

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE BENEFICIO PARA UNA ARCILLA
MONTMORILLONÍTICA NACIONAL**

**AGNI YAMILE CARREÑO CONTRERAS
JOSE FERNANDO MACÍAS CHACÓN**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2007

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE BENEFICIO PARA UNA ARCILLA
MONTMORILLONÍTICA NACIONAL**

**AGNI YAMILE CARREÑO CONTRERAS
JOSE FERNANDO MACÍAS CHACÓN**

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

Director

M.Sc. Ing. Julio Elías Pedraza Rosas

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2007**

A DIOS. *Por proporcionarme la fortaleza y paciencia necesarias para afrontar con entereza las dificultades; así como por haber puesto en mi camino, a cada uno de los ángeles que me ayudaron a superar las mismas. Gracias Señor.*

A MI MADRE, *Esperanza Contreras. Por dedicar toda su vida de trabajo y sacrificios para ver mi sueño hecho realidad. Gracias Ma.*

A MI PADRE, *Feliciano Carreño (E.P.D). Porque con sus exigencias me hizo comprender la importancia de siempre ir más allá...*

A MI HERMANA, *Nohora Carreño Contreras. Por su constante y valiosa colaboración.*

A MI AMIGO, *Julián Alberto Morón. Por ser ejemplo de fortaleza y superación personal.*

A MIS FAMILIARES Y AMIGOS. *Por el apoyo que de alguna u otra forma me brindaron durante todo este tiempo.*

AGNI YAMILE

A Dios, por que hace posible que todos los elementos de este mundo se dispongan para que cualquier cosa, por sencilla que sea, pueda suceder.

A mis Padres, Carmen y Alvaro, por enseñarme el valor de la vida, y como conseguir las cosas a punta de trabajo y dedicación. Además por estar ahí durante todo este tiempo. Gracias por la Paciencia, y sobre todo, gracias por ser mis padres.

A mi hermano German, por servirme de ejemplo y mostrarle una dirección a mi vida, haciéndome saber como puedo llegar a ser.

A mi compañera Agni, porque sin su dedicación, la culminación de este proyecto no hubiese sido posible.

A mis Amigos, Prospero, Freddy, William, Claudia, Dennyse, Pilar, Mary, Alex, Johana, Erika y Esmeralda. Quienes saben lo que para mi significa la amistad y lo importante que ha sido su compañía en todos los buenos y malos momentos que hemos vivido durante estos últimos años.

A quien me dio la Fuerza para seguir adelante en un duro momento de mi vida. Porque no solo me mostró lo que por alguna razón olvide que estaba dentro de mí, sino que también me sirvió de ejemplo y me inspiro admiración... Gracias, pues sin ese último empujón no hubiese llegado.

JOSE FERNANDO

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a las siguientes personas y entidades:

- M.Sc. Ing. Julio Elías Pedraza Rosas, Director de proyecto, por su instrucción, apoyo y colaboración a lo largo de este tiempo.
- M.Sc. Químico. Olger Mendoza Villabona, Coordinador Químico Laboratorio GIMBA, por sus valiosos aportes y asesoría técnica.
- Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA), por acogernos y brindarnos los medios necesarios para el desarrollo de nuestro trabajo de grado.
- Los técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica: Ambrosio Carrillo, Daniel Garavito, Javier Gaitán y Orlando Buitrago, por su paciencia y entera disposición a la hora de brindarnos su asistencia técnica.
- Los técnicos de la Escuela de Ingeniería Química: Guillermo Acero, Wilson Carreño y Eduardo Carreño, por facilitarnos sus equipos e instalaciones para la realización de los ensayos del estudio reológico.
- Técnico Alejandro Torres de la Escuela de Química por su colaboración.
- Laboratorio de Difracción de Rayos-X de la Escuela de Química, especialmente al Ph. D. Henao, por su valiosa contribución.

- A las empresas Mineralcol y ECOMIN, por su colaboración en el suministro de las muestras.
- A todo el cuerpo de docentes de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, en especial a los profesores: Ph.D. Elcy María Córdoba T. y Ph.D. Darío Yesid Peña B., por sus palabras de apoyo y constante ayuda.
- A todas aquellas personas que de alguna u otra forma nos brindaron su compañía y apoyo durante este tiempo.

TÍTULO: PROPUESTA DE UN SISTEMA DE BENEFICIO PARA UNA ARCILLA MONTMORILLONÍTICA NACIONAL

AUTORES: CARREÑO CONTRERAS, Agni Yamile
MACÍAS CHACÓN, Jose Fernando

PALABRAS CLAVES: Arcillas, bentonita, montmorillonita, atrición, dispersión, capacidad de adsorción, beneficio en húmedo, lixiviación ácida.

RESÚMEN:

Colombia posee arcillas montmorilloníticas, las cuales a pesar de ser explotadas y comercializadas, carecen en su mayoría de estudios de caracterización y beneficio que permitan establecer los procesos adecuados para la obtención de bentonitas de alta calidad.

El objetivo de este proyecto fue el de proponer un sistema de beneficio para una arcilla montmorillonítica nacional, con el fin de incrementar la fracción de las especies arcillosas predominantes, y así mejorar su capacidad de adsorción.

Inicialmente se determinó la composición química y mineralógica de cuatro muestras: Arcicol[®], SB-1, LR-2 y RR-3; la primera comercial, proveniente del Valle del Cauca y las restantes, tipo Run of Mine, de Tolima. Se seleccionaron las muestras Arcicol[®] y LR-2 para aplicarles procesos de beneficio en húmedo. Luego de complementar su caracterización, se realizó un estudio de dispersión y de viscosidad de pulpas. Para su concentración y refinación, se trabajaron procesos que incluyeron un pretratamiento por molienda y por atrición; seguido de desarenamiento por malla, por sedimentación, por flotación espumante, por hidrociclón; y para la remoción de impurezas de hierro, se aplicó la concentración magnética y la lixiviación ácida. La capacidad de adsorción se determinó utilizando los índices de adsorción de azul de metileno MBI y de capacidad de intercambio catiónico CIC.

De acuerdo con los resultados, se determinó que la muestra Arcicol[®] ya se está comercializando con algún proceso de beneficio. Para la mena LR-2, con base en los mejores resultados se propuso un sistema de beneficio, con el cual partiendo de un mineral con 63.4% de especies arcillosas (montmorillonita, illita, caolinita) y 27.97% de cuarzo, después de un tratamiento de atrición/dispersión y desarenamiento por malla más hidrociclón, se obtuvo un producto bajo en cuarzo (5.73%) y concentrado en las especies arcillosas; lográndose un incremento en la relación Al_2O_3/SiO_2 de 0.237 a 0.619 (equivalente al 161.18%) y, en el índice MBI de 20.78 a 45.75 meq/100g (120.16%). La lixiviación resultó ser significativamente desfavorable sobre la capacidad de adsorción del producto.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director M. Sc. Julio Elías Pedraza Rosas.

TITLE: PROPOSAL OF A BENEFICIATION SYSTEM FOR A NATIONAL MONTMORILLONITIC CLAY^{*}

AUTHORS: CARREÑO CONTRERAS, Agni Yamile
MACÍAS CHACÓN, Jose Fernando

KEYWORDS: Clay, bentonite, montmorillonite, attrition, dispersion, adsorption capacity, wet beneficiation, acid leaching.

ABSTRACT:

Colombia has montmorillonitic clays, which in spite of these are exploited and commercialized, in most cases studies about their characterization and beneficiation have not made in order to establish the suitable processes to obtain high quality bentonites.

The objective of this project was to propose a beneficiation system for a national montmorillonitic clay, in order to increase the fraction of the predominant species of clay, and therefore to improve their adsorption capacity.

Initially the chemical and mineralogical composition was determined for four samples: Arcicol[®], SB-1, LR-2 y RR-3; the first one was commercial, originate from Valle del Cauca and the other, Run of Mine type, from Tolima. The samples Arcicol[®] and LR-2 were chosen to apply beneficiation wet processes. After the complementary characterization, a study of dispersion and viscosity of slips was made. For concentration and refinement of the samples, processes which included a pretreatment by grinding and attrition were worked; followed by quartz separation using screens, sedimentation, froth flotation, hydrocyclone; and for the removing of iron impurities, magnetic concentration and acid leaching were applied. The adsorption capacity was determined measuring the Methylene Blue Index MBI and the Cation-Exchange Capacity CEC.

In agreement to the results, it was found the Arcicol[®] sample is actually commercializing after some beneficiation process have been applied. Using the best results for the LR-2 ore, a beneficiation system was proposed, and applying it to the mineral Run of Mine with 63.4% of clays species (montmorillonite, illite, kaolinite) and 27.97% of quartz, after a attrition/dispersion treatment and quartz separation using screens and hydrocyclone, a quartz (5.73%) and concentrated in the clays species was obtained; a increase in the Al₂O₃/SiO₂ ratio from 0.237 to 0.619 (equivalent to the 161.18%) and MBI index from 20.78 to 45.75meq/100g (120.16%) were reached. The leaching resulted is unfavorable on the adsorption capacity of the product.

* Degree Work

** Physical-chemical Engineering Faculty. Metallurgical Engineering and Materials Science School. Director M. Sc. Julio Elías Pedraza Rosas.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	
1. PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	4
1.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA	4
1.2 LAS ARCILLAS EN COLOMBIA	8
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	11
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2. ESTADO DEL ARTE	12
3. FUNDAMENTO TEORICO	16
3.1 GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS	16
3.2 ESTRUCTURA DE LOS FILOSILICATOS	16
3.3 CLASIFICACION DE LAS ARCILLAS	19
3.4 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS	20
3.4.1 Superficie Específica	20
3.4.2 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	21
3.4.3 Capacidad de Sorción	23
3.4.4 Hidratación e Hinchamiento	24
3.5 VISCOSIDAD Y DISPERSIÓN DE LAS PULPAS DE ARCILLA	25
3.6 BENTONITA	29
3.6.1 Aplicaciones Industriales de las Bentonitas	30
3.6.2 Procesos de Beneficio de las Arcillas	31
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	39
4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ADQUISICIÓN DE MUESTRAS	41

4.2 CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS MENAS A BENEFICIAR	41
4.2.1 Caracterización Geoquímica y Mineralógica	42
4.2.2 Selección de las Menas a Beneficiar	42
4.2.3 Caracterización Fisicoquímica	43
4.2.3.1 Capacidad de Adsorción	44
4.2.3.2 Carga Eléctrica Superficial	46
4.2 ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE PULPAS DE LAS MENAS A BENEFICIAR	47
4.4 ESTUDIO DE LA VISCOSIDAD DE PULPAS DE LAS MENAS A BENEFICIAR	48
4.5 DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO DE LAS MENAS SELECCIONADAS	50
4.5.1 Selección de los Procesos de Beneficio	50
4.5.2 Diseño Experimental de los Procesos de Beneficio	51
4.5.2.1 Ensayos de Desarenamiento	51
4.5.2.2 Ensayos para la Remoción de Impurezas de Hierro	51
4.5.3 Evaluación de los Procesos de Beneficio	53
4.5.4 Ensayos de Pretratamiento de las Menas	54
4.5.4.1 Molienda	54
4.5.4.2 Atrición	54
4.5.4.3 Análisis Granulométrico	56
4.5.5 Estudio de Desarenamiento por Separación por Malla en Húmedo	57
4.5.6 Estudio de Desarenamiento por Sedimentación	57
4.5.6.1 Influencia del Tipo de Agitación Durante la Dispersión	58
4.5.6.2 Influencia del Pretratamiento de Hidratación	59
4.5.6.3 Influencia de los Pretratamientos de Molienda y Atrición	59
4.5.7 Estudio de Desarenamiento por Hidrociclón	60
4.5.8 Estudio de Desarenamiento por Flotación Espumante	62
4.5.9 Estudio de Separación Magnética	62
4.5.10 Estudio del Proceso de Lixiviación Ácida	63
4.5.10.1 Bentonita “Comercial”	63

4.5.10.2 Bentonita “Run of Mine”	64
4.6 EVALUACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y PROPUESTA DEL SISTEMA DE BENEFICIO	65
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	66
5.1 CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS MENAS A BENEFICIAR	66
5.1.1 Caracterización Geoquímica y Mineralógica de las Muestras Bentoníticas	66
5.1.1.1 Composición Química	66
5.1.1.2 Composición Mineralógica	67
5.1.2 Selección de las Menas a Beneficiar	68
5.1.3 Caracterización Fisicoquímica de las Menas a Beneficiar	69
5.1.3.1 Viscosidad de Pulpas	70
5.1.3.2 Carga Eléctrica Superficial	71
5.2 ESTUDIO DE DISPERSIÓN DE PULPAS DE LAS MENAS A BENEFICIAR	73
5.2.1 Mineral Arcicol®	73
5.2.2 Mineral LR-2	75
5.3 ESTUDIO DE VISCOSIDAD DE PULPAS DE LAS MENAS A BENEFICIAR	77
5.3.1 Mineral Arcicol®	77
5.3.2 Mineral LR-2	81
5.4 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS MENAS A BENEFICIAR	83
5.4.1 Mineral Arcicol®	83
5.4.2 Mineral LR-2	86
5.4.2.1 Pretratamiento de Molienda	86
5.4.2.2 Pretratamiento de Atrición	89
5.5 VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA DE AZUL DE METILENO COMO MÉTODO PARA DETERMINAR LA CANTIDAD DE ESPECIES ARCILLOSAS	91
5.6 PROCESOS DE BENEFICIO APLICADOS A LAS MENAS ESCOGIDAS	93
5.6.1 Desarenamiento por Separación por Malla en Húmedo	93
5.6.1.1 Mineral Arcicol®	93
5.6.1.2 Mineral LR-2	97
5.6.2 Desarenamiento por Sedimentación	99

5.6.2.1 Mineral Arcicol®	99
5.6.2.2 Mineral LR-2	105
5.6.3 Desarenamiento por Hidrociclón	111
5.6.3.1 Características del Producto Arcilloso Concentrado por Hidrociclón	113
5.6.3.2 Características de las Colas o Descarga del Hidrociclón	115
5.6.4 Desarenamiento por Flotación Espumante	117
5.6.5 Mejor Proceso de Desarenamiento de la Mena LR-2	118
5.6.6 Remoción de Hierro por Separación Magnética	118
5.6.7 Remoción de Hierro por Lixiviación Ácida para el Mineral Arcicol®	119
5.6.7.1 Selección del Tipo de Agitación y de la Concentración del Agente Lixivante	119
5.6.7.2 Selección de la Temperatura de Lixiviación y del Tiempo de Residencia del Mineral en el Sistema	121
5.6.7.3 Composición Química y Mineralógica del Producto Arcilloso Obtenido después del Proceso de Lixiviación	126
5.6.8 Remoción de Hierro por Lixiviación para el Mineral LR-2	129
6. PROPUESTA DEL SISTEMA DE BENEFICIO	132
6.1 EVALUACIÓN DEL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD ADSORTIVA DE LAS MENAS BENEFICIADAS	132
6.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL DIAGRAMA DE FLUJO PROPUESTO	133
6.3 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE CADA PROCESO PROPUESTO	135
6.3.1 Etapa de Trituración	135
6.3.2 Etapa de Atrición / Dispersión	136
6.3.3 Etapa de Desarenamiento por Malla en Húmedo	137
6.3.4 Etapa de Desarenamiento por Hidrociclón	137
6.3.5 Etapa de Recuperación	138
6.4 BALANCE DE MASA Y DIAGRAMA DE FLUJO PROPUESTO PARA EL BENEFICIO DE LA ARCILLA LR-2	139
6.5 TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS	143
CONCLUSIONES	145

RECOMENDACIONES	148
BIBLIOGRAFÍA	149
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los minerales arcillosos	19
Tabla 2. Superficie específica de algunas arcillas	21
Tabla 3. Capacidad de intercambio catiónico de algunos minerales arcillosos	22
Tabla 4. Características de estabilidad de los coloides	28
Tabla 5. Terminología comercial empleada para la bentonita	29
Tabla 6. Operaciones para el procesamiento de arcillas	33
Tabla 7. Condiciones de trabajo para la determinación del Potencial Zeta en el estudio de dispersión de las muestras de arcilla seleccionadas	48
Tabla 8. Variables operativas utilizadas en el estudio de la viscosidad de pulpas bentoníticas	50
Tabla 9. Variables operativas utilizadas para el pretratamiento de atrición de la mena bentonítica "Run of Mine"	56
Tabla 10. Variables operativas trabajadas en el desarenamiento por hidrociclón	61
Tabla 11. Composición química de las bentonitas nacionales recolectadas (sobre muestra seca, % en peso)	66
Tabla 12. Composición mineralógica de las bentonitas nacionales recolectadas	67
Tabla 13. Parámetros fisicoquímicos de las menas Arcicol [®] y LR-2	69
Tabla 14. Viscosidad de pulpas para el mineral Arcicol [®]	70
Tabla 15. Viscosidad de pulpas para el mineral LR-2	71
Tabla 16. Influencia de la dosificación de dispersantes sobre el Potencial Zeta del sistema arcilla-agua (mineral Arcicol [®])	74
Tabla 17. Influencia de la dosificación de dispersantes sobre el Potencial Zeta del sistema arcilla-agua (LR-2)	76

