estas aguas, este problema permite implementar el uso de las arcillas como materiales adsorbentes de estos metales, para garantizar el control en la contaminación de estos efluentes.

Con el objeto de darle a las arcillas de Santander un mayor valor agregado y proyectar su posible uso como materiales adsorbentes, es necesario beneficiarlas con el fin de incrementar su contenido de minerales arcillosos, así como también aumentar la finura de tamaño de partícula, separarle la arena y otros contaminantes. Por tanto este proyecto está destinado a proponer un sistema de beneficio para las arcillas de Santander, con el fin de buscar soluciones a la problemática anteriormente planteada.

En la Figura 1 se sintetiza la problemática a resolver, con sus causas y efectos.

Figura 1. Diagrama causa – efecto planteado para el problema



## **1.2. OBJETIVO GENERAL**

Proponer un sistema de beneficio por vía húmeda para concentrar la illita y la caolinita a partir de una arcilla del departamento de Santander, con el fin de obtener un producto que brinde mayor eficiencia, al ser usado como material adsorbente.

## **1.3. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Determinar el o los procesos metalúrgicos de beneficio en húmedo para concentrar la illita y la caolinita de la mena arcillosa en estudio, con base en sus características.
- Evaluar experimentalmente el o los procesos de beneficio para la mena en estudio.
- Seleccionar el sistema de beneficio mas adecuado para concentrar la illita y la caolinita de la mena estudiada, según los resultados obtenidos en la fase experimental.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. BENEFICIO DE LAS ARCILLAS

De las menas arcillosas, las más estudiadas en cuanto a procesos de beneficio, son las de caolín. Esto se debe a los exigentes requisitos en cuanto a composición química y mineralógica para su uso en las distintas aplicaciones de las cuales participa. Las menas de caolín son procesadas adoptando varios procesos físicos y químicos tales como separación magnética (Shoumkov et al., 1987), floculación selectiva (Farhount, 1989), aplicación de ultrasonido (Komskaja et al., 1971), lixiviación con varios químicos tales como ácido oxálico y otros ácidos orgánicos (Veglio et al., 1996; Ambikadevi and Lalithambika, 2000), ácidos orgánicos en presencia de un medio fermentado (De Mesquita et al., 1996), carbohidratos (Veglio and Toro, 1994) , EDTA (Borggaard, 1979), ditionito de sodio con mezclas de ácido sulfúrico (Conley and Lloyd, 1970; Ambikadevi and Gopalakrishna, 1997), etc. <sup>[9]</sup>

N.J. Saskia, D.J. Bharali, P. Sengupta, D. Bordoloi, R. L. Goswamee, P.C. Saskia, P.C. Borthakur (2003) <sup>[9]</sup>, caracterizaron y beneficiaron una caolinita proveniente de Assam, India. El beneficio consistió de un tamizado en húmedo por un tamiz -53 $\mu$ m, éste removió casi todo el cuarzo y una cantidad considerable de impurezas de hierro contenidas en el caolín. El contenido de hierro en la arcilla pudo ser reducido aun mas por tratamiento con un separador magnético en húmedo de alta intensidad (WHIMS) y lixiviando con ácidos orgánicos, dentro de los cuales mostró la mayor eficiencia el ácido oxálico, para unas condiciones de temperatura ambiente, altas revoluciones (14 000 rpm), un tiempo de 12 horas y una concentración óptima de ácido de

0.4 M. Con este proceso se mejoró la calidad de la arcilla, obteniéndose un producto que puede ser utilizado como materia prima cerámica grado II y III.

P. Raghavan, S. Chandrasekhar, V. Vogt, E. Gock (2003) <sup>[10]</sup>, estudiaron la separación de impurezas titanoféreas de un caolín de la India por pre - tratamiento de alto esfuerzo cortante y flotación por espumas. Ellos sometieron la pulpa a una agitación de alto esfuerzo cortante con el dispersante (etapa llamada HSD) y con el colector (etapa llamada HSC) como pasos de preflotación seguida por flotación inversa. La arcilla antes de este proceso de preflotación fue sometida a tres pasos por un hidrociclón para clasificar por tamaño. Ellos evaluaron el efecto del HSD, HSC y otras variables, midiendo indirectamente su efecto por el desempeño de la flotación en términos del contenido de óxido de titanio en el producto de arcilla. Concluyeron que las operaciones de preflotación con HSD y HSC tienen una profunda influencia sobre la separación de las impurezas titanoféreas del caolín por flotación por espumas.

S.K. Mandal, P.C. Banerjee (2004) <sup>[11]</sup>, estudiaron los efectos de diferentes parámetros físico - químicos en la lixiviación de hierro de una china clay con ácido oxálico. Ellos evaluaron la influencia del tiempo, la temperatura y la concentración de ácido oxálico, encontrando que para un tiempo de 6 horas, una temperatura de 80 °C y una concentración de 0.1 M de ácido oxálico se alcanza la máxima remoción de óxido de hierro de la china clay, alcanzando una remoción del 50 %.

Güven Önal, Mustafa Özer, Fatma Aíslan (2002) <sup>[12]</sup>, investigaron sobre la sedimentación en medio ultrasónico. Ellos estudiaron los efectos de la densidad de pulpa, la adición de floculante y el tratamiento ultrasónico sobre la sedimentación de la arcilla, determinando las condiciones óptimas de

velocidad de sedimentación. Ellos encontraron que el tratamiento ultrasónico aplicado durante la sedimentación, afecta positivamente la purificación de la arcilla al incrementar las velocidades de sedimentación de las impurezas sedimentables.

Otra de las menas arcillosas de las cuales se reportan investigaciones en cuanto a beneficio son las menas de bentonita. Esto debido a que una gran parte de estas menas presenta problemas para su utilización, debido a la baja concentración de esmectita, alto nivel de impurezas y una composición inconsistente. Por lo que el beneficio de éstas es necesario para la mayoría de las aplicaciones industriales tales como lodos de perforación, arenas de fundición, etc.

M.S. Hassan y N.A. Abdel-Khalek (1998) <sup>[13]</sup>, caracterizaron y beneficiaron una bentonita egipcia. Las muestras fueron procesadas por trituración, molienda, seguida por tratamiento en hidrociclón para obtener preconcentrados que fueron lixiviados con HCl diluido. La aplicación de este diagrama de flujo removió la mayoría de los minerales asociados (calcita, cuarzo, feldespato y dolomita). Después, estos concentrados fueron refinados por una serie de tratamientos ácidos y alcalinos antes de su evaluación como bentonita industrial.

## **2.2. DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE ADSORCION DE LAS ARCILLAS**

En los últimos años se ha surgido la búsqueda de nuevas técnicas experimentales que son definidas y ensayadas para encontrar métodos mas rápidos y económicos para la caracterización de minerales arcillosos. Entre estas técnicas se ha estudiado la técnica de acetato de amonio y la técnica

de adsorción de azul de metileno, siendo esta última aplicada con gran éxito, tal como se ha comprobado en los estudios que a continuación se describen.

De acuerdo a Hang y Bridley (1970) <sup>[16]</sup>, el área superficial y la capacidad de intercambio catiónico de arcillas en la forma de intercambio sódico se pueden determinar por la técnica de adsorción de azul de metileno. El área superficial es calculada del consumo de azul de metileno en el punto de floculación óptimo y la CIC de la meseta de adsorción, es decir la máxima adsorción de azul de metileno.

Kahr y Madsen (1995) <sup>[14]</sup>, usaron la adsorción de azul de metileno para determinar la capacidad de intercambio catiónico y el área superficial de tres tipos de arcillas una bentonita, otra illita y otra caolinita. Los resultados obtenidos para cada arcilla, fueron comparados con la capacidad de intercambio catiónico y con el área superficial obtenidos por otras técnicas experimentales, encontrándose que la adsorción de azul de metileno de todas las arcillas investigadas corresponde de buena manera con la cantidad de cationes intercambiados.

Chiappone, Marelló y Setti (2004) <sup>[15]</sup>, utilizaron la técnica de azul de metileno según la norma ASTM C 837 – 99 y ANFOR NF P 94 – 068, para evaluar la actividad de un suelo, con base en el tipo y cantidad de minerales arcillosos contenidos en éste. Los resultados fueron comparados con otras técnicas experimentales, encontrándose que las técnicas de adsorción de azul de metileno hacen posible caracterizar suelos en términos de cantidad y tipo de minerales arcillosos presentes a través de un índice que da información semicuantitativa.

### 3. FUNDAMENTO TEÓRICO

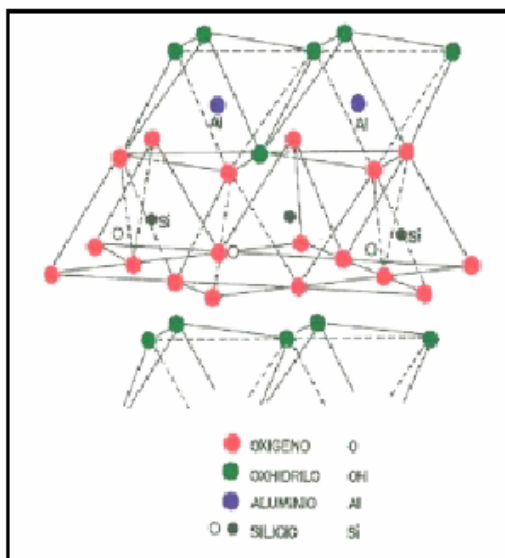
#### 3.1. GENERALIDADES SOBRE LAS ARCILLAS

**3.1.1. Definición.** La arcilla proviene del latín “arguilla” y la palabra “clay” proviene del antiguo idioma que quería decir plástico [3]. El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados; desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales, filosilicatos en su mayoría, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano muy fino (inferior a 2  $\mu\text{m}$ ). Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas [5]. En general, las arcillas son materiales terrosos compuestos principalmente por silicatos alumínicos o magnésicos hidratados de potasio, sodio y otros elementos (Mutis 1983).

**3.1.2. Minerales Arcillosos.** Actualmente se conoce que los minerales arcillosos son numerosos y difieren entre sí por su forma, estructura, apilamiento de las capas y por la simetría de la red que forman entre sí. Estas redes estructurales no son perfectas, generalmente presentan huecos por falta de iones o por sustitución de unos iones por otros que distorsionan la estructura y generan diferencias entre familias. Es bueno tener presente que en los depósitos naturales siempre coexisten varias clases de minerales arcillosos simples e interstratificados acompañados de óxidos de hierro o de titanio, piritas, yeso, calcita, feldespatos y otros minerales. De acuerdo a su distribución estructural los minerales arcillosos se pueden dividir en las siguientes familias o grupos que a continuación se describen.

**3.1.2.1. Filosilicatos bilaminares.** Los filosilicatos bilaminares están formados por dos capas: una tetraédrica y otra octaédrica, por eso reciben los nombres de bilaminares, 1:1 ó T:O (Figura 2). Generalmente los tetraedros son de silicio, rodeados por oxígeno, aun cuando en ocasiones el silicio puede estar sustituido por iones de aluminio o de hierro. Los octaedros pueden tener como ión predominante el aluminio o el magnesio y están rodeados de oxígeno o de hidroxilos (OH). Cuando el ión dominante es el aluminio, la lámina que se forma se denomina dioctaédrica, y cuando el ión dominante es el magnesio, se dice que la capa es trioctaédrica. Los diferentes iones están apilados en tal forma que se mantiene la electronegatividad entre ellos. Las capas tetraédrica y octaédrica constituyen una lámina. En esta clasificación se distinguen dos familias de minerales: la de las caolinitas o caolinitas (dioctaédricos) y la de las serpentinas (trioctaédricos).

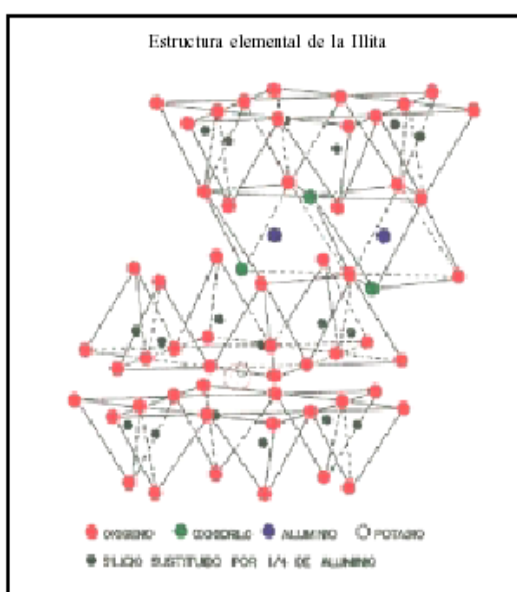
**Figura 2.** Estructura elemental de la Caolinita.



Fuente: BERNAL, I. Análisis próximo de arcilla para cerámica. Rev. Acad. Coloma. Cienc. 27 (105): 569 – 578, 2003.

**3.1.2.2. Filosilicatos trilaminares.** Cada lámina está formada por dos capas de tetraedros de sílice que encierran una capa de octaedros de alúmina o de magnesia, por ésta razón se les denomina "trilaminares", 2:1 ó T:O:T. (Figura 3). Las láminas no son eléctricamente neutras debido a que se presentan sustituciones de unos iones por otros de diferente carga. Comprenden tres familias: Esmectitas, Micas y minerales fibrosos o Atapulgita.

**Figura 3.** Estructura elemental de la Illita



Fuente: BERNAL, I. Análisis próximo de arcilla para cerámica. Rev. Acad. Coloma. Cienc. 27 (105): 569 – 578, 2003.

**3.1.2.3. Cloritas.** Son un grupo de minerales cuyas láminas están compuestas por dos capas tetraédricas y dos octaédricas por lo que se les denomina 2:1:1 ó T:O:T:O. Las láminas no son eléctricamente neutras debido a sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga pero de tamaño semejante. La neutralidad se logra por grupos hidroxilos y por cationes interlaminares como sodio, potasio, calcio o magnesio. La separación entre láminas es del orden

de 14Å o más. La fórmula general de las cloritas es  $R_5^{++} R^{+++} Si_3 R^{+++} O_{10} (OH)_8$  en la cual  $R^{++}$  puede ser Fe ó Mg y  $R^{+++}$  puede ser Al ó Fe.

En la Tabla 1 se presenta una clasificación de los minerales arcillosos más comunes. En la literatura se encuentran otras clasificaciones que incluyen numerosos minerales basados en otras propiedades.

**Tabla 1.** Clasificación de los minerales arcillosos más comunes.

	DIOCTAEDRICOS		TRIOCTAEDRICOS		CARGA
<b>BILAMINARES</b> T : O 1:1	CANDITAS	Caolinita	SERPENTINA	Antigorita	
		Nacrita		Crisotilo	
		Dickita		Lizardita	X = 0
		Halloisita		Bertierina	
<b>TRILAMINARES</b> T : O : T 2 : 1	Pirofilita		Talco		X = 0
		Montmorillonita		Saponita	X = 0,2-0,6
	ESMECTITAS	Beidellita	ESMECTITAS	Hectorita	
		Nontronita			
	Vermiculitas		Vermiculitas		X = 0,6-0,9
	Illitas				X = 0,9
		Moscovita		Biotita	X = 1
	MICAS	Paragonita	MICAS	Flogopita	
			Lepidolita		
<b>T : O . T : O</b> <b>2 : 1 : 1</b>	CLORITAS				
<b>FIBROSOS</b>	Paligorskita		Sepiolita		

Fuente: [www3.usal.es/~delcien/doc/GA.PDF](http://www3.usal.es/~delcien/doc/GA.PDF).

**3.1.3. Otros minerales en las arcillas.** Los minerales arcillosos rara vez están presentes en estado puro. Junto a ellos se presenta un gran número de minerales ocurrentes, por lo que la composición mineralógica de estas rocas suele ser muy compleja y variable.

Uno de los compuestos mas frecuentes de las arcillas es la sílice. Esta especie mineralógica se presenta en la mayor parte de las variedades de arcilla, en forma de cuarzo u otra forma cristalina o amorfa de sílice. En las arcillas residuales se encuentra, principalmente, como cuarzo cristalino. Las arcillas

sedimentarias también contienen normalmente cantidades apreciables de cuarzo que ha sido transportado y depositado junto con los minerales arcillosos. Los carbonatos también son muy frecuentes en las arcillas. El tipo de carbonato más común es la calcita, y a veces pequeñas cantidades de magnesita ( $MgCO_3$ ). Los feldespatos son componentes habituales de las arcillas residuales, por el contrario, rara vez se presentan en arcillas sedimentarias. Las micas no hidratadas, tales como la moscovita y la biotita, son bastante estables por lo que se encuentran a menudo en las rocas arcillosas.

Los principales minerales de hierro presentes en las rocas arcillosas, de los que depende en gran parte el color de la arcilla tanto en crudo como en cocido, son la magnetita ( $Fe_3O_4$ ), la hematina ( $\alpha - Fe_2O_3$ ), la limonita ( $FeO.OH.nH_2O$ ), la gohetita ( $\alpha - FeO.OH$ ) y la siderita ( $FeCO_3$ ). Al igual que los minerales de hierro existen otros que afectan el color en crudo y cocido de las arcillas, como son los óxidos de titanio presentes mineralógicamente como rutilo y anatasa ( $TiO_2$ ). La materia orgánica o carbonosa es otro componente presente en las arcillas en proporciones muy variables en función del origen y características del yacimiento. Esta última impureza proporciona a la arcilla un color que varía desde el gris al negro en función de su contenido.

### **3.2. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS ARCILLAS**

Las propiedades fisicoquímicas de las arcillas generalmente dependen de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a  $2 \mu m$ ).
- Su morfología laminar (filosilicatos).
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan un valor elevado del área superficial y una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. En la Tabla 2 se muestran algunos ejemplos de valores de área específica de algunas arcillas.

**Tabla 2.** Área específica de algunas arcillas

<b>ARCILLA</b>	<b>AREA ESPECIFICA (M<sup>2</sup>/G)</b>
Caolinita de elevada cristalinidad	<15
Caolinita de baja cristalinidad	<50
Halloysita	<60
Illita	<50
Montmorillonita	80-300
Sepiolita	100-240
Paligorskita	100-200

Fuente: ¿Qué son las arcillas?, disponible en: [www.omega.ilce.edu.mx](http://www.omega.ilce.edu.mx).

Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial con compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, desarrollando propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, como ya se ha citado, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes. A esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales. En la Tabla 3 se muestran algunos ejemplos de valores de la capacidad de intercambio catiónico para diferentes arcillas.

**Tabla 3.** Capacidades de intercambio catiónico de algunas arcillas

<b>ARCILLA</b>	<b>CIC (MEQ/ 100 G)</b>
Caolinita	3-5
Halloysita	10-40
Illita	10-50
Clorita	10-50
Vermiculita	100-200
Montmorillonita	80-200
Paligorskita	20-35

Fuente: ¿Qué son las arcillas?, disponible en: [www.omega.ilce.edu.mx](http://www.omega.ilce.edu.mx).

### **3.3. EL SISTEMA AGUA - ARCILLA**

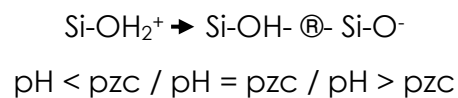
Las pequeñas dimensiones de los minerales arcillosos hacen que se comporten como un sistema coloidal cuando entran en contacto con el agua, mientras que la presencia de cargas les permite atraer sustancias ubicadas en la solución en contacto con ellas.

Los minerales arcillosos presentan una carga neta negativa. Sin embargo, aunque se conoce la existencia de las cargas eléctricas sobre la superficie de las partículas de arcilla cuando éstas se hallan dispersas en agua, el origen de estas cargas continúa siendo confuso. De entre los mecanismos propuestos, se admiten dos como más probables: Enlaces rotos y bordes de cristal, y sustituciones isomorfas, los cuales generan en los minerales arcillosos dos tipos de carga; la permanente y la dependiente del pH.

Las cargas permanentes, constantes o estructurales se generan, a través de los procesos geológicos, debido a sustituciones isomórficas en las estructuras cristalinas, generalmente negativas debido al reemplazo de átomos de la

estructura por otros de menor valencia (magnesio por aluminio, aluminio por silicio). Estas cargas resultan independientes del entorno del mineral.

En los bordes, sin embargo, aparecen cargas que son dependientes del pH, del medio y por lo tanto son variables. Surgen de la disociación de grupos superficiales, como muestra el siguiente esquema:



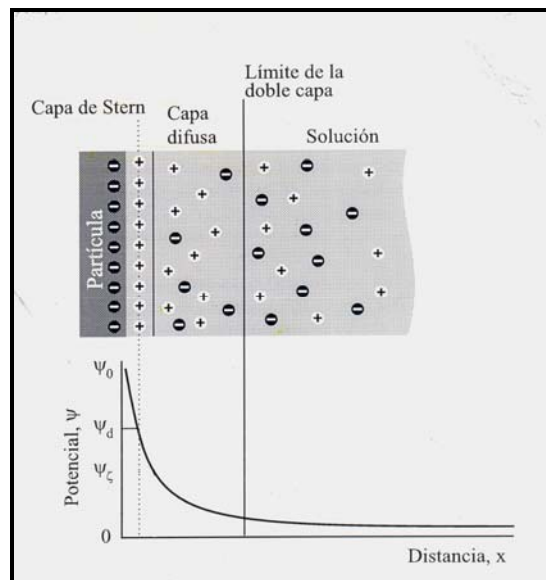
Sólo se encuentran neutralizadas bajo una cierta condición de pH, denominada pzc: punto de carga cero (point of zero charge), que depende del tipo de enlace químico involucrado. Cuando el pH se eleva por encima del pzc, en un medio más alcalinizado, la superficie de borde adquiere carga negativa (pH > pzc) mientras que al descender por debajo del pzc, en un medio más ácido, se vuelve positiva. Esto no implica que el valor de pzc sea neutro, dependiendo del grupo funcional implicado puede oscilar entre ácidos y alcalinos.

La forma precisa en que las cargas se encuentran distribuidas alrededor de las partículas es de gran importancia para la comprensión de los sistemas coloidales. En la gráfica de la Figura 4 se ha representado la variación que experimenta el potencial eléctrico de una partícula coloidal con la distancia a su superficie. En ésta la reducción del potencial eléctrico está acentuada por la acumulación de iones de signo opuesto, denominados contra-iones, en las proximidades de la superficie de la partícula.

Para explicar este comportamiento, actualmente se acepta el modelo de Stern con ligeras modificaciones (modelo de doble capa eléctrica). En dicho

modelo se admite que una fracción de los contra - iones es adsorbida fuertemente y forma una monocapa cercana a la superficie, denominada capa de Stern. El resto de los contra - iones forma una capa difusa alrededor de la partícula, disminuyendo su concentración de forma exponencial con la distancia a la misma. El potencial en el limite exterior de la capa adsorbida se denomina potencial de Stern,  $\Psi_d$ , mientras que el potencial existente sobre la superficie del sólido es conocido con el nombre de potencial de Nernst,  $\Psi_0$ .

**Figura 4.** Modelo de la doble capa eléctrica



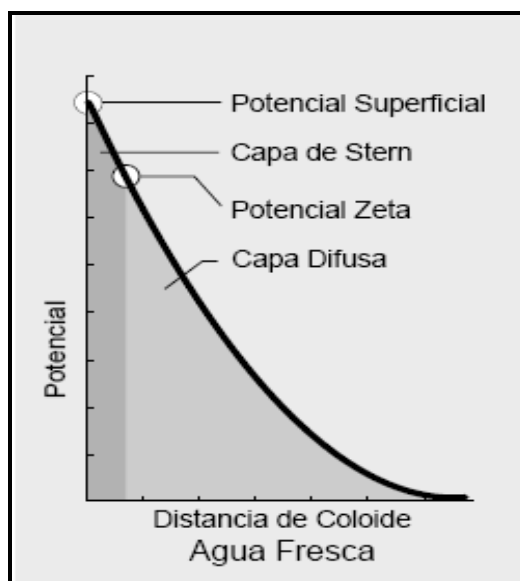
Fuente: BARBA, Antonio. BELTRÁN, Vicente. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. Instituto de tecnología cerámica. Graficas Castaño, S.L. España. 1997.

La capa difusa puede ser visualizada como una atmósfera cargada rodeando al coloide. A cualquier distancia de la superficie, la densidad de carga es igual a la diferencia de concentración entre iones positivos y negativos. La densidad de carga es mucho mayor cerca del coloide y gradualmente disminuye a cero cuando las concentraciones de iones positivos y negativos se asemejan.

Los contra-iones de la capa de Stern y de la capa difusa son los que conforman la *doble capa*. El espesor de esta doble capa depende del tipo y concentración de los iones de la solución. El coloide negativo y su atmósfera cargada positivamente producen un potencial eléctrico relativo a la solución. Este tiene un valor máximo en la superficie y disminuye gradualmente con la distancia, aproximándose a cero fuera de la capa difusa. La caída del potencial con la distancia desde el coloide es un indicador de la fuerza repulsiva entre los coloides en función de la distancia a las cuales estas fuerzas entran en juego.

Un punto de particular interés es el potencial donde se unen la capa difusa y la de Stern. Este potencial es conocido como el potencial zeta (Figura 5), el cual es importante porque puede ser medido de una manera muy simple, mientras que la carga de la superficie y su potencial no pueden medirse. El potencial zeta puede ser una manera efectiva de controlar el comportamiento del coloide puesto que indica cambios en el potencial de la superficie y en las fuerzas de repulsión entre los coloides.

**Figura 5.** Potencial Zeta contra Potencial Superficial.



Fuente: Manual, disponible en: [www.zeta-meter.com](http://www.zeta-meter.com)

El potencial zeta es un parámetro fundamental en la estabilidad de los sistemas coloidales. Cuando dos partículas cargadas eléctricamente, con el mismo tipo de carga, se aproximan éstas tienden a repelerse. La determinación del potencial zeta permite, por lo tanto evaluar cuantitativamente la fuerza de repulsión entre partículas, siendo ésta tanto mas intensa cuanto mayor es el valor absoluto del potencial zeta. En los sistemas agua – arcilla, un aumento de potencial zeta y, por tanto, de las fuerzas repulsivas, se traduce en una mayor dispersión de las partículas en el agua, es decir, en la desfloculación.

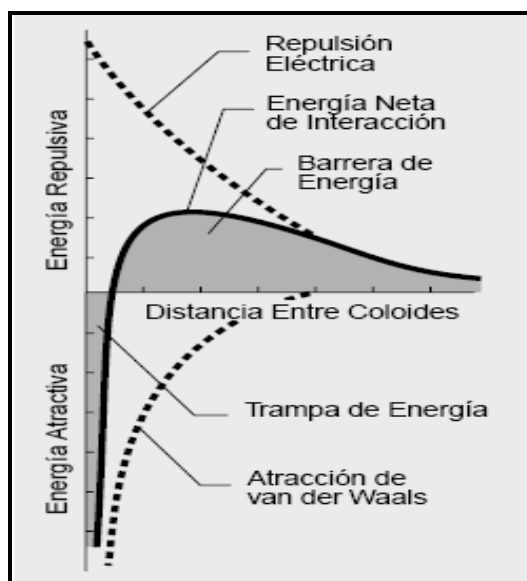
La teoría DLVO (llamada así por Derjaguin, Landau, Verwey y Overbeek) es la clásica explicación de los coloides en suspensión. Esta se basa en el equilibrio entre las fuerzas opuestas de repulsión electrostática y atracción tipo Van der Waals y explica por qué algunos coloides se aglomeran mientras que otros no lo hacen.

La repulsión electrostática llega a ser importante cuando los coloides se aproximan y la doble capa comienza a interferir. Se requiere energía para superar esta repulsión y forzar la unión entre las partículas. Esta energía aumenta fuertemente cuando las partículas se acercan. Se usa una curva de repulsión electrostática para indicar la cantidad de energía que hay que vencer para que las partículas puedan ser forzadas a juntarse. Esta energía llega a un valor máximo cuando las partículas están casi juntas y disminuye a cero fuera de la doble capa.

La atracción de Van der Waals entre los coloides es ciertamente el resultado de las fuerzas entre las moléculas individuales de cada coloide. El efecto es aditivo; o sea, una molécula del primer coloide experimenta la atracción de Van der Waals de cada molécula del segundo coloide. Esto se repite para cada molécula del primer coloide y la fuerza total corresponde a la suma de todas ellas. Se usa una curva de energía de atracción para indicar la variación en las fuerzas de Van der Waals con la distribución entre las partículas.

La teoría DLVO explica la tendencia de los coloides a aglomerarse o permanecer separados al combinar la atracción de Van der Waals y la curva de repulsión electrostática: la curva combinada es llamada la *energía neta de interacción*. A cada distancia el pequeño valor se resta del mayor valor para dar la energía neta. El valor neto se representa entonces arriba si es repulsivo o abajo si es atractivo. La curva de interacción neta cambia siempre de atracción a repulsión y nuevamente a atracción (Figura 6).

**Figura 6.** Curva de energía neta de interacción.



Fuente: Manual, disponible en: [www.zeta-meter.com](http://www.zeta-meter.com)

Si existe una zona repulsiva, entonces el punto de máxima energía de repulsión se llama la *barrera de energía*. La altura de esta barrera indica cuán estable es el sistema. Para aglomerar dos partículas que van a chocar éstas deben tener suficiente energía cinética debido a su velocidad y masa, como para pasar sobre dicha barrera. Si la barrera desaparece, entonces la interacción neta es totalmente atractiva y consecuentemente las partículas se aglomeran. Esta región interna es referida como la *trampa de energía*, pues los coloides pueden considerarse como sistemas unidos por fuerzas de Van der Waals.

Dependiendo de los propósitos es posible alterar el entorno del coloide para aumentar o disminuir la barrera energética. Varios métodos pueden ser usados para este propósito, tales como cambios en la atmósfera iónica, el pH o agregando compuestos activos para afectar directamente la carga del coloide. En cada caso la medida del potencial zeta indicará el efecto de la alteración, principalmente en su estabilidad.

La Tabla 4 está basada en la experiencia con muchos sistemas floculados y dispersados. Esta tabla describe la relación entre el potencial zeta y la probable respuesta de la suspensión

**Tabla 4.** Relación entre la estabilidad y el potencial zeta.

<b>Características de estabilidad</b>	<b>ZPC promedio (mV)</b>
Máxima aglomeración y precipitación	+3 a 0
Excelente aglomeración y precipitación	-1 a -4
Regular aglomeración y precipitación	-5 a -10
Umbral de aglomeración	-11 a -20
Meseta de leve estabilidad (baja aglomeración)	-21 a -30
Estabilidad moderada (no hay aglomeración)	-31 a -40
Buena estabilidad	-41 a -50
Muy buena estabilidad	-51 a -60
Excelente estabilidad	-61 a -80
Máxima estabilidad	-81 a -125

Fuente: Manual, disponible en: [www.zeta-meter.com](http://www.zeta-meter.com)

### **3.4. CLASIFICACIÓN Y USOS DE LAS ARCILLAS**

Las arcillas raramente están presentes como minerales puros, generalmente son mezclas de los diversos tipos de arcilla. Las características físicas de las arcillas, que determinan su valor comercial, dependen de sí o no los varios tipos de arcillas están mezclados, qué tipos de arcillas están presentes y sus porcentajes, el porcentaje y composición de los materiales no arcillosos presentes, y otros factores.

La utilización de la arcilla como materia prima, requiere que la arcilla tenga una gama estricta de características para cada industria. Por lo tanto, un fabricante del ladrillo desea una fuente de gran capacidad de arcilla, que

tenga un porcentaje bajo de hinchamiento, un color constante de cocción, y una temperatura relativamente baja de cocción, etc. Un fabricante de papel tiene una prueba específica de la blancura que cualquier caolinita debe pasar antes de que pueda ser utilizada en la fabricación de papel de alta calidad.

Ya que los depósitos individuales de arcilla pueden ser únicos debido a sus modos específicos de formación y de las características físicas de cualquier mezcla dada de arcillas, la industria clasifica generalmente la arcilla por las características que determinan su uso.

Es por esto que la clasificación de las arcillas, es una tarea difícil que conduce a distintos resultados según sea el punto de vista geológico, mineralógico, referido a las propiedades o de acuerdo con el uso.

Según la clasificación mineralógica, los tipos de arcilla están dados por el mineral arcilloso predominante: arcillas caoliníticas, illíticas, montmorilloníticas, etc. Por otro lado si existen dos o más minerales arcillosos la clasificación se establece considerando los minerales mayoritarios. Así, por ejemplo, se encuentran las arcillas illítico – caoliníticas, las caoliníticas – halloysíticas, etc.

La clasificación para arcillas industriales adoptada por el U. S. Bureau of Mines es la siguiente:

- Caolines
- Arcillas ball (plásticas)
- Arcillas refractarias
- Bentonitas
- Fuller's earth
- Arcillas comunes

**3.4.1. Arcillas ball** (plásticas). Abarca una serie desde refractarias a no refractarias. El color varía del blanco al negro según el contenido orgánico. El mineral de arcilla es la caolinita, pobremente cristalizada, con mica hidratada y cuarzo; tiene un grano mas fino que en el caolín y su contenido de sílice y álcalis es generalmente mayor. La mayoría de las arcillas son plásticas en algún grado cuando se las mezcla con agua, desde las altamente plásticas (grasas) hasta las poco plásticas (magras).

Se utilizan en cerámica blanca, revestimientos blancos, azulejos, sanitarios, elementos para electricidad y producción de chamota, fundamentalmente.

Mineralógicamente se caracterizan por la mayor proporción de caolinita, con montmorillonita subordinada, si bien puede incluir halloysita y cantidades menores de illita y pirofillita. Otros minerales no arcillosos que las integran son cuarzo, feldespato, mica y vidrio volcánico y también contenidos pequeños de minerales de hierro.

**3.4.2. Arcillas refractarias.** Son todos los tipos de arcillas con un punto de fusión de al menos 1.650° C (Helmut, 1980), aunque otros autores postulan 1.434 °C. El punto de fusión de estas arcillas está ligado esencialmente al porcentaje de caolinita presente (1.785° C para la caolinita pura).

**3.4.3. Fuller's earth.** Se llama tradicionalmente así a las arcillas que tienen un alto poder blanqueador y decolorizador en aceites, grasas y ceras de origen animal, vegetal, mineral o sintético. Las *fuller's earth* son arcillas altamente absorbentes, cuyo principal mineral arcilloso constituyente es la paligorskita y/o sepiolita. Otros minerales de arcillas como esmectitas de Ca e illita-esmectitas pueden tener también este poder decolorizante.

**3.4.4. Arcillas comunes.** No refractarias, funden entre los 1.000 y 1.200° C como consecuencia de su alto contenido de fundentes (álcalis y compuestos de hierro). Su composición incluye principalmente diversas cantidades de illita, caolinita y montmorillonita. Otros componentes pueden ser: cuarzo, moscovita, feldspatos, biotita, glauconita, pirita, óxidos de hierro y sustancias orgánicas. Este nombre fue propuesto por el U. S. Bureau of Mines para designar al grupo de arcillas, de variada composición mineralógica y química, cuya demanda industrial es amplia, su precio es bajo y su uso se circunscribe, principalmente, a la manufactura de materiales de construcción tales como ladrillos, tejas y todos los productos de cerámica roja.

**3.4.5. Arcilla bentonita.** Nombre comercial de las arcillas tipo montmorillonita, las que, tratadas con compuestos químicos aminados (p. ej. dodecilamonio) se vuelven repelentes al agua -hidrofóbicas-, aunque mantienen gran afinidad por las especies orgánicas, en particular los aceites, las grasas y los colorantes o pigmentos naturales. El nombre bentonita proviene de Fort Benton, Wyoming, EUA, donde W. C. Knight descubrió un enorme yacimiento de este tipo de arcilla en 1896.

**3.4.6. Caolines.** Las rocas denominadas "caolines" son silicatos de aluminio hidratados  $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ . Están constituidas mayoritariamente por uno de los siguientes minerales: caolinita, haloisita, dickita y nacrita. El más común de todos ellos es la caolinita, aunque los restantes forman ocasionalmente depósitos explotables comercialmente. El caolín es una arcilla blanca después de la cocción, que tiene numerosos usos y requiere a su vez de varias especificaciones para poder utilizarlo.

### **3.5. ARCILLAS COMO MATERIALES ADSORBENTES**

Debido a sus propiedades físico – químicas y a su bajo costo, las arcillas naturales están siendo estudiadas como materiales adsorbentes para el tratamiento de efluentes industriales que contienen metales pesados, sustancias radiactivas y contaminantes orgánicos como pesticidas, herbicidas, fertilizantes y otras sustancias sintéticas.

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

Los trabajos realizados hasta el momento demuestran que las arcillas son unas buenas candidatas para ser modificadas en busca de mejores propiedades para la adsorción de cationes debido a su composición superficial y capacidad de intercambio catiónico. Esta técnica ya se ha llevado a gran escala; en 1999 Montana Techo of the University of Montana y MSE Technology Applications, Inc. presentaron para U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development el estudio de remoción de metales pesados a nivel de escala piloto utilizando caolín modificado como material adsorbente [6].

### **3.6. PROCESOS DE BENEFICIO DE LAS ARCILLAS**

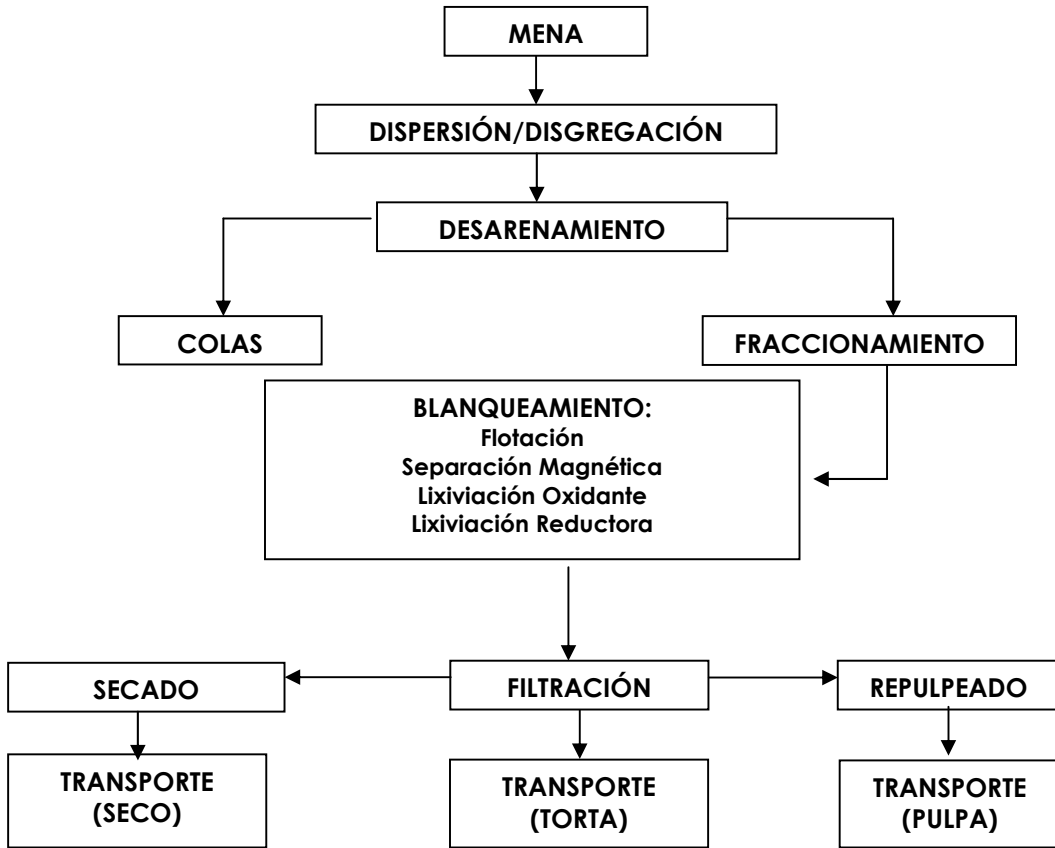
La pureza de las arcillas es un concepto bastante ambiguo, sin embargo, esta se suele relacionar con la ausencia de minerales o componentes distintos a los

propios de los minerales de arcilla (caolinita, illita, montmorillonita, 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.

Recién explotadas las arcillas son mas bien silíceas, con elevado contenido de impurezas, tales como óxidos y sulfuros de hierro, óxidos de titanio (anatasa, rutilo), mica, feldespatos, materia orgánica, entre otros, siendo en general el porcentaje de mineral arcilloso inferior incluso al 20%.

Básicamente los procesos utilizados en el beneficio de las arcillas se clasifican en dos, de acuerdo a la calidad de las arcillas, seco y húmedo [8]. El beneficio por vía seca es simple y generalmente consta de trituración, secado, pulverización y clasificación neumática. El beneficio por vía húmeda en términos generales consta de: dispersión/disgregación, desarenamiento/clasificación, separación magnética de alta intensidad, flotación, lixiviación, filtración y secado. Esto se muestra en forma de flujograma en la Figura 7.

**Figura 7.** Flujoograma general simplificado del beneficio en húmedo de arcillas caoliníficas



Fuente: BENVINDO DA LUZ, Adão. ESTUDO DE REOXIDACAO E REDUCAO DE FERRO CONTENIDO EM CAULINS. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas. São Paulo. 1998.

**3.6.1. Dispersión / disgregación.** En este proceso se aprovecha la naturaleza coloidal de las arcillas, en donde se busca maximizar las fuerzas repulsivas entre partículas, para así producir pulpas estables; ya que las repulsiones mutuas entre partículas adyacentes impiden la unión de grandes y rápidas sedimentaciones de aglomerados arcillosos, logrando así una pulpa con menor viscosidad y mayor facilidad de trabajo para su posterior tratamiento.

Cuando las arcillas naturales se dispersan en agua tienen tendencia a aglomerarse a menos que estén adecuadamente desfloculadas. Este hecho genera suspensiones con un comportamiento excesivamente viscoso y tixotrópico que imposibilita su uso.

La tendencia a la aglomeración de las partículas arcillosas, como antes se ha señalado, dependerá del balance de fuerzas a las que se hallen sometidas. En consecuencia, los aditivos utilizados en la desfloculación tendrán como propósito modificar la intensidad de dichas fuerzas.

Uno de estos mecanismos consiste en aumentar la repulsión mediante la modificación de la carga superficial existente en las partículas, lo que puede conseguirse fácilmente cambiando el pH del medio. Como ya se indicó, los bordes de los cristales muestran un carácter anfótero.

Otro de los procedimientos utilizados habitualmente consiste en modificar el potencial zeta mediante la introducción de cationes que en forma solvatada sean grandes y poco cargados. Estos cationes proporcionan un potencial zeta elevado, debido a su limitada capacidad para reducir el potencial eléctrico en las proximidades de las partículas, lo que equivale a un gran poder desfloculante. Hofmeister dispuso los cationes ordenados en función de su capacidad de desfloculación <sup>[1]</sup>; dicha serie, ordenada en grado creciente, es la siguiente:



Sin embargo, la adición de un electrolito en exceso no es un método práctico para desflocular, ya que reduce el potencial zeta, denominándose este fenómeno hiperdesfloculación o sobredesfloculación.

Finalmente, se debe indicar que cuando se introducen en la suspensión aniones en exceso, estos también se pueden adsorber sobre las partículas arcillosas, incrementando su carga eléctrica negativa. Sin embargo, se ha demostrado que, para la mayor parte de los aniones, este efecto de adsorción está muy limitado y solo se verifica para algunos aniones de elevada carga.

Los desfloculantes o dispersantes habitualmente utilizados en la industria cerámica son electrolitos en los que tanto el catión como el anión contribuyen a aumentar la estabilidad coloidal de las partículas. Estos desfloculantes son siempre sales sódicas (o amónicas en ciertos casos), debido a que este contra-ión proporciona un elevado potencial zeta.

En la Tabla 5 se muestran los mecanismos de actuación de algunos de los desfloculantes más comunes.

Uno de los reactivos más utilizados durante años ha sido el carbonato de sodio. Como se indica en la Tabla 5, este electrolito actúa modificando la carga superficial de las partículas e introduciendo iones desfloculantes ( $\text{Na}^+$ ).

El silicato de sodio es un desfloculante más energético que el anterior ya que, además de introducir iones  $\text{Na}^+$  y aumentar el pH, forma un coloide protector que impide que las partículas se acerquen

**Tabla 5.** Mecanismos de actuación de algunos desfloculantes [1]

	Electrostático			Estérico
	Adición De Cationes Desfloculantes	Eliminación De Cationes Floculantes	Modificación De Carga Superficial	
Silicato Sódico	■	■	■	■
Carbonato Sódico	■	■	■	
Fosfatos	■	■	■	■
Poliacrilatos	■		■	■
Huminatos	■		■	■

Fuente: BARBA, Antonio. BELTRÁN, Vicente. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. Instituto de tecnología cerámica. Graficas Castaño, S.L. España. 1997.

El silicato sódico puede causar la floculación cuando la arcilla esta contaminada con yeso (sulfato cálcico) debido a la doble descomposición que tiene lugar entre el electrolito y la sal, con formación de silicato cálcico insoluble y sulfato sódico muy soluble. Como resultado de esta reacción, los iones sulfatos libres pueden reemplazar a los iones hidroxilos de la doble capa, reduciéndose el potencial zeta, lo que origina la floculación de la suspensión. Este hecho se evita mediante la adición de una cantidad pequeña de hidróxido de bario, que forma sulfato de bario insoluble.

Actualmente la dispersión se realiza a nivel industrial, por un proceso conocido como attriti3n scrubbing o atrición por agitación. Aunque en los últimos años

han surgido algunas tentativas para el uso del tratamiento ultrasónico en la industria minera.

**3.6.1.1. Atrición por agitación.** La atrición por agitación emplea una alta energía de mezclado, impartiendo una acción de frotamiento sobre la pulpa. Este mezclado resulta en un frotamiento vigoroso partícula - partícula en un ambiente elevado en sólidos. Los mayores efectos de este frotamiento de partículas incluyen limpieza, dispersión y desintegración. La limpieza remueve capas o películas de material fino de granos individuales y produce la limpieza de su superficie, y la dispersión de la pulpa es el resultado de la desintegración de las partículas aglomeradas.

**3.6.1.2. Ultrasonido.** Es bien conocido que el tratamiento ultrasónico es generalmente usado en la limpieza de superficies metálicas. Recientemente, han surgido algunas tentativas para el uso de tratamiento ultrasónico en la industria minera, principalmente en la flotación, tamizado, molienda, limpieza, separación y remoción de partículas finas de gases o líquidos. Un beneficio substancial del ultrasonido en procesos mineros puede ser la remoción de capas superficiales y esto puede ser alcanzado a través de largas pero muy localizadas fuerzas de cavitación.

El sonido viaja atravesando un fluido como ondas de presión en tres dimensiones las cuales consisten de ciclos alternos de compresión y descompresión. El rango de frecuencia de 20 a 100 kHz representa el rango comúnmente usado por fuentes ultrasónicas. Durante el ciclo de descompresión la presión negativa desarrollada por la fuente ultrasónica supera las fuerzas intermoleculares presentes en el fluido, dando como resultado la formación de microburbujas. El ciclo de compresión siguiente es casi instantáneo, liberando una muy larga pero localizada explosión de

energía. Este proceso es conocido como cavitación y es el mismo que el colapso y formación de burbujas en la proximidad de los impellers, donde la cavitación fue por primera vez observada.

El más simple efecto de liberar energía por cavitación es ayudar a limpiar la superficie de los minerales suspendidos en pulpa. Un efecto más complejo puede ser alterar la superficie química del mineral, de tal modo que afecte su respuesta a otras sustancias en solución o régimen de separación física. Finalmente cuando es usada en procesamiento de minerales la cavitación también puede cambiar la composición de algunos reactivos y la del agua misma (formación de peróxidos).

Varios investigadores han mostrado que campos acústicos intensivos pueden modificar el estado de un material conduciendo a efectos químicos y de dispersión, los efectos químicos están caracterizados por cavitación y están acompañados por incrementos locales de presión y temperatura. Por otro lado efectos dispersantes son realizados cuando el ultrasonido es aplicado a la pulpa conteniendo estabilizadores tales como surfactantes y esto resulta en la formación de emulsiones. La aplicación ultrasónica en este camino mejora la efectividad del reactivo debido a una distribución mas uniforme de éste en la solución y también da realce de la actividad de los químicos usados.

Disminución de la viscosidad y disminución de la tensión superficial debido a la vibración ultrasónica son otros posibles mecanismos. La energía ultrasónica es también parcialmente adsorbida por el medio y convertida en calor, la generación de calor y el subsecuente aumento de temperatura disminuirán la viscosidad y la tensión superficial del fluido.

**3.6.1.3. Desarenamiento o clasificación Volumétrica.** Consiste en la eliminación de partículas de tamaño grueso como el cuarzo, donde se aprovecha la fuerza de gravedad y la diferencia de tamaños entre minerales. La clasificación volumétrica se efectúa a escala de laboratorio y a escala industrial según dos métodos:

- Por vía directa, utilizando unas aberturas de dimensiones y formas dadas; este método es válido para cortes granulométricos en general superiores a 0.2 – 0.5 mm.
- Por vía indirecta, por sedimentación diferencial en un fluido; este método se utiliza en un campo comprendido entre 1 mm y algunas micras.

**3.6.2. Cribado o clasificación directa.** El cribado es una operación que comienza desde la salida de la mina y que se sucede en las diversas etapas de la fragmentación. Se realiza sobre cribas o tamices, aparatos que presentan unas aberturas de dimensiones dadas, y cuya finalidad es la de separar el producto en dos fracciones: el rechazo y el que pasa a través del vibrante.

**3.6.2.1. Técnicas de cribado fino.** Se pueden señalar tres técnicas interesantes que permiten cribar finamente, incluso por vía seca.

- Procedimiento Rhewum: consiste, para las cribas electromagnéticas, en superponer unas armónicas de frecuencias muy elevadas (> 1 000 Hz) obtenidas por vibración electromagnética u onda sonora, a la vibración sinusoidal principal (50 ó 100 Hz) de forma que cada hilo metálico del tamiz vibre independientemente de los otros. Se combate así eficazmente los fenómenos de obstrucción o cegado y se puede tamizar hasta 50 micras por vía húmeda.

- Procedimiento Mogensen: el principio base de este procedimiento consiste en utilizar una serie de tamices de mallas semejantes y de pendientes cada vez mayores (hasta 100% aproximadamente). Las ventajas son las siguientes:
  - Se puede obtener un cribado fino (hasta 100 micras) utilizando unos tamices de mallas mucho más gruesas que la dimensión de la separación deseada.
  - 
  - Por este hecho, los caudales de producción aceptados son importantes y los riesgos de atascos o obturación muy bajos, a pesar de que el aparato puede tratar materiales bastantes húmedos (arcillas al 7% de humedad con calefacción eléctrica de telas).
- Parrillas curvas: este tipo de parrillas han generado un desarrollo importante en el cribado, ya que poseen un caudal específico, diez veces superior al de los aparatos clásicos de tamizado. Es posible utilizar rejillas curvas cuyas distancias entre barrotes pueden escalonarse de 40 mm a 40 micras.

**3.6.3. Sedimentación o clasificación indirecta.** La resistencia ofrecida por un fluido al desplazamiento de un sólido se utiliza para la clasificación por sedimentación.

Existen dos tipos de sedimentación llamados sedimentación libre y sedimentación obstaculizada según la abundancia de partículas sólidas en la pulpa. Por definición, el límite entre la sedimentación libre y la sedimentación obstaculizada viene dado por una proporción igual al 5% en volumen de sólidos en el fluido. Para los valores inferiores al 5% se encuentra en el campo

de la sedimentación libre y para los valores superiores, en el campo de la sedimentación obstaculizada.

Los siguientes procesos se aplican principalmente para el blanqueamiento de las arcillas en especial de los caolines.

**3.6.4. Separación magnética.** La separación magnética de alta intensidad (campo cerca de 15 000 Gauss) es una técnica convencional empleada en el beneficio del caolín, para la remoción de óxidos de hierro, óxidos de titanio (rutilo y anatasa) y a algunos tipos de micas. Mas recientemente y con esa misma finalidad, se han desarrollado los separadores magnéticos a base de superconductores y con sistema de criogenia, con un flujo considerable hasta de 50 000 Gauss. Su aplicación es forzosamente limitada.

**3.6.5. Flotación inversa.** Consiste en la remoción de impurezas de óxidos de hierro y titanio. Una de las referencias sobre la flotación inversa de arcillas para la remoción de impurezas minerales de titanio férricos proviene de la patente de Iñeek (1951). Este investigador usó una emulsión de un ácido graso y una amina de ácido graso (una combinación de iones positivos y negativos) como colector en una pulpa de arcilla defloculada. Desde entonces el proceso tuvo varias modificaciones y alteraciones. Un nuevo concepto de flotación fue introducido por Greenet y otros (1961), el cual es conocido actualmente como flotación con cargador o ultraflotación. En este proceso el acondicionamiento del caolín es logrado por dos reactivos esenciales, el colector y el mineral auxiliar (calcita). Las disoluciones de los iones de calcio actúan como activador sobre la superficie del mineral para la absorción del colector, en donde las impurezas minerales son atrapadas, y posteriormente son arrastradas en las burbujas de aire y finalmente flotadas.

Una importante condición para realizar la flotación es el desprendimiento y liberación de las impurezas minerales desde la superficie/ interfase de las partículas de arcilla, el cual es alcanzado por impactos de alto corte impartido durante el acondicionamiento preflotación con el dispersante. El concepto de corte – acondicionamiento (agitación) de la arcilla antes de la flotación, con el dispersante, colector y un activador para minerales de titanio fue propuesto por Cudby (1969). Sin embargo, después de la patente de Cudby, todos los trabajos siguientes para la flotación de minerales titanio féreos de arcillas invariablemente consistió en un acondicionamiento pre flotación. Ángel y otros (1997) de la misma manera concluyeron que el acondicionamiento de alta intensidad antes de la flotación es el resultado de un tratamiento mecánico – químico en la aglomeración de los finos a los flóculos; al mantener la alta velocidad de corte ayuda a incrementar la cobertura de la superficie de los flóculos, lo cual mejora la flotación. Ion y Hilderbrand (1986) y más tarde Wang y Nagaraj (1987) extendieron esto a los caolines y observaron que los hidroxamatos exhibían mejor selectividad y que no necesitaban de un activador para la flotación. El preacondicionamiento de alto corte con dispersante y el colector es esencial para la flotación con hidroxamatos. Ellos pudieron incluso beneficiar satisfactoriamente los caolines de East Georgia en los cuales se dificultaba su proceso al usar ácidos grasos por la extrema fineza de estas arcillas (90% menor a 2micras). De aquí se puede observar que existen muchos métodos para la remoción de titanio féreos en el caolín y por tanto no existe un único método. Esto conlleva a posteriores y continuas investigaciones.