Tabla 18. Viscosidad de pulpa para mineral Arcicol [®] en función del contenido de sólidos y la velocidad de agitación mecánica en dispersión	78
Tabla 19. Viscosidad de pulpas para el mineral Arcicol [®] en función del contenido de sólidos y de la velocidad de ultra-agitación en dispersión	80
Tabla 20. Viscosidad de pulpas para el mineral LR-2 en función del contenido de sólidos y de la velocidad de agitación mecánica en dispersión	81
Tabla 21. Distribución granulométrica del mineral Arcicol [®]	84
Tabla 22. Distribución microgranulométrica del mineral Arcicol [®]	85
Tabla 23. Distribución granulométrica del mineral LR-2 preparado por molienda	86
Tabla 24. Evaluación del MBI y de la relación Al_2O_3 / SiO_2 para las fracciones >325# Tyler del mineral LR-2 después de la molienda	87
Tabla 25. Distribución microgranulométrica del mineral LR-2 preparado por molienda	88
Tabla 26. Distribución granulométrica del mineral LR-2 preparado por atrición	89
Tabla 27. Distribución microgranulométrica del mineral LR-2 preparado por atrición	90
Tabla 28. Composición química del producto pasante de la malla #325 Tyler para el mineral Arcicol [®]	93
Tabla 29. Composición mineralógica del producto pasante por la malla 325# Tyler para el mineral Arcicol [®]	94
Tabla 30. Composición química del producto retenido por la malla 325# Tyler para el mineral Arcicol [®]	95
Tabla 31. Composición mineralógica del producto retenido por la malla 325# Tyler para el mineral Arcicol [®]	96
Tabla 32. Composición química del producto pasante por la malla #325 Tyler del mineral LR-2	97
Tabla 33. Variación del índice MBI de la fracción pasante por la malla 325# Tyler con el tiempo de atrición del mineral LR-2	98
Tabla 34. MBI del material suspendido obtenido bajo influencia de velocidades de ultra-agitación diferentes para el mineral Arcicol [®]	99

Tabla 35. Variación del índice MBI del producto suspendido en función del tiempo de sedimentación bajo diferentes clases de agitación en la dispersión del mineral Arcicol [®]	100
Tabla 36. Influencia del pretratamiento de hidratación y del tiempo de sedimentación sobre el índice MBI del producto suspendido del mineral disperso de Arcicol [®]	102
Tabla 37. Composición química del producto suspendido obtenido bajo 40min de sedimentación del mineral Arcicol [®]	103
Tabla 38. Composición mineralógica del producto suspendido obtenido después de 40min de sedimentación para el mineral Arcicol [®]	104
Tabla 39. Influencia del tiempo de sedimentación sobre el índice de adsorción MBI de los productos suspendido y sedimento del mineral LR-2 previamente molido a -48# Tyler	105
Tabla 40. Composición química del producto suspendido obtenido por sedimentación del mineral LR-2 molido a -48# Ty	108
Tabla 41. Composición mineralógica del producto suspendido obtenido por sedimentación del mineral LR-2 molido a -48# Tyler	108
Tabla 42. Composición química del concentrado obtenido mediante sedimentación del mineral LR-2 disgregado y tamizado a -250 μ m (-60#Ty)	110
Tabla 43. Composición mineralógica del producto obtenido por sedimentación del mineral LR-2 disgregado y tamizado a -250 μ m (-60#Ty)	110
Tabla 44. Influencia del contenido de sólidos y la presión de trabajo sobre el MBI del rebalse para el mineral LR-2	112
Tabla 45. Composición química de la fracción fina del mineral LR-2 obtenida en la separación por hidrociclón (20% p/p y 45psi)	113
Tabla 46. Composición mineralógica del rebalse del mineral LR-2 obtenido en la separación por hidrociclón (20% p/p y 45psi)	114
Tabla 47. Composición química de las colas obtenidas en la separación por hidrociclón para el mineral LR-2 (20% p/p y 45psi)	116
Tabla 48. Composición mineralógica del producto de la descarga del hidrociclón para el mineral LR-2 (20% p/p y 45psi)	116

Tabla 49. Influencia de la dosificación de colector sobre el MBI de los productos de flotación del mineral LR-2	118
Tabla 50. Influencia del tipo de agitación y de la concentración de ácido oxálico sobre la disolución del hierro y el aluminio mediante lixiviación ácida del mineral Arcicol [®] (12h, 80°C, 10% p/p, pH 1.5 ± 0.5)	119
Tabla 51. Influencia del tiempo de lixiviación del producto beneficiado del mineral Arcicol [®] sobre la disolución de hierro y aluminio a diferentes temperaturas (0.3M ácido oxálico, 10% p/p, pH 1.5 ± 0.5, agitación recíproca)	122
Tabla 52. Relación Al ₂ O ₃ / SiO ₂ (r) y la Capacidad de Adsorción del mineral Arcicol [®] tratado con 0.3M de ácido oxálico a 80°C durante tiempos de lixiviación de 4, 8 y 12h, respectivamente	125
Tabla 53. Composición química del producto del mineral Arcicol [®] lixiviado con 0.3M de ácido oxálico, a 80°C durante 12h (% en peso, sobre muestra seca)	127
Tabla 54. Composición mineralógica de la muestra Arcicol [®] lixiviada	127
Tabla 55. Influencia del porcentaje de sólidos sobre la remoción de hierro y aluminio del mineral LR-2	129
Tabla 56. Condiciones requeridas para la etapa de atrición / dispersión de la mena "Run of Mine" LR-2	136
Tabla 57. Características generales de la etapa de desarenamiento por malla practicada a la mena "Run of Mine" LR-2	137
Tabla 58. Características generales del proceso de desarenamiento por hidrociclón practicada a la mena "Run of Mine" LR-2	138
Tabla 59. Características generales y condiciones de la planta de beneficio de la mena bentonítica "Run of Mine" LR-2	139

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Árbol causa-efecto para el planteamiento del problema	7
Figura 2. Estructura tetraédrica de Si-O	16
Figura 3. Estructura 2:1 (T:O:T) de arcillas tipo Esmectita	18
Figura 4. Unión de capas octaédricas y tetraédricas formando láminas de arcilla	18
Figura 5. Estructura card-house de la arcilla montmorillonítica	26
Figura 6. Fuerzas entre partículas coloidales	27
Figura 7. Efecto del pH sobre el potencial zeta y la viscosidad aparente de una suspensión de arcilla	28
Figura 8. Diagrama general de un proceso de beneficio vía húmeda para una bentonita	34
Figura 9. Diagrama general de beneficio en húmedo de arcillas caoliníticas	35
Figura 10. Planta de procesamiento en húmedo de caolín de Sandersville-Georgia-EUA	36
Figura 11. Diagrama de flujo para el procesamiento en seco de bentonita	37
Figura 12. Planta de beneficio de caolín con tres etapas de refinado y tres de lavado mediante hidrociclones (Amberger Kaolin-Werke, Hirschau)	38
Figura 13. Etapas y actividades adelantadas para el desarrollo del proyecto	40
Figura 14. Determinación del MBI	46
Figura 15. Tipos de agitadores empleados en la determinación de la viscosidad de pulpas bentoníticas	49
Figura 16. Esquema general de desarenamiento aplicado para concentrar las arcillas	52

Figura 17. Procesos empleados para la remoción de impurezas de hierro	53
Figura 18. Sistema de agitación de una celda de flotación Denver provisto de un arreglo de aspas de doble hélice invertida para la atrición del mineral	55
Figura 19. Esquema del sistema sifón utilizado en la recuperación del mineral suspendido	58
Figura 20. Sistema de desarenamiento por hidrociclón	61
Figura 21. Viscosidad de pulpas para el mineral Arcicol [®]	70
Figura 22. Viscosidad de pulpas para el mineral LR-2	71
Figura 23. Potencial Zeta de suspensiones de las arcillas Arcicol [®] y LR-2	72
Figura 24. Efecto de la dosificación de silicato de sodio sobre el potencial zeta del sistema arcilla-agua (Arcicol [®])	73
Figura 25. Efecto de la concentración de pirofosfato de sodio sobre el potencial zeta del sistema arcilla-agua (Arcicol [®])	73
Figura 26. Efecto de la concentración de silicato de sodio sobre el potencial zeta del sistema arcilla -agua (LR-2)	75
Figura 27. Influencia de la dosificación de pirofosfato de sodio sobre el potencial zeta del sistema arcilla-agua (LR-2)	76
Figura 28. Variación de la viscosidad de pulpa para mineral Arcicol [®] en función del contenido de sólidos a diferentes velocidades de agitación mecánica en dispersión	78
Figura 29. Viscosidad de pulpas del mineral Arcicol [®] en función de la velocidad de agitación en dispersión a diferentes porcentajes de sólidos	80
Figura 30. Variación de la viscosidad de pulpas del mineral LR-2, en función del contenido de sólidos a diferentes velocidades de agitación mecánica en dispersión	82
Figura 31. Viscosidad de pulpas del mineral LR-2, en función de las velocidades de agitación mecánica en dispersión a diferentes porcentajes de sólidos	83
Figura 32. Distribución microgranulométrica del mineral Arcicol [®]	85

Figura 33. Curva de distribución microgranulométrica del mineral LR-2 preparado por molienda	88
Figura 34. Curva de distribución microgranulométrica del mineral LR-2 preparado por atrición	91
Figura 35. Influencia del acumulado retenido sobre el MBI y la relación Al_2O_3/SiO_2 de cada malla	92
Figura 36. Comparación entre la relación Al_2O_3/SiO_2 (r) y MBI del producto del rebalse del hidrociclón para diferentes porcentajes de sólidos en la arcilla LR-2	92
Figura 37. Difractograma del producto pasante por la malla 325# Tyler para el mineral Arcicol [®]	94
Figura 38. Difractograma del producto retenido por la malla 325# Tyler para el mineral Arcicol [®]	96
Figura 39. Variación del índice MBI del producto suspendido en función del tiempo de sedimentación bajo diferentes clases de agitación en la dispersión del mineral Arcicol [®]	100
Figura 40. Efecto del pretratamiento de hidratación y del tiempo de sedimentación sobre el índice MBI del producto suspendido del mineral disperso de Arcicol [®]	102
Figura 41. Difractograma del producto obtenido después de 40min de sedimentación para el mineral Arcicol [®]	104
Figura 42. Efecto del tiempo de sedimentación sobre el índice de adsorción MBI de los productos suspendido y sedimento del mineral LR-2 previamente molido a -48# Tyler	106
Figura 43. Difractograma del producto suspendido obtenido por sedimentación del mineral LR-2 molido a -48# Tyler	109
Figura 44. Difractograma del concentrado obtenido por sedimentación del mineral LR-2 disgregado y tamizado a $-250\mu m$ (-60# Ty)	111
Figura 45. Efecto del contenido de sólidos y la presión de trabajo sobre el MBI del rebalse en el mineral LR-2	112

Figura 46. Composición mineralógica del rebalse producto de la separación por hidrociclón (LR-2, 20% p/p y 45psi)	115
Figura 47. Difractograma del producto de la descarga del hidrociclón (LR-2, 20% p/p y 45psi)	117
Figura 48. Efecto de la concentración de ácido oxálico sobre la lixiviación de hierro y aluminio del producto beneficiado del mineral Arcicol [®] , bajo la acción de dos diferentes tipos de agitación	120
Figura 49. Efecto del tiempo de contacto en la lixiviación del producto beneficiado del mineral Arcicol [®] sobre la disolución de hierro y aluminio a diferentes temperaturas de lixiviación (0.3M ácido oxálico, 10% p/p, pH 1.5 ± 0.5, agitación recíproca)	122
Figura 50. Fotografía del mineral Arcicol [®] en estado natural (a) y lixiviado (b) (0.3M ácido oxálico, 80°C, 12h)	124
Figura 51. Efecto del tiempo de lixiviación sobre los parámetros Capacidad de Adsorción y r del mineral Arcicol [®] tratado por lixiviación ácida (0.3M ácido oxálico, 80°C)	125
Figura 52. Difractograma del mineral Arcicol [®] lixiviado	128
Figura 53. Efecto del contenido de sólidos sobre la remoción de hierro y aluminio en la lixiviación ácida del mineral LR-2	130
Figura 54. Fotografía del mineral LR-2 en estado natural (a) y lixiviado (b) (0.3M ácido oxálico, 80°C, 12h, 10% p/p)	131
Figura 55. Esquema general del sistema de beneficio propuesto para la mena bentonítica LR-2	134
Figura 56. Balance de masa para el sistema de beneficio propuesto	141
Figura 57. Diagrama de flujo de la planta propuesta para el beneficio de la mena "Run of Mine" LR-2	142
Figura 58. Circuito empleado para el tratamiento de relaves y la producción de arena ultrafina	144

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Métodos de Ensayo Utilizados en la Caracterización de las Menas Bentoníticas a Beneficiar

ANEXO B. Difractogramas de las Menas Nacionales Recolectadas

ANEXO C. Composiciones Químicas (Valores Guía) de Algunas Bentonitas Empleadas Mundialmente a Escala Industrial

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo comprende un estudio de caracterización y beneficio de dos menas bentoníticas provenientes de los departamentos del Valle del Cauca y Tolima, de las cuales a pesar de los pocos estudios existentes en la actualidad, se conoce que las características mineralógicas y fisicoquímicas de estas muestras, las hacen aptas para ser preparadas y muy posiblemente empleadas en el tratamiento de las aguas residuales industriales, con lo cual se le otorga a las mismas un valor agregado, ya que hoy en día este tipo de minerales son utilizados casi exclusivamente en la industria cerámica, del cemento y del papel.

Este proyecto hace parte de un macroproyecto realizado por el Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente denominado “Desarrollo de materiales adsorbentes como una alternativa tecnológica para la reducción de la carga contaminante en vertimientos generados en la industria de los electrorecubrimientos” (8484), mediante el cual se busca estudiar nuevas tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales de éste tipo de industrias; de igual forma, es respaldado por la Dirección de Investigación y Extensión de la Facultad (DIEF), por medio del proyecto “Producción de arcillas modificadas (Tipo Montmorillonita) a partir de bentonitas colombianas” (5422).

A lo largo de los últimos años, se han realizado estudios para la implementación de una técnica que consiste en aprovechar las arcillas como material adsorbente de algunos metales pesados, ya que estos materiales poseen características fisicoquímicas que los hacen útiles en la remoción de cationes metálicos disueltos en soluciones acuosas.

El objeto principal del trabajo fue estudiar la factibilidad de obtener una arcilla beneficiada, apta para su posible utilización directa o con adición de agentes modificantes, como materia prima en la industria de los materiales adsorbentes.

El trabajo inicialmente consistió en la selección de muestras de minerales de arcilla de las que se conocía previamente que por sus características mineralógicas podrían ser utilizadas para la elaboración de materiales adsorbentes.

Una vez caracterizadas las muestras a tratar, se procedió a aplicar los procesos de beneficio que ayudaran a eliminar las impurezas principales como el cuarzo, la albita e impurezas de hierro, ya que éstos minerales generan una disminución de la capacidad de adsorción de las arcillas.

Por tal razón, se hizo necesaria la aplicación de procesos para el desarenamiento de las menas, tales como la separación por malla en húmedo, por sedimentación, por hidrociclón y por flotación espumante. Con lo anterior, se obtuvieron productos con un menor contenido de ganga silíceo, lo que se vio reflejado en el aumento de la relación Alúmina/Sílice, logrando de esta forma establecer una relación con el Índice Azul de Metileno (MBI) que permitió evaluar la evolución de cada uno de los procesos de beneficio aplicados a las menas seleccionadas.

Así mismo, para la remoción del mineral de hierro se aplicaron a las muestras procesos tales como la lixiviación ácida y la separación magnética, siendo el primero de ellos el que mostró los mejores resultados en cuanto a eliminación de hierro, pero incidiendo negativamente sobre la capacidad de adsorción de las muestras tratadas.

Por último, y con base en la información obtenida en cada una de las etapas del proyecto, se propuso un sistema de beneficio para una de las menas bentoníticas seleccionadas, en el cual las impurezas pudieron ser removidas hasta el punto de

obtener un material con mejores características, lo cual lo hace aceptable para posteriores estudios de adsorción de metales pesados de los efluentes industriales.

1. PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las aguas residuales provenientes de las industrias de los electrorecubrimientos son en la actualidad, uno de los desechos industriales de mayor poder contaminante por sus características tóxicas y corrosivas. A pesar de que existen diferentes tecnologías para el tratamiento de aguas residuales industriales, en nuestro país, la mayoría de éstas han sido estudiadas sólo a escala de laboratorio, debido a los altos costos necesarios para su implementación. Las plantas de tratamiento existentes, se dedican a aliviar el daño cuando éste ya está hecho, es decir, su objetivo es tratar los efluentes contaminados, por medio de diversos procesos tales como eliminación de arena, sedimentación primaria, tratamiento en reactores con lodos biológicos, sedimentación final, espesamiento, estabilización y deshidratación de lodos. Sin embargo, no existe realmente una técnica que de manera sencilla y económica, le permita a las pequeñas industrias de electrorecubrimientos, disminuir la cantidad de metales pesados en sus vertidos hasta niveles permisibles, con lo cual el impacto sobre las aguas sea mínimo.