**3.6.6. Lixiviación.** Considerables estudios han sido dirigidos hacia la remoción de contaminantes de hierro por métodos físicos y químicos. Sin embargo, los procesos de separación física como la flotación son generalmente menos eficientes para la remoción de hierro que la lixiviación química. La lixiviación

ácida reductiva es una de las más conocidas y empleadas en los procesos químicos de beneficio de minerales de interés industrial. La lixiviación ácida convencional con difionito de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ) empleada para la lixiviación de estos minerales no siempre permite obtener una alta calidad de las arcillas caoliníficas; por esta razón en algunos casos se hace necesaria la lixiviación ácida convencional ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  o  $\text{HCl}$ ), pero esta es costosa y los efluentes obtenidos son ecológicamente inaceptables.

Estudios recientes de alternativas para la remoción de hierro consiste en el desarrollo de procesos biotecnológicos ecológicamente aceptables (eco – amigos). Dentro de estos procesos, está bien establecido que el ácido oxálico es un agente lixivante potencial para disolver metales pesados de varios minerales incluyendo arcillas y caolines. N.J. Saskia, D.J. Bharali, P. Sengupta, D. Bordoloi, R. L. Goswamee, P.C. Saskia, P.C. Borthakur (2003) <sup>[9]</sup> compararon la efectividad de varios lixiviantes orgánicos para lo cual encontraron el siguiente orden de efectividad: ácido oxálico > ácido oxálico + EDTA > Malonic > ácido cítrico. Demostrando que al menos todo el hierro no estructural puede ser removido a temperatura ambiente usando una solución de ácido oxálico 0.4 M.

### **3.7. PLANTAS DE BENEFICIO DE ARCILLAS**

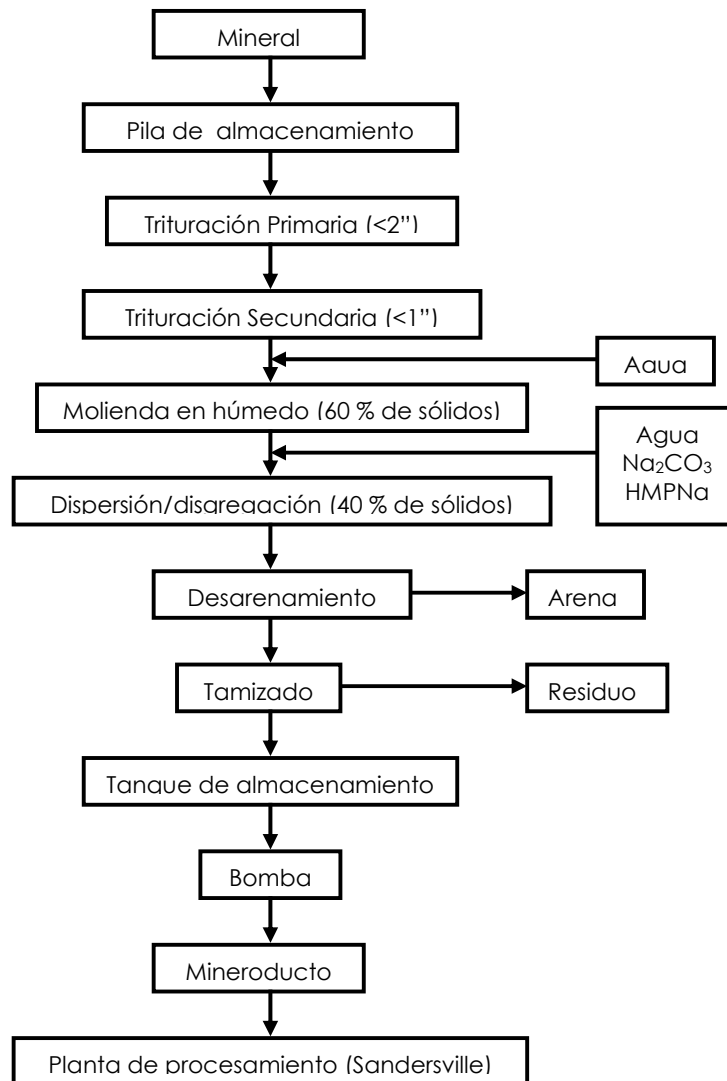
Al considerar los circuitos de procesamiento de minerales, hay un factor particularmente significativo; cada mineral es único, y por lo tanto requiere de un diagrama de proceso único para obtener el rendimiento óptimo <sup>[2]</sup>.

Actualmente, dependiendo de las características de las menas arcillosas y de los requisitos en cuanto a composición química y mineralógica para su uso en las distintas aplicaciones de las cuales participan, se encuentran desde

simples hasta complejos sistemas de beneficio, tal como el de la planta de beneficio de caolín de AMAZÔNIA S.A – CADAM en el estado de Pará Brasil <sup>[7]</sup> Figura 8, y las plantas de Reedy Creek y Sandersville Geórgia-EUA. Figuras 9, 10 y 11 respectivamente.

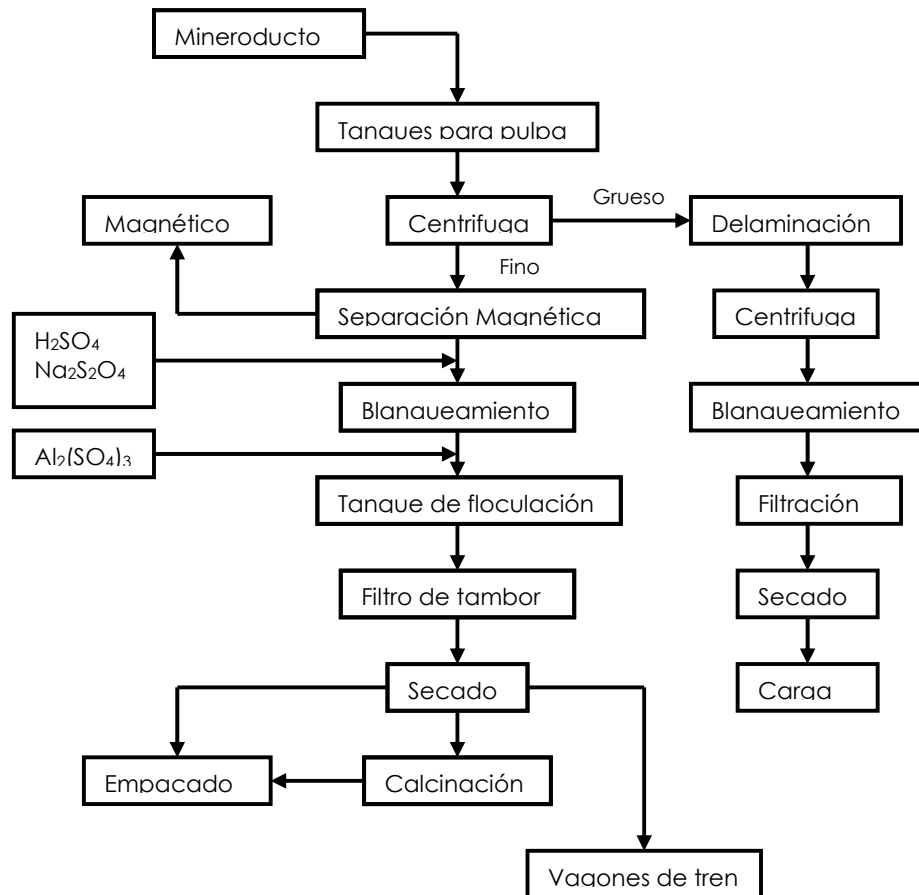


**Figura 9.** Planta de procesamiento de caolin de Sandersville-Geórgia-EUA.



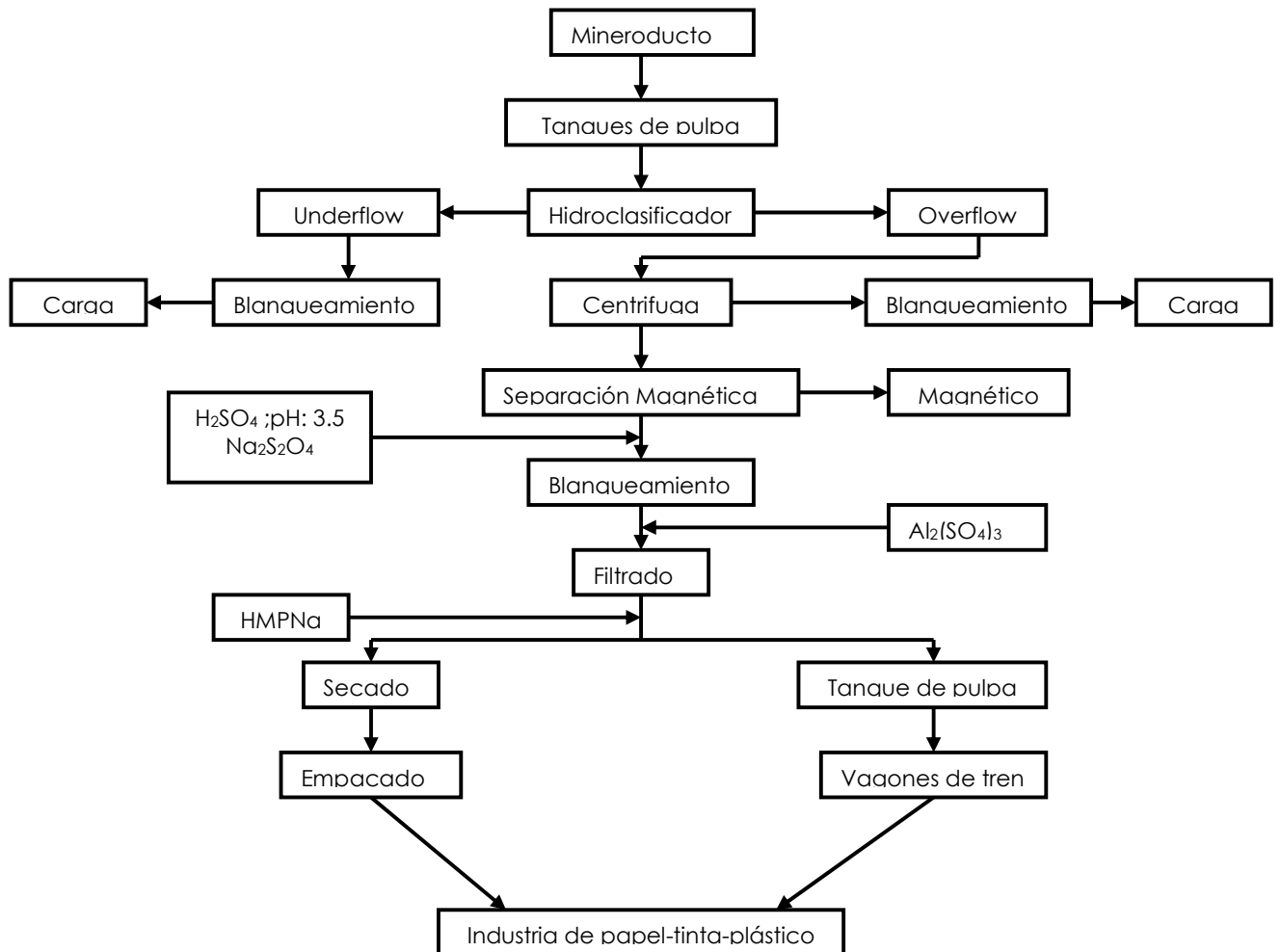
Fuente: BENVINDO DA LUZ, Adão. CHAVES P., Arthur. TECNOLOGÍA DEL CAOLÍN: ENFOQUE A LA INDUSTRIA DEL PAPEL. Serie rocas e indústrias minerales. Corpo editorial. Cetem. Brasil. 2000.

**Figura 10.** Planta de procesamiento de caolín de Sandersville-Geórgia-EUA.



Fuente: BENVINDO DA LUZ, Adão. CHAVES P., Arthur. TECNOLOGÍA DEL CAOLÍN: ENFOQUE A LA INDUSTRIA DEL PAPEL. Serie rocas e indústrias minerales. Corpo editorial. Cetem. Brasil. 2000.

**Figura 11.** Planta de procesamiento de caolín de Reedy Creek, Geórgia-EUA.



Fuente: BENVINDO DA LUZ, Adão. CHAVES P., Arthur. TECNOLOGÍA DEL CAOLÍN: ENFOQUE A LA INDUSTRIA DEL PAPEL. Serie rocas e industrias minerales. Corpo editorial. Cetem. Brasil. 2000.

## 4. DESCRIPCIÓN DE LA MINA

### 4.1. LOCALIZACIÓN

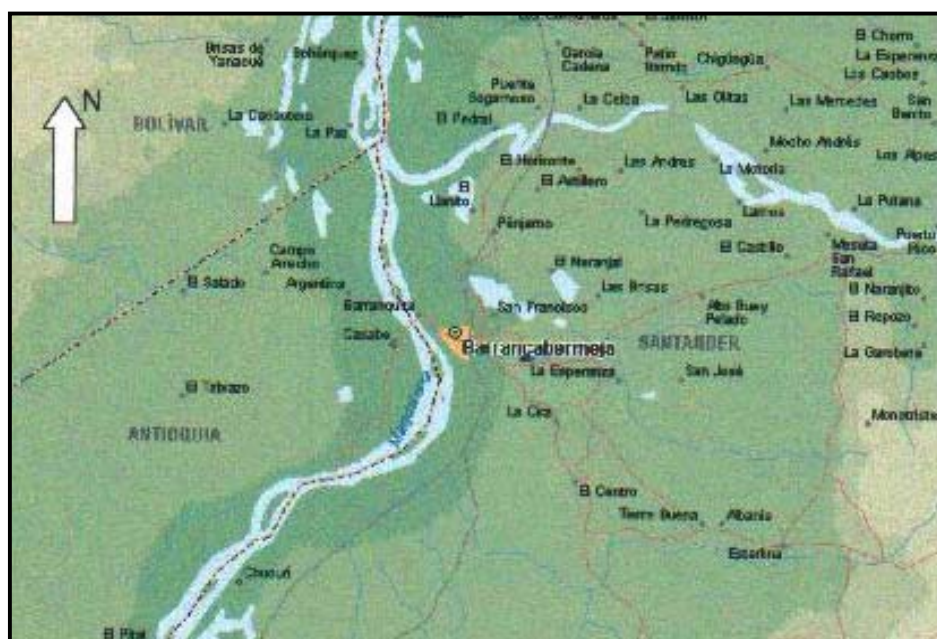
La mina se encuentra ubicada en el municipio de Barrancabermeja (Santander) por la margen izquierda de la autopista Barrancabermeja – Bucaramanga (Figura 12), a la altura del kilómetro 4 + 500 m por una vía carreteable que conduce hacia el relleno sanitario la Esmeralda e intercepta la carretera nacional. Estos terrenos hacen parte de la cuenca sedimentaria del valle interandino del Magdalena Medio entre las cordilleras central y occidental.

Las coordenadas geodesicas del sitio son:

X: 1.272.800

Y: 1.029.000

Figura 12. Localización del sector.



## 4.2. RESERVAS DE LA MINA

El dato de las reservas de la mina esta basado en estudios anteriores realizados a esta misma [25].

El área de aprovechamiento consta de tres sectores tal como se muestra en la Figura 13, que concentran el volumen de reservas del deposito arcilloarenoso apto para la explotación del producto comercial de la empresa. Las labores exploratorias de superficie y de subsuelo para el año 2004 fueron realizadas en los sectores mencionados y permitieron llevar acabo la estimación de las reservas tanto en volumen como caracterización de calidad de la misma.

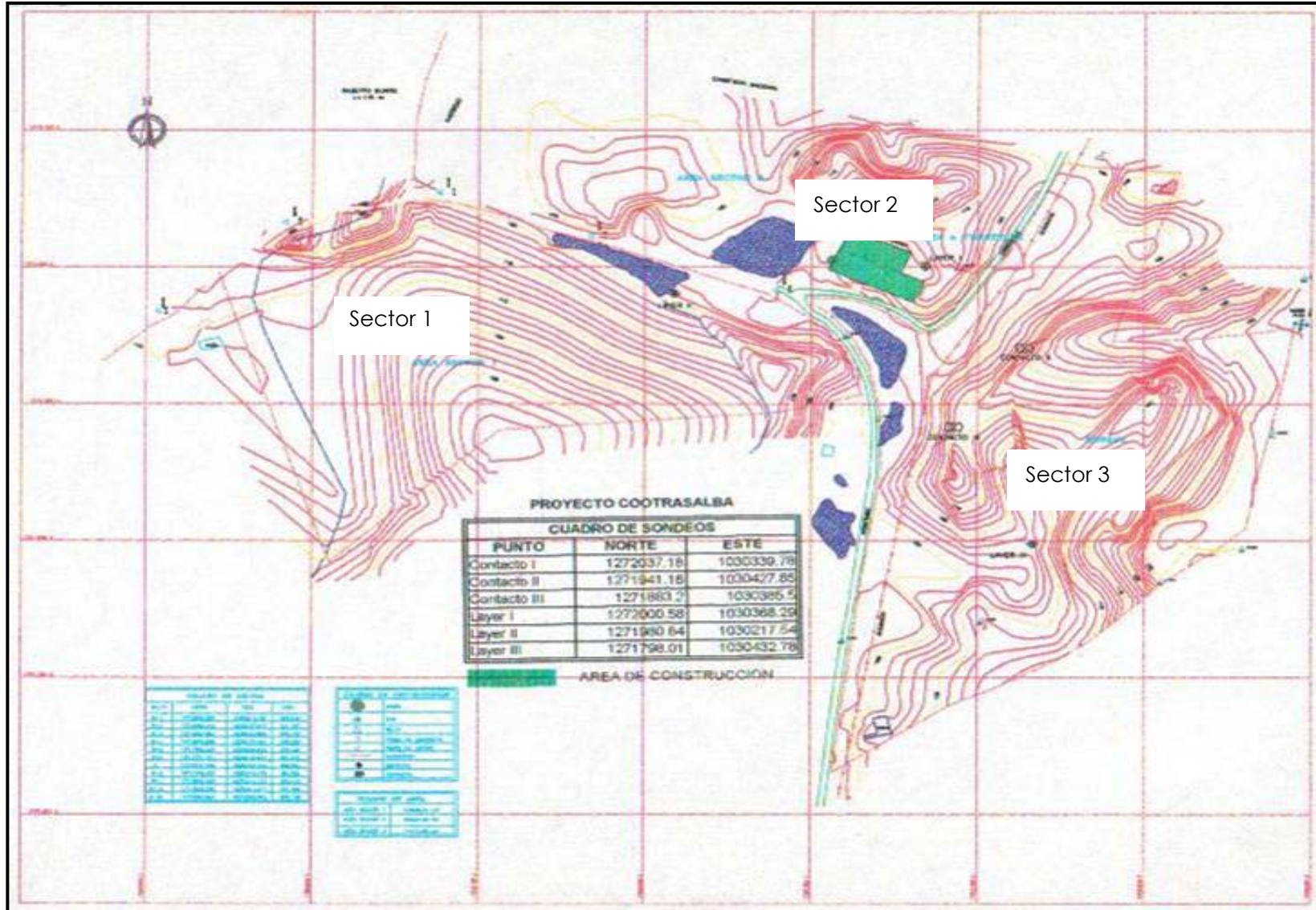
La estimación de las reservas totales fue realizada mediante el método de perfiles o secciones y son mostradas en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Reservas explotables de los tres sectores.

SECTOR	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	TONELAJE
1	493.782,76	1.007.002,89
2	368.386,38	806.769,16
3	87.798,70	192.278,79
TOTAL	949.967,84	2.076.050,81

A continuación, en la Figura 13 se muestra los tres sectores de explotación que se encuentran en la mina.

**Figura 13.** Mapa cartográfico de los sectores de explotación.



En la Tabla 7 se muestra las reservas para el Sector 1 que es el que actualmente se está explotando.

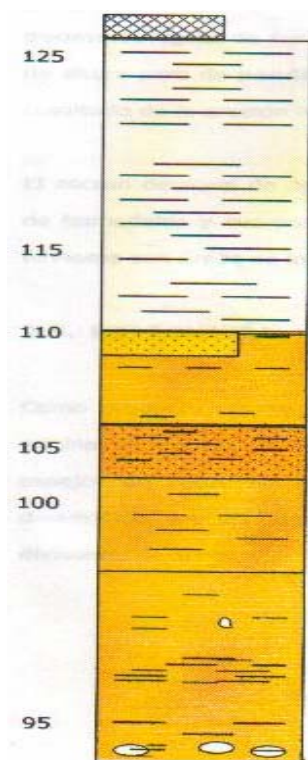
**Tabla 7.** Reservas explotables del Sector 1.

<b>COTA</b>	<b>AREA (m<sup>2</sup>)</b>	<b>H (m)</b>	<b>VOLUMEN (m<sup>3</sup>)</b>	<b>TONELAJE</b>
105	47.118,87	2	94.237,34	206.379,77
107	43.835,45	2	87.670,90	191.999,27
109	39.365,44	2	78.732,88	172.425,00
111	34.651,82	2	69.303,64	151.774,97
113	23.210,97	2	46.421,94	101.664,04
115	17.680,40	2	35.360,80	77.440,15
117	13.759,14	2	27.518,28	55.885,03
119	10.516,33	2	21.032,66	46.061,52
121	7.672,30	2	15.344,60	33.603,36
123	5.133,65	2	10.267,30	22.485,38
125	2.915,39	2	5.830,78	12.769,40
127	1.030,52	2	2.061,64	4.514,99
<b>TOTAL</b>	<b>246.891,36</b>		<b>493.782,76</b>	<b>1.007.002,89</b>

Se asumió unas pérdidas del 10 % por aspectos de explotación, transporte, manipulación durante el proceso de fabricación del producto, por lo cual las reservas totales explotables son del orden de 1.868.445,73 ton de material arcilloso.

En la Figura 14 se muestra la columna litológica del sector de explotación 1, con la respectiva información mineralógica de los tramos.

**Figura 14.** Columna litológica del depósito.



Suelo aluvial limo-arcilloso

*Tramo 1*

Arcillolita: pardo rojiza moteada, plasticidad media, compactación medio a alta, humedad baja a media.

*Tramo 2*

Arenisca: cuarzo feldespático de grano grueso a medio, blanda a friable.

Nivel de arenisca cuarzo feldespático.

*Tramo 3*

Arcillolita. Abigarrada compactación media. plasticidad alta. humedad media.

*Tramo 4*

Conglomerado de guijas y guijarros de cuarzo, limonita y componentes líticos en matriz de limo y arcilla blanda.

### 4.3. MUESTREO DEL MINERAL

Solo es posible la explotación de los sectores 1 y 3 ya que en el sector 2 esta limitada la extracción de mineral debido a que por allí cruza la línea del oleoducto de ECOPETROL y según normas de seguridad se debe dejar una franja que proteja dicha infraestructura. Actualmente solo está siendo explotado el sector 1; por tal motivo el muestreo se realizó solamente en este último sector.

El muestreo del mineral fue realizado con base en la extracción actual del mineral en la mina, la cual consiste en barrer en forma columnar (vertical y

descendente) cada frente de tal manera que se consiga la mezcla de minerales que se observa en la columna litológica (ver Figura 14). Por lo tanto se procedió a recolectar muestra de cada tramo de la columna litológica, se mezcló y se cuarteó manualmente de tal manera que se obtuviera una muestra representativa de dicho sector de explotación.

## 5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El proyecto se desarrolló a través de una serie de etapas, las cuales consistieron en:

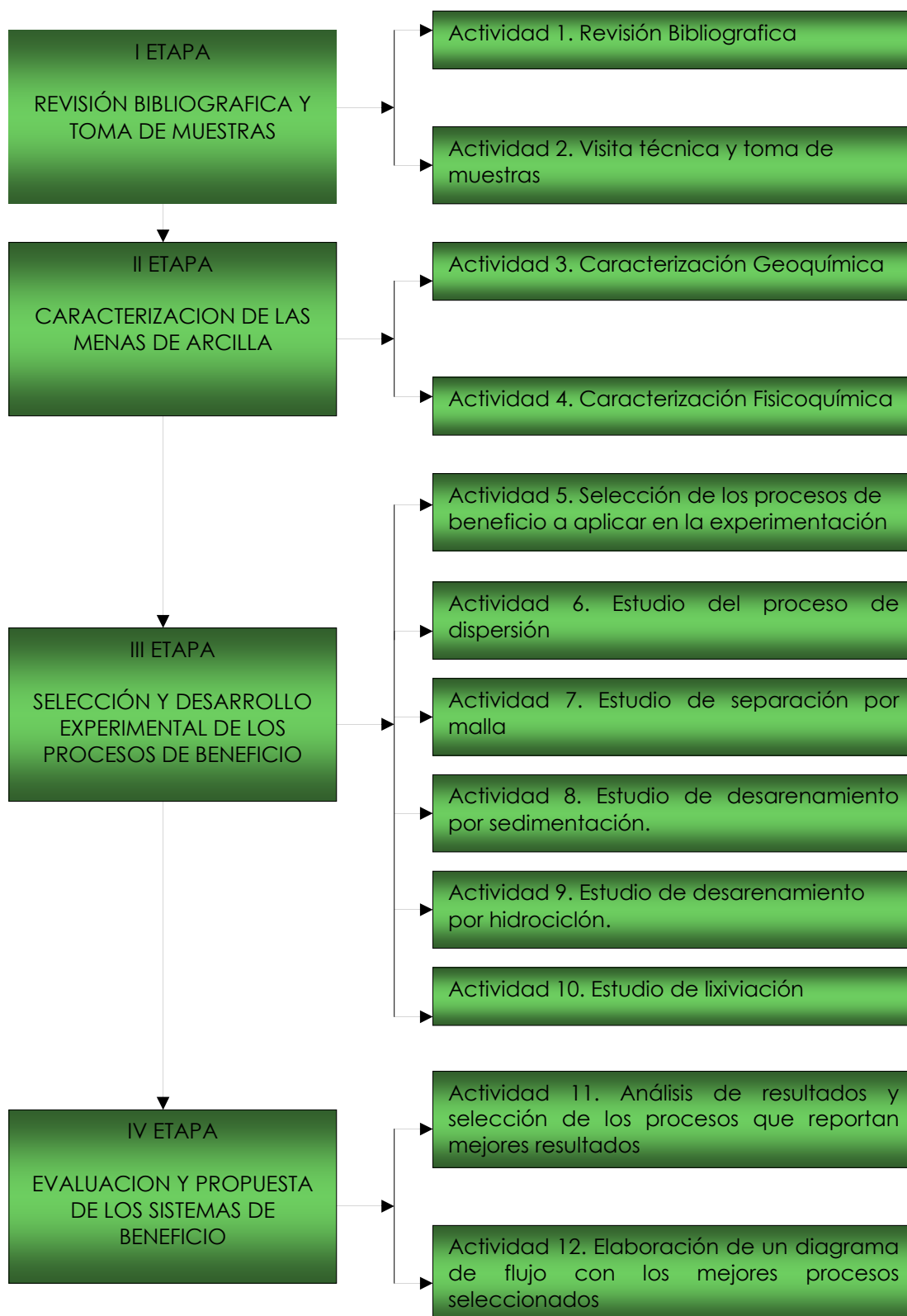
- Revisión bibliográfica.
- Caracterización de las menas.
- Selección del proceso de beneficio.
- Desarrollo experimental.
- Propuesta del circuito de beneficio.
- Socialización de los resultados.