Por otro lado, las arcillas son hoy en día uno de los minerales industriales con un importante uso, ya que sus aplicaciones se dan en diferentes campos como son cerámica, cemento, medicinas, cosméticos, insecticidas, materiales refractarios, purificantes, blanqueadores y además son útiles en la industria del petróleo. Sin embargo, para que puedan ser utilizados en la mayoría de estas aplicaciones, las arcillas deben cumplir con ciertas características físicas, químicas y mineralógicas.

Por esta razón, se han hecho estudios en varios países para la implementación de una técnica, que consiste en el aprovechamiento de las arcillas como materiales adsorbentes de algunos metales pesados, ya que por sus características

fisicoquímicas, estos minerales son útiles en la remoción de cationes metálicos disueltos en soluciones acuosas, como en el caso de los efluentes industriales. Tales estudios han dado buenos resultados, al punto que su utilización se está convirtiendo hoy en día, en una buena alternativa para combatir este tipo de contaminación.

En el contexto nacional, esta de aplicación se ha visto limitado, ya que en la actualidad ésta alternativa no ha sido lo suficientemente estudiada y las arcillas locales requieren de un análisis riguroso para determinar si tales minerales pueden utilizarse como materiales adsorbentes.

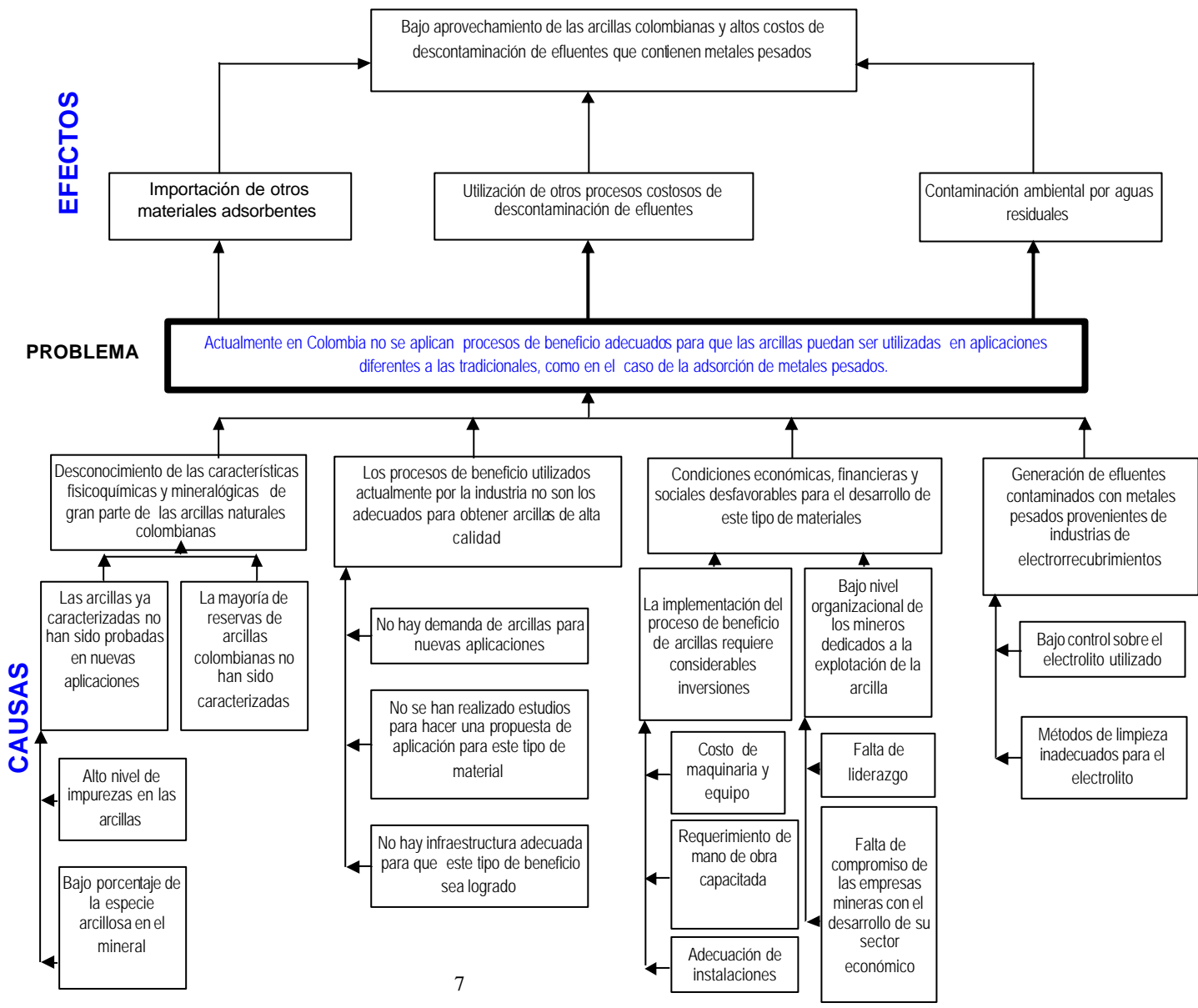
Colombia, cuenta con un gran potencial de reservas de minerales arcillosos, sin embargo, se desconocen las características tanto químicas como mineralógicas de la mayoría de éstas arcillas. Muchos de los minerales arcillosos del territorio nacional, no han sido caracterizados a pesar de estar siendo explotados en la actualidad. Esta es una razón por la cual su utilización únicamente ha sido destinada a propósitos tradicionales, tales como la fabricación artesanal de cerámica, ladrillos, tuberías de gres, etc.

Por otra parte, otra de las razones que han limitado el empleo de estos minerales, es la falta de estudios que evalúen su capacidad de adsorción. Lo anterior, es debido tanto a los altos niveles de impurezas encontrados en las arcillas ya caracterizadas, como a los bajos porcentajes de las especies mineralógicas encargadas de la adsorción. Por tales razones, es de gran importancia que éstas arcillas sean sometidas a un proceso de beneficio adecuado que permita superar aquellos inconvenientes, para que de ésta forma se consiga una arcilla apta para otros propósitos menos tradicionales y, proponer la utilización de este material en la remoción de metales pesados contenidos en los efluentes de las industrias de electrorecubrimientos.

En consecuencia, se hace necesaria la realización de un estudio de caracterización y beneficio para algunas menas arcillosas provenientes de diferentes sitios del territorio nacional, (principalmente de los departamentos de Tolima y Valle del Cauca), las cuales probablemente poseen características mineralógicas y fisicoquímicas que las hacen posibles candidatas para el tratamiento de aguas residuales industriales.

A continuación (Figura 1), se presenta el árbol causa-efecto utilizado para el desarrollo del problema:

Figura 1. Arbol causa – efecto para el planteamiento del problema



1.2 LAS ARCILLAS EN COLOMBIA

En Colombia se conoce la ocurrencia de arcillas en prácticamente todas las regiones del país; sin embargo, la calidad de éstos materiales varía ampliamente de un sitio a otro. Las manifestaciones arcillosas son residuales y transportadas, perteneciendo a casi todas las edades geológicas; no obstante, los yacimientos más comúnmente explotados son del cuaternario y terciario.

i. Región Noroccidental

En los departamentos de Antioquia, Caldas y Chocó se han estudiado en varias ocasiones la ocurrencia de minerales arcillosos. Estos yacimientos son de diverso origen, destacándose como los más importantes los de carácter residual. Las principales explotaciones provienen de:

- Arcillas residuales de las cordilleras Central y Occidental derivadas de la meteorización de rocas ígneas. El mayor aprovechamiento procede del Batolito Antioqueño y del complejo Ruiz-Tolima.
- Arcillas transportadas que conforman los bancos de arcillolitas en las formaciones Amagá, Abejorral, Quebradagrande y Valle Alto. Los principales sitios de extracción son Angelopolis, Abejorral y Amagá, en el departamento de Antioquia; y Aguadas San Felix en el departamento del Caldas.
- Arcillas transportadas del tipo aluvial, se encuentran en las riveras de los ríos Cauca, Nare, Aburrá y otros del área. Entre estos depósitos, han tenido interés y son explotados los de Rionegro, Llano de Ovejas y el Sureste de San Pedro, todos en el departamento de Antioquia.
- Caolines y arcillas caoliníticas se conocen en varios sitios; algunos niveles de shales silíceos y feldespáticos de la formación Abejorral. El yacimiento más importante de caolín es explotado en el municipio de La Unión (Antioquia).

ii. Región Nororiental

Comprende Boyacá y los Santanderes, siendo éstos una fuente importante de minerales arcillosos.

En Norte de Santander, es bien conocido que las fuentes más importantes son el grupo de Guayabo y la formación León.

En la zona de Santa Rosa, Duitama, Paipa y Tuta afloran estratos sedimentarios, de donde se puede extraer mineral caolinítico. Además, se han realizado análisis sobre la calidad y reservas de varios municipios, entre los que se destacan Barrancabermeja, Girón, Lebrija, Málaga, Piedecuesta, Rionegro, Socorro y Zulia, este último en Norte de Santander.

iii. Región Occidental y Suroccidental

Comprende los departamentos del Cauca, Nariño, Quindío, Risaralda y Valle del Cauca. Esta región, es rica en arcillas rojas, amarillas y ocre.

En las márgenes del río la Vieja, se encuentran depósitos que surten a Pereira.

En el departamento de Nariño, especialmente en los municipios de Barbacoas, Contadero, El Tambo, Funes, Imues, La Cruz, Maquí, Pasto, San Lorenzo y San Pablo, se conocen varias manifestaciones caoliníticas que no han sido muy estudiadas ni explotadas.

En el norte del departamento del Cauca, se mencionan depósitos de arcillas caoliníticas, y sus principales ocurrencias son los municipios de Suárez, Santander de Quilichao, Popayán, Morales y el Bordo. Según estudios anteriores, se revelan reservas de 1'200.000 toneladas de arcilla en las áreas de Chozas y Calicanto en la ciudad de Popayán [1].

En el departamento del Quindío, las manifestaciones más importantes de arcillas, se encuentran en la vereda Rio gris del municipio de Génova, veredas Palogrande y La Duquesa en el municipio de Calarcá y paraje la Quiebra, municipio de Pijao.

En el norte del departamento de Risaralda son abundantes las manifestaciones de arcillas. Las zonas más reconocidas son Barroblanco en el municipio de Quinchia y la Hacienda Montegrande en el municipio del Mistrató.

iv. Región Central

Esta región, comprende los departamentos de Cundinamarca, Huila y Tolima, siendo una región que posee un gran volumen de arcillas y en donde se han realizado numerosas investigaciones sobre calidad y reservas.

La sabana de Bogotá posee reservas de unos 3.500 millones de toneladas; el Valle de Sopó-Gachancipá tiene 377 millones de metros cúbicos y los municipios de Cajicá, Chía, Cota, Tenjo, Tabio y Zipaquirá presentan un volumen de 1.016 millones de metros cúbicos de arcilla. A pesar de contar con un alto potencial de reservas, debido a que la mayor parte de la Sabana de Bogotá es de uso agrícola y ganadero, las arcillas no pueden ser totalmente explotadas.

En el departamento del Huila, se reportan arcillas para ladrillería y cerámica. Las localidades más promisorias, dada su buena localización, calidad y reservas de arcilla se encuentran en los municipios de Campoalegre, Palermo, Yaguará, Tesalia y la Plata.

Las arcillas industriales en el departamento del Tolima tienen como principales ocurrencias, alrededor de Ibagué; en el norte del departamento, se encuentran depósitos en los municipios de Casablanca, Falán y Líbano, entre otros.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un sistema de beneficio para una arcilla montmorillonítica nacional, con el fin de incrementar la fracción de la especie arcillosa predominante.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características fisicoquímicas y mineralógicas de una mena montmorillonítica nacional.
- Determinar experimentalmente el o los procesos de beneficio necesarios para obtener un producto arcilloso con mayor contenido de montmorillonita.
- Seleccionar un sistema de beneficio adecuado para concentrar la montmorillonita de la mena caracterizada.

2. ESTADO DEL ARTE

Actualmente, el problema de la purificación de aguas contaminadas con metales pesados es muy común. La completa remoción de estos metales altamente tóxicos, requiere un tratamiento cuidadoso para volver de nuevo útiles las aguas. Existen numerosos estudios acerca de la purificación de estos efluentes en los cuales, se han evaluado diversas técnicas para la remoción de los iones metálicos contenidos en ellos. KRYVORUCHKO, A., ATAMANENKO, I. y KORNILOVICH, B., (2001) [2] estudiaron algunas de éstas técnicas, como son la sorción y la coagulación.

Por otra parte, DA FONSECA, M. G., de OLIVEIRA, M., y ARAKAKI, L. (2005) [3] hacen referencia a la existencia de otros procesos tales como la precipitación química, ósmosis inversa, adsorción sobre materiales selectivos y oxidorreducción, que pueden ser aplicados para remediar la acción este tipo de contaminantes. Así mismo, mencionan que las resinas de intercambio iónico y el carbón activado, han sido ampliamente usados en la industria para la remoción de iones disueltos en agua potable o aguas de calderas. Sin embargo, estos investigadores expresan que aquellos materiales no son económicamente viables.

De este modo, tales estudios han permitido dirigir la mirada hacia otras alternativas más efectivas y de mayor viabilidad económica, razón por la cual, investigaciones que involucran minerales arcillosos como materiales adsorbentes han tomado gran impulso en esta área, a pesar de que éstos minerales poseen una capacidad de sorción menor, en comparación con la de los sorbentes sintéticos.

Por esta razón, JIA-QIAN JIANG, COOPER, C. y OUKI, S. (2001) [4], a partir de los últimos años han venido desarrollando diversas investigaciones relacionadas con uno de los minerales arcillosos esmectíticos más abundantes y con mayor capacidad de intercambio, la montmorillonita, la cual se ha encontrado que dependiendo del tipo de catión intercambiable predominante en la misma, presenta unas propiedades fisicoquímicas particulares, dentro de las que se destacan la capacidad de intercambio catiónico y el área superficial específica, que determinan su comportamiento en las diferentes aplicaciones industriales.

Es así como se ha presentado la necesidad de realizar estudios encaminados al mejoramiento de las diferentes propiedades de las arcillas, con el fin de poder utilizarlas en aplicaciones de tipo tecnológico, para lo cual se han efectuado ensayos de caracterización que permiten establecer de una forma más clara la naturaleza de las impurezas presentes en las menas, y por tanto sirven como punto de partida para la determinación del proceso de beneficio más apropiado para las mismas. HASSAN, M. S. y ABDEL-KHALEK (1998) [5], encontraron que las impurezas más comunes presentes en una bentonita de la región egipcia, fueron la calcita, la dolomita, los feldespatos, el cuarzo y algunos minerales de hierro; por lo cual, establecieron una serie de procesos tales como trituración, molienda, clasificación en hidrociclones que permitieron obtener pre-concentrados que sometidos a procesos posteriores de purificación, tales como la lixiviación con ácido clorhídrico diluido, produjeron la eliminación de los carbonatos, logrando de ésta forma concentrados arcillosos de alta calidad.

ODER, R. (1981) [6], patentó en Estados Unidos un trabajo consistente en el mejoramiento de un proceso de beneficio que permitiera incrementar la blancura de los caolines, con el cual encontró que el método más adecuado para la remoción de las impurezas, incluía básicamente tres etapas: operaciones mecánicas para reducción de tamaño, dispersión de la pulpa arcilla-agua y separación magnética.

Así mismo, SAIKIA, N., BHARALI, D. y SENGUPTA, P., (2003) [7], efectuaron la caracterización y beneficio de arcillas caoliníticas, demostrando que la aplicación del tamizado en húmedo de la arcilla, remueve una cantidad considerable de impurezas contenidas en el mineral. Además, encontraron que el contenido de hierro podía ser reducido por medio de un tratamiento de separación magnética de alta intensidad (WHIMS), o lixiviando con ácidos orgánicos de los cuales el más efectivo fue el ácido oxálico.

MANDAL K. y BANERJEE, P.C. (2004) [8], estudiaron la influencia de diferentes parámetros físicoquímicos en la lixiviación de hierro de un tipo de arcilla conocida como China Clay utilizando para ello ácido oxálico. En este estudio, se evaluaron parámetros tales como la temperatura, la concentración de ácido y el tiempo de lixiviación. Los resultados mostraron que con 80°C de temperatura, una concentración de 0.1M de ácido y 6 horas de reacción, se logró la máxima remoción del hierro contenido en la arcilla.