Adicional a las etapas anteriores se realizó una visita técnica de campo, con el objetivo de tener un conocimiento más detallado del yacimiento de la mena en estudio, y hacer la toma de muestras necesarias para llevar a cabo esta investigación.

En este trabajo se estudió con mayor detalle el comportamiento del mineral en el proceso de dispersión y sedimentación, pues fue necesario comprobar la aplicabilidad de la técnica de azul de metileno como variable respuesta, en función de la capacidad de intercambio catiónico, y así buscar las condiciones adecuadas de las variables que hacen parte de este proceso.

A continuación se presenta la Figura 15, en donde se esquematiza de manera simplificada la metodología del trabajo que se desarrolló.

Figura 15. Metodología de trabajo experimental.



## **5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MENA**

Esta etapa se realizó con el fin de determinar las diferentes características de la arcilla bajo estudio, que permitan clasificarla y definir las operaciones y procesos más adecuados para su beneficio. Los métodos de análisis y ensayos utilizados para la caracterización del mineral se presentan en el Anexo A.

Las muestras recolectadas fueron secadas al ambiente y luego trituradas y molidas, hasta obtener un tamaño de partícula menor de 981  $\mu\text{m}$ . Por cuarteo se tomó una muestra representativa para realizar los posteriores análisis que se describen a continuación.

**5.1.1 Caracterización geoquímica y mineralógica.** Se determinó la composición química para la mena aplicando la Norma ASTM C 323-56 (1990). Para la determinación de las especies mineralógicas presentes en la mena se utilizó la técnica de análisis por difracción de rayos X, la cual fue realizada en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

**5.1.2 Caracterización fisicoquímica.** Se llevó a cabo con el fin de determinar los siguientes parámetros:

- Humedad.
- pH de la mena (Norma ASTM 11 D 4972 -89).
- Viscosidad.
- Densidad real (Norma ASTM C 329-88).
- Distribución granulométrica y microgranulométrica.
- Capacidad de intercambio catiónico.

- Índice de adsorción de azul de metileno (Norma C - 837 – 99)

Para la determinación del porcentaje de humedad del material (Anexo A), las muestras recolectadas del yacimiento explotado por la Ladrillera Cootrasalba, se transportaron en envases sellados con el fin de evitar la pérdida del agua presente en las muestras.

La determinación del pH de la mena se realizó preparando una pulpa al 10% de la muestra a evaluar en agua destilada. Posteriormente manteniendo la pulpa en agitación, se hizo la lectura introduciendo el electrodo del pHmetro registrando el respectivo valor.

Para la determinación de la viscosidad de las pulpas, se empleó un viscosímetro de agujas marca Brookfield (Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industria de Santander). Las medidas de viscosidad se tomaron a diferentes porcentajes de sólidos: 20, 25, 30, 35 y 40 % (relación P/V).

La densidad real del mineral se determinó por el método picnométrico, cuyo procedimiento se describe en el Anexo A.

La distribución granulométrica de la muestra, se determinó mediante la disgregación en húmedo con adición de dispersante (silicato de sodio) y posterior tamizado a través de una serie de mallas: #50 – #100 –# 200 –# 270 – #325 Tyler. La fracción de mineral pasante de la malla #325 Tyler se analizó microgranulométricamente, mediante el uso del fotosedimentador, marca LUMOSSED de propiedad de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.

El índice de adsorción fue medido usando la norma ASTM C-837 - 99 "determinación del índice de azul de metileno en arcillas" (Anexo A).

Para determinar la capacidad de intercambio catiónico de la arcilla natural se utilizó el método de acetato de amonio 1N, el cual fue realizado por el Laboratorio Químico de Suelos de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

**5.1.3. Clasificación de la arcilla.** Basados en los resultados obtenidos de la caracterización del material de la mina y la revisión bibliográfica, se analizó y clasificó el tipo de arcilla estudiada.

## **5.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO DE LA ARCILLA**

Los procesos de beneficio evaluados en este trabajo son procesos utilizados actualmente en la purificación de las arcillas. Estos fueron: Desarenamiento por malla, desarenamiento por sedimentación, desarenamiento por hidrociclón, separación magnética y lixiviación ácida.

**5.2.1. Capacidad de intercambio catiónico de materiales arcillosos.** Debido a que se esperaba aumentar la capacidad de intercambio catiónico del material beneficiado se requirió de una variable respuesta que permitiera medir dicha propiedad. Entre las técnicas que permiten medir la capacidad de intercambio catiónico están:

- Capacidad de intercambio catiónico por el método de acetato de amonio.
- Índice de azul de metileno por la técnica de adsorción de azul de metileno.

Como variable respuesta se procedió a utilizar la técnica de adsorción de azul de metileno, debido a que esta técnica es relativamente rápida, y efectiva. Está fundamentada en la norma ASTM C-837-99 Índice De Azul De Metileno De Arcillas, y hace posible cuantificar la capacidad de adsorción iónica de un suelo por medición de la cantidad de azul de metileno necesaria para cubrir la superficie total de las partículas de arcilla contenidas en el suelo<sup>2</sup>. El ensayo se puede usar para diversos materiales arcillosos (caolinita, illita, bentonita, etc.) Los resultados de su aplicación indican que existe una relación lineal entre el índice de azul de metileno (MBI) y algunas propiedades fundamentales de las arcillas, entre las cuales están la capacidad de intercambio catiónico y el índice Alúmina/Sílice.

Para conocer y comprobar la fiabilidad y precisión de esta técnica fue necesario realizar algunas pruebas preliminares con el fin de eliminar el cuarzo a la mena de experimentación, ésta se sometió a ensayos de sedimentación a diferentes tiempos; luego de lo cual al producto flotado, además del índice de azul de metileno se le determinó por análisis químico la relación Alúmina/Sílice. Los resultados se pueden observar en la Tabla 8 y en la grafica 10.

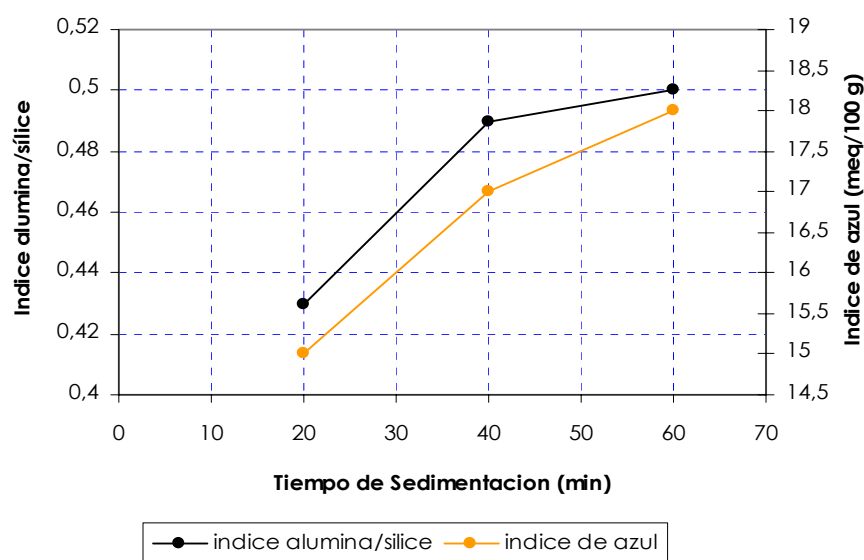
---

<sup>2</sup> Caracterización del mineral arcilloso a través del ensayo de azul de metileno

**Tabla 8.** Comprobación de la técnica de azul de metileno mediante índice sílice/alúmina para diferentes tiempos de sedimentación.

Tiempo de sedimentación (Min)	Índice alúmina/sílice del producto flotado	Índice de azul del producto flotado (Meq/100 g)
20	0.43	15
40	0.49	17
60	0.50	18

**Gráfica 1.** Curva índice alúmina/ sílice del producto flotado y índice de azul del producto flotado vs. Tiempo de sedimentación.



Como se puede observar en los resultados anteriores la técnica de adsorción de azul de metileno permite detectar cambios muy pequeños en los porcentajes de sílice y alúmina de un material arcilloso, ya que al aumentar la relación alúmina/sílice debe aumentar el contenido de aluminosilicatos en este caso de illita y caolinita especialmente.

**5.2.2. Separación en húmedo por malla.** El estudio del proceso de separación por malla fue escogido para reducción de cuarzo grueso. En este proceso se evaluaron las siguientes variables: número de malla y tiempo de preagitación. Las variables respuesta analizadas durante el estudio fueron: relación  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  y adsorción de azul de metileno.

La preparación de las pulpas fue realizada disgregando por preagitación a altas velocidades, 14000 rpm, agregando el mineral molido a -16 mallas Tyler a un volumen de agua hasta un porcentaje de sólidos de 60%. Fue necesario el uso de dispersante para lograr mantener las partículas en suspensión. El equipo usado para la preagitación fue un ultra agitador marca HAMILTON.

En cada prueba experimental se procedió a recoger el material retenido en la malla y a secarlo a  $100 \pm 5$  °C, con el fin de pesarlo y determinarle el índice de azul de metileno.

**5.2.2.1. Selección de la malla.** Para seleccionar la malla, de acuerdo a la revisión bibliográfica se procedió a hacer pasar una pulpa, preagitada a 14000 rpm, dispersada con silicato de sodio al 60 % de sólidos a través de una serie de tamices Tyler: 200, 270 y 325, buscando encontrar la malla que retuviera más cantidad de sólidos, con menor índice de azul de metileno en el producto retenido por malla.

**5.2.2.2. Selección del tiempo de preagitación (14000 rpm).** Basados en información bibliográfica el tiempo de preagitación fue evaluado entre 5 y 15 minutos, utilizando un porcentaje de sólidos del 60 %.

La selección del tiempo de preagitación más adecuado se realizó escogiendo los menores valores de la relación  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  e índice de azul de

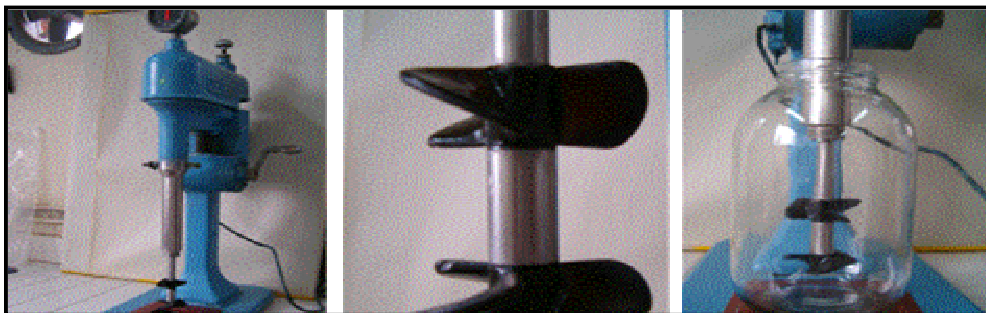
metileno, ya que entre mas bajo es este valor se retiene mas cuarzo en la malla.

**5.2.3. Estudio de Dispersión.** Este estudio fue llevado a cabo para mejorar la dispersión en los diferentes procesos de beneficio. El estudio realizado fue comparativo, se usó agitación mecánica (2700 rpm) y ultrasonido con agitación mecánica (750 rpm). En cada una de las pruebas se evaluaron las siguientes variables: dosificación de dispersante y pH de la pulpa. La variable respuesta analizada para este estudio fue el potencial zeta, el cual según la teoría, tal como se observa en la Tabla 4 al aumentar el valor absoluto del potencial Z aumenta la dispersión de la pulpa.

**5.2.3.1. Estudio de dispersión usando agitación mecánica a 2700 rpm.** Se preparó una pulpa con arcilla natural llevándola a un porcentaje de sólidos apto para la agitación mecánica el cual fue del 30 %.

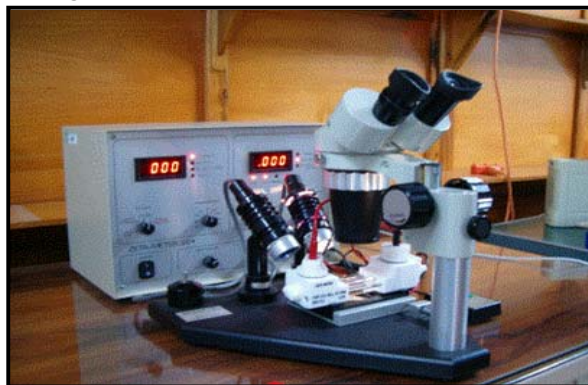
Para la dispersión de la pulpa, se trabajó adicionando dispersante a la misma, el cual actúa como defloculante haciendo que las partículas de arcilla se mantengan en suspensión, debido a que esta sustancia genera un efecto de repulsión entre ellas. Esta dispersión fue realizada utilizando el mecanismo de agitación de una celda de flotación DENVER (Figura 16). Este equipo posee aspas de doble hélice invertida que generan un efecto de corte en la pulpa originando un gran efecto de disgregación sobre ésta.

**Figura 16.** Mecanismo de agitación de una celda de flotación DENVER.



i. **Evaluación de la dosificación del dispersante.** Después de haber ajustado el porcentaje de sólidos requerido para la agitación mecánica, con base en la revisión bibliográfica se procedió a evaluar la dosificación del dispersante, silicato de Sodio, escogido por su gran poder dispersante y bajo costo, en un rango de 0.2 -1 % P/V, manteniendo el pH entre 5.6 y 6. El efecto de la cantidad de dispersante se evaluó mediante la lectura de potencial zeta en el equipo Zetameter System 3.0+ que se muestra en la figura 17.

**Figura 17.** Equipo Zetameter System 3.0+.



ii. **Evaluación del pH.** Utilizando el mejor porcentaje de dispersante obtenido según los resultados anteriores, donde el rango del pH variaba entre 5.6 y 6 por efecto solo del dispersante, se procedió a evaluar el pH. Según la revisión bibliográfica a un pH básico se incrementan favorablemente las condiciones de dispersión de la pulpa, por lo cual se estudió un rango de pH entre 5 y 10. El modificante de pH empleado fue el hidróxido de sodio y la variable respuesta fue la lectura del potencial Z.

**5.2.3.2. Estudio de dispersión usando ultrasonido con agitación mecánica a 750 rpm.** Se preparó una pulpa con el porcentaje de sólidos mas favorable para la sedimentación que fue del 30 % P/V. Usando este tipo de dispersión se evaluaron porcentajes de dispersante y pH de la pulpa. Al igual que en la

agitación mecánica (2700 rpm) la variable respuesta fue la lectura de potencial zeta.

Previamente a la agitación de la pulpa, se agregaba el dispersante y luego se agitaba en presencia de ultrasonido producido por un equipo Ultrasonic Lc 30H marca ELMA, tal como se muestra en la Figura 18. El efecto del ultrasonido ayuda a generar disgregación de la pulpa, debido a que se origina un tipo de ondas de alta frecuencia que producen cavitación en la interfase sólido – líquido, provocando separación entre las partículas aglomeradas.

**Figura 18.** Montaje de la dispersión usando ultrasonido con agitación mecánica.



Para el caso de la evaluación de la dosificación de dispersante y la Evaluación del pH, se empleó la misma metodología aplicada en la dispersión con agitación mecánica a 2700 rpm.

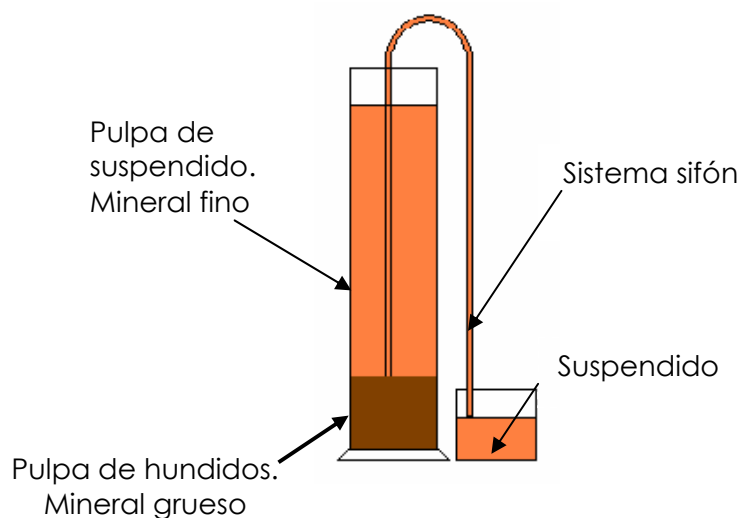
**5.2.4. Estudio de Desarenamiento.** Este estudio permite la reducción del contenido de cuarzo en la arcilla. Para esto se tuvieron en cuenta las mejores condiciones tanto de dosificación de dispersante, como de pH obtenidos en las pruebas de dispersión. En este estudio se realizaron pruebas tanto por

sedimentación como por hidrociclón para ver la efectividad de cada proceso.

**5.2.4.1. Estudio de desarenamiento por sedimentación.** Las pulpas utilizadas para este estudio fueron preparadas bajo las mejores condiciones tanto de dosificación de dispersante como de pH para asegurar que existiera una excelente dispersión. Para este estudio de Sedimentación se evaluaron las siguientes variables: porcentaje de sólidos y tiempo de sedimentación. La variable respuesta analizada durante este estudio fue el índice de azul de metileno en el mineral suspendido (flotado), partiendo del hecho de que un mayor índice significa un mayor contenido de mineral arcilloso en un determinado producto.

Estos ensayos se realizaron en probetas de 500 ml. Para la recuperación del mineral presente en la pulpa de los suspendidos, al finalizar la prueba se utilizó un sistema de sifón que se introducía hasta el nivel de la interfase del mineral sedimentado y la pulpa de suspendidos (Figura 19). Luego los dos productos se secaban en una estufa a una temperatura de  $100 \pm 5$  °C para pesarlos y determinarles el respectivo índice de azul de metileno.

**Figura 19.** Esquema del sistema sifón empleado para la recuperación de suspendidos



i. **Selección del porcentaje de sólidos de la pulpa.** Basados en las mejores condiciones tanto de dosificación de dispersante como de pH del sistema, se prepararon las pulpas a diferentes porcentajes de sólidos, entre 10 y 35% basados en la revisión bibliográfica. Se determinó la viscosidad de las pulpas a los diferentes porcentajes de sólidos con el fin de determinar aquella que proporcionara la viscosidad crítica.

ii. **Evaluación del tiempo de sedimentación.** Una vez determinado el porcentaje de sólidos de pulpa adecuado, se procedió a seleccionar el tiempo de sedimentación, realizando pruebas a un amplio rango de tiempos, desde 5 a 80 minutos. La dispersión de la pulpa se efectuó utilizando tanto la agitación mecánica a 2700 rpm como la asistida por ultrasonido, con el fin de poder comparar los resultados. La variable respuesta fue el índice de azul de metileno.

**5.2.4.2. Estudio de desarenamiento por hidrociclón.** Las pulpas utilizadas para este estudio fueron también preparadas bajo las mejores condiciones tanto de dosificación de dispersante como de pH. Para este estudio se evaluaron las siguientes variables: Selección del hidrociclón, selección de la presión de trabajo y selección del porcentaje de sólidos. Las variables respuesta analizadas fueron: relación  $Al_2O_3/SiO_2$  e índice de azul de metileno.

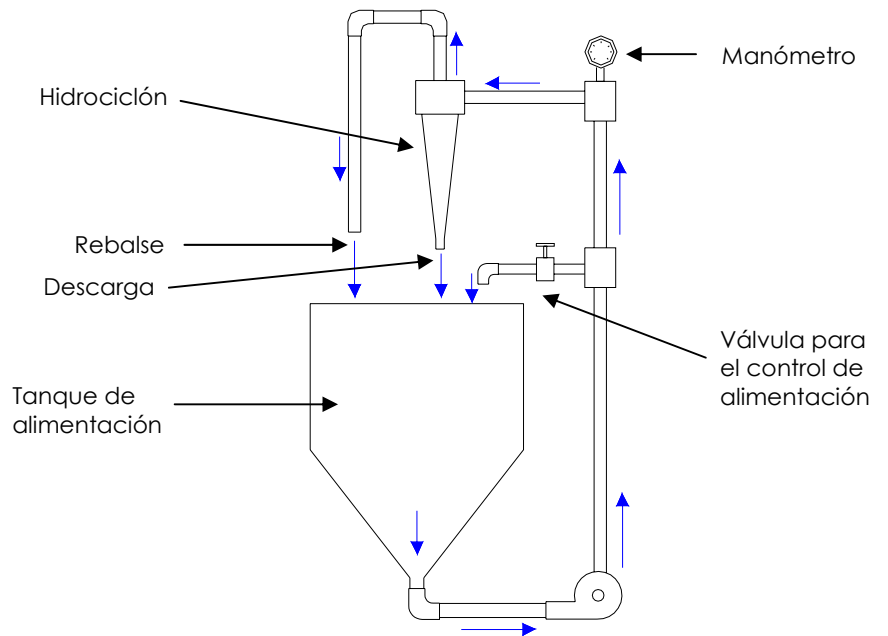
i. **Selección del hidrociclón.** Para seleccionar el hidrociclón se realizaron pruebas con dos tipos de hidrociclón el Krebs Y Bauer del mismo tamaño, cuyos diámetros de rebalse y descarga se presentan en la Tabla 9. Utilizando el criterio de densidad de pulpa, el hidrociclón que proporcione mayor densidad en la pulpa de descarga será seleccionado. Por lo tanto se estudiaron los dos tipos de hidrociclón y la variable respuesta fue la densidad

de la pulpa en la descarga. Estas pruebas fueron realizadas bajo una presión de 10 psi y 22.5 % de sólidos (Figura 20).

**Tabla 9.** Diámetros de descarga y rebalse de los hidrociclones evaluados.

Hidrociclón	Diámetro De Rebalse (mm)	Diámetro De Descarga (mm)
Bauer	15,5	13
Krebs	9,3	13

**Figura 20.** Equipo y esquema de dirección de flujo de la pulpa dentro del hidrociclón.



**ii. Selección de la presión.** Una vez encontrado el hidrociclón más efectivo se procedió a hacer pruebas variando, según la bibliografía consultada, la presión de la bomba entre 10 y 20 psi. Las variables respuesta fueron: relación  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  e índice de azul de metileno. Estas pruebas fueron realizadas bajo un porcentaje de sólidos de 22.5 %.

**iii. Selección del porcentaje de sólidos.** Encontrada la presión de trabajo se procedió a realizar pruebas variando el porcentaje de sólidos entre un rango de 15 a 30 %, según la bibliografía consultada. Las variables respuesta fueron: relación  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  e índice de azul de metileno.

**5.2.5. Prueba De Separación Magnética.** Esta prueba fue realizada con el fin de verificar la existencia de cantidades pequeñas de óxidos de hierro magnéticos en el mineral de la mina, ya que en el análisis de DRX no se reportó minerales de hierro. Para esto se realizó una prueba con las siguientes condiciones: pulpa de 30% P/V, un tiempo de residencia de 36 minutos y 11.4 kTeslas.

**5.2.6. Estudio del Proceso de Lixiviación.** El estudio del proceso de lixiviación fue realizado para la reducción de hierro presente en la arcilla. Para este estudio se evaluaron las siguientes variables: selección del tipo de lixiviante y su dosificación, influencia del tiempo de agitación, influencia de la velocidad de agitación e influencia de la temperatura. Las variables respuesta analizadas durante el estudio fueron: % de hierro removido e índice de azul de metileno.

Las pruebas de lixiviación fueron realizadas en vasos de precipitados de 250 ml con 100 ml de pulpa preparada con la arcilla natural. Finalizado el tiempo de lixiviación se filtraban las pulpas con el fin de recolectar una alícuota del filtrado, para determinar por absorción atómica el contenido de hierro

disuelto. De igual forma se tomaban residuos secos para realizar la determinación del índice de azul de metileno.

**5.2.6.1. Selección del tipo de lixivante y su dosificación.** Una vez tomada la pulpa proveniente de la sedimentación se procedió a la selección de un tipo de lixivante: ácido oxálico o ácido sulfúrico, seleccionados según la revisión bibliográfica. Se realizó pruebas con cada uno de los dos lixiviantes tomando rangos, según la bibliografía, de 0.1 M a 0.4 M; escogiéndose el lixivante y la dosificación que produjera la mayor cantidad de hierro removido. Las pruebas se realizaron a 500 rpm, 12 horas de contacto y 25 °C.

**5.2.6.2. Influencia del tiempo de agitación.** Estas pruebas fueron realizadas usando el lixivante y la dosificación que produjo buena cantidad de hierro removido de la arcilla a baja concentración de ácido. Las pruebas realizadas se hicieron variando el tiempo en un rango de 4 a 12 horas, escogiendo el que mayor contenido de hierro removiera. Las pruebas se realizaron a una concentración 0.3 M de ácido oxálico, 500 rpm y 25 °C.

**5.2.6.3. Influencia de la velocidad de agitación.** Encontrado el mejor lixivante, y el tiempo de agitación más adecuado, se procedió se realizar ensayos a diferentes velocidades de agitación entre un rango de 500 y 1500 rpm, observando el porcentaje de hierro removido de la arcilla. Estas pruebas se realizaron a una concentración de ácido 0.3 M, 12 horas de contacto y 25 °C.

**5.2.6.4. Influencia de la temperatura.** Encontrado el mejor lixivante, el tiempo de agitación y la velocidad de agitación más adecuada se procedió a variar la temperatura para un rango entre 25 y 80 °C, según la bibliografía. Al igual, la variable respuesta siguió siendo el porcentaje de hierro removido de

la arcilla. Estas pruebas se realizaron a una concentración de ácido 0.3 M, 12 horas de contacto y 1500 rpm.

### **5.3. PROPUESTA DEL SISTEMA DE BENEFICIO**

Esta etapa se realizó con el fin de seleccionar el sistema de beneficio mas adecuado para la arcilla de Barrancabermeja que permita obtener la composición mineralogica y química más adecuadas para ser empleadas en la industria de materiales adsorbentes. Analizando los resultados obtenidos tanto en los procesos de desarenamiento como los de remoción de hierro, se propuso un sistema de beneficio que incluyó los procesos que reportaron los mejores resultados en cuanto a incremento del índice de azul de metileno y de la capacidad de intercambio catiónico. Posteriormente se realizó una prueba final donde se sometió el mineral del yacimiento al sistema de beneficio propuesto, con el fin observar la concentración de mineral arcilloso de etapa en etapa, la recuperación de dicho mineral y el incremento de la capacidad de intercambio catiónico.

Finalmente se elabora el flujograma del sistema de beneficio propuesto con su respectivo balance de masa.

## 6. RESULTADOS Y ANALISIS

### 6.1. CARACTERIZACION DE LA ARCILLA

#### 6.1.1. Caracterización Geoquímica

**6.1.1.1. Composición química.** El resultado de la composición química del mineral de la mina de la Ladrillera Cootrasalba se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Composición química del mineral.

Composición química	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	LOI
%	64.09	6.27	26.09	0.30	1.72	0.02	1.10	0.41

**6.1.1.2. Composición mineralógica.** El resultado del análisis por difracción de rayos X de la mena reportó la presencia de las especies mineralógicas que se muestran en la Tabla 11, y el difractograma se muestra en la Figura 21.

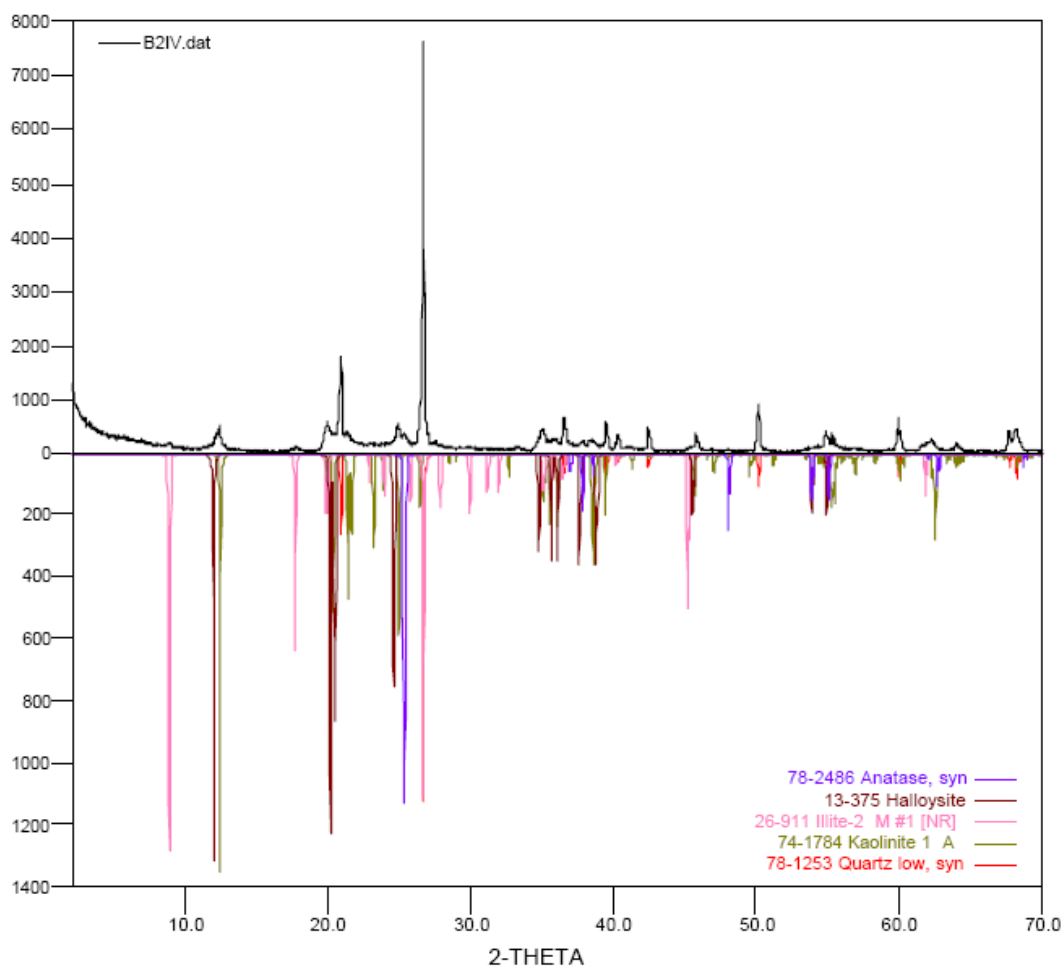
**Tabla 11.** Composición mineralógica del mineral.

	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO(%)
Cristalinos	SiO <sub>2</sub>	Cuarzo	26.42
	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	Caolinita	23.32
	TiO <sub>2</sub>	Anatasa	2.36
	(K,H <sub>3</sub> O)Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	Illita	31.46
	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	Háloisita	1.74
	Amorfa		14.70

Los resultados del análisis mineralógico mostraron la presencia de impurezas, principalmente el cuarzo en gran proporción y en baja proporción la anatasa.

Se encontró presencia de especies arcillosas en cantidades significativas, como es el caso de la illita, caolinita y háloisita. El análisis químico reportó un porcentaje significativo de hierro, el cual no se detectó en el análisis mineralógico; posiblemente esté formando parte de la fracción amorfa o de alguna especie arcillosa en forma sustitucional o intersticial.

**Figura 21.** Difractograma de la arcilla natural.



**6.1.2. Caracterización Físicoquímica.** Se determinó la densidad real promedio del mineral cuyo valor fue de 2.2834 g/cm<sup>3</sup>. El nivel de pH promedio de la mena fue de 4.6. La humedad promedio del mineral de mina fue de 12.69 %

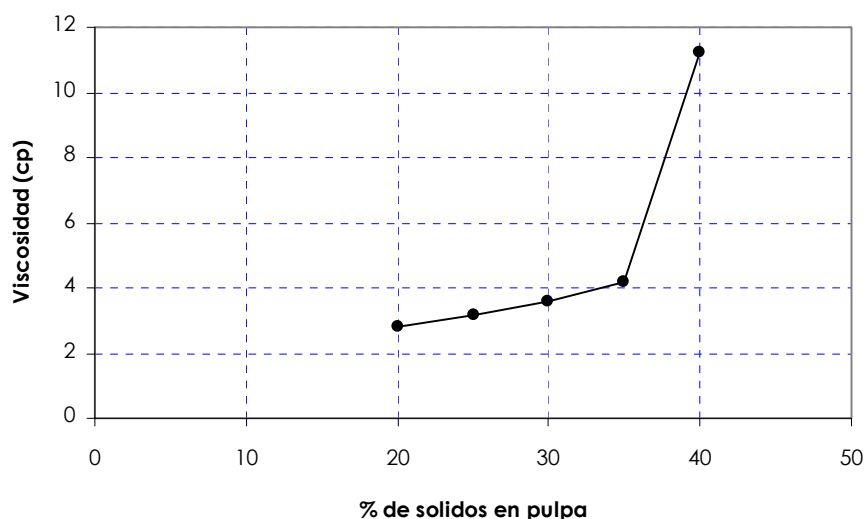
debido seguramente a que en la zona de Barrancabermeja la precipitación ha sido baja en los últimos años.

Los resultados obtenidos de la viscosidad a diferentes porcentajes de sólidos se muestran en la Tabla 12 y en la Gráfica 2.

**Tabla 12.** Viscosidad para pulpas a diversos porcentajes de sólidos.

Porcentaje de sólidos (P/V)	Viscosidad (cp)
20	2.81
25	3.14
30	3.59
35	4.16
40	10.3

**Gráfica 2.** Variación de la viscosidad de pulpas del mineral en función de los porcentajes de sólidos.



En la curva de la grafica anterior se puede observar que de 35 a 40 % de sólidos hay un significativo incremento en la viscosidad de las pulpas. También puede observarse que en el rango de 20 a 35 % de sólidos los valores de las

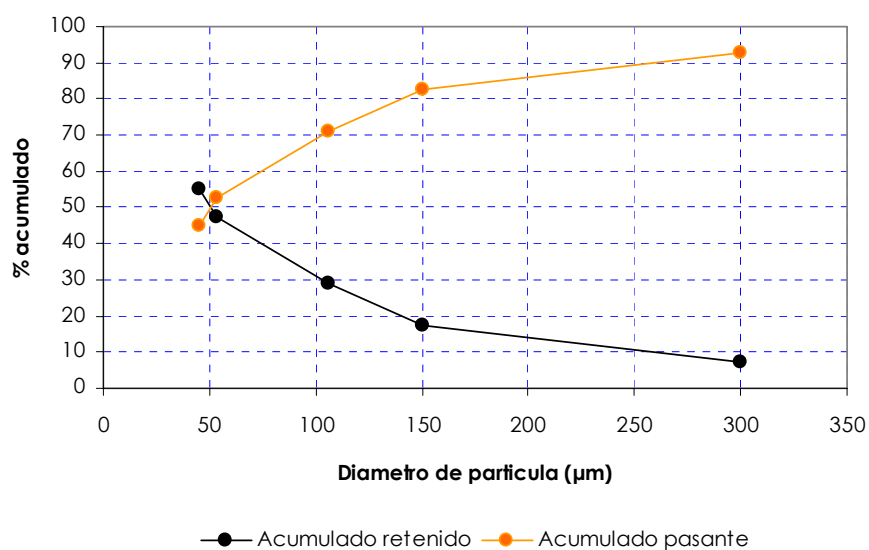
viscosidades de las pulpas son bajas, esto es debido a la presencia de cuarzo en gran proporción.

El análisis granulométrico en húmedo presentó la distribución que se muestra en la Tabla 13 y en la Gráfica 3.

**Tabla 13.** Distribución granulométrica del mineral arcilloso natural.

Malla Tyler #	Diámetro de partícula (µm)	Acumulado retenido (%)	Acumulado pasante (%)	Índice de azul del retenido (meq/100 g)
50	300	7.45	92.55	1.0
100	150	17.49	82.51	3.0
140	106	29.03	70.97	4.0
270	53	47.33	52.67	4.5
325	45	55.13	44.87	6.0

**Gráfica 3.** Distribución granulométrica del mineral arcilloso natural.



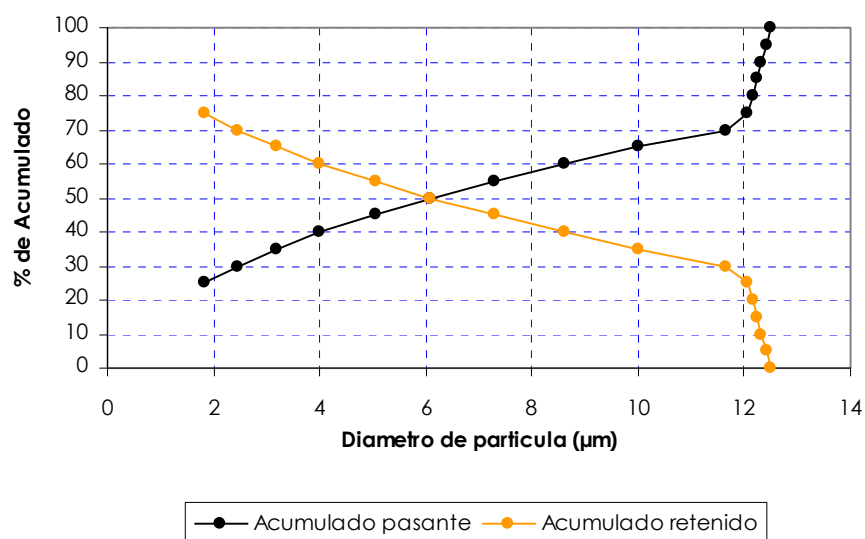
Los resultados obtenidos de la microgranulometría del mineral mediante el uso del fotosedimentador marca LUMOSSED se muestran en la Tabla 14 y en la

Gráfica 4. De estos resultados se puede observar que un 50 % de la cantidad utilizada para esta determinación tiene tamaños menores a 6.1  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 14.** Distribución microgranulométrica del mineral arcilloso natural.

Diámetro de partícula ( $\mu\text{m}$ )	Acumulado pasante (%)	Acumulado retenido (%)
12.50	100	0
12.41	95	5
12.33	90	10
12.24	85	15
12.15	80	20
12.07	75	25
11.65	70	30
10.01	65	35
8.61	60	40
7.31	55	45
6.10	50	50
5.06	45	55
4.01	40	60
3.18	35	65
2.44	30	70
1.82	25	75

**Grafica 4.** Curva Distribución granulométrica respecto al acumulado pasante y al acumulado retenido vs. Diámetro de partícula.



Entre las propiedades fisicoquímicas de los materiales arcillosos se encuentra la adsorción, característica de alta significancia en este proyecto, por lo cual fue muy importante determinarla en la arcilla natural para luego compararla con la de los diferentes productos obtenidos de los procesos de beneficio aplicados en este trabajo. Así con la técnica de azul de metileno, la arcilla natural reportó un índice de adsorción (MIB) de 10.5 meq/100 g, mientras que su capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue de 14 meq/100 g.

**6.1.3. Clasificación de la mena.** Con base en los resultados de caracterización obtenidos y específicamente, de la composición mineralógica obtenida (Tabla 10) la arcilla puede clasificarse como una illítico-caolinitica según la clasificación mineralógica, y como una arcilla común según el U. S. Bureau of Mines [24].

## **6.2. PROCESOS DE BENEFICIO APLICADOS A LA ARCILLA**

### **6.2.1. Estudio de Separación por Malla.**

**6.2.1.1. Selección de la malla.** Con base en los resultados obtenidos del retenido en el análisis de granulometría en húmedo (Tabla 13) se procedió a seleccionar la malla que mayor cantidad de mineral retuviera, con el menor índice de adsorción. Se encontró que la malla Tyler # 270 (53  $\mu$ m) era la malla que mayor cantidad de mineral retenía con menor índice de azul de metileno, por tanto era la mas conveniente para realizar el cribado.

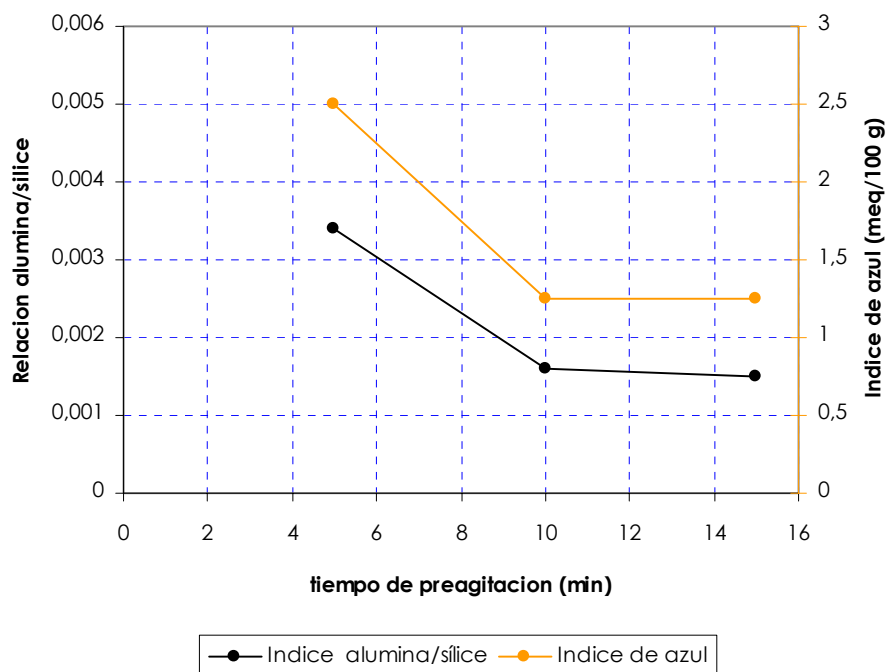
**6.2.1.2. Efecto del tiempo de preagitación de la pulpa en la separación por malla.** Se procedió a evaluar el tiempo de preagitación a alto corte para encontrar el tiempo que permitiera retener a la vez mayor cantidad de cuarzo

y menor cantidad de alúmina. Los resultados se muestran en la Tabla 15 y en la Gráfica 5.

**Tabla 15.** Efecto del tiempo de preagitación a 60 % de sólidos y 14000 rpm del producto retenido en la malla Tyler 270 #.

Tiempo de agitación (min)	% peso del retenido	Índice alúmina/sílice del producto retenido	Índice de azul del producto retenido (meq/100 g)
5	21.28	0.0034	2.5
10	21.13	0.0016	1.25
15	21.12	0.0015	1.25

**Gráfica 5.** Curva de Relación  $Al_2O_3/SiO_2$  e índice de azul de metileno Vs. Tiempo de agitación a 60 % de sólidos y 14000 rpm del producto retenido en la malla Tyler 270 #.



Las curvas muestran claramente que al aumentar el tiempo de agitación de 5 a 10 minutos ocurre una disminución en la relación alúmina/sílice y del índice de azul. Esto es debido a que al utilizar una agitación a alto corte durante un

tiempo prolongado hay mayor interacción aspa-partícula y partícula-partícula, permitiendo la mayor disgregación de las partículas que componen la arcilla. Al aumentar el tiempo la relación permanece casi constante, por tal motivo el tiempo mas adecuado de agitación es 10 minutos; ya que a menores tiempos hay mayor arcilla retenida en la malla, y a mayores tiempos se consiguen iguales retenciones de arcilla pero mayor gasto de energía.

**6.2.1.3. Características del material arcilloso obtenido de la separación por malla en húmedo.** Después de aplicadas las mejores condiciones de separación por malla:

- ✓ Separación en húmedo con malla Tyler 270 #.
- ✓ Tiempo de agitación de la pulpa a alto esfuerzo de corte: 10 min.

Se determino que la composición química del material pasante es la presentada en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Composición química del mineral pasante en malla Tyler # 270 con preagitación de pulpa a 60 % de sólidos y 14000 rpm.

Composición química	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	LOI
%	59.41	6.12	28.96	0.32	3.12	0.00	1.8	0.27

El índice de azul de metileno (MIB) del material refinado o pasante obtenido de la separación por malla reportó un valor de 16 meq/100 g, que comparado con el valor de 10.5 meq/100 g de la arcilla natural indica que hubo un aumento en la adsorción de 52.3 %.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del material obtenido de la separación por malla reportó un valor de 20 meq/100 g, que comparado con el valor de 14 meq/100 g de la arcilla natural indica que se ha aumentado la CIC en 42.8 %.

Con los resultados de MIB y CIC se puede concluir que se ha concentrado el mineral arcilloso y se ha disminuido la cantidad de cuarzo en la arcilla. La Tabla 16 lo corrobora ya que indica la disminución de sílice y aumento de alúmina.

### **6.2.2. Estudio de Dispersión.**

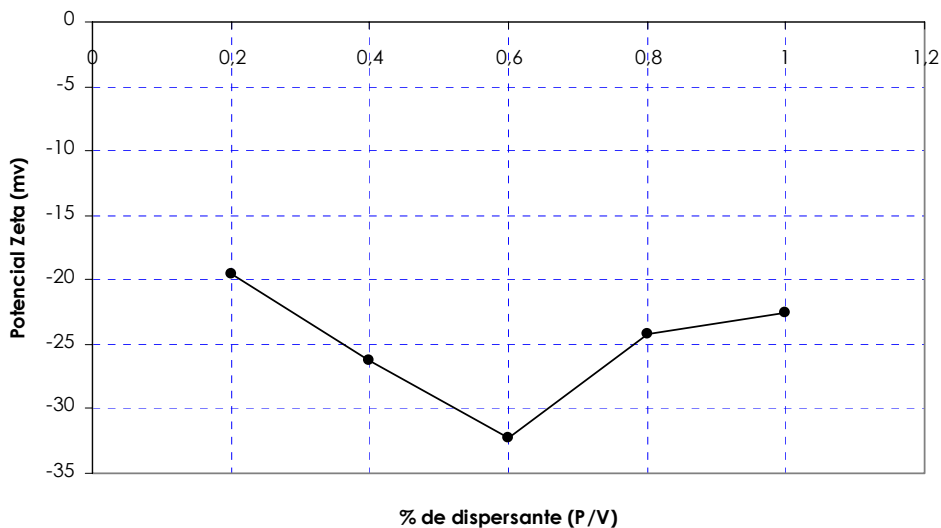
#### **6.2.2.1. Estudio de dispersión usando agitación mecánica a 2700 rpm.**

**i. Selección de la dosificación de dispersante.** Los resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla 17 y en la Gráfica 6. De estos se puede observar que la dosificación mas adecuada de silicato de sodio a pH 5 fue de 0.6 % V/P (ml/g). A bajos porcentajes de silicato no hay suficiente dispersante, y según Zaman, Abbas A. y Mathur, Sharad podría causar que algunos de los aluminosilicatos entren en contacto con el agua y formen hidróxidos de aluminio  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , que luego se precipitan<sup>[23]</sup>, originando poca presencia de aluminosilicatos dispersos en solución y por tanto una baja dispersión como lo muestra las lecturas de potencial zeta. A porcentajes de silicato mayores a 0.6 % V/P el silicato podría empezar a formar un gel de aluminosilicato, originando precipitación y por tanto disminución en la dispersión <sup>[23]</sup>.

**Tabla 17.** Efecto del % de silicato de sodio sobre el potencial zeta la arcilla a pH 5.

% de Silicato de sodio (V/P)	Potencial Zeta (mV)
0.2	-19.5
0.4	-26.2
0.6	-32.3
0.8	-24.2
1	-22.5

**Grafica 6.** Curva del efecto del % de silicato de sodio vs. Potencial zeta de la arcilla a pH 5.



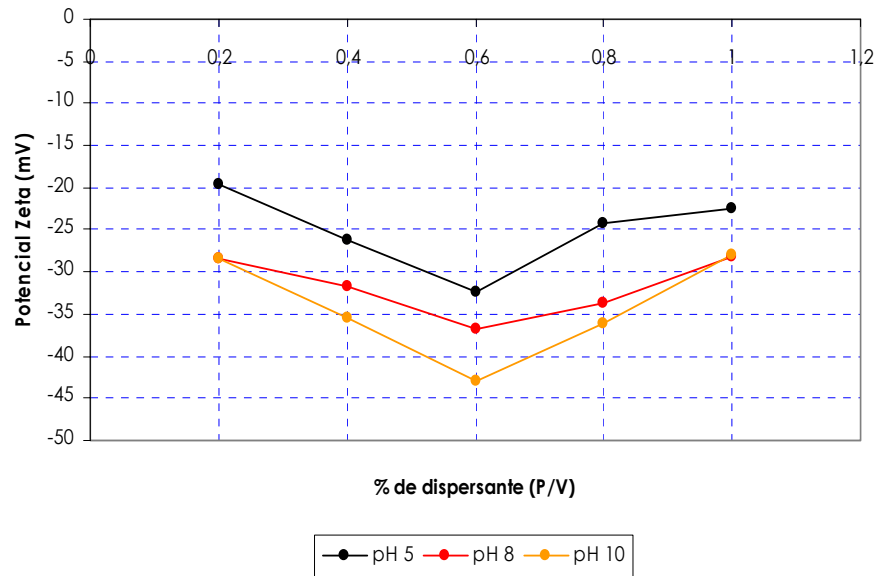
**ii. Evaluación del pH.** Los resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla 18 y en la Gráfica 7. Como se puede observar en estos resultados hay otra variable que ejerce influencia en la dispersión y es el pH de la pulpa. Se puede observar que al aumentar el pH hay un aumento en la dispersión, evitando posiblemente la formación de hidróxidos de aluminio y volviendo más repulsivas las partículas, tal como se observa con las lecturas de potencial zeta. Para un pH de 10 se obtuvieron las mejores condiciones de dispersión cuya lectura fue de -42.9 mV. Como se puede observar al aumentar el pH va

aumentando la carga superficial de las arcillas, lo que es denominado carga variable, que dependen del pH; entre mas básico sea el pH del sistema, que para este caso es 10, la superficie tendrá una carga mas negativa y la capacidad de intercambio catiónico será mas significativa <sup>(26)</sup>, por tal motivo la lectura de potencial zeta es mas negativa y esto permitirá obtener una mayor dispersión.

**Tabla 18.** Efecto del % de silicato de sodio sobre el potencial zeta de la arcilla a diferentes pHs.

PH	% de Silicato de sodio (V/P)	POTENCIAL Z (MV)
5	0.2	-19.5
	0.4	-26.2
	0.6	-32.3
	0.8	-24.2
	1	-22.5
8	0.2	-28.4
	0.4	-31.8
	0.6	-36.7
	0.8	-33.7
	1	-28.2
10	0.2	-28.4
	0.4	-35.4
	0.6	-42.9
	0.8	-36.1
	1	-28.0

**Gráfica 7.** Curva del efecto del % de silicato de sodio vs. Potencial zeta de la arcilla a diferentes pHs.



Como se observa en la Tabla 18 y en la Gráfica 7 las mejores condiciones se obtienen a 0.6 % V/P de silicato de sodio y pH 10.

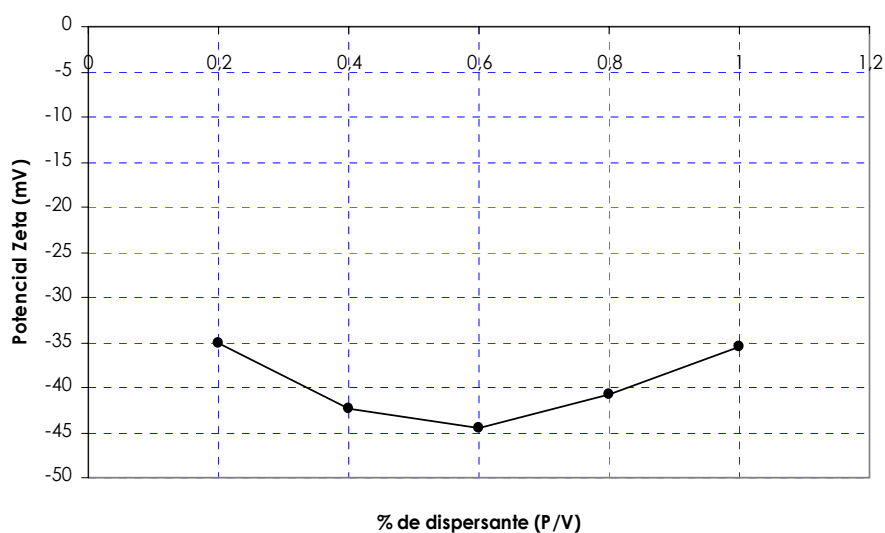
#### **6.2.2.2. Estudio de dispersión usando ultrasonido con agitación mecánica a 750 rpm.**

**i. Selección de la dosificación de dispersante.** Los resultados de este set de pruebas se presentan en la Tabla 19 y en la Gráfica 8. De estos resultados se puede determinar que la mejor dosificación de silicato de sodio a pH 5 se obtuvo a 0.6 % V/P.