RAGHANVAN, P., CHANDRASEKHAR, S., VOGT, V. y GOCK, E. (2003) [9] ensayaron tratamientos en los que para la separación de impurezas de hierro y titanio, se aplicaba un alto esfuerzo cortante y la flotación por espumas. El proceso consistió en someter una pulpa a agitaciones de alto esfuerzo de cizallamiento tanto con un dispersante (HSD) como con un colector (HSC), y a etapas de preflotación, seguidas de flotación inversa. En este trabajo, se estudió el efecto de las etapas de agitación, además de 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, concluyendo que las operaciones de preflotación con HSD y HSC tienen un importante efecto en la separación de las impurezas titanoférricas de la arcilla.

Según BRINDLEY, G. W. y HANG, P. T. (1970) [10], la técnica de adsorción de azul de metileno puede ser utilizada para determinar tanto el área superficial como la capacidad de intercambio (CIC) de las arcillas. Estos investigadores, calcularon

el área superficial de ciertos minerales arcillosos partiendo del consumo de azul de metileno en el punto de floculación óptimo y, la CIC a partir de la máxima adsorción de azul de metileno.

De acuerdo con lo anterior, se ha estandarizado un método para la determinación del Índice Azul de Metileno de las arcillas, mediante las normas ASTM C 837 – 99 y AFNOR NF P 94 – 068. CHIAPPONE, A., MARELLO, S., SCAVIA, C. ySETTI (2004)[11], empleando el método descrito en las normas anteriormente mencionadas, determinaron la actividad de un suelo con base en la cantidad y tipo de minerales arcillosos presentes en la muestra.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

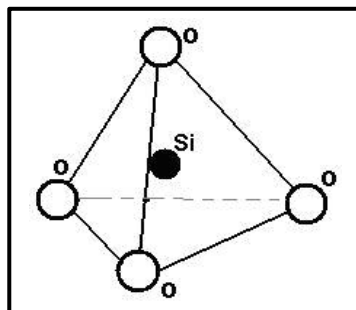
3.1 GENERALIDADES DE LAS ARCILLAS

Mineralógicamente, el término arcilla engloba a un grupo de minerales, filosilicatos en su mayoría, en los cuales las propiedades fisicoquímicas dependen tanto de su estructura como de su tamaño de grano muy fino (inferior a 2 μm). Estos minerales, constituyen gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayoría, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

3.2 ESTRUCTURA DE LOS FILOSILICATOS

Las propiedades de las arcillas son consecuencia en su mayor parte de sus características estructurales. Por esta razón, es necesario tener un conocimiento de la estructura de los filosilicatos con el fin de comprender sus propiedades. Este tipo de minerales, están constituidos por una unidad estructural Si-O que es un tetraedro de coordinación, con el Si en el centro y cuatro oxígenos en cada uno de los vértices del tetraedro. Los tetraedros son pirámides de base triangular, con todas sus caras iguales (Figura 2).

Figura 2. Estructura tetraédrica de Si-O

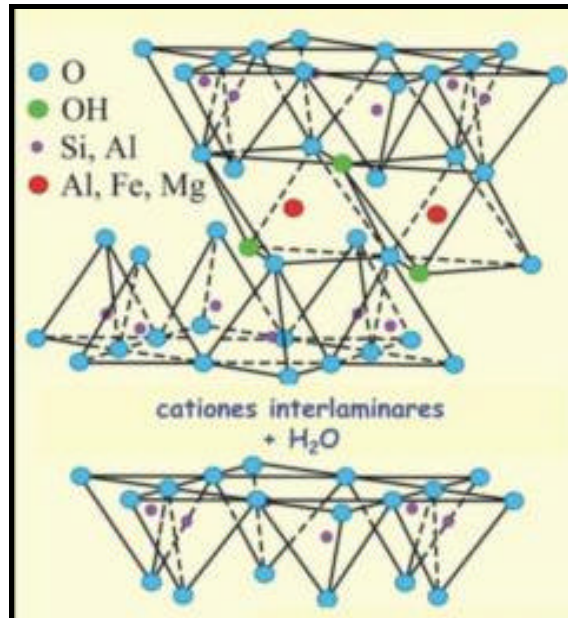


El tetraedro Si-O se encuentra eléctricamente descompensado, ya que el Si aporta cuatro cargas positivas frente a las ocho negativas de los cuatro oxígenos de los vértices, por lo que ha de unirse a otros cationes para neutralizar las cargas. Los grupos tetraédricos $(\text{SiO})_4^{4-}$ se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$, que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas, los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por Al^{3+} o Fe^{3+} . Estas capas tetraédricas, se unen a otras octaédricas de tipo gibsita o brucita. En ellas algunos Al^{3+} o Mg^{2+} , pueden estar sustituidos por Fe^{2+} o Fe^{3+} y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn.

La unión se genera en el plano formado por los oxígenos de los tetraedros que se encuentran sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos $(\text{OH})^-$ de la capa brucítica o gibsítica, de forma que, en este plano, quede un $(\text{OH})^-$ en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. Los demás $(\text{OH})^-$ son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros, como se muestra en la Figura 3.

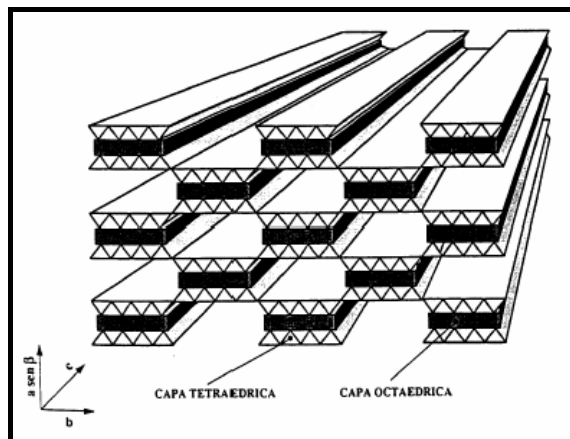
De manera similar, puede ocurrir una unión en la superficie opuesta de la capa octaédrica. Así, los filosilicatos pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más octaédrica y se denominan **bilaminares**, (**1:1**, o **T:O**); o bien, por tres capas: una octaédrica y dos tetraédricas, denominándose **trilaminares**, (**2:1** o **T:O:T**). A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se la denomina lámina (Figura 4). Si todos los huecos octaédricos están ocupados, la lámina se denomina **trioctaédrica** (Mg^{2+} dominante en la capa octaédrica). Si sólo están ocupadas dos tercios de las posiciones octaédricas y el tercio restante está vacante, se denomina **dioctaédrica** (el Al^{3+} es el catión octaédrico dominante).

Figura 3. Estructura 2:1 (T:O:T) de arcillas tipo Esmeclita



Fuente: www.uclm.es/users/higueras/MGA/Tema_09_OtrosMin_2_1.htm

Figura 4. Unión de capas octaédricas y tetraédricas formando láminas de arcilla



Fuente: GARCÍA, E. y SUAREZ, M. p. 5

En algunos filosilicatos (esmectitas, vermiculitas y micas), las láminas no son eléctricamente neutras debido a las sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga. El balance de carga se mantiene por la presencia de cationes en el espacio interlaminar (como por ejemplo en el grupo de las micas), por la existencia de cationes hidratados (como en las vermiculitas y esmectitas) o grupos hidroxilo coordinados octaédricamente, como sucede en las cloritas (también denominadas **T:O:T:O** o **2:1:1**).

3.3 CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS

Los filosilicatos se clasifican atendiendo a que sean bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos, como se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los minerales arcillosos

	DIOCTAÉDRICOS		TRIOCTAÉDRICOS		CARGA
BILAMINARES T:O 1:1	CANDITAS	Caolinita Nacrita Dickita Halloysita	SERPENTITA	Antigorita Crisotilo Lizardita Bertierina	X=0
TRILAMINARES T:O:T 2:1	Pirofilita		Talco		X=0
	ESMECTITAS	Montmorillonita Beidellita Nontronita	ESMECTITAS	Saponita Hectorita	X= 0.2-0.6
	Vermiculitas Illitas		Vermiculitas		X=0.6-0.9 X=0.9
	MICAS	Moscovita Paragonita	MICAS	Biotita Flogopita Lepidolita	X=1
T:O:T:O 2:1:1	CLORITAS				
FIBROSOS	Paligorskita		Sepiolita		

Fuente: Ibid., p. 7

El grupo de las esmectitas, que incluye a la montmorillonita, la saponita, la sauconita, la beidelita, la nontronita, etc., son aluminosilicatos hidratados de fórmula teórica $(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O$, (sin considerar sustituciones dentro de las capas), y cuya composición teórica sin material interlaminar está dada por: SiO_2 (66.7%), Al_2O_3 (28.3%) y H_2O (5%).

En los minerales de este grupo, hay sustituciones de átomos de aluminio y posiblemente fósforo por silicio en la coordinación tetraédrica y/o magnesio, hierro, zinc, níquel, litio, etc., por el aluminio en la lámina octaédrica [12].

Las montmorillonitas siempre difieren de la fórmula teórica debido a que la celda no tiene sus cargas eléctricas balanceadas. Esta deficiencia de carga, es contrarrestada por los cationes intercambiables adsorbidos entre las capas.

3.4 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Muchas de las aplicaciones importantes de las arcillas radican en sus propiedades fisicoquímicas, las cuales dependen principalmente de:

- Tamaño de grano extremadamente fino (partículas inferiores a $2\ \mu m$)
- Morfología laminar (filosilicatos)
- Sustituciones isomórficas, que influyen en la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en los espacios interlaminares.

3.4.1 Superficie Específica

Las arcillas poseen una elevada área superficial, muy importante para aquellos usos industriales en los que la interacción sólido-líquido depende directamente de esta propiedad. La superficie específica está definida como el área de la

superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso que exista) de las partículas por unidad de masa, la cual se expresa generalmente en m^2/g .

En la Tabla 2, se muestran valores característicos de superficie específica para los principales minerales arcillosos.

Tabla 2. Superficie específica de algunas arcillas

ARCILLA	SUPERFICIE ESPECIFICA (m^2/g)
Caolinita de elevada cristalinidad	hasta 15
Caolinita de baja cristalinidad	hasta 50
Halloisita	hasta 60
Illita	hasta 50
Montmorillonita	80-300
Sepiolita	100-240
Paligorskita	100-200

Fuente: Ibid., p. 8-9

3.4.2 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Los minerales arcillosos tienen la propiedad de adsorber ciertos cationes y retenerlos en un estado intercambiable, es decir, que los pueden cambiar con otros iones que estén en solución acuosa. Los iones intercambiados son retenidos externamente a la unidad estructural del mineral arcilloso, sin afectar la estructura del mismo.

La capacidad de intercambio se puede expresar en términos de miliequivalentes por gramo o por 100 gramos. En las arcillas, los cationes intercambiables más frecuentes son el calcio, magnesio, hidrógeno, potasio, amonio y sodio, en este orden de abundancia relativa.

Los valores de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) para algunos minerales arcillosos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Capacidad de intercambio catiónico de algunos minerales arcillosos

MINERAL ARCILLOSO	CIC (meq/100g)
Caolinita	3-5
Halloisita	10-40
Illita	10-50
Clorita	10-50
Montmorillonita	80-200
Vermiculita	100-200
Sepiolita-Paligorskita	20-35

Fuente: Ibid., p. 9

Métodos de Determinación. La Capacidad de Intercambio Catiónico de minerales arcillosos y la cantidad de cationes intercambiables pueden presentar diferentes valores, de acuerdo con el método utilizado para su determinación. Por consiguiente, la CIC no es una propiedad de la arcilla independiente de las condiciones bajo las cuales se mide, por lo cual, se obtienen resultados diferentes con métodos diferentes.

Por esta razón, las determinaciones de esta propiedad generalmente están basadas en soluciones y condiciones de referencia puesto que deben regularizarse para obtener datos y valores de significancia, los cuales puedan ser aplicados e interpretados de manera coherente.

La CIC se determina a partir de la cantidad adsorbida de un catión índice, al hacer atravesar una solución que contenga dicho catión a través de una muestra de suelo o arcilla. Los métodos más utilizados, generalmente emplean como catión índice el NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ba^{++} utilizando soluciones tamponadas. Sin embargo, en los últimos años se ha venido estudiando el método del Índice Azul de Metileno (Methylene Blue Index -MBI), como una técnica de caracterización para la

evaluación de la CIC de suelos y arcillas. Es así como a continuación, se hace mención a dos de los métodos antes mencionados, destacando que el primero de ellos, el Acetato de Amonio (1N), es uno de los más comúnmente empleados en el análisis de suelos; en tanto que el segundo, el método MBI, es en su mayoría utilizado para el control de calidad de las bentonitas, especialmente en el campo de la fundición.

i. **Técnica de Acetato de Amonio (1N)**. El método del Acetato de Amonio es uno de los más utilizados para la determinación de la CIC. Consiste en el empleo de una solución de acetato de amonio 1N (pH 7), con la que se busca la saturación de la superficie de intercambio con un catión índice, el cual es el ion amonio. Después de este proceso, se efectúa un lavado del exceso de saturante con alcohol, un posterior desplazamiento del catión índice con potasio y por último, la determinación del amonio mediante destilación.

ii. **Técnica Azul de Metileno**. Es una técnica de ensayo de tipo Turbidimétrico ampliamente utilizada gracias a su simplicidad y efectividad, la cual es la única de su clase que se encuentra respaldada por entidades internacionales tales como la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR) y la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM).

Estas dos normas, definen un índice que refleja la “actividad” de un suelo, que para el caso de las normas AFNOR (1993), se denomina “Valor azul de suelo” (V_B), y en el de las normas ASTM, “Índice Azul de Metileno” (MBI), los cuales proporcionan una evaluación semicuantitativa de la actividad de un suelo e indicaciones cualitativas del tipo de minerales arcillosos contenidos en el mismo.

3.4.3 Capacidad de Sorción

Esta propiedad de las arcillas, es primordial para su utilización como materiales adsorbentes ya que, éstos pueden adsorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar o en los canales estructurales.

La capacidad de sorción está directamente relacionada con las características de la textura, tales como superficie específica y porosidad, y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se realizan por separado:

- Absorción: Cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad.
- Adsorción: Cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato.

3.4.4 Hidratación e Hinchamiento

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

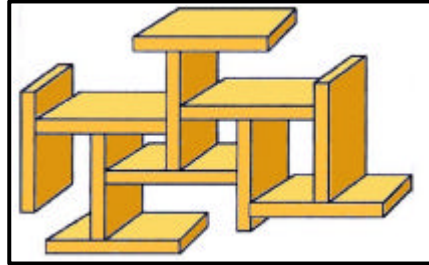
La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca o Mg, su capacidad de hinchamiento es mucho más reducida.

3.5 VISCOSIDAD Y DISPERSIÓN DE LAS PULPAS DE ARCILLA

Las suspensiones de montmorillonita presentan características reológicas únicas, principalmente debido a la estructura compleja de la doble capa eléctrica que rodea a las partículas, cuando ellas están en contacto con soluciones acuosas. Dichas características, son útiles para una amplia variedad de aplicaciones tecnológicas, tales como lodos de perforación, pinturas, cosméticos, acondicionadores de suelo, etc; por tal razón, se han emprendido diversos estudios sobre las propiedades reológicas de este tipo de suspensiones, encontrándose una fuerte influencia de parámetros tales como el contenido de esmectita, la concentración de la dispersión, el pH del medio, el tipo y concentración del electrolito, el envejecimiento de la dispersión, el tiempo de hinchamiento y la temperatura.

De este modo, se encuentra que en el caso de las arcillas tipo montmorillonita, la mayoría de su superficie interfacial sólido-líquido está asociada con las caras planares de las partículas, las cuales presentan una carga superficial negativa, debido a las sustituciones iónicas (principalmente Mg^{+2} por Al^{+3} y Al^{+3} por Si^{+4}) en la red cristalina. Tal carga es por consiguiente, esencialmente independiente de la composición iónica del medio (carga permanente), contrario a la pequeña fracción de la superficie de los bordes de las láminas de arcilla, los cuales presentan una fuerte dependencia del pH (carga variable). Esta heterogeneidad en la distribución de carga superficial, es la principal responsable de la floculación en las suspensiones de montmorillonita sódica y de la estructura de los agregados coloidales. Es por ello, que a pH's ácidos, cuando las cargas de las caras y bordes tienen signos opuestos, la formación de agregados card-house o (estructuras tipo "T" o castillo de naipes) son posibles, a través de la heterocoagulación de la cara de una partícula con los bordes de sus vecinos, tal como se ilustra en la Figura 5. En contraste, bajo condiciones básicas (cuando todas las superficies están cargadas negativamente), las repulsiones entre partículas son predominantes.