**Tabla 19.** Efecto del % de silicato de sodio sobre el potencial zeta de la arcilla a pH 5.

<b>% De silicato de sodio (V/P)</b>	<b>Potencial z (mV)</b>
0.2	-35.1
0.4	-42.4
0.6	-44.6
0.8	-40.8
1	-35.5

**Gráfica 8.** Curva % de silicato de sodio vs. Potencial zeta a pH 5.

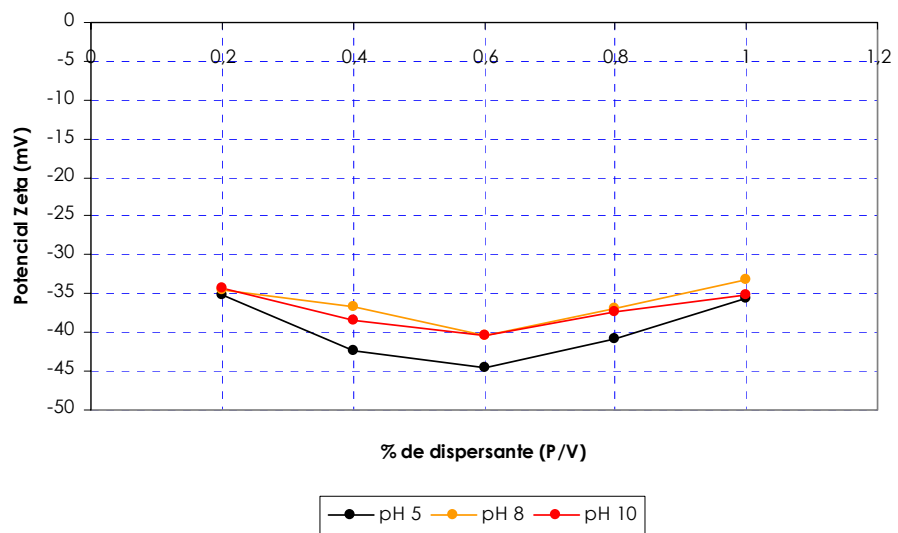


**ii. Evaluación del pH.** En la Tabla 20 y en la Gráfica 9 se presentan los resultados obtenidos. Como se puede ver en la Gráfica 9 al aumentar el pH disminuye el potencial zeta y por tal motivo la dispersión de la pulpa, generando menores fuerzas de repulsión en el sistema partícula-partícula. Esta es una particularidad del ultrasonido, que puede generar que los reactivos pierdan sus propiedades e incluso pueden actuar de forma inesperada [12]. Se encontró que la mejor dispersión se consigue a un pH de 5 debido a que se obtiene una lectura de potencial zeta mas negativa de -44.6 mV.

**Tabla 20.** Efecto del % de silicato de sodio sobre el potencial zeta de la arcilla a diferentes pHs.

PH	% de Silicato de sodio (V/P)	POTENCIAL Z (MV)
5	0.2	-35.1
	0.4	-42.4
	0.6	-44.6
	0.8	-40.8
	1	-35.5
8	0.2	-34.5
	0.4	-36.6
	0.6	-40.3
	0.8	-37.0
	1	-33.2
10	0.2	-34.3
	0.4	-38.4
	0.6	-40.3
	0.8	-37.3
	1	-35.1

**Gráfica 9.** Curva del efecto del % de silicato de sodio vs. Potencial zeta de la arcilla a diferentes pHs.



### **6.2.3. Estudio de Desarenamiento por Sedimentación.**

**6.2.3.1. Selección del porcentaje de sólidos de la pulpa.** Con base en los resultados obtenidos a partir de la prueba de viscosidad (Tabla 12 y Grafica 2) se determinó que un buen porcentaje de sólidos para trabajo de estas pulpas es de 30 % de sólidos. A mayores porcentajes de sólidos la viscosidad aumenta exponencialmente, dificultando el manejo de las pulpas y principalmente obstaculizando la sedimentación de las partículas de cuarzo para separarlas de las especies arcillosas.

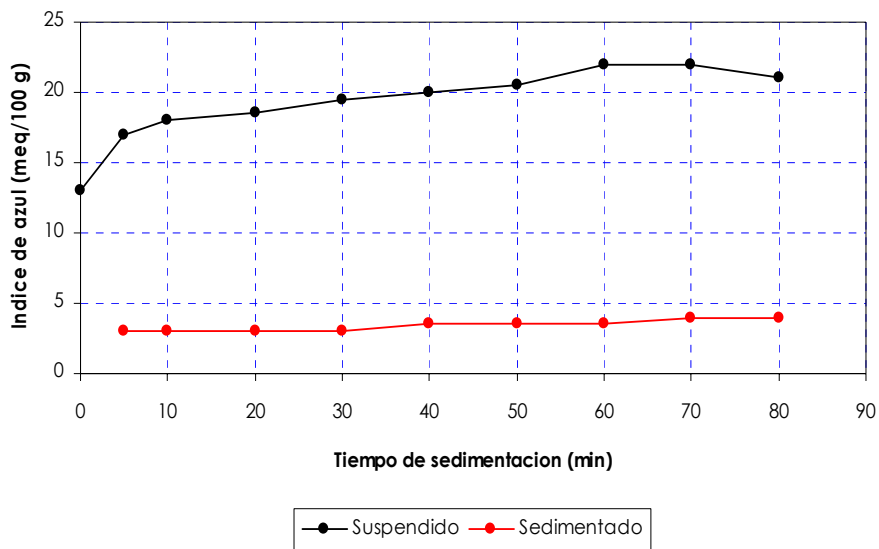
### **6.2.3.2. Sedimentación de la pulpa proveniente de agitación mecánica a 2700 rpm.**

**i. Evaluación del tiempo de sedimentación.** Los resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla 21 y en la Gráfica 10. Como se observa en la Gráfica 10, al aumentar el tiempo de sedimentación hasta 60 minutos aumenta la adsorción de azul de metileno en el material suspendido y por consiguiente la proporción de arcilla en este material. A tiempos mayores posiblemente las partículas mas gruesas de las especies arcillosas se empiezan a precipitar por efecto de la gravedad, y por tal motivo disminuye la proporción de éstas en el material suspendido.

**Tabla 21.** Efecto del tiempo de sedimentación en el índice de azul de metileno a 0.6 % de silicato de sodio y pH 10.

Tiempo de sedimentación	Índice de azul de suspendido (meq/100 g)	Índice de azul de sedimento (meq/100 g)
5	17.0	3
10	18.0	3
20	18.5	3
30	19.5	3
40	20.0	3.5
50	20.5	3.5
60	22.0	3.5
70	22.0	4
80	21.0	4

**Gráfica 10.** Curva del índice de azul de metileno Vs. Tiempo de sedimentación a 0.6 % de silicato de sodio y pH 10.



Como se puede observar en la Tabla 21, el material suspendido, comparado con el sedimentado, siempre presentó los mayores índices de azul de metileno, lo cual indica que las mayores cantidades de mineral arcilloso se encontraban en el material suspendido, y que, el sedimento en su mayoría estaba compuesto de cuarzo. El material sedimentado no presentó gran adsorción de azul de metileno, su valor máximo fue de 4 meq/100 g, caso diferente para el mineral suspendido que alcanzó una adsorción máxima de 22 meq/100 g.

**ii. Características del material arcilloso obtenido por sedimentación.** Después de aplicadas las mejores condiciones de separación mediante dispersión-sedimentación:

- ✓ Silicato de sodio: 0.6 % V/P
- ✓ pH:10
- ✓ Porcentaje de sólidos: 30 %
- ✓ Agitación para dispersión: mecánica, 2700 rpm.
- ✓ Tiempo de sedimentación: 60 minutos.

Se obtuvo un producto suspendido (concentrado o material arcilloso) cuya composición química se muestra en la Tabla 22.

**Tabla 22.** Composición química del mineral suspendido en sedimentación, disperso con agitación mecánica de 2700 rpm.

Composición química	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	LOI
%	50.50	6.52	38.24	0.36	2.32	0.00	1.71	0.35

El índice de azul de metileno (MIB) del material suspendido obtenido por estas pruebas de sedimentación reportó un valor de 22 meq/100 g, indicando que

se ha incrementado la adsorción en 109 %, teniendo en cuenta que este índice es de 10.5 meq/100 g para la arcilla natural.

Por otra parte, La capacidad de intercambio catiónico (CIC) del material suspendido obtenido por estas pruebas de sedimentación reportó un valor de 26 meq/100 g, indicando que se ha incrementado la CIC en 85.7 %, comparado con 14 meq/100 g de la arcilla natural.

Como el MIB y la CIC reportaron incrementos considerables, se puede concluir que la gran mayoría de cuarzo ha sido retirado y el mineral arcilloso ha sido concentrado, indicando que la sedimentación es un proceso favorable para el desarenamiento.

**iii. Características de las colas o material sedimentado.** La composición química que se presenta en la Tabla 23, corresponde a la de las colas o material sedimentado bajo las mejores condiciones de separación por dispersión-sedimentación citadas anteriormente.

**Tabla 23.** Composición química de las colas o material sedimentado con dispersión con agitación mecánica a 2700 rpm.

Composición química	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	LOI
%	84.47	5.89	7.86	0.097	0.52	0.00	1.10	0.06

El índice de azul de metileno (MIB) para este material sedimentado fue de 4 meq/100 g, y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 8 meq/100 g.

Con los resultados de MIB y CIC se puede concluir que dentro de las colas o material sedimentado aun hay algo de mineral arcilloso, como lo corrobora el

análisis químico que indica que hay presencia de 7.86 % de alúmina, pero con un alto porcentaje de SiO<sub>2</sub>, de 84.47 %.

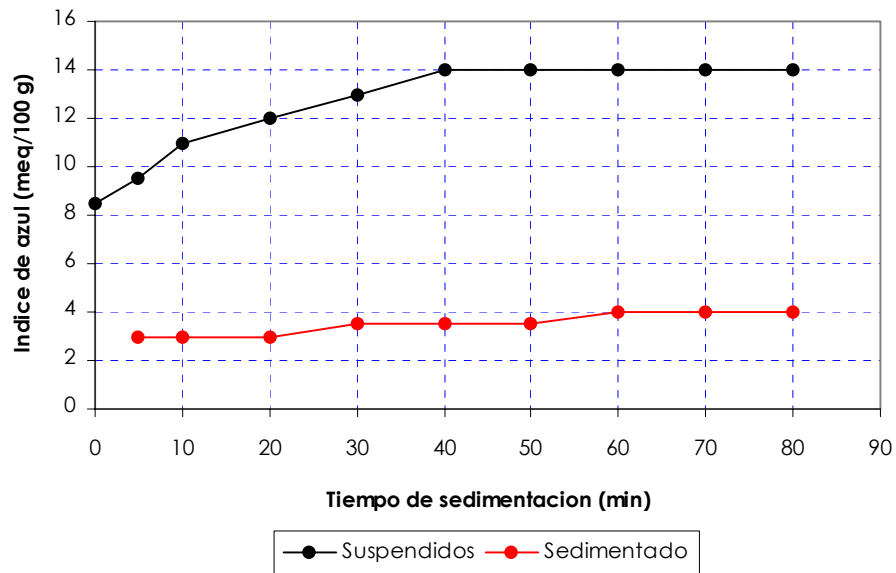
### 6.2.3.3. Sedimentación de la pulpa proveniente de dispersión con ultrasonido y agitación mecánica a 750 rpm.

**i. Evaluación del tiempo de sedimentación.** Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 24 y en la Gráfica 11. Al aumentar el tiempo de sedimentación hasta 40 minutos aumenta el índice de azul de metileno hasta un valor de 14 meq/100 g, es decir en el suspendido se esta aumentando la proporción de material arcilloso. A tiempos mayores a 40 minutos el índice de azul para este producto permanece constante, lo que indica que se ha suspendido la sedimentación; así lo confirma el índice de adsorción del producto sedimentado o colas del proceso que permanece constante.

**Tabla 24.** Efecto del tiempo de sedimentación en el índice de azul de metileno a 0.6 % de silicato de sodio y pH 5.

Tiempo de sedimentación (min)	Índice de azul de suspendido (meq/100 g)	Índice de azul de sedimento (meq/100 g)
5	9.5	3
10	11.0	3
20	12.0	3.5
30	13.0	3.5
40	14	3.5
50	14	4
60	14	4
70	14	4
80	14	4

**Gráfica 11.** Curva del índice de azul de metileno Vs. Tiempo de sedimentación a 0.6 % de silicato de sodio y pH 5.



En la Gráfica 11 se puede observar que el producto sedimentado es en su mayoría cuarzo debido a que no hay gran adsorción de azul de metileno la cual da un valor de 4 meq/100 g.

**ii. características del material arcilloso obtenido por sedimentación.** Después de aplicadas las mejores condiciones de separación mediante dispersión-sedimentación:

- ✓ Silicato de sodio: 0.6 % V/P
- ✓ pH: 5
- ✓ Porcentaje de sólidos: 30 %
- ✓ Agitación para dispersión: mecánica, 750 rpm, con ultrasonido
- ✓ Tiempo de sedimentación: 40 minutos.

Se obtuvo un producto suspendido (material arcillosos o concentrado) de la composición química presentada en la Tabla 25.

**Tabla 25.** Composición química del mineral suspendido en sedimentación, disperso con agitación mecánica de 750 rpm asistida por ultrasonido.

Composición química	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	LOI
%	51.06	6.64	37.2	0.37	2.49	0.00	1.8	0.44

El índice de azul de metileno del material suspendido obtenido fue de 14 meq/100 g, indicando que hubo un incremento de 33.3 %, mientras que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue de 18 meq/100 g, indicando un leve aumento en la adsorción de 28.57 %.

**iii. Características de las colas o material sedimentado.** Bajo las mismas condiciones de sedimentación citadas anteriormente se obtuvo un producto sedimentado con la composición química presentada en la Tabla 26.

**Tabla 26.** Composición química de las colas o material sedimentado con dispersión por agitación mecánica de 750 rpm asistida por ultrasonido.

Composición química	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	LOI
%	75.49	5.94	16.23	0.14	2.00	0.00	0.11	0.09

El índice de azul de metileno (MIB) de las colas o material sedimentado fue de 3.5 meq/100 g y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 7 meq/100 g.

De los resultados obtenidos por MIB y CIC se puede concluir que en el material sedimentado va mineral arcilloso, lo que origina que haya adsorción y esto es corroborado con la Tabla 26 en la cual se observa la presencia de alumina.

**6.2.4. Estudio de Desarenamiento por Hidrociclón.** Los resultados y su análisis respecto a este proceso de concentración centrífuga en el hidrociclón se muestran a continuación.

**6.2.4.1. Selección del tipo de hidrociclón.** Al realizar las pruebas con dos hidrociclones con diámetro de rebalse diferente, se obtuvo como resultado que el hidrociclón Bauer de mayor diámetro de rebalse, 15.5 mm, presentó los mejores resultados con respecto a la densidad de pulpa en la descarga del hidrociclón.

Proporcionando la salida inferior más densa, se presentará mayor eficiencia de separación. Esto se atribuye a que un incremento en el diámetro de rebalse previene la sobrecarga del hidrociclón, proporcionando una mayor separación entre partículas de diferente densidad y tamaño. Cabe aclarar que en casos extremos se genera una disminución de la eficiencia del hidrociclón.

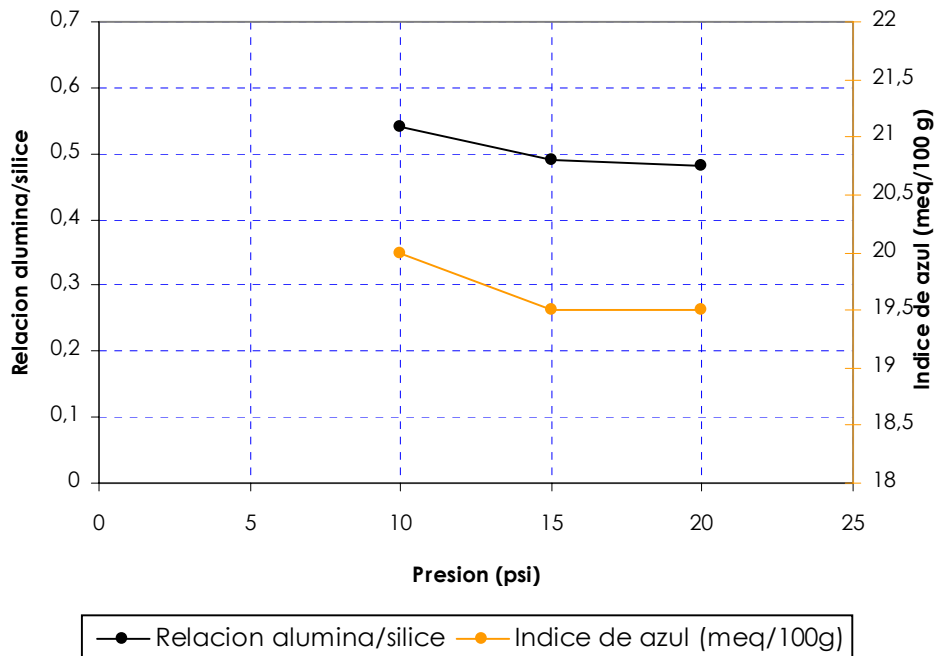
**6.2.4.2. Selección de la presión de trabajo.** Los resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla 27 y en la Gráfica 12. Al aumentar la presión de 10 psi a 15 psi la relación alumina/sílice disminuye en 0.05 unidades, lo que indica que disminuye la eficiencia de separación del hidrociclón, tal como lo evidencia el índice de azul de metileno que decrece en 0.5 unidades, indicando una disminución en la concentración de minerales arcillosos en el rebalse. Entre tanto, la relación Alumina/Sílice como el índice de azul de metileno se mantienen aproximadamente constantes entre 15 psi a 20 psi. El incremento

de la presión de alimentación hasta 10 psi mejora la eficiencia de separación, debido a que se aumenta tanto la velocidad de flujo como la fuerza G (gravedad aumentada por la fuerza centrífuga), pero presiones superiores a 10 psi, no mejoran la eficiencia de la separación, porque aumenta el caudal en el hidrociclón y por ende habrá mayor cantidad de partículas lo que hace mas difícil la separación.

**Tabla 27.** Efecto de la variación de la presión en la separación en hidrociclón a 22.5 % de sólidos.

Presión (psi)	Relación alumina/sílice en producto arcilloso del rebalse	Índice de azul (meq/100 g) en producto arcilloso del rebalse
10	0.54	20.0
15	0.49	19.5
20	0.48	19.5

**Gráfica 12.** Curva de relación alumina/sílice en el producto arcilloso del hidrociclón vs. Presión a 22.5 % de sólidos.

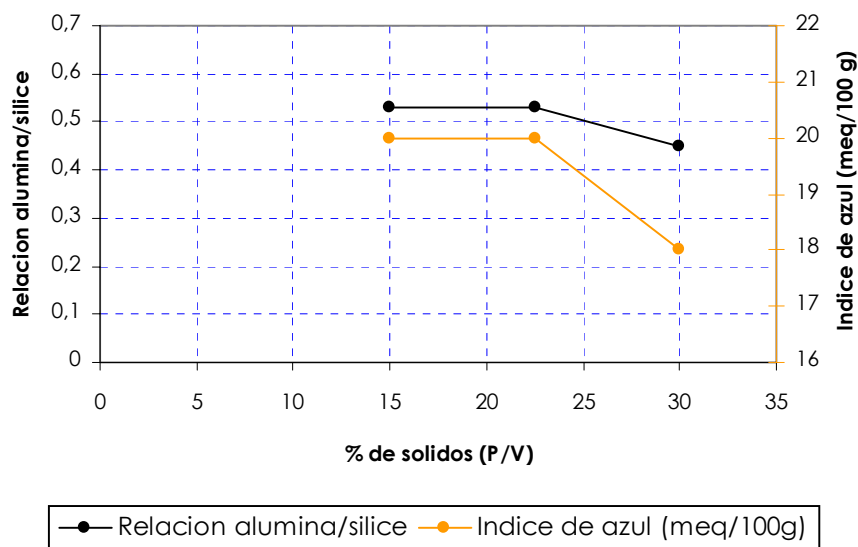


**6.2.4.3. Selección del porcentaje de pulpa.** En la Tabla 28 y en la Gráfica 13 se presentan los resultados de estas pruebas. Al aumentar el porcentaje de pulpa de 15% a 22.5 % de sólidos, la relación alumina/sílice se mantiene constante, mientras que para un porcentaje de sólidos del 30% la relación disminuye de 0.53 a 0.45, descenso que se refleja en el índice de azul de metileno, el cual disminuye de 20 a 18 meq/100g, disminuyendo la eficiencia de separación del hidrociclón. Aumentar el porcentaje de sólidos al 30% disminuye la eficiencia de separación debido a que se aumenta la cantidad de partículas, lo que dificulta la función del hidrociclón.

**Tabla 28.** Efecto de la variación de % de sólidos en la separación en hidrociclón a 10 psi.

% de Sólidos	Relación alumina/sílice en producto arcilloso del rebalse	Índice de azul (meq/100 g) en producto arcilloso del rebalse
15.0	0.53	20
22.5	0.53	20
30.0	0.45	18

**Gráfica 13.** Curva de relación alumina/sílice en el producto arcilloso del hidrociclón vs. % de sólidos a 10 psi.



**6.2.4.4. Características del material arcilloso obtenido por hidrociclón.** Después de aplicadas las mejores condiciones de dispersión-hidrociclón:

- ✓ Silicato de sodio: 0.6 % V/P
- ✓ pH: 10
- ✓ Porcentaje de sólidos: 22.5 %.
- ✓ Presión de trabajo: 10 psi.
- ✓ Hidrociclón Bauer

Se obtuvo un material arcilloso desarenado cuya composición química se muestra en la Tabla 29.

**Tabla 29.** Composición química del mineral desarenado por hidrociclón.

Composición química	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	LOI
%	55.57	8.34	29.94	0.33	3.69	0.00	1.97	0.16

La adsorción de azul de metileno (MIB) del material arcilloso obtenido en el rebalse del hidrociclón fue de 20 meq/100 g, lo cual indica que la MIB de la arcilla se incrementó en 90.4 %, mientras que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue de 22 meq/100 g, incrementando su valor en 57.1 %.

Aun cuando los resultados de MIB como de CIC reportaron incrementos significativos considerables permitiendo concluir que se ha separado cuarzo y se ha concentrado mineral arcilloso, la composición química, indica que a pesar de que ha disminuido la sílice y aumentado la alúmina, estas variaciones no son tan significativas, como para obtener un buen producto arcilloso.

**6.2.5. Prueba de separación magnética.** El porcentaje de hierro en el mineral arcilloso después de su paso por separador magnético, es igual al del mineral inicial (6.32%). Por lo que se concluye que no hubo separación de hierro a partir de la arcilla y por lo tanto el hierro presente en el mineral no es hierro magnético.

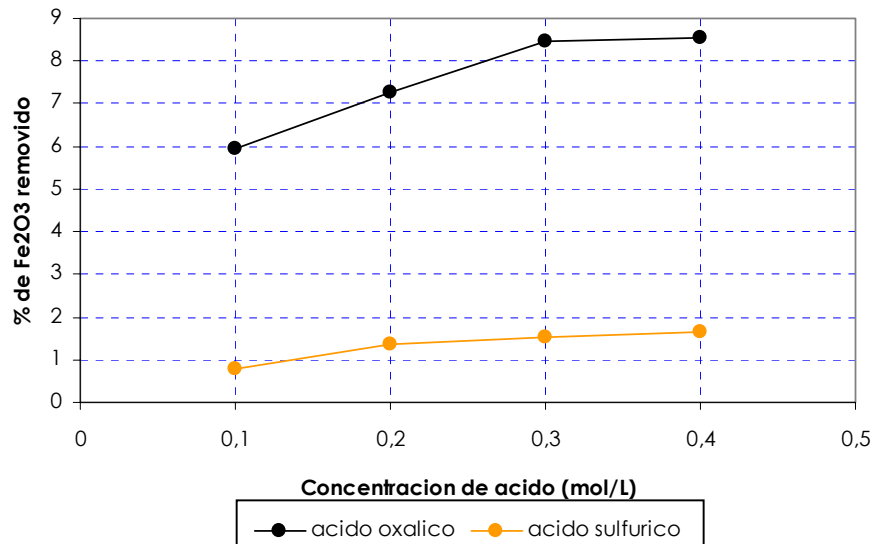
### 6.2.6. Estudio del Proceso de Lixiviación.

**6.2.6.1. Selección del tipo de lixiviante y su dosificación.** Los resultados de los ensayos para la evaluación de los lixiviantes a diferentes dosificaciones se presentan en la Tabla 30 y en la Gráfica 14. En esta gráfica, se observa que el porcentaje de hierro disuelto fue más alto para todas las dosificaciones con el ácido oxálico que con el sulfúrico, alcanzándose un máximo de disolución de 8,55%

**Tabla 30.** Efectos del lixiviante y su dosificación en la remoción de hierro durante 12 horas de agitación a 500 rpm.

Lixiviante	Concentración de ácido (M)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> removido (%)
Ácido Oxálico	0.1	5,94
	0.2	7,25
	0.3	8,46
	0.4	8,55
Ácido Sulfúrico	0.1	0.78
	0.2	1.37
	0.3	1.54
	0.4	1.67

**Gráfica 14.** Curva de remoción de hierro vs. Concentración del lixiviante para 12 horas de agitación a 500 rpm.

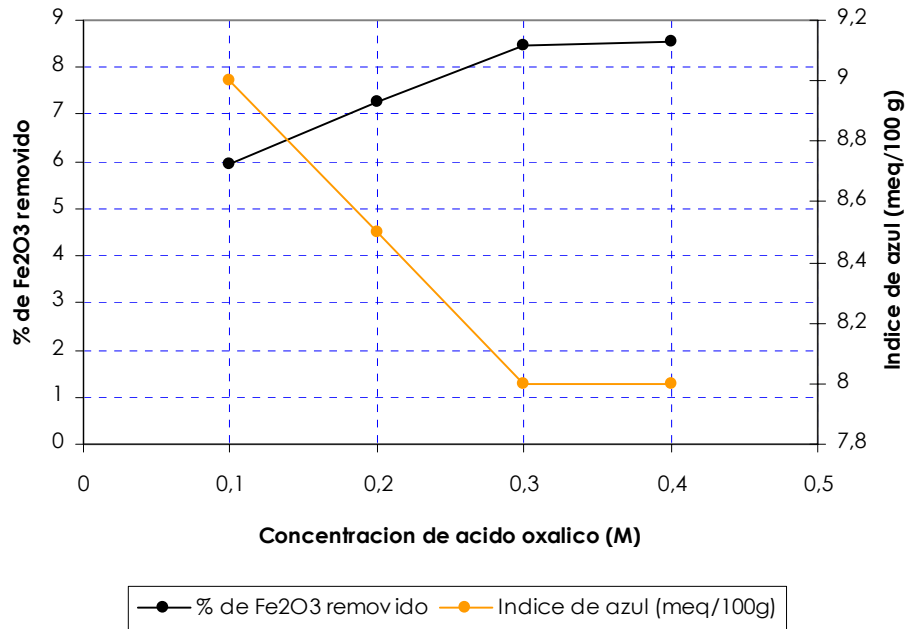


Al incrementar la concentración de ácido oxálico se incrementa la disolución de hierro, pero esta disolución no es tan significativa, tal como se puede apreciar en la Tabla 31, pasando de un 5.94 % a un 8.55 %, en donde la disolución se estabiliza en 0.3 molar.

**Tabla 31.** Efecto de la remoción de hierro sobre el poder adsorbente de la arcilla.

Concentración de ácido oxálico (mol/L)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> removido (%)	Índice de azul (meq/100 g)
0.1	5,94	9
0.2	7,25	8,5
0.3	8,46	8
0.4	8,55	7,5

**Gráfica 15.** Curva de hierro removido e índice de azul vs. Concentración de ácido para 12 horas de agitación a 500 rpm y 25 °C.



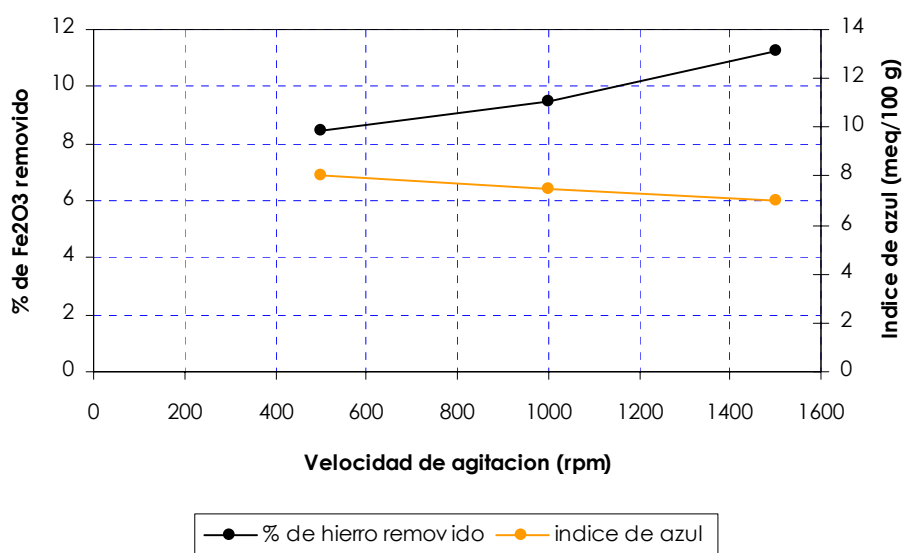
En la Grafica 15, se observa que al incrementar la concentración de ácido oxálico, disminuye el índice de azul de metileno. Aunque esta disminución no es tan significativa, si concuerda con el aumento de hierro removido del material arcilloso; tal como se aprecia en la Tabla 31, donde la disolución de hierro pasa de un 5.94 % a un 8.55%, y el índice de azul lo hace de 9 meq/100 g a 7.5 meq/100 g.

**6.2.6.2. Influencia de la velocidad de agitación.** En la tabla 32 y en la Gráfica 16 se muestran los resultados obtenidos de estas pruebas. Se observa que el incremento en el porcentaje de remoción de hierro no es muy significativo, pasando de un 8.46 % a un 11.24 % de hierro removido por disolución, lo que hace pensar que el control de la lixiviación es químico.

**Tabla 32.** Efecto del grado de agitación sobre la remoción de hierro y el poder adsorbente del residuo de lixiviación a 0.3 M de ácido oxálico, 12 horas de contacto y 25 °C.

Velocidad de agitación (rpm)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> removido (%)	Índice de azul (meq/100 g)
500	8.46	8
1000	9.48	7.5
1500	11.24	7

**Gráfica 16.** Curva de hierro removido e índice de azul vs. Velocidad de agitación para 12 horas de agitación a 0.3 M de ácido oxálico y 25 °C.

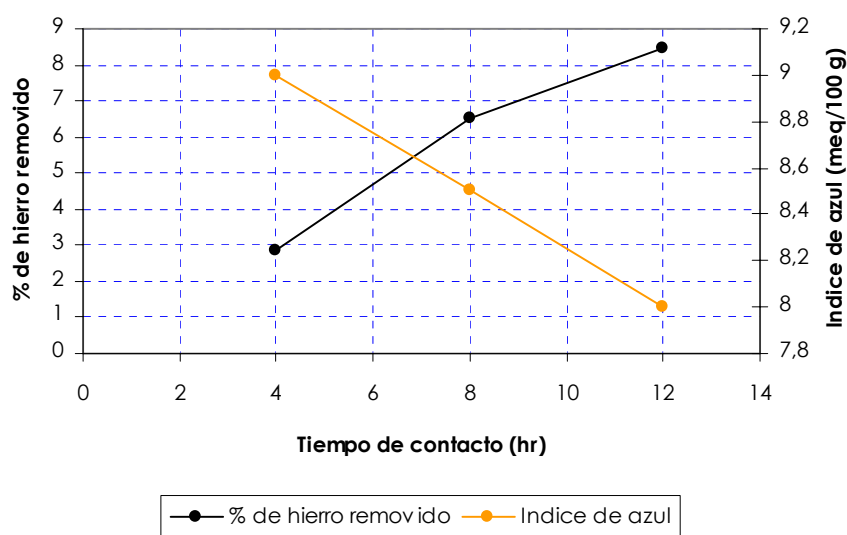


**6.2.6.3. Influencia del tiempo de agitación.** Los resultados de estas pruebas se presentan en la Tabla 33 y en la grafica 17. Al igual que con la velocidad de agitación, el tiempo de contacto no ejerce una influencia significativa en la lixiviación del hierro.

**Tabla 33.** Efecto del tiempo de contacto sobre la remoción de hierro y el poder adsorbente del residuo de lixiviación a 0.3 M de ácido oxálico, 500 rpm y 25 °C.

Tiempo de contacto (hr)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> removido	Índice de azul (meq/100 g)
4	2.86	9.0
8	6.52	8.5
12	8.46	8.0

**Gráfica 17.** Curva de hierro removido e índice de azul vs. Tiempo de contacto para 0.3 M de ácido oxálico a 1500 rpm y 25 °C.



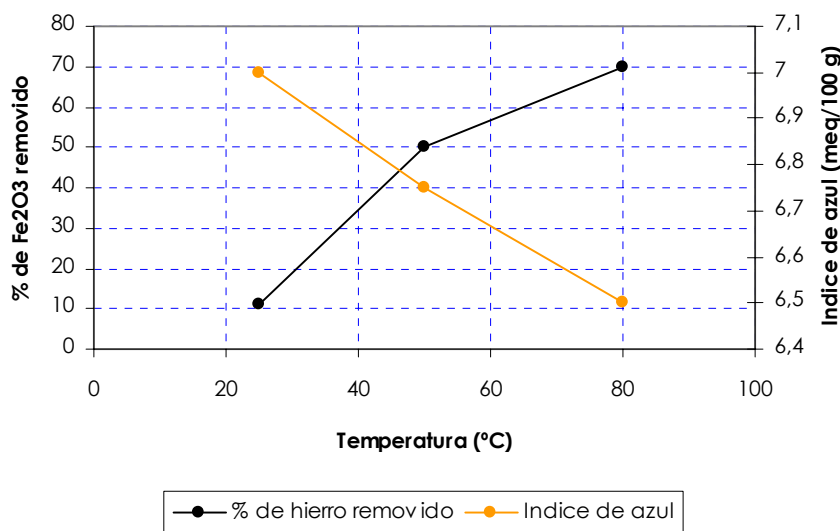
**6.2.6.4. Influencia de la temperatura.** En la Tabla 34 y en la Gráfica 18 se presentan los resultados de estos ensayos. La temperatura a diferencia de los otros factores evaluados si ejerce gran influencia, corroborando la hipótesis de que el control es químico. Se alcanzó una disolución de hierro del 69.85 %, porcentaje que es significativo. Pero se disminuyó la adsorción de azul de metileno en cuatro unidades comparándola con la arcilla natural. Esto último se atribuye a que los óxidos de hierro favorecen la capacidad de intercambio

catiónico de las arcillas, por lo que al eliminarlos disminuye esta propiedad. Por tanto no es conveniente remover el hierro cuando las arcillas se van a utilizar como materiales adsorbentes.

**Tabla 34.** Efecto de la temperatura sobre la remoción de hierro y el poder adsorbente del residuo de lixiviación a 0.3 M de ácido oxálico, 12 horas de contacto y 1500 rpm.

Temperatura (°C)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> removido (%)	Índice de azul (meq/100 g)
25	11.24	7.00
50	50.20	6.75
80	69.85	6.50

**Gráfica 18.** Curva de hierro removido e índice de azul vs. Temperatura para 12 horas de agitación a 1500 rpm y 0.3 M de ácido oxálico.



**6.2.6.5. Características del material arcilloso obtenido por lixiviación.** Después de aplicadas las mejores condiciones de lixiviación:

- ✓ Concentración de ácido oxálico: 0.3 M

- ✓ Tiempo de contacto: 12 hr.
- ✓ Velocidad de agitación: 1500 rpm.
- ✓ Temperatura de lixiviación: 80 °C.

Se obtuvo un producto cuya composición se muestra en la Tabla 35.

**Tabla 35.** Composición química del material arcilloso después de lixiviado.

Composición química	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	LOI
%	71.28	1.71	22.95	0.11	2.72	0.00	0.83	0.40

El valor de la absorción de azul de metileno (MIB) del material obtenido después de la lixiviación fue de 6.5 meq/100 g, indicando que hubo una disminución en la absorción de 38.1 %; mientras que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue de 10 meq/100 g, indicando una disminución de 28.57 %.

## **7. PROPUESTA DEL SISTEMA DE BENEFICIO**

### **7.1. DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO PROPUESTO**

A partir de los resultados del estudio experimental realizado se puede hacer la discusión que a continuación se presenta.

El desarenamiento por sedimentación presentó los mejores resultados de eliminación de cuarzo y de aumento de la capacidad de adsorción del material arcilloso. De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta los diferentes medios de dispersión empleados para el desarrollo de dicha etapa, se observó que los valores de composición química obtenidos por agitación asistida por ultrasonido son muy cercanos a los obtenidos con solo agitación mecánica; sin embargo, los valores de capacidad de intercambio catiónico son mayores empleando este último medio de dispersión.

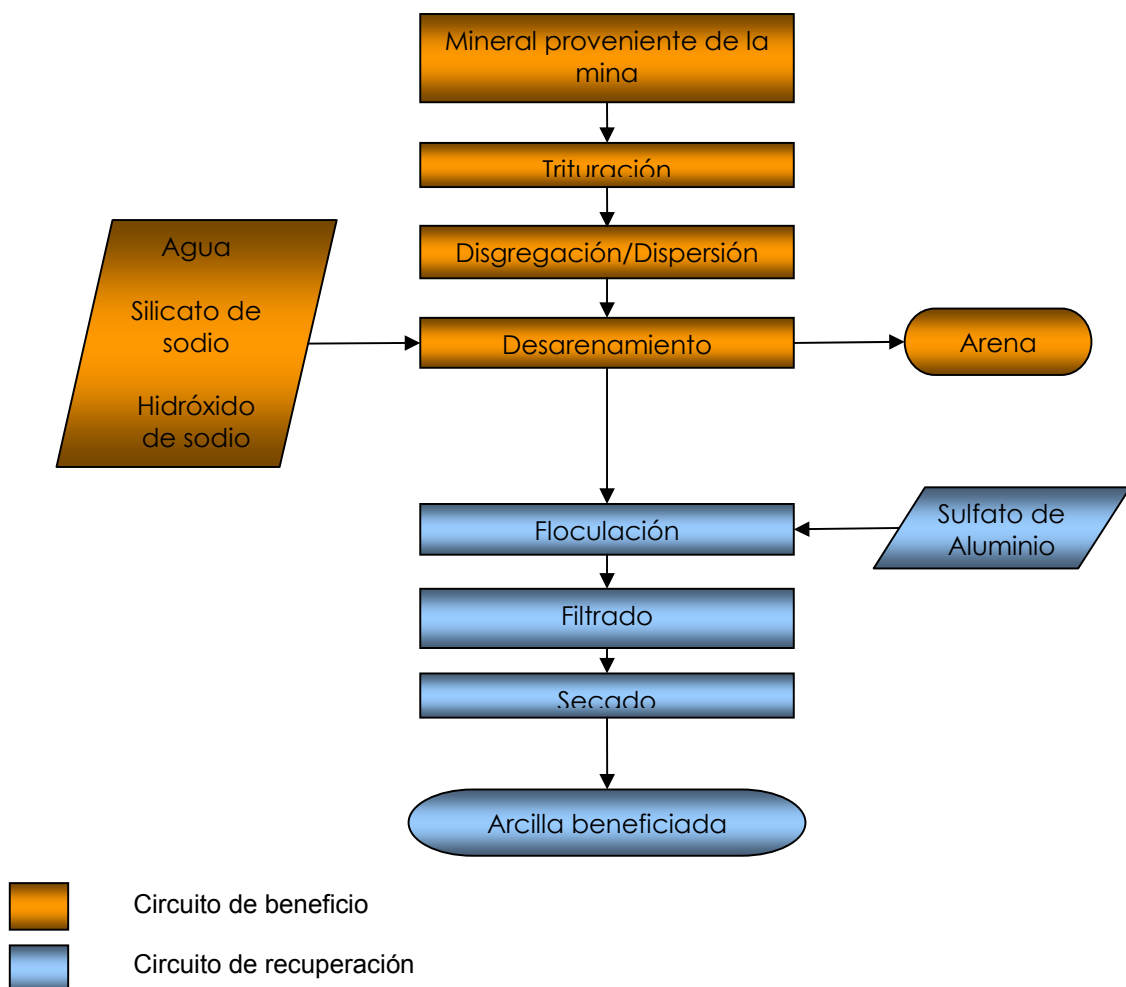
Con base en lo anterior, y teniendo en cuenta que la propuesta del sistema de beneficio de la arcilla se encuentra encaminada a la obtención de un material apto para la adsorción de metales pesados, es conveniente considerar aquellos procesos que proporcionen valores de capacidad de intercambio catiónico más elevados. De esta manera, se propone una etapa de dispersión con agitación mecánica a 2700 rpm y el desarenamiento por medio de un hidroespesador.

Aunque estudios y plantas actuales de beneficio de arcillas (especialmente caoliníficas) sugieren una etapa final de lixiviación, para una mayor eliminación de hierro, para la aplicación de la arcilla como material adsorbente no es conveniente, debido a que la lixiviación aunque remueve

un alto porcentaje de hierro, disminuye significativamente la capacidad de intercambio catiónico de esta.

Atendiendo estas consideraciones, se propone para el beneficio del mineral arcilloso de la Ladrillera Cootrasalba el sistema descrito en la Figura 22.

**Figura 22.** Diagrama de bloques de la planta propuesta para el mineral arcilloso de la ladrillera Cootrasalba.



El diagrama de flujo propuesto consta de 2 circuitos:

**Circuito de beneficio:** comprende las etapas de trituración, disgregación/dispersión y desarenamiento.

**Circuito de recuperación:** conformado por los procesos de floculación, filtrado y secado.

El mineral extraído de la mina es lavado en el circuito de beneficio. Este circuito inicia con la etapa de trituración, de donde se obtiene un producto a una granulometría inferior a 25.4 mm para ser depositado en una pila de almacenamiento.

Una vez el mineral ha alcanzado la granulometría apropiada, sigue hacia la etapa de disgregación/dispersión donde se agita mecánicamente una pulpa al 30% en sólidos, a un pH de 10, utilizando hidróxido de sodio, y con adición de silicato de sodio como dispersante. La pulpa proveniente de la disgregación/dispersión es bombeada hacia un hidroespesador, donde se realiza la remoción de la arena.

Posteriormente el mineral pasa al circuito de recuperación, en donde se efectúa la separación sólido/ líquido de la arcilla dispersa en la pulpa. Para esto, la pulpa es bombeada hacia un tanque de floculación, donde se adiciona sulfato de aluminio como floculante, luego el producto floculado es transportado hacia el filtro, Y finalmente la torta es llevada a la etapa de secado, donde se tendrá la arcilla beneficiada.

## **7.2. PRUEBA DE BENEFICIO FINAL**

Para comprobar si el mineral de la mina se adecua al proceso de beneficio propuesto, se realizó una prueba final en la cual se sometió el mineral del

frente de explotación a todos los procesos y en la secuencia como se presenta en el sistema propuesto. Luego se realizó un análisis químico y prueba de capacidad de intercambio catiónico al producto final.

Los resultados del análisis químico del producto arcilloso beneficiado (Tabla 36), muestran que la arcilla obtenida presenta un elevado porcentaje de alumina como consecuencia del proceso de beneficio al cual fue sometida, logrando aumentarlo de un 26.09 % en la muestra inicial a un 38,24% en el producto final. Este incremento concuerda con el aumento de la capacidad de intercambio catiónico, que incrementó de 14 meq/100 g en la muestra inicial a 26 meq/100g en el producto final, un incremento del 85.7% o 12 unidades en la capacidad de intercambio catiónico.

**Tabla 36.** Análisis químico del mineral beneficiado de la ladrillera Cootrasalba según el sistema propuesto.

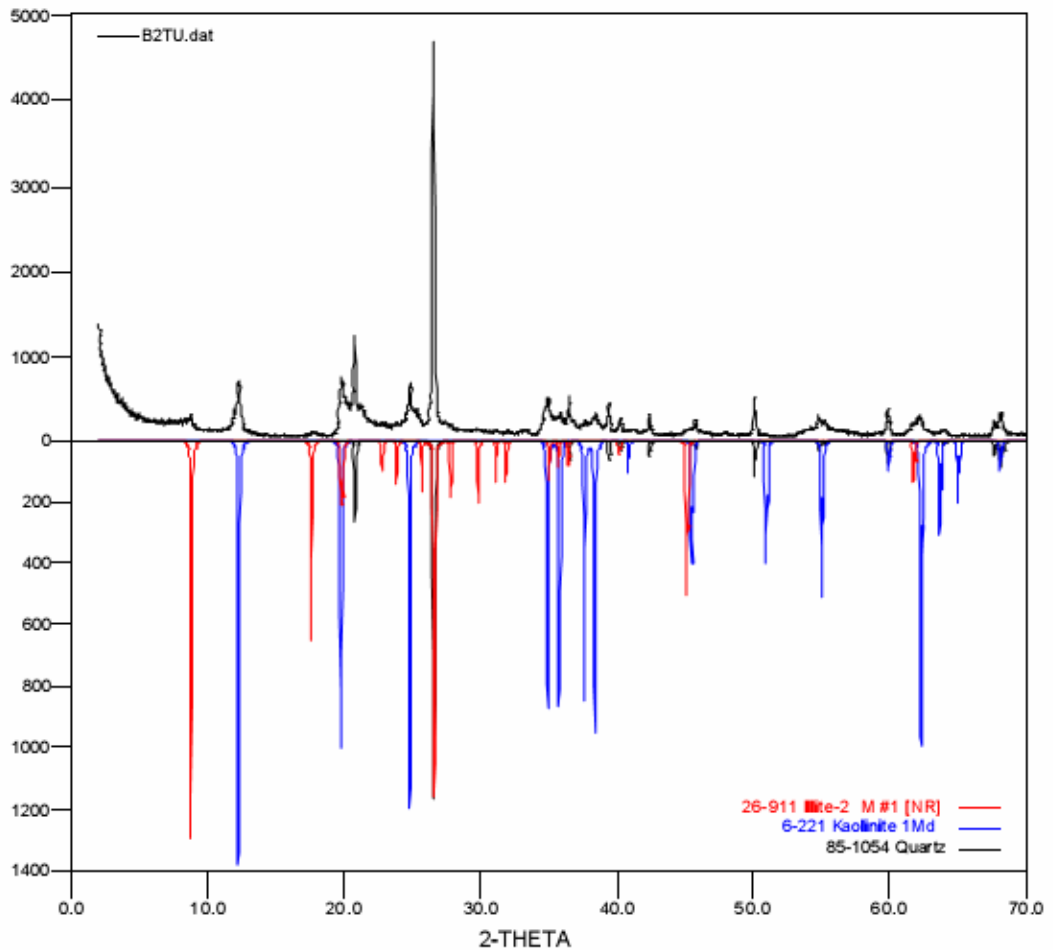
Composición química	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	LOI
%	50.50	6.52	38.24	0.36	2.32	0.00	1.71	0.35

En la Tabla 37 y en la Figura 23 se observa el análisis mineralógico de la arcilla beneficiada.

**Tabla 37.** Composición mineralógica del mineral beneficiado.

	FASE	NOMBRE	CUANTITATIVO(%)
Cristalinos	SiO <sub>2</sub>	Cuarzo	10.29
	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	Caolinita	44.66
	(K,H <sub>3</sub> O)Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	Illita	34.63
	Amorfa		10.42

**Figura 23.** Difractograma de la arcilla beneficiada.



Estos datos confirman que el proceso propuesto es adecuado para el beneficio del mineral con miras a su aplicación como material absorbente.

### 7.3. DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE LOS PROCESOS

Se puso una base de cálculo de 40 t/d para los cálculos del balance de masa, ya que esa es la cantidad de mineral que procesan los mineros de la ladrillera. El perfil de recuperación de la arcilla en la pulpa del proceso de desarenamiento fue determinado de acuerdo a los datos del laboratorio.

A continuación se presenta una descripción de los procesos que conforman la propuesta.

**Circuito de beneficio.** Actualmente el sistema empleado para la extracción de arcillas en la Ladrillera Cootrasalba es a cielo abierto y el arranque se realiza por medio de buldózer Caterpillar D4, el cargue por medio de cargadores y se transporta hasta el sitio de acopio. Debido a que el mineral se extrae con buldózer, el material explotado presenta forma de bloques o terrones, cuyos tamaños promedios van desde los 400 a 500 mm. Este material constituye la materia prima a beneficiarse por el sistema propuesto.

El mineral extraído de la mina inicia el proceso con una trituración primaria a través de una trituradora de rodillo dentado, cuya función es desterronar la arcilla, que se alimenta con tamaños que van desde los 400 a 500 mm para obtener un producto de granulometría inferior a 200mm. Este producto sigue para una trituración secundaria, a través de una trituradora de triples rodillos para obtener un producto de tamaño promedio de 25.4 mm.

Estos equipos se seleccionaron, ya que en general las trituradoras de rodillos son especiales para manejar material grueso, húmedo y pegajoso. Una trituradora de triples rodillos es un equipo compuesto por una trituradora de rodillo sencillo seguido por una trituradora de rodillo doble.

Posteriormente el mineral será depositado en una pila de almacenamiento, con el fin de asegurar un flujo continuo del mineral alimentado a las etapas siguientes del sistema de beneficio.

Luego, el producto triturado se carga a una tolva que alimenta a una banda transportadora, la cual descarga el mineral a la etapa de disgregación.

El mineral triturado será alimentado con flujo regulado a tanques de disgregación/dispersión por medio de la banda transportadora. En estos tanques se llevará a cabo tanto la disgregación como la dispersión del mineral, con el fin de liberar y mantener en suspensión las partículas arcillosas. La disgregación del mineral, se realizará por medio de la adición continua y controlada de flujos de soluciones de agua, dispersante 0.6% de silicato de sodio, y acondicionador de pH hidróxido de sodio para mantenerlo en un valor de 10. El porcentaje de sólidos de la pulpa en los tanques será del 30% en peso y tendrá un tiempo de residencia de 15 minutos. La descarga de la pulpa disgregada y dispersa se realizará por rebalse del tanque y servirá de alimento a la etapa de desarenamiento por sedimentación.

La pulpa procedente de las celdas de disgregación/dispersión, servirá de alimento al proceso de desarenamiento, el cual se llevará a cabo en un espesador con un tiempo de residencia de 60 minutos. De este equipo se obtendrán dos productos de pulpas de mineral, los sedimentos y los suspendidos. En los sedimentos, arenas o colas se encontrará el cuarzo, y en los suspendidos estarán los minerales arcillosos de illita y caolinita.

La descarga de los sedimentos se realizará por la parte inferior del espesador, mediante el movimiento de los rastrillos los cuales desplazarán las arenas hasta el centro del equipo, desde donde se bombeará el sedimento hasta la pila de almacenamiento de colas.

La pulpa de suspendidos o material concentrado saldrá por la parte superior del espesador como rebalse. El porcentaje de recuperación del mineral en los suspendidos será del 67.54%, según los resultados de laboratorio.

**Circuito de recuperación.** La pulpa de mineral arcilloso de suspendidos proveniente de la etapa de desarenamiento será alimentada al tanque de floculación, donde se adiciona sulfato de aluminio como floculante, en una relación de 10 Kg/ t mineral, con el fin de hacer efectiva la filtración.

La pulpa floculada se transporta hasta un filtro rotatorio de tambor, del cual se obtendrá una torta de mineral filtrado con un porcentaje de sólidos del 60% en peso.

Por último la torta de mineral será alimentada a la etapa de secado donde será pulverizada y empacada, para ser comercializada a la industria de materiales adsorbentes.

#### **7.4. ELABORACIÓN DEL BALANCE DE MASA Y EL DIAGRAMA DE FLUJO DETALLADO**

A continuación se presentan los parámetros de operación de cada una de las etapas de la planta de beneficio.

**Tabla 38.** Características generales de la planta de beneficio para la obtención de un producto arcilloso para la industria de los materiales adsorbentes.