Figura 5. Estructura card-house de la arcilla montmorillonítica



Fuente. Disponible en: www.cumate.com/VeegumVangel%20Spanish.pdf

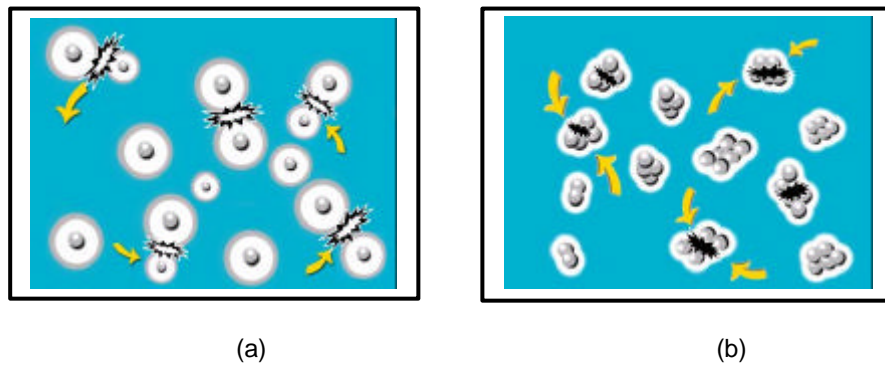
Es por ello, que atendiendo a lo anteriormente planteado, se hace necesario un conocimiento un poco más profundo de las propiedades físicas y cualidades de las suspensiones, debido a que éstas son fuertemente afectadas por las propiedades de los coloides, ya que las características de una suspensión pueden ser cambiadas si se comprenden las interacciones que se presentan entre las partículas.

En el caso específico del procesamiento de minerales, es de suma importancia el conocimiento del comportamiento coloidal de las partículas, ya que éste define en gran parte las características reológicas de la pulpa y por consiguiente, su desempeño en cada uno de los procesos de beneficio, debido a que para la aplicación de los mismos se requieren pulpas altamente concentradas, de fluidez y estabilidad controladas. Por tal razón, los estudios de dispersión son necesarios ya que estos de alguna manera permiten tener conocimiento de las fuerzas entre partículas, para de esta forma producir suspensiones estables. Es así como debido a su tamaño microscópico, las fuerzas de unión en la superficie del coloide y el líquido son las que determinan su comportamiento; cada coloide contiene una carga eléctrica que suele ser de naturaleza negativa, por lo que se producen fuerzas de repulsión electrostática entre los mismos, las cuales dependiendo de su magnitud generan diferentes características sobre los coloides. En consecuencia, se ha encontrado que cuando la carga es lo suficientemente elevada, los coloides permanecen discretos, dispersos y en suspensión (Figura 6a); mientras que

cuando se reducen o eliminan estas cargas, se obtiene el efecto opuesto y, los coloides se aglomeran y sedimentan (Figura 6b).

Los anteriores comportamientos, son controlados de una manera efectiva por el *Potencial Zeta*, puesto que este parámetro indica cambios en el potencial de la superficie y en las fuerzas de repulsión entre los coloides, tal como puede ser observado en la Tabla 4.

Figura 6. Fuerzas entre partículas coloidales: (a) de repulsión y (b) de atracción



Fuente. Disponible en: www.zeta-meter.com

De este modo, se ha encontrado que una interesante aplicación de los estudios de potencial zeta, ha sido la minimización de la viscosidad de las dispersiones de arcilla, ya que como se ha mencionado previamente, en la mayoría de las aplicaciones industriales, dichas dispersiones deben presentar una fluidez y estabilidad controladas; características que pueden ser alcanzadas incrementando el pH de la suspensión, a través de la adición de una sustancia alcalina (agente dispersante), por medio de la cual la superficie de las partículas adquiere una carga negativa, causando un incremento en la repulsión electrostática de las mismas y por consiguiente, previniendo la adhesión y aglomeración de dichas partículas, con lo cual se obtiene un sistema disperso de baja viscosidad.

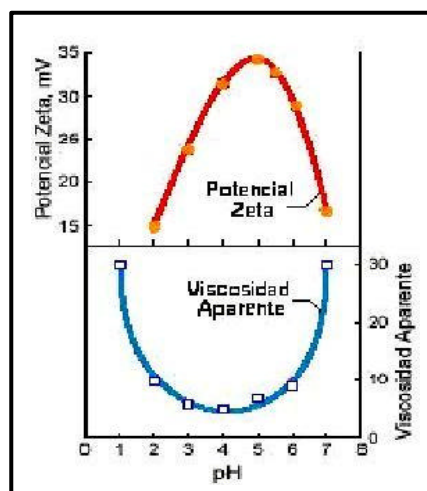
En la Figura 7, se muestra el efecto del pH sobre la viscosidad aparente y el potencial zeta de una suspensión de este tipo. En ella, se observa que el potencial zeta máximo, corresponde a una viscosidad aparente mínima.

Tabla 4. Características de estabilidad de los coloides

CARACTERÍSTICAS DE ESTABILIDAD	POTENCIAL ZETA PROMEDIO (mV)
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

Figura 7. Efecto del pH sobre el potencial zeta y la viscosidad aparente de una suspensión de arcilla



Fuente. Ibid., p. 6

3.6 BENTONITA

El término bentonita se refiere a una roca formada por arcillas altamente coloidales y plásticas, compuesta principalmente de montmorillonita (mineral arcilloso del grupo de la esmectita), la cual puede contener también feldespatos, biotita, caolinita, illita, cristobalita, piroxeno, circón y cuarzo cristalino [13]. Los criterios de clasificación utilizados por la industria se basan en su comportamiento y propiedades fisico-químicas. De este modo, la clasificación más aceptada establece dos tipos de bentonitas en función de su capacidad de hinchamiento en agua: bentonitas altamente hinchables (sódicas) y bentonitas poco hinchables (cálcicas), cuya principal diferencia radica en el catión interlamina predominante, sodio o calcio.

De manera similar, en los Estados Unidos se emplea otro tipo de denominación, el cual es dependiente de la ubicación de las minas y plantas de producción en dicho país. Es así como, a las bentonitas originarias de Wyoming, Dakota Sur y Montana, se les conoce como “Bentonitas Occidentales o Wyoming” y, a las provenientes de Mississippi y Alabama, “Bentonitas del Sur”[14].

De este modo, mundialmente a nivel comercial existen diversas denominaciones para aquellas clases de bentonita, algunas de las cuales se encuentran consignadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Terminología comercial empleada para la bentonita

MINERAL	EQUIVALENTE UK	EQUIVALENTE USA
Bentonita	Montmorillonita-Na	Montmorillonita-Na & Ca
Bentonita Sódica (Na)	Bentonita	Bentonita Wyoming
Bentonita Cálcica (Ca)	Fuller's earth	Bentonita del Sur
Fuller's earth	Fuller's earth	Todas las arcillas de blanqueamiento: atapulgita, sepiolita

Fuente: Bentonite, Pyrophyllite and Talc in the Republic of South Africa. Department Minerals and Energy Republic of South Africa, 2004. p. 1

3.6.1 Aplicaciones Industriales de las Bentonitas

Algunas de las aplicaciones industriales de las bentonitas, relacionadas con sus propiedades fisicoquímicas, se presentan a continuación.

i. **Absorbentes.** La elevada superficie específica de la bentonita, le confiere una gran capacidad tanto de absorción como de adsorción. Debido a esto se emplea en decoloración y clarificación de aceites, vinos, sidras, cervezas, etc. Tienen gran importancia en los procesos industriales de purificación de aguas que contengan diferentes tipos de aceites industriales y contaminantes orgánicos. Además, es utilizada como soporte de productos químicos, como por ejemplo herbicidas, pesticidas e insecticidas, posibilitando una distribución homogénea del producto tóxico.

En los últimos años, este tipo de arcilla se encuentra compitiendo con la sepiolita y la paligorskita, como materia prima para la fabricación de lechos de animales. La demanda de bentonitas para este uso varía sustancialmente de unos países a otros, así en Estados Unidos comenzaron a utilizarse a finales de los años 80. Sin embargo, en Europa el mercado es más complejo y su demanda mucho menor.

ii. **Alimentación animal** Este tipo de aplicación está cobrando importancia en los últimos tiempos, consiste en la utilización de la bentonita como ligante en la fabricación de alimentos pelletizados para animales, tales como pollos, cerdos, pavos, cabras, corderos, y ganado vacuno. Además de servir como ligante, se emplea como soporte de vitaminas, sales minerales, antibióticos y de otros aditivos. En 1992 se empezó a fabricar un innovador producto comestible denominado "Repotentiated Bentonite (RB)". Según estudios del "Poultry Research Institute" el aporte de pequeñas cantidades de bentonitas (1%) a la alimentación de aves de corral reporta importantes beneficios: se incrementa la producción de huevos en un 15 %, su tamaño en un 10 % y la cáscara se hace más dura. De este modo, se ha encontrado que la bentonita tiene una doble

misión: actuar como promotor del crecimiento y como atrapador de toxinas. En el primer caso, ocurre que el alimento mezclado con dicho mineral, debido a la gran capacidad de adsorción de la bentonita, permanece más tiempo en la zona intestinal, en donde la arcilla adsorbe el exceso de agua y, hace que los nutrientes permanezcan más tiempo en el estómago, siendo mayor su rendimiento. En el segundo caso, la bentonita adsorbe las toxinas, de modo que éstas no pueden atravesar las paredes intestinales.

iii. Industria farmacéutica. Desde hace tiempo las bentonitas se vienen usando como excipiente por la industria farmacéutica. Debido a que no son tóxicas, ni irritantes, y además que no pueden ser absorbidas por el cuerpo humano, se utilizan para la elaboración de preparaciones tanto de uso tópico como oral. Se usa como adsorbente, estabilizante, espesante, agente suspensor y como modificador de la viscosidad. Su principal uso es en la preparación de suspensiones tópicas, geles y soluciones. Cuando se usa como parte de una preparación oral, su naturaleza adsorbente puede enmascarar el sabor de otros ingredientes, o puede relentizar la liberación de ciertos fármacos catiónicos (la hectorita y la saponita se utilizan como fármacos o drogas retardantes). Como en el resto de los excipientes, las cantidades que se requieren son pequeñas. Generalmente las concentraciones de bentonita como agente de soporte es del 0,5-5 % y del 1-2% cuando se usa como adsorbente.

3.6.2 Procesos de Beneficio de las Arcillas

El tipo de procesos de beneficio aplicado a las arcillas depende en gran medida de su naturaleza, de la clase de impurezas presentes en la mena y del uso específico al cual vaya a ser destinado dicho mineral. De este modo, se tiene que las arcillas dependiendo de su aplicación, pueden ser clasificadas como estructurales o especializadas; en donde las primeras, son comúnmente explotadas y principalmente usadas para la manufactura de cerámicos, ladrillos, tejas y

tuberías; mientras que las últimas, dentro de las que se encuentran la bentonita y las fuller's earth, son explotadas y procesadas para usos especializados.

Es así como la mayoría de arcillas domésticas son explotadas usando varios tipos de herramientas y equipos, dentro de los cuales se incluyen palas, cargadores y retroexcavadoras. Así mismo, se hace uso de procesos tales como el minado hidráulico y el dragado; después de lo cual, las arcillas así explotadas, son procesadas por métodos mecánicos, tales como trituración, molienda y clasificación, que no alteran apreciablemente las propiedades mineralógicas o químicas del mineral. Sin embargo, debido a que las arcillas son usadas en un amplio rango de aplicaciones, frecuentemente es necesario usar otros procesos mecánicos y químicos, tales como atrición, secado, calcinación, blanqueamiento y extrusión para preparar el mineral para su uso.

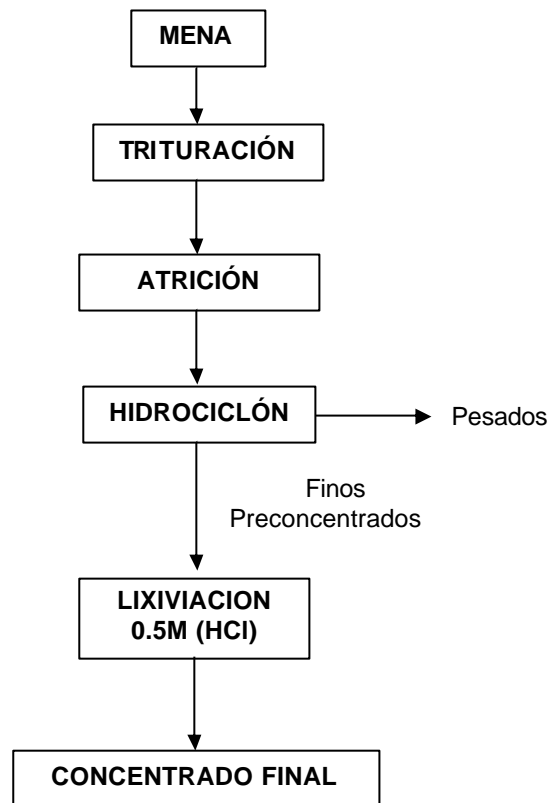
En la Tabla 6, se muestran algunas de las operaciones más frecuentemente utilizadas para el proceso de beneficio de arcillas. De igual forma, en las figuras 8, 9, 10, 11 y 12 se muestran esquemas de plantas típicas de procesamiento de arcillas.

Tabla 6. Operaciones para el procesamiento de arcillas

PROCESO	CAOLÍN	BALL CLAY	FIRE CLAY	BENTONITA	FULLER'S EARTH	ARCILLA COMÚN Y SHALE
Explotación	X	X	X	X	X	X
Apilamiento	X	X	X	X	X	X
Trituración	X	X	X	X	X	X
Molienda	X	X	X	X	X	X
Cribado	X		X		X	X
Mezcla	X	X				X
Flotación	X	X				
Extrusión					X	X
Secado	X		X	X	X	X
Calcinación	X		X	X		
Empaquetamiento	X	X	X	X	X	
Otros	Fraccionamiento	Pulverización	Intemperización	Intercambio Catiónico	Dispersión	
	Separación Magnética		Mezclado	Granulación		
	Tratamiento Ácido			Clasificación Neumática		
	Blanqueamiento				Blanqueamiento	

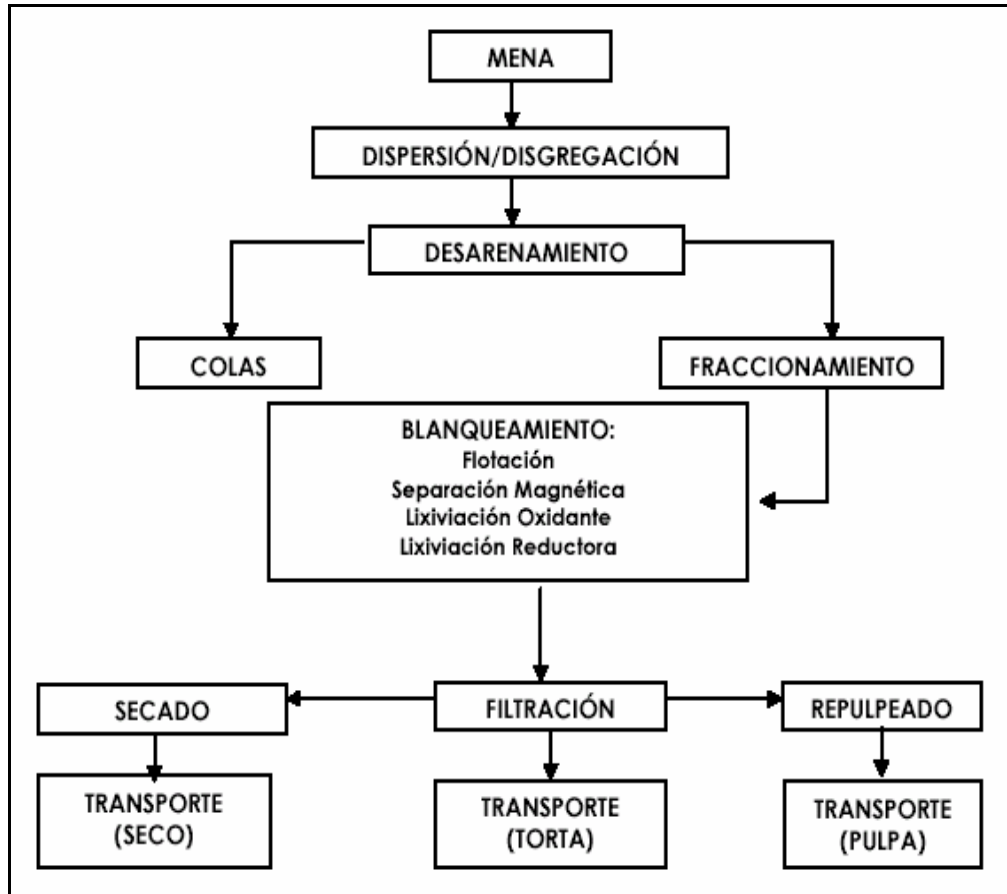
Fuente: Ibid., p. 17

Figura 8. Diagrama general de un proceso de beneficio vía húmeda para una bentonita