<b>Características generales</b>		
Capacidad mineral mina seco	40	t/d
Tiempo de operación	8	h
Humedad de mina	12.69	%
Densidad real del mineral	2.2834	g/cm <sup>3</sup>

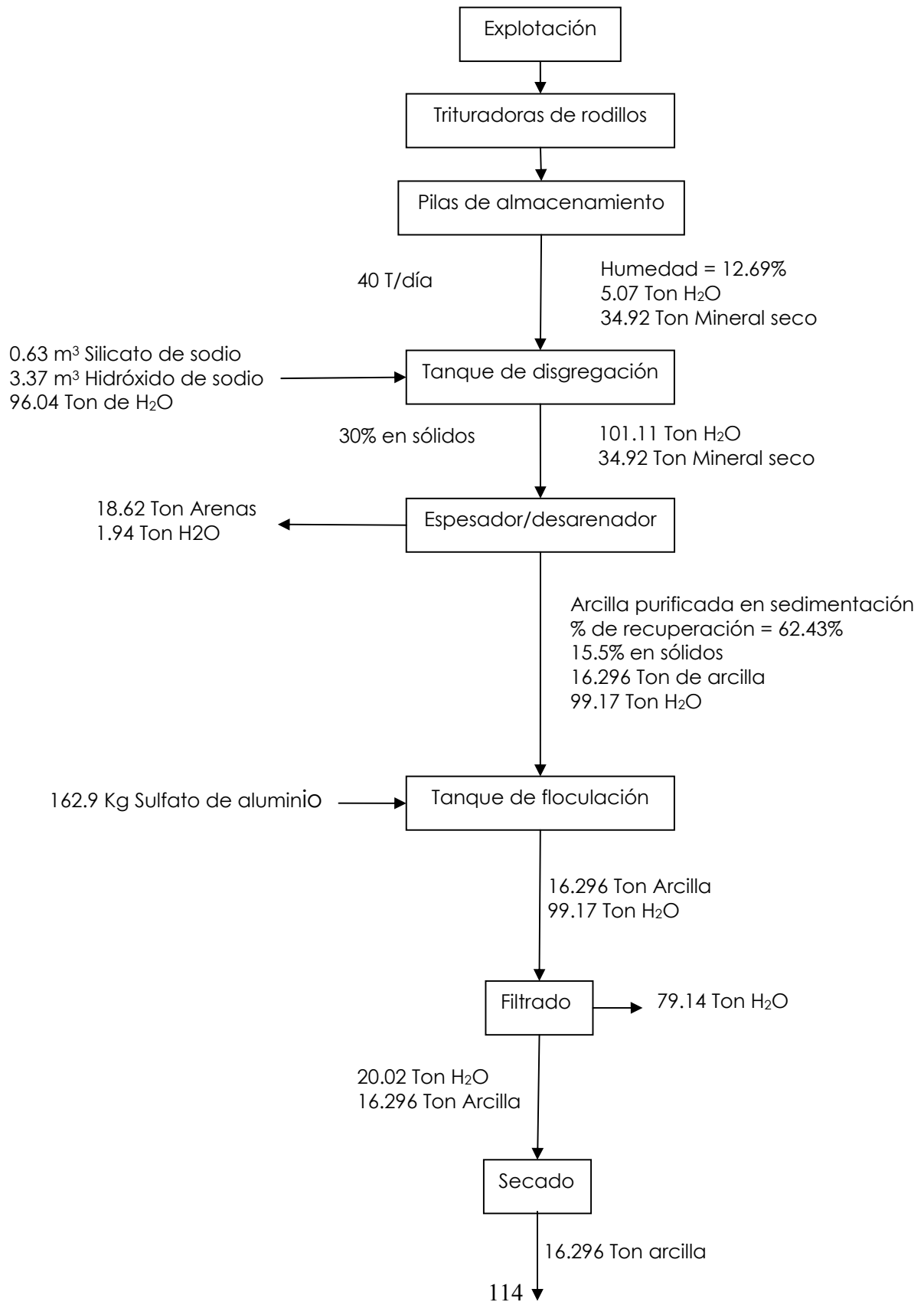
Porcentaje de recuperación total de la planta	67.54	%
<b>Contenido mineralógico de la mena</b>		
Caolinita	23.32	%
Illita	31.46	%
Cuarzo	26.42	%
Anatasa	2.36	%
Haloisita	1.74	%
<b>Etapa de trituración</b>		
Tamaño mineral de alimento	400 - 500	mm
Tamaño mineral del producto	25,4	mm
<b>Etapa de disgregación/dispersión</b>		
Reactivo de dispersión	Silicato de sodio	
Densidad del dispersante (1:1)	1.23	g/cm <sup>3</sup>
Dosificación de dispersante	0,6	% V/P mineral
Reactivo modificador de pH	Hidróxido de sodio	
Densidad del hidróxido de sodio (3 M)	1.11	g/cm <sup>3</sup>
Dosificación de hidróxido de sodio	3.33	% V/P mineral
Tiempo de residencia	15	min
pH de pulpa	10	
Porcentaje de sólidos de pulpa	30	%
Densidad del líquido	1,0	g/cm <sup>3</sup>
Densidad de pulpa disgregación	1.18	g/cm <sup>3</sup>
<b>Etapa de desarenamiento</b>		
Porcentaje de recuperación	67.54	%
Porcentaje de sólidos suspendidos	15.5	%
Tiempo de residencia	60	min
Densidad de pulpa sedimentos	1,92	g/cm <sup>3</sup>
Densidad de pulpa suspendidos	1,1	g/cm <sup>3</sup>
<b>Composición mineralógica suspendidos</b>		
Caolinita	44.66	%
Illita	34,63	%
Cuarzo	10,29	%
<b>Composición química de suspendidos</b>		
SiO <sub>2</sub>	50.50	%
FE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.52	%
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	38.24	%
MgO	0.36	%
K <sub>2</sub> O	2.32	%
CaO	0.00	%
TiO <sub>2</sub>	1.71	%

LOI	0.35	%
<b>Composición química de sedimentos</b>		
SiO <sub>2</sub>	84.47	%
FE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.89	%
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.86	%
MgO	0.097	%
K <sub>2</sub> O	0.52	%
CaO	0.00	%
TiO <sub>2</sub>	1.10	%
LOI	0.06	%
<b>Etapa de floculación y filtración</b>		
Reactivo floculante	Sulfato de aluminio	
Dosificación floculante	10	Kg/ Ton mineral
Tiempo de residencia en floculación	3,5	min
Porcentaje de sólidos a floculación	15.5	%
Porcentaje de sólidos en torta filtrada	60	%
<b>Etapa de secado</b>		
Porcentaje de humedad del producto	3	%

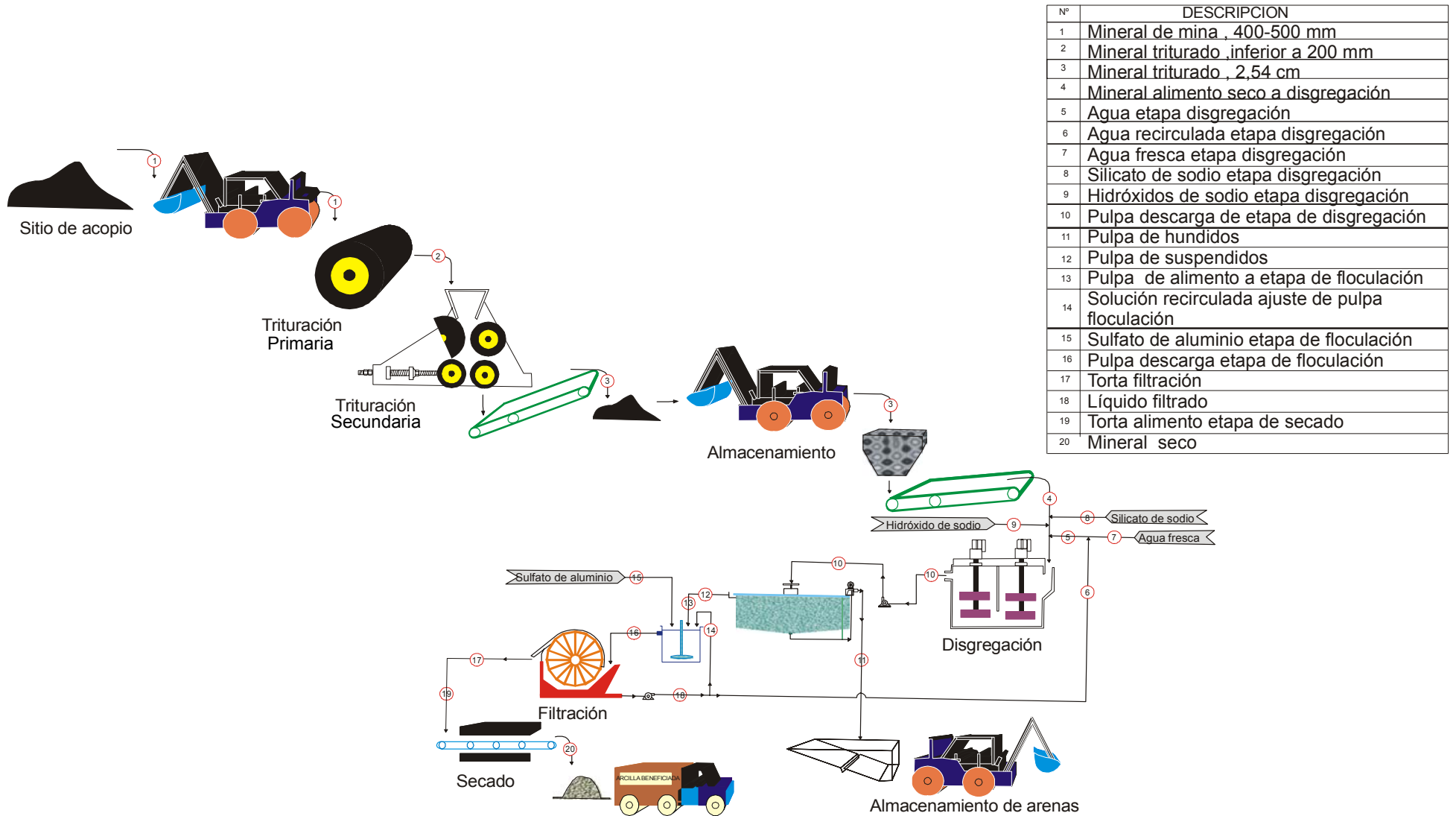
El balance de masa del sistema propuesto se realizó teniendo en cuenta los parámetros de operación presentados en la Tabla 38, y los resultados se presentan en la Figura 24.

En la Figura 25 se muestra el diagrama de flujo de la planta propuesta para el beneficio de la arcilla.

**Figura 24.** Balance de masa de la propuesta de beneficio.



**Figura 25.** Diagrama de flujo de la planta propuesta para el beneficio de la arcilla común de Barranca (Santander).



## CONCLUSIONES

Con base en la información obtenida de la caracterización geoquímica y fisicoquímica podemos decir que la arcilla de la mina de la ladrillera Cootrasalba corresponde a una arcilla común según el U. S. Bureau of Mines.

En cuanto al proceso de disgregación/dispersión, el uso de agitación mecánica a 2700 rpm, 0.6% V/P de silicato de sodio como dispersante y pH 10, permitió obtener las mejores condiciones de dispersión posibles para este estudio.

Dentro de los procesos de desarenamiento la sedimentación presentó los mejores resultados en cuanto a eliminación de cuarzo a partir de la arcilla natural. Según el análisis químico se incrementó la alúmina de un 26.09 % hasta un 38.24 %, al mismo tiempo se logró incrementar la adsorción de azul de metileno de 10.5 meq/100 g hasta 22 meq/100 g equivalente a un aumento del 109 %, igualmente para la capacidad de intercambio catiónico la cual fue llevada de 14 meq/100 g hasta 26 meq/100 g que significa un incremento del 85.7 % para esta propiedad.

El proceso de lixiviación presentó buenos resultados en cuanto a eliminación de hierro ya que permitió remover un 69.9 % de éste, pero a la vez se disminuyó el índice de azul de metileno en un 30.1 %, lo mismo que la capacidad de intercambio catiónico que disminuyó en un 28.57 %; lo que originó su descarte como proceso de beneficio para el incremento de las propiedades adsorbentes.

La técnica de azul de metileno fue ratificada como prueba calificada para realizar ensayos de capacidad de adsorción en arcillas, debido a que los resultados obtenidos presentaron coherencia con los resultados de la relación alúmina/sílice como de capacidad de intercambio catiónico lo que valida su uso como variable respuesta para los procesos de beneficio estudiados en este proyecto.

La planta de beneficio propuesta como resultado final, permite obtener un material con mayor valor agregado, en comparación al proceso que actualmente se le está dando a este mineral utilizando una planta que no requiere alta tecnología.

## RECOMENDACIONES

El proceso de lixiviación permitió obtener muy buenos resultados en cuanto a remoción de hierro (69.9 %), obteniendo un % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la arcilla final de 1.7, lo cual permite recomendar un estudio mas profundo de dicho proceso para implementarlo en el sistema de beneficio planteado para otras aplicaciones, como es el caso de los cerámicos ya que el % de hierro alcanzado se acerca a los mínimos exigidos según las composiciones químicas exigidas para estos materiales (ver ANEXO B).

Las arenas separadas por sedimentación pueden ser utilizadas en la industria del vidrio, para lo que se requiere un estudio adicional para saber que procesos implementar según las características de pureza requeridas para su aplicación en dicha industria.

Se recomienda un estudio de factibilidad económica para la planta propuesta con el fin de determinar la viabilidad de la implementación del sistema de beneficio.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BARBA, Antonio. BELTRÁN, Vicente. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. Instituto de tecnología cerámica. Graficas Castaño, S.L. España. 1997.
2. KELLY, Errol G. SPOTTISWOOD, David J. Introducción al procesamiento de minerales. Editorial Limusa, S.A. de C.V. México, D.F. 1990.
3. VILLAMIZAR A., Rodrigo. CAMACHO P., Mario. SANCHES M., Antonio. PLAN DE DESARROLLO MINERO – AMBIENTAL PARA SANTANDER. Impreso en Colombia. 1996. Pág. 225 – 230.
4. PIERRE, Blazy. El beneficio de los minerales. Rocas y minerales. España. Pág. 78 -86.
5. <http://www3.usal.es/~delcien/doc/GA.PDF>
6. Final Report- Removal of metals from berkeley pit water using kad technology. Montana Tech of The University of Montana. MSE Technology Applications, Inc. Pennsylvania. 1999.
7. BENVINDO DA LUZ, Adão. CHAVES P., Arthur. TECNOLOGÍA DEL CAOLÍN: ENFOQUE A LA INDUSTRIA DEL PAPEL. Serie rocas e industrias minerales. Corpo editorial. Cetem. Brasil. 2000.

8. BENVINDO DA LUZ, Adão. ESTUDO DE REOXIDACAO E REDUCAO DE FERRO CONTENIDO EM CAULINS. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas. São Paulo. 1998.
9. N. J. Saikia, D. J. Bharali, P. Sengupta, D. Bordoloi, R.L. Goswamee, P.C. Saikia, P.C. Borthakur. Characterization, beneficiation and utilization of a kaolinite clay from Assam, India. Applied CLAY Science. 2003.
10. RAGHAVAN, P. CHANDRASEKHAR, S. Separation of titaniferrous impurities from kaolin by high shear pretreatment and froth flotation. Applied CLAY Science. 2003.
11. S.K. Mandal, P.C. Banerjee. Iron leaching from China clay with oxalic acid: effect of different physico-chemical parameters. Mineral processing. 2004.
12. ÖNAL, Güven. ÖZER, Mustafa. AÍSLAN, Fatma. Sedimentation of clay in ultrasonic medium. Minerals Engineering. 2003.
13. M.S. Hassan, N.A. Abdel-Khalek. Beneficiation and applications of an Egyptian bentonite. Applied CLAY Science. 1998.
14. G., Kahr. F. T., Madsen. Determination of the cation exchange capacity and the surface area of bentonite, illite and kaolinite by methylene blue adsorption. Applied CLAY Science. 1994.
15. CHIAPPONE, Antonella. MARELLO, Stefania. SCAVIA, Claudio. SETTI, Massimo. Clay mineral characterization through the methylene blue test: comparison with other experimental techniques and applications of the method. Canadian Geotechnical Journal. 2004.

16. HANG, P. T. BRINDLEY, G. W. Methylene blue adsorption by clay minerals. Determination of surface areas and cation exchange capacities. *Clays clay Miner.* 1970.
17. MORA R., Leidy. MEJÍA M., Carlos A. Proyecto de grado "Propuesta de un proceso para la reducción de impurezas presentes en los caolines de Oiba (Santander), para la producción de cemento blanco". Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Marzo, 2005.
18. CALA N., Jose M. GARCÍA P., Yezid O. Proyecto de grado "Estudio del mejoramiento de la calidad de los caolines del municipio de Oiba (Santander) usando flotación columnar. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Octubre, 2005.
19. DE MESQUITA, L.M.S. RODRÍGUES T. Bleaching of Brazilian kaolins using organic acids and ferromeneted médium. *Minerals Engineering*. Vol. 9 N° 9. pág. 965 – 971. 1996.
20. VASQUEZ Q., Custodio. Manual de laboratorio de procesos de minerales I. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1983.
21. <http://www.zeta-meter.com>
22. RAGHAVAN, P. CHANDRASEKHAR, S. Separation of titaniferous impurities from kaolin by high shear pretreatment and froth flotation. *Applied Clay Science*. 2003.

23. Zaman, Abbas A. y Mathur, Sharad. Influence of dispersing agents and solution conditions on the solubility of crude kaolin. *Applied Clay Science*. p124-130. 2004.
24. Zhao, S. M. The flotation behaviour of *N*-(3-aminopropyl)-dodecanamide on three aluminosilicates. *Minerals Engineering*, Volume 16, Issues 12, December 2003, Pages 1391-1395.
25. [www.ofite.com](http://www.ofite.com)
26. Garrido, Carlos. Proyecto de ampliación de la infraestructura de la Ladrillera Cootrasalba. 2004.
27. [www.iio.ens.uabc.mx](http://www.iio.ens.uabc.mx)

# ANEXOS

## ANEXO A. METODOLOGIA DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACION

### 1. METODOLOGIA DE LOS ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACION DEL MINERAL

A continuación se muestra la metodología de cada uno de los ensayos realizados para llevar a cabo la caracterización del mineral.

**PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA LOS DRX.** Para este proceso se maceró la muestra en un mortero de ágata hasta una finura menor a la malla 325 Tyler. Posteriormente, el espécimen seleccionado de la muestra fue montado en un portamuestra de aluminio mediante la técnica de llenado lateral.

Condiciones de medición de las muestras:

Voltaje	40 kV
Corriente	20 mA
Rendijas (Slits)	DS 1,0°
	RS 0,3 mm
	SS 1,0°
Velocidad de barrido	3°/min
Muestreo	0,02°
Rango de medición	2 – 70°
Radiación	CuKa
Monocromador	Grafito
Difractómetro	Rigaku modelo D-MAX-III/B
Datos cristalográficos	Powder Diffraction File (PDF-2) the Internacional Center for Diffraction Data (ICDD)

La identificación cualitativa de las fases presentes en las muestras, se realizó mediante comparación de las reflexiones del perfil observado con las reflexiones de los perfiles de difracción reportados en la base de datos Powder Diffraction File del ICDD, utilizando el software respectivo. En el proceso de identificación se aplicó el método de Hanawalt.

Posteriormente para la realización de los análisis cuantitativos se mezcló con la muestra a evaluar una cantidad conocida de un patrón interno, corundum. La medición se hizo a pasos dejando 2 segundos para muestreo en cada paso. Las demás condiciones de medición fueron las mismas utilizadas para el análisis cualitativo.

#### **DETERMINACIÓN DE LA SÍLICE TOTAL (SiO<sub>2</sub>) y ÓXIDOS METÁLICOS EN ARCILLAS.**

##### *Reactivos*

Ácido clorhídrico (HCl) puro, ácido clorhídrico (HCl) en relación 1:1, ácido fluorhídrico (HF) puro, ácido Perclórico (HClO<sub>4</sub>), Hidróxido de sodio, Carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).

##### *Equipos y material de laboratorio*

Crisoles de platino, balanza analítica, mufla, equipo de absorción atómica, plancha de calentamiento, vaso de precipitado de 600mL, varilla de vidrio con policia, vidrio de reloj.

##### *Procedimiento*

1. Pesar 3g de carbonato de sodio en un crisol de platino con tapa
2. Tarar y pesar 0,25g (Wm) de la muestra de caolín sobre la medida anterior

3. Mezclar muy bien con un alambre de platino (preferiblemente), y agregar una capa de carbonato de sodio sobre la mezcla
4. Tapar el crisol y llevar a la mufla hasta 950°C
5. Realizar un montaje con un vaso de precipitado de 600mL, vidrio reloj que cubra el vaso y una varilla de vidrio con policía.
6. Introducir el crisol después de la calcinación de la muestra en el vaso con el montaje, introduciendo en el crisol la varilla.
7. Agregar cuidadosamente ácido clorhídrico 1:1 dentro del crisol de platino.
8. Esperar durante un tiempo hasta que termine de burbujear y cuidadosamente lavar el crisol, previniendo que la muestra quede totalmente dentro del vaso.
9. Adicionar 20mL de ácido perclórico y dejar secar en una plancha.
10. Adicionar 5mL de HCl puro y agua caliente.
11. Dejar enfriar y aforar en un balón de 100mL.
12. Filtrar y recoger el filtrado para la lectura de los metales (Al, Fe, Ca, K, Ti) en el equipo de absorción atómica preparando los respectivos patrones y realizando las correspondientes diluciones dependiendo de la sensibilidad del equipo.
13. Al papel filtro adicionar tres gotas de hidróxido de amonio, y calcinarlo a 1000°C.
14. Pesar el calcinado (W1).
15. Adicionar sobre el calcinado 5mL de HF y dejar evaporar completamente la sílice.
16. Calcinar el crisol de platino con tapa (1000°C).
17. Introducir en un desecador y pesar (W2).

*Sílice Total:*

$$\%SiO_2 = \frac{W1 - W2}{Wm} * 100\%$$

El análisis químico se expresa en forma de óxidos, dando la siguiente información:

✓ %SiO<sub>2</sub>. esta sílice que se determina por este método, es la sílice total presente en el mineral, y su valor es indicativo del porcentaje de sílice libre o cuarzo que posee la muestra y también hace parte de las arcillas presentes con diferente naturaleza, ya que la sílice también se presenta en los minerales arcillosos.

✓ %Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. normalmente su valor está íntimamente relacionado con la porción de mineral arcilloso.

✓ %CaO. El calcio se encuentra normalmente en forma de carbonatos alcalinotérreos (calcita y dolomita).

✓ %MgO. Este óxido se asocia a la presencia de dolomita y clorita.

✓ %K<sub>2</sub>O. Indica la presencia de illita, mica ó feldespato potásico.

✓ Pérdidas por calcinación. Normalmente se debe a la descomposición de los minerales arcillosos y los carbonatos y, en menor medida, a la combustión de la materia orgánica.

✓ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Este óxido se asocia a la presencia de impurezas de mineral de hierro (hematita, magnetita, entre otros).

✓ TiO<sub>2</sub>. Este óxido se asocia a la presencia de impurezas de mineral de titanio (anatasa, rutilo).

#### **DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD**

(Norma ICONTEC 864)

Las muestras obtenidas directamente de la mina fueron transportadas en recipientes sellados herméticamente para lograr el mayor grado de conservación de las muestras.

### *Materiales y equipos*

Balanza analítica, Estufa, Desecador.

### *Procedimiento*

1. Pesar 1g + 0,1mg de muestra en un vidrio reloj
2. Calentar en una estufa durante 1h entre 105 y 110 °C
3. Dejar enfriar la muestra en un desecador
4. Pesar la muestra y repetir el procedimiento hasta peso constante.

*Contenido de humedad:*

$$\%H = \frac{W_m - W_s}{W_m} * 100\%$$

Donde:

$W_m$ : Peso de la muestra

$W_s$ : Peso de la muestra seca

### **DETERMINACIÓN DEL pH DE LA MENA**

*(Norma ASTM 11 D 4972 - 89. Determinación de pH de suelos)*

### *Materiales y reactivos*

Potenciómetro con electrodo, balanza, vasos de precipitados, solución buffer, agua destilada, mineral.

### *Procedimiento*

La preparación del potenciómetro se realiza con soluciones buffer de pH conocido, de la siguiente manera:

1. Lavar los electrodos con agua destilada y secarlos
2. Introducir los electrodos en una solución buffer
3. Verificar el botón de temperatura

4. Colocar el botón del potenciómetro en la posición para leer pH y calibrar al valor de la solución buffer
5. Volver el botón de pH a su posición solución inicial.
6. Sacar los electrodos de la solución buffer.

Así el potenciómetro está listo para determinar el pH de la pulpa.

Determinación de pH con agua destilada

1. Tomar 10 g de mineral.
2. Llevarlo a un recipiente de vidrio adicionando 10 mL de agua destilada.
3. Mezclar y dejar reposar por 1 hora.
4. Leer el pH con el pH metro.

#### **DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL**

*Materiales y reactivos*

Picnómetro, balanza analítica, líquido y mineral

*Procedimiento*

1. Secar la muestra a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$
2. La granulometría del material debe ser  $< 4.75$  mm.
3. Pesar el picnómetro vacío,  $M_f$ , previamente limpio y seco (secar en estufa de laboratorio).
4. Introducir dentro del picnómetro el mineral en estudio (ocupando entre la mitad y las  $\frac{3}{4}$  parte del volumen del picnómetro) y pesar, restando 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 2 mm el peso mínimo de la muestra es de 20 g, para tamaños máximos de 4.75 mm son 100 g)

5. Adicionar líquido para humectar completamente el sólido y sacar todas las burbujas de aire que estén presentes.

El líquido elegido debe poseer las siguientes características:

- Humectar completamente el mineral.
- Penetrar fácilmente en el interior de los poros de la muestra.
- No debe presentar ninguna reacción con el sólido.

6. Completar con el líquido hasta llenar el picnómetro (tener en cuenta la tapa y el capilar) y pesar,  $M_b$ .

7. Vaciar el picnómetro y limpiarlo.

8. Llenar el picnómetro con el líquido elegido y pesar,  $M_a$ .

9. Introducir el termómetro en el agua y registrar la temperatura,  $T$  con  $0.5^\circ\text{C}$  de precisión

10. Cálculo de la densidad :

$$\rho = \frac{M_o \times \text{densidad del líquido}}{[M_o + (M_a - M_b)]}$$

En donde,

$M_o$  = gramos de la muestra sólida seca

$M_a$  = peso del picnómetro lleno con agua

$M_b$  = peso del picnómetro lleno con agua y muestra sólida

#### **DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE AZUL DE METILENO DE ARCILLAS**

(Norma ASTM C 837-99. Índice de azul de metileno de arcillas)

##### *Materiales y Reactivos*

- Balanza
- Agitador
- pHmetro

- Beaker, 600 ml
- Bureta, 25 ml
- Varilla de vidrio
- Papel filtro
- Solución de azul de metileno 0.01N
- Acido sulfúrico 0.1 N

#### *Procedimiento*

- Pesar 2.00 g de arcilla que ha sido previamente secada por 24 horas en horno y colocarla en un beaker de 600 ml.
- Adicionar 300 ml de agua destilada al beaker y mezclar con el agitador hasta que la arcilla quede uniformemente dispersa.
- Determinar el pH de la pulpa y adicionar suficiente acido sulfúrico para mantener el pH dentro del rango de 2.5 a 3.8. continuar agitando después de que el pH ha sido alcanzado (se haya adicionado la ultima cantidad de acido) de 10 a 15 minutos.
- De nuevo determine el pH para saber si es necesario adicionar mas acido para mantener el pH en el rango 2.5 a 3.8.
- Con la pulpa aun agitándose, llene la bureta con solución de azul de metileno, adicione 5 ml de solución a la pulpa y agitar por 1 a 2 minutos.
- Remover una gota de la pulpa usando la varilla de vidrio y colocarla sobre el borde del papel filtro.
- Observe la apariencia de la gota sobre el papel filtro. El punto final es indicado por la formación de un halo azul claro alrededor de la gota. Continué adicionando de 1 ml solución de azul de metileno a la pulpa durante 1 a 2 minutos de agitación después de cada adición hasta que el punto final es alcanzado. Para arcillas ball clays con relativamente altos índices de azul de metileno, el ensayo puede iniciar después de haber

adicionado 2 o 3 veces de 5 ml para el mismo tiempo. Esperar 1 a 2 minutos de agitación después de agregar cada adición.

- Después de que el punto final es alcanzado, continuar agitando por 2 minutos y confirmar.

**ANEXO B. ESPECIFICACIONES REQUERIDAS PARA LA INDUSTRIA CERÁMICA.**

Muestra	Composición elemental, %			Mineral pasante, %		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	> 25 μm	> 10 μm	< 2 μm
<b>Cerámicos Grado I</b>	37,0 (min)	0,8 (máx)	0,7 (máx)	5 (máx)	15 (máx)	70 (min)
<b>Cerámicos Grado II</b>	34,0 (min)	1,0 (máx)	0,8 (máx)	7 (máx)	20 (máx)	65 (min)
<b>Cerámicos Grado III</b>	32,0 (min)	1,5 (máx)	1,0 (máx)	10 (máx)	25 (máx)	60 (min)