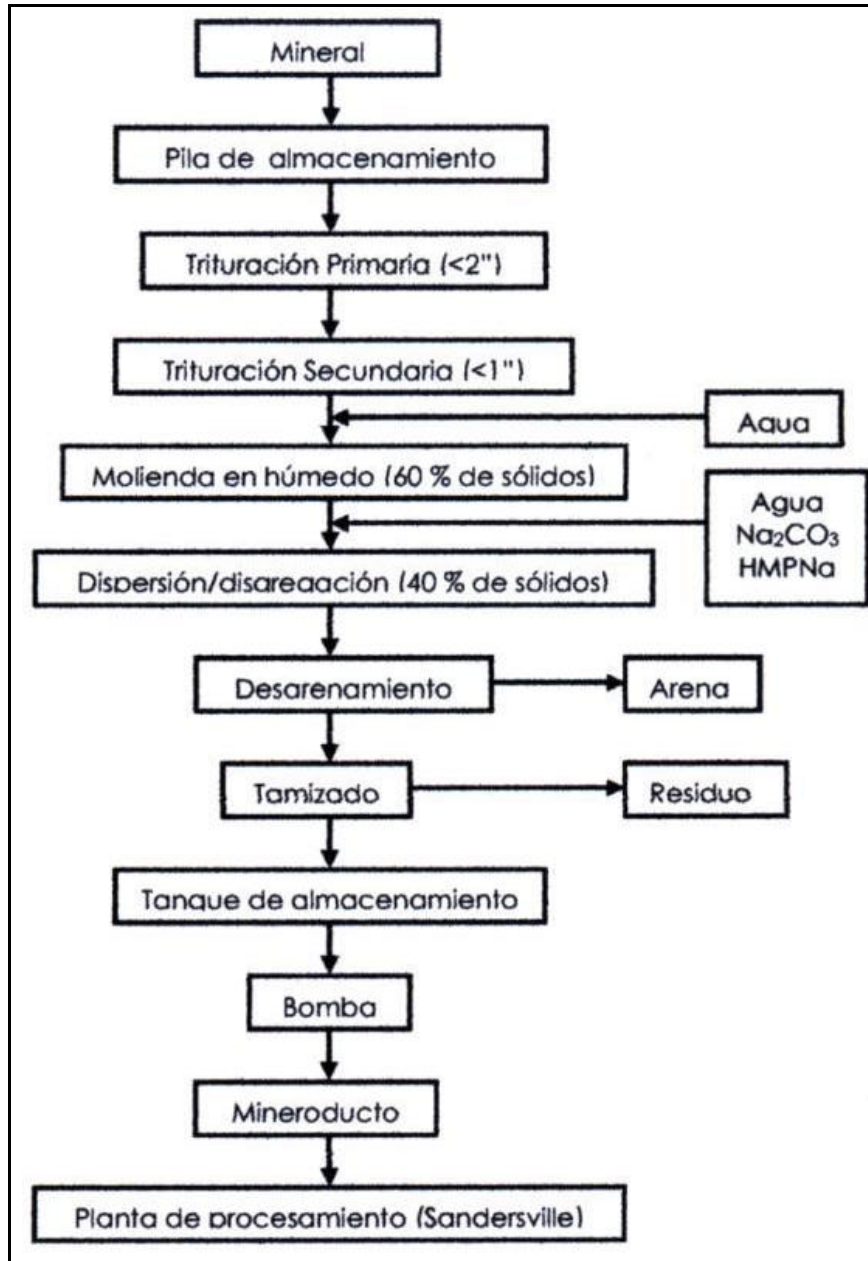
Fuente: HASSAN, M.S. y ABDEL-KHALEK, N.A. Beneficiation and Applications of an Egyptian Bentonite. Elsevier, 1998. p.104

Figura 9. Diagrama general de beneficio en húmedo de arcillas caoliníticas



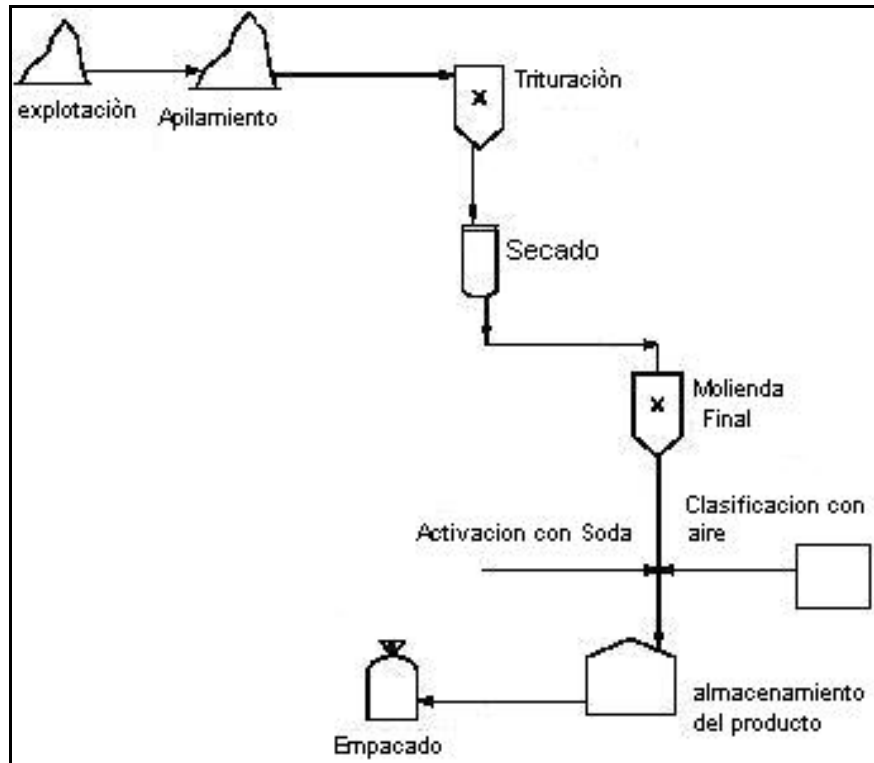
Fuente: BENVINDO DA LUZ, A. Estudo de Reoxidação e Redução de Ferro Contido em Caulins. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas, São Paulo. 1998

Figura 10. Planta de procesamiento en húmedo de caolín de Sandersville-Georgia-EUA.



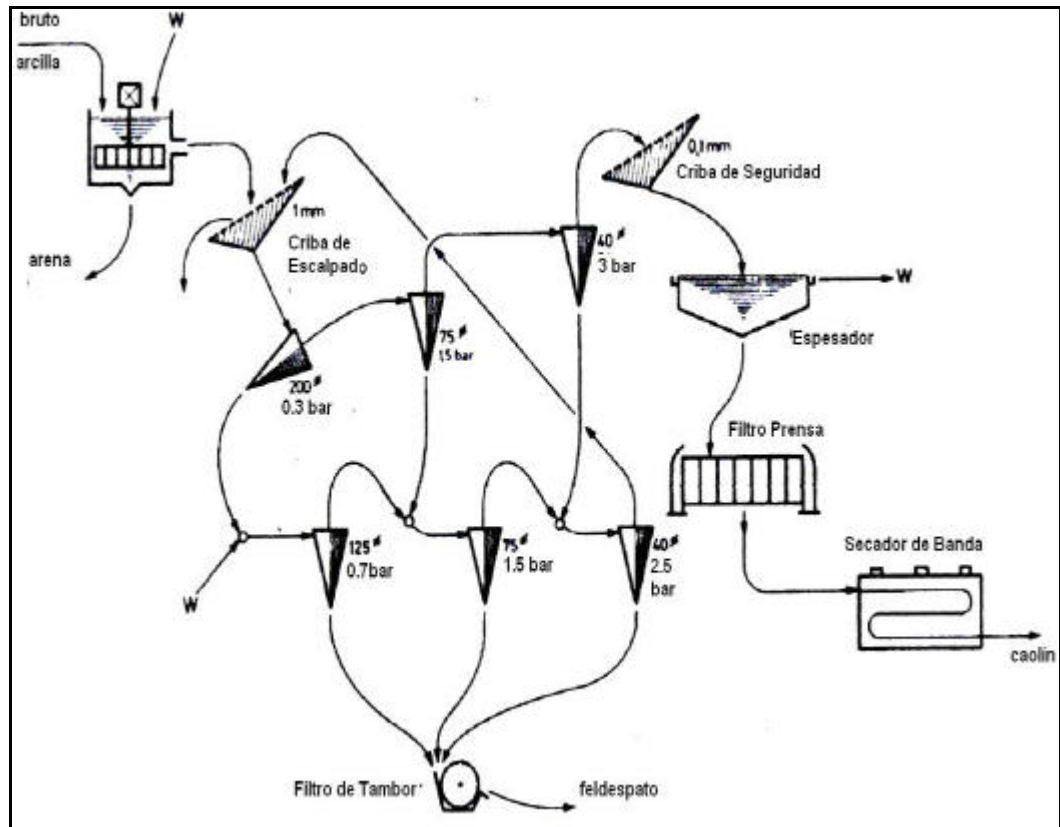
Fuente: BENVINDO DA LUZ, A. y CHAVES P., A. Tecnología del Caolín: Enfoque a la Industria del Papel. Serie Rocas e Industrias Minerales. Brasil, 2000.

Figura 11. Diagrama de flujo para el procesamiento en seco de bentonita



Fuente: Emission Estimation Technique Manual for Mining and Processing of NonMetallic Minerals. National Pollutant Inventory. Version 2.0., 2000. p. 15

Figura 12. Planta de beneficio de caolín con tres etapas de refinado y tres de lavado mediante hidrociclones (Amberger Kaolin-Werke, Hirschau)



Fuente: TRAWINSKI, H. Aplicaciones y funcionamiento práctico de los hidrociclones. p. 15

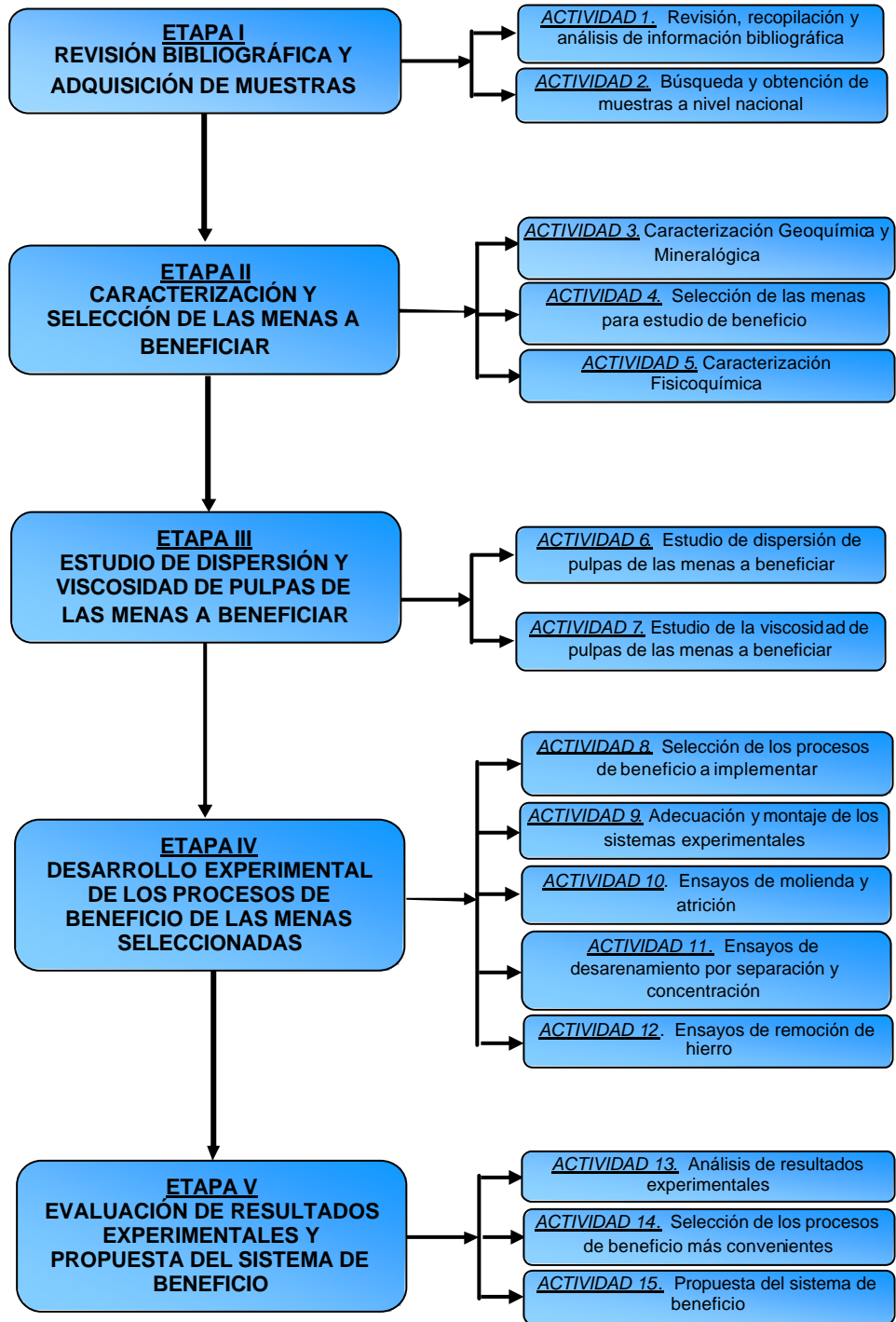
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Teniendo en cuenta las etapas y actividades propuestas en el plan de proyecto, así como las modificaciones sugeridas por el Grupo de Investigaciones en Minerales Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) para el desarrollo del mismo, se planteó una metodología de trabajo en la cual se propuso la ejecución de las siguientes etapas:

- I. Revisión bibliográfica y Adquisición de muestras de diferentes menas bentoníticas
- II. Caracterización y Selección de las menas bentoníticas a beneficiar
- III. Estudio de Dispersión y Viscosidad de pulpas de las menas bentoníticas a beneficiar
- IV. Desarrollo experimental de los procesos de beneficio de las menas seleccionadas
- V. Evaluación de resultados experimentales y Propuesta del sistema de beneficio

En la Figura 13, se presenta un diagrama de flujo en el cual se ilustran en forma sintetizada cada una de las anteriores etapas, con las respectivas actividades adelantadas para el desarrollo del trabajo experimental del presente proyecto.

Figura 13. Etapas y actividades adelantadas para el desarrollo del proyecto



4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ADQUISICIÓN DE MUESTRAS

Con base en la revisión bibliográfica realizada se encontró que en un trabajo de grado [15] anterior desarrollado en la Universidad Industrial de Santander, en el cual se pretendía demostrar la factibilidad de la sustitución de la bentonita importada por arcilla natural colombiana, se trabajaron muestras provenientes de los departamentos de Santander, Tolima y Valle del Cauca, encontrándose la presencia de montmorillonita sódica en las arcillas correspondientes a estos dos últimos departamentos; razón por la cual, la búsqueda de las muestras se enmarcó dentro de estas zonas específicas del país.

De acuerdo con lo anterior, se logró la adquisición de cuatro muestras de menas bentoníticas denominadas: Arcicol[®] (Marca Registrada, Empresa Bentocol Ltda), SB-1, LR-2 y RR-3; la primera de ellas, una muestra “comercial”, adquirida por compra en Bucaramanga, proveniente del departamento del Valle del Cauca y las tres restantes “Run of Mine”, procedentes del municipio de Lérída (Tolima), suministradas por la empresa minera Mineralcol (Minerales y Arcillas de Colombia), las cuales por políticas internas de la empresa no fueron tomadas con participación directa de personal especializado de la Universidad, sino que fueron proporcionadas a través de la Empresa Colombiana de Minerales, ECOMIN, sin ningún tipo de información, ni geológica ni mineralógica.

4.2 CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS MENAS A BENEFICIAR

Con el fin de determinar cuál de las muestras adquiridas reunía las características (químicas y mineralógicas) adecuadas para la posterior aplicación de los diferentes procesos de beneficio según el objetivo del proyecto, se llevó a cabo la preparación de cada una de las muestras para de esta forma obtener una porción representativa de las mismas. De este modo, considerando el caso específico de la mena bentonítica “comercial” Arcicol[®], tal preparación consistió simplemente en la homogeneización y cuarteo sistemático de la muestra en estado de recepción, ya que esta se comercializa bajo una granulometría muy fina, cerca del 98%

menor a la malla 325#Tyler. En el caso de las menas bentoníticas SB-1, LR-2 y RR-3, fue necesaria la realización previa de un proceso de molienda con el fin de lograr un tamaño de partícula inferior a los 300 μ m (48#Tyler), ya que dichas muestras en estado de recepción contenían terrones con tamaños que oscilaban entre los 3 y 5cm.

4.2.1 Caracterización Geoquímica y Mineralógica

Para el desarrollo de esta actividad, se llevó a cabo la determinación de la composición química de cada una de las muestras obtenidas, de acuerdo con lo planteado por la Norma ASTM C 323-56 (Reaprobada 1999), cuyo procedimiento se encuentra consignado en el Anexo A. La realización de este análisis elemental, se efectuó en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica, Perkin-Elmer, Modelo 2380, del Grupo de Investigaciones en Minerales Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) adscrito a la Universidad Industrial de Santander.

En el caso de la determinación de las especies mineralógicas presentes en cada una de las muestras, se empleó la técnica de Difracción de Rayos X, para lo cual se contó con los servicios del Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Escuela de Química, adscrito a la Universidad Industrial de Santander. Al igual que en el caso anterior, la metodología empleada para el desarrollo de este análisis se encuentra registrada en el Anexo A.

4.2.2 Selección de las Menas a Beneficiar

A pesar de la recomendación hecha al sustentar el plan de trabajo de grado, en el sentido de trabajar con solo una mena, se encontró que por problemas en la adquisición a tiempo de las muestras tal como se extraían de los yacimientos, finalmente se terminó trabajando con dos minerales, ya que las muestras “Run of Mine” SB-1, LR-2 y RR-3 fueron suministradas por ECOMIN seis meses después de haber sido aprobado el plan de proyecto. Es así como inicialmente se trabajó

con la bentonita “comercial” Arcicol[®], que a pesar de sus buenas características, porque seguramente es un material ya beneficiado, podría ser susceptible de mejorar su calidad, por contener aún porcentajes significativos de impurezas, tales como albita, cuarzo y hierro; impurezas que podrían disminuirse con la implementación de algunos procesos de beneficio, otorgándole a ese mineral un valor agregado y por tanto muy probablemente se podría ampliar sus usos y aplicaciones actuales.

Por otra parte, con base en la caracterización geoquímica y mineralógica realizada a las muestras “Run of Mine” suministradas por ECOMIN, se procedió a seleccionar la muestra más apropiada para la aplicación de los diferentes procesos de beneficio. Como criterio de selección se tomó que la mena a beneficiar debía contener cantidades relativamente bajas de montmorillonita y altos contenidos de cuarzo y hierro.

4.2.3 Caracterización Físicoquímica

Las actividades restantes de caracterización se efectuaron exclusivamente para las dos menas bentoníticas seleccionadas (Arcicol[®] y LR-2). Se determinaron cada uno de los parámetros que se muestran a continuación, con base en las especificaciones estándar existentes para tal fin, las cuales se encuentran consignadas en el Anexo A.

Humedad. La determinación del contenido de humedad libre de las muestras se desarrolló bajo el criterio de la Norma ASTM C 324-01^{e1}.

Densidad Real. La densidad real de cada una de las muestras se determinó con base en la Norma ASTM C 329-88 haciendo uso del método del picnómetro.

Índice de Hinchamiento. La evaluación de las propiedades de hinchamiento de los dos minerales bentoníticos se llevó a cabo de acuerdo con las especificaciones estipuladas en la Norma ASTM D 5890-02.

Acidez. La determinación del nivel de acidez para cada una de las muestras se realizó bajo el criterio de la Norma ASTM 11D 4972-89, haciendo uso de un pHmetro marca Metrohm.

Área Superficial Específica (SSA). La medición del área superficial específica se desarrolló con base en la teoría de adsorción de gas (BET), haciendo uso del analizador NOVA 1200 del Grupo de Investigaciones en Catálisis (CICAT), adscrito a la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander (UIS). En el Anexo A, se presenta una breve descripción de las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo dicha medición.

Viscosidad de Pulpas. La evaluación de la viscosidad de pulpas de las dos muestras seleccionadas, se realizó con el Reómetro Digital Brookfield, Modelo DV-III+, del Laboratorio de Reología de la Escuela de Ingeniería Química, adscrita a la Universidad Industrial de Santander. Esta evaluación fue desarrollada a un contenido de sólidos del 7, 10 y 15% p/p para la bentonita comercial, y del 10, 20 y 30% p/p para la mena “Run of Mine”.

4.2.3.1 Capacidad de Adsorción. Con base en lo planteado por Rhoades [16], quien afirma que la estimación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de los suelos y la cantidad de cationes intercambiables, parámetros estrechamente relacionados con la capacidad de adsorción de las arcillas, son dependientes del método utilizado para su evaluación, y conociendo la existencia de diversos métodos para la determinación de la CIC (método del acetato de amonio, del acetato de sodio y del cloruro de amonio), la capacidad de adsorción de las menas en estudio se determinó por medio de dos métodos diferentes; el primero de ellos, el método tradicional del acetato de amonio (1N) y el segundo, conocido como el método de ensayo para el Índice Azul de Metileno de una arcilla.

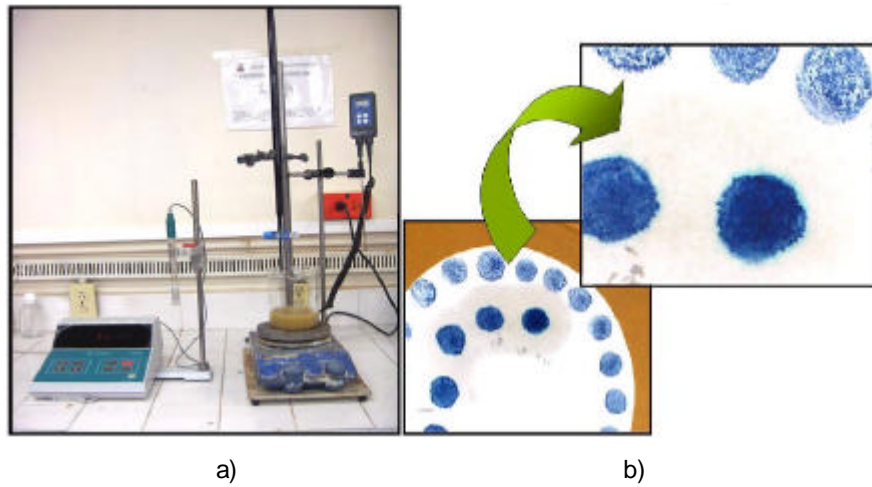
i. **Método del Acetato de Amonio (1N).** Para la determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) por medio de este método, se contó con los

servicios del Laboratorio Químico de Suelos adscrito a la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

ii. Método del Índice Azul de Metileno (MBI). El Índice Azul de Metileno (MBI) se determinó de acuerdo con la Norma ASTM C 837-99 (Reaprobada 2003), cuyo método de ensayo se describe a continuación. Adicionalmente, en la Figura 14, se ilustra tanto el montaje experimental utilizado para el desarrollo de esta prueba como el halo azul que indica el punto final del ensayo.

- ✓ Pesar 2.00g de arcilla seca y, colocarla en un vaso de precipitados de 600ml; agregar 300ml de agua destilada en el vaso y, agitar hasta que la arcilla se encuentre uniformemente dispersa.
- ✓ Determinar el pH de la pulpa y, agregar ácido sulfúrico (0.1N) hasta lograr un pH en el rango de 2.5-3.8 después de lo cual, se debe continuar agitando por 15min desde la última adición de ácido. Posteriormente, medir de nuevo el pH de la pulpa, y de ser necesario agregar más reactivo con el fin de restaurar el pH en el rango establecido.
- ✓ Con la pulpa aún bajo agitación, llenar la bureta con la solución de azul de metileno, agregar 5ml de esta solución a la pulpa, y agitar de 1 a 2min.
- ✓ Remover una gota de la pulpa, usando una varilla de vidrio y, colocarla sobre el borde de un papel de filtro.
- ✓ Observar la apariencia de la gota sobre el papel, y tener en cuenta que el punto final es indicado por la formación de un ligero halo azul alrededor de la gota (Figura 14). Continuar agregando la solución de azul de metileno a la pulpa, en incrementos de 1ml con 1 a 2min de agitación después de cada adición, entonces ensayar, hasta que el punto final sea alcanzado.
- ✓ Después de que el punto final es alcanzado, continuar agitando por 2min y reensayar.

Figura 14. Determinación del MBI. a) Montaje experimental. b) Punto final del ensayo



El Índice Azul de Metileno puede ser calculado mediante la siguiente expresión:

$$MBI = [(E * V) / W] * 100 \quad (1)$$

Donde

MBI: Índice Azul de Metileno para la arcilla (meq/100g arcilla)

E: miliequivalentes de Azul de Metileno por mililitro

V: mililitros de solución Azul de Metileno requerida para la titulación

W: gramos de arcilla seca

Además, los cálculos pueden ser facilitados usando un factor multiplicador donde la muestra es 2.00g y la solución azul de metileno es 0.01N:

$$MBI = [(0.01 * V) / 2] * 100 = 0.5V \quad (2)$$

4.2.3.2 Carga Eléctrica Superficial. La carga eléctrica superficial fue determinada mediante la medición del potencial zeta. Esta fue llevada a cabo preparando suspensiones diluidas de las arcillas, y empleando como agentes modificadores de pH dos sistemas de reactivos diferentes: HCl-NaOH y HNO₃-NH₄OH. Las lecturas de este potencial se realizaron en el equipo Zetameter

System 3.0+ de propiedad del Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) de la UIS.

4.3 ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE PULPAS DE LAS MENAS A BENEFICIAR

Este estudio se realizó con el fin de determinar las condiciones más apropiadas de pH, tipo y dosificación de agente dispersante, para asegurar una buena dispersión en agua de los sólidos que conforman las menas. Sólo al asegurarse que los sólidos, incluidas las partículas coloidales, forman sistemas dispersos estables, se puede esperar que los procesos de separación y concentración de arcillas sean efectivos.

Como variable respuesta o indicativa del grado de dispersión de estos sistemas arcilla-agua se escogió el Potencial Zeta, el cual según la teoría, tal como se observa en la Tabla 4, al aumentar su valor absoluto se aumenta el grado de dispersión de las pulpas arcillosas.

Para el desarrollo de este estudio, se trabajó con dos agentes dispersantes diferentes: Silicato de Sodio (Na_2SiO_4) y Pirofosfato de Sodio ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), en un rango de dosificación de 0.5-1.5% (v/p y p/p, respectivamente) (Tabla 7), y efectuando el barrido del Potencial Zeta exclusivamente en el rango de pH comprendido entre 6 y 12, por medio de la adición del agente modificador de pH que arrojó los resultados de potencial más convenientes en la caracterización realizada a las dos menas bentoníticas a beneficiar. El rango de pH trabajado, se seleccionó teniendo en cuenta que debido a la heterogeneidad en la distribución de carga superficial de las partículas de arcilla, se tenía conocimiento que bajo condiciones básicas tanto los bordes como las caras de las láminas de arcilla se encuentran cargadas negativamente y por lo tanto, predominarán las repulsiones entre partículas contribuyendo así a la dispersión del sistema [17].

Es así como para la lectura del Potencial Zeta, se hizo necesaria la preparación de suspensiones diluidas de arcilla (“comercial” y “Run of Mine”), las cuales fueron obtenidas en la forma que se describe a continuación. Inicialmente, se prepararon pulpas al 10% de sólidos (p/p) por medio de la adición de la respectiva dosificación de dispersante a evaluar y, mediante la agitación de las mismas a una velocidad de 1250rpm durante 15min; al término de los cuales, se extrajo una alícuota que fue posteriormente aforada en un balón de 250ml, permitiendo así la obtención de una suspensión diluída de arcilla.

Tabla 7. Condiciones de trabajo para la determinación del Potencial Zeta en el estudio de dispersión de las muestras de arcilla seleccionadas

MUESTRA	AGENTE MODIFICADOR DE pH	RANGO DE pH	RANGO DOSIFICACION DISPERSANTE
Mena Bentonítica + Silicato de Sodio	NH ₄ OH	6 -12	0.5 – 1.5% v/p
Mena Bentonítica + Pirofosfato de Sodio			0.5 – 1.5% p/p

4.4 ESTUDIO DE LA VISCOSIDAD DE PULPAS DE LAS MENAS A BENEFICIAR

La evaluación de la viscosidad de las pulpas de las dos menas bentoníticas seleccionadas se efectuó con el fin de determinar el porcentaje de sólidos más apropiado para su manejo y desarrollo en los diferentes procesos de beneficio, teniendo en cuenta que las pulpas de arcilla con relativamente bajos porcentajes de sólidos, sin previo tratamiento de dispersión, se caracterizan por presentar valores de viscosidad muy altos que dificultan su manejo. Por tal razón, esta evaluación fue llevada a cabo con base en las mejores condiciones encontradas en el estudio de dispersión y, teniendo en cuenta la influencia en primer lugar de dos tipos de agitadores, el uno un Mecánico Convencional, Modelo IKA-

Labortechnik y el otro un Ultra-agitador, Modelo DI 148 (Figura 15); y en segundo lugar, diferentes velocidades de agitación, durante un tiempo constante de 15 min.

Para el desarrollo de estas pruebas, fue necesaria la preparación de las pulpas bentoníticas (“comercial” y “Run of Mine”) a cada uno de los porcentajes de sólidos especificados en la Tabla 8, bajo las mejores condiciones de dispersión, dosificación de dispersante y pH, encontradas con el estudio anterior. Tales pulpas, fueron sometidas a la velocidad de agitación respectiva durante un tiempo de 15min, después del cual se tomó una alícuota que fue introducida en el portamuestras del Reómetro Digital Brookfield, Modelo DV-III+.

En la Tabla 8, se presentan las variables operativas utilizadas en cada uno de los casos para la determinación de la viscosidad de pulpas de las dos muestras de bentonita seleccionadas.

Figura 15. Tipos de agitadores empleados en la determinación de la viscosidad de pulpas bentoníticas. a) Agitador mecánico convencional, modelo IKA-Labortechnik. b) Ultra-agitador, modelo DI 148.



a)



b)

Tabla 8. Variables operativas utilizadas en el estudio de la viscosidad de pulpas bentoníticas

MUESTRA	TIPO DE AGITADOR	VELOCIDAD DE AGITACIÓN (rpm)	RANGO %SÓLIDOS (p/p)
Bentonita "Comercial"	Mecánico Convencional	750	10 - 20
		1000	
		1250	
Bentonita "Run of Mine"		750	10 - 50
		1000	
		1250	
Bentonita "Comercial"	Ultra-agitador	11000	10 - 20
		16000	
		22000	

De acuerdo con la tabla anterior, es necesario aclarar que el equipo de ultra-agitación fue empleado solo en el caso de la bentonita "comercial", debido a la dificultad presentada para trabajar a altos contenidos de sólidos.

4.5 DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO DE LAS MENAS SELECCIONADAS

Para la ejecución de la presente etapa se tomó como punto de partida la información extractada del material bibliográfico recopilado, por medio de lo cual se tuvo una noción de los diferentes procesos de beneficio empleados en la concentración y refinación de minerales arcillosos, así como de las variables y los rangos de trabajo utilizados para tal fin.

4.5.1 Selección de los Procesos de Beneficio

Dentro de los procesos de beneficio seleccionados para el tratamiento y purificación de las menas en estudio, se encuentran aquellos relacionados con la disminución del tamaño de partícula del mineral, como es la molienda; los referidos a la disgregación del mismo, como es la atrición; igualmente, aquellos relacionados con procesos de separación y concentración en húmedo, dentro de los que se escogieron el desarenamiento o eliminación de cuarzo por malla, por

hidrociclón, por sedimentación y por flotación espumante; y por último, aquellos procesos que hacen referencia a la eliminación de impurezas de hierro, tales como la separación magnética y la lixiviación ácida. No obstante, vale la pena aclarar que los diferentes procesos de beneficio aplicados a cada una de las dos menas bentoníticas seleccionadas, fueron escogidos teniendo en cuenta tanto su estado de recepción como los resultados de caracterización obtenidos para cada una de ellas.

4.5.2 Diseño Experimental de los Procesos de Beneficio

Para llevar a cabo el desarrollo experimental de los procesos de beneficio seleccionados, se realizó un diseño experimental clásico, con el fin de conocer el efecto ejercido por una determinada variable sobre el comportamiento del sistema, al dejar constantes los demás parámetros del mismo.

4.5.2.1 Ensayos de Desarenamiento. Estos ensayos fueron realizados con el fin de establecer el tipo de proceso más adecuado para eliminar el cuarzo y por consiguiente concentrar las especies arcillosas presentes en cada una de las menas. En la Figura 16, se presenta una síntesis de los diferentes procesos de desarenamiento desarrollados para la concentración del mineral arcilloso.

4.5.2.2 Ensayos para la Remoción de Impurezas de Hierro. Estas pruebas (Figura 17) se llevaron a cabo por medio de la aplicación independiente de los procesos de lixiviación y de separación magnética, donde este último proceso fue aplicado únicamente a la mena arcillosa “Run of Mine” procedente del pretratamiento de atrición/dispersión. Tales ensayos fueron realizados con el objeto de determinar el proceso más conveniente para la remoción de este tipo de impurezas.

Figura 16. Esquema general de desarenamiento aplicado para concentrar las arcillas

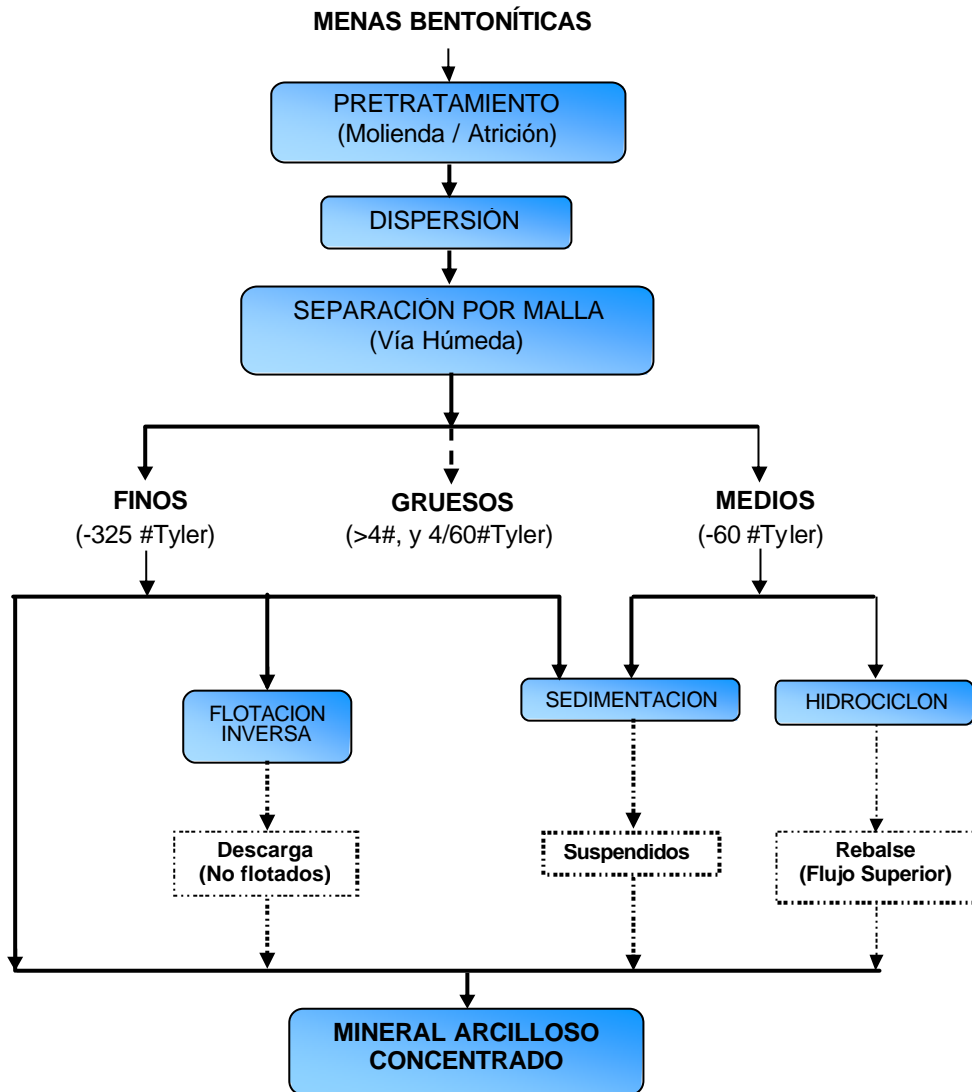
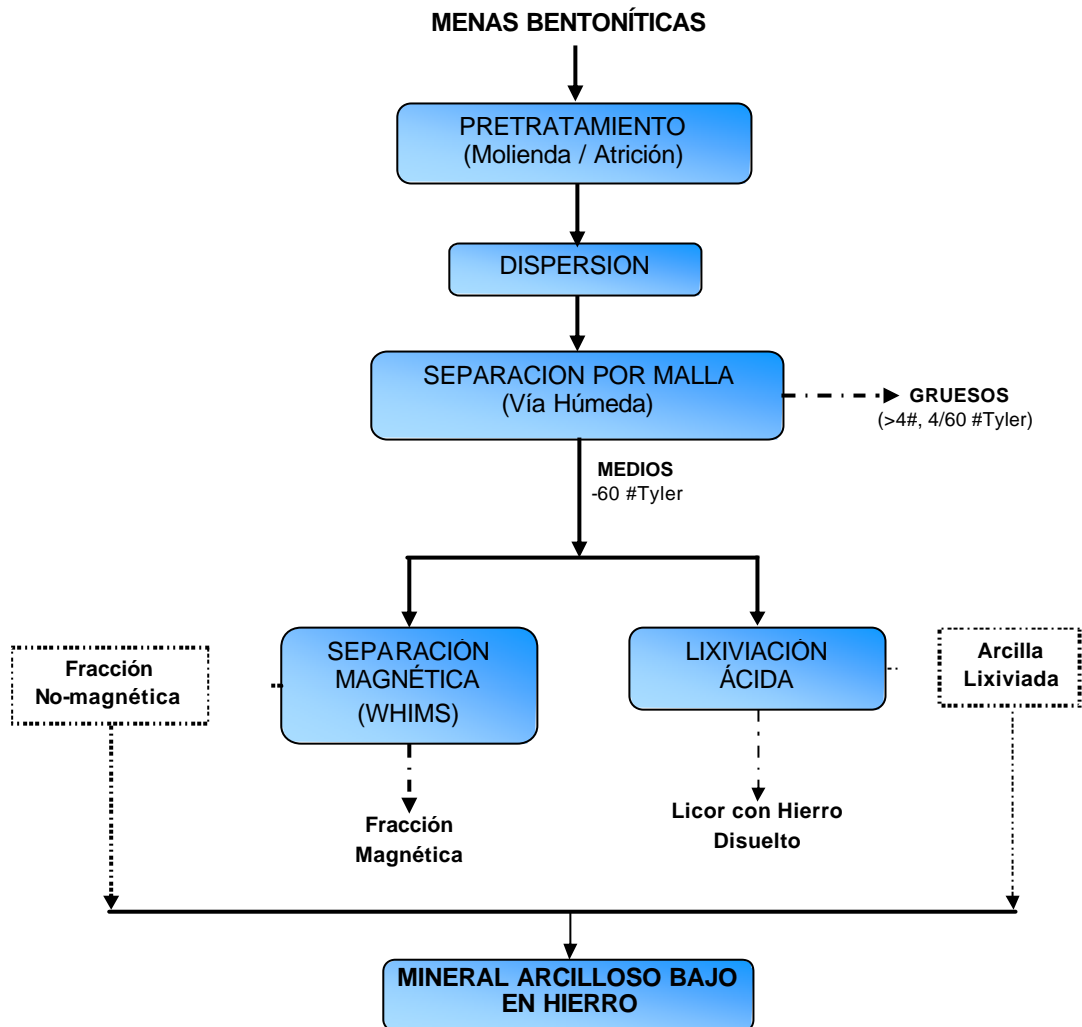


Figura 17. Procesos empleados para la remoción de impurezas de hierro



4.5.3 Evaluación de los Procesos de Beneficio

Para la evaluación de los procesos de concentración y refinación aplicados a cada una de las muestras seleccionadas, surgió la necesidad de establecer una variable dependiente o respuesta que permitiera efectuar dicha evaluación. Esta variable, debería guardar algún tipo de relación con la capacidad de adsorción de los productos arcillosos, ya que dicha propiedad determinaría la posibilidad de su aplicación como material adsorbente. Es así como, se decidió escoger el Índice Azul de Metileno (MBI) como parámetro indicativo de dicha evolución, atendiendo a las siguientes razones: la primera, relacionada con aspectos de procedimiento

ya que, en comparación con otras técnicas, la determinación de este índice se realiza de manera sencilla y relativamente rápida; y la segunda, relacionada con aspectos de caracterización, ya que el MBI al presentar una relación directa con la capacidad de adsorción de la arcilla, permite realizar una evaluación semicuantitativa de la actividad adsortiva del producto arcilloso [11], y por lo tanto inferir acerca del tipo de especie arcillosa presente en el mismo, haciendo posible la correlación del comportamiento de este parámetro, con el presentado por la relación Alúmina/Sílice ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, denominada r en el presente proyecto), la cual es igualmente una variable respuesta indicativa de la concentración del mineral arcilloso presente en la mena.

4.5.4 Ensayos de Pretratamiento de las Menas

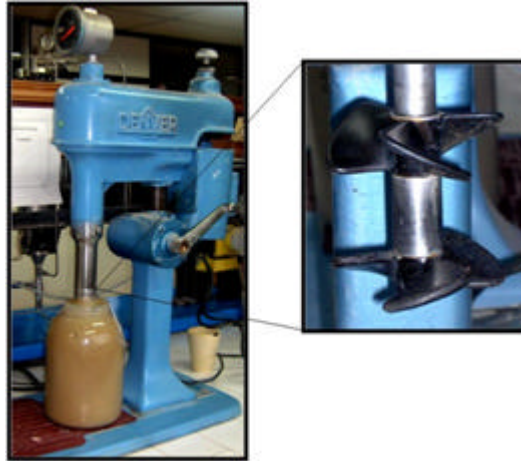
Este se realizó con el fin de establecer el tipo de pretratamiento que proporcionaría a las menas una distribución de tamaño de partícula más adecuada para la posterior aplicación de los diferentes procesos de beneficio. En el caso de la mena “Run of Mine”, se realizaron ensayos relacionados con los procesos de molienda y atrición; mientras que para el de la mena “comercial” Arcicol[®], no fue necesario someterla a ninguno de estos dos procesos, puesto que ésta, como ya se dijo anteriormente, se comercializa como un material muy fino, el 97.33% por debajo de la malla 325#Tyler.

4.5.4.1 Molienda. El proceso de molienda (vía seca) fue aplicado a la mena “Run of Mine” en estado de recibido, haciendo uso de un molino de bolas de material cerámico y, controlando el tiempo de residencia del mineral en el mismo durante 60min, hasta obtener un tamaño de partícula inferior a los $300\mu\text{m}$ (48#Ty).

4.5.4.2 Atrición. Al igual que en el caso anterior, este proceso fue aplicado a la mena “Run of Mine” en estado de recepción, haciendo uso del sistema de agitación de una celda de flotación Denver con el cual, se llevó a cabo la disgregación de la pulpa. Este tipo de sistema posee un arreglo de aspas de

doble hélice invertida (Figura 18), las cuales generan oposición de los flujos de pulpa, proporcionando de esta manera un alto impacto partícula-partícula [18].

Figura 18. Sistema de agitación de una celda de flotación Denver provisto de un arreglo de aspas de doble hélice invertida para la atrición del mineral



Para la aplicación de este pretratamiento, se prepararon pulpas al 30% (p/p) de sólidos, las cuales fueron disgregadas a una velocidad de 2700rpm durante el mismo tiempo de duración del proceso de molienda (60 minutos); después de lo cual, la pulpa fue sometida a una etapa de dispersión, bajo las mejores condiciones de dosificación de dispersante y pH encontradas, durante un tiempo de 15 minutos; luego de lo cual se realizó el análisis granulométrico y microgranulométrico. Teniendo en cuenta los resultados anteriores, fue necesario efectuar otras pruebas, con el fin de establecer tanto el tiempo como el porcentaje de sólidos más convenientes para obtener una adecuada disgregación del mineral. Se evaluó un tiempo de atrición de 30 minutos, manteniendo constantes las condiciones de velocidad de disgregación y contenido de sólidos ensayados previamente. Posteriormente, se desarrollaron pruebas a un porcentaje de sólidos mayor (50% p/p), evaluando tiempos de atrición de 15 y 30 minutos, y conservando las condiciones trabajadas con anterioridad. En la Tabla 9, se consignan las condiciones experimentales anteriormente explicadas.

Tabla 9. Variables operativas utilizadas para el pretratamiento de atrición de la mena bentonítica “Run of Mine”

% SÓLIDOS (p/p)	TIEMPO ATRICIÓN (min)
30	60
	30
50	15
	30

4.5.4.3 Análisis Granulométrico. Este se desarrolló con el objeto de tener conocimiento de la distribución granulométrica de cada una de las muestras seleccionadas listas para someterlas a los procesos de beneficio y, para lo cual se les realizó tanto el análisis granulométrico como el microgranulométrico.

i. **Distribución Granulométrica.** La determinación de la distribución granulométrica en el caso específico de la arcilla “comercial”, fue realizada para la muestra en estado de recepción, por medio del tamizado en húmedo de la misma, con previo tratamiento de dispersión bajo las mejores condiciones encontradas, y durante un tiempo de agitación de 15min, haciendo uso del conjunto de mallas #60, #100, #140, #200, #270 y #325 Tyler. De la misma forma, se efectuó la determinación de la distribución granulométrica de la segunda muestra “Run of Mine”. No obstante, teniendo en cuenta que este mineral fue sometido a dos tipos de pretratamiento diferentes, molienda y atrición, dicha determinación fue realizada de manera independiente para cada uno de estos casos, aclarando además que para la mena sometida al pretratamiento de atrición, se empleó adicionalmente la malla #4 Tyler.

ii. **Distribución Microgranulométrica.** Para la evaluación de la distribución microgranulométrica tanto para el caso de la muestra “comercial” en estado de

recepción como para el caso de la mena “Run of Mine” sometida a cada uno de los pretratamientos de molienda y atrición, se emplearon fracciones de mineral pasante de la malla #325 Tyler, las cuales fueron dispersadas en un medio ultrasónico por aproximadamente 5 minutos y, posteriormente conducidas al Fotosedimentador LUMOSSED de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, en donde fueron efectuadas cada una de estas determinaciones.

4.5.5 Estudio de Desarenamiento por Separación por Malla en Húmedo

Esta etapa inicial de desarenamiento se desarrolló con el objeto de obtener una separación del mineral en distintas fracciones: gruesas, medias y finas; que permitiera la mayor retención del cuarzo en las fracciones gruesas, y que se concentraran las especies arcillosas en las fracciones finas.

Inicialmente, esta etapa de separación fue realizada a través de la malla #325 Tyler. Teniendo en cuenta que para el caso específico del pretratamiento de atrición, las superficies con aberturas pequeñas son por naturaleza más costosas, de menor resistencia física y, suelen presentar en su operación una alta tendencia al bloqueo causado por partículas retenidas, para fines prácticos se consideró necesaria la utilización de mallas más convenientes para el desarrollo de este proceso, tales como la #4 y la #60 Tyler.

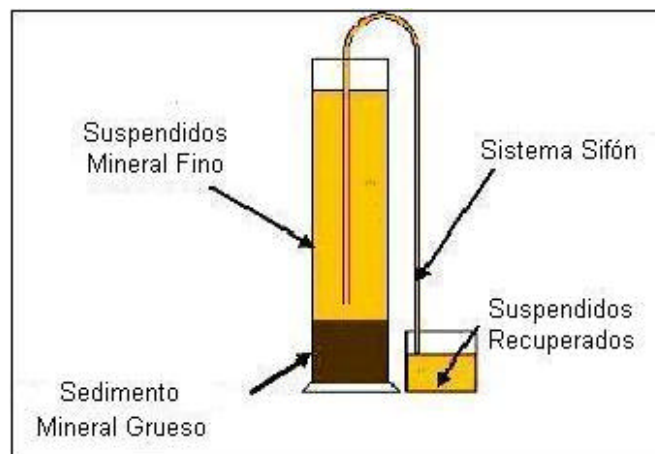
4.5.6 Estudio de Desarenamiento por Sedimentación

Para el caso específico de esta etapa de separación se consideró necesario el estudio de dos situaciones diferentes, atendiendo a las características presentadas por cada una de las menas seleccionadas, tal y como se describe en los numerales 4.5.6.1, 4.5.6.2 y 4.5.6.3. Para el caso de la muestra “comercial”, se determinó el comportamiento a este proceso, con base en la observación independiente de la influencia ejercida por el tipo de agitación durante la dispersión y por un tratamiento previo de hidratación aplicado a la arcilla. En el

caso de la mena de arcilla “Run of Mine”, se observó el comportamiento a la sedimentación bajo la influencia de cada uno de los pretratamientos (molienda y atrición) practicados a la misma.

Estos ensayos de sedimentación fueron llevados a cabo como se describe a continuación. Una vez dispersas las pulpas, éstas se dejaban sedimentar en probetas de 500ml durante un tiempo determinado, después del cual el mineral suspendido era recuperado por medio de la aplicación de un sistema sifón (Figura 19). Este sistema consistía en introducir una manguera en la probeta hasta un nivel aproximado de 5ml por encima de la interfase (suspendidos/sedimentos), con el fin de evitar el arrastre o succión de material grueso.

Figura 19. Esquema del sistema sifón utilizado en la recuperación del mineral suspendido



4.5.6.1 Influencia de l Tipo de Agitación Durante la Dispersión. En este caso se estudió el comportamiento a la sedimentación presentado por la arcilla “comercial”, bajo la influencia de diferentes tipos de agitación mecánica, ultrasónica y ultra-agitación, durante la dispersión previa de las pulpas. Tal comportamiento, fue evaluado por medio de la determinación del MBI para el material suspendido (producto concentrado de mineral arcilloso) obtenido a cada uno de los tiempos de sedimentación ensayados (5, 20, 40, 60 y 80min).

El trabajo realizado con cada uno de los medios dispersores seleccionados, fue llevado a cabo durante un tiempo de 15 minutos, bajo las mejores condiciones de dispersión encontradas (dosificación de dispersante y pH) y, manejando una concentración de sólidos equivalente al 10%(p/p) de acuerdo con los resultados obtenidos mediante el estudio de viscosidad.

4.5.6.2 Influencia del Pretratamiento de Hidratación. Con base en los resultados de las experiencias anteriores de sedimentación, se consideró necesario observar el comportamiento de sedimentación presentado por la arcilla “comercial”, pero bajo la acción de un pretratamiento de hidratación [19]. Es así como dicho pretratamiento, fue aplicado a la muestra por un periodo de tiempo de 96h (4 días) durante el cual, ésta permaneció en reposo al interior de un recipiente lleno de agua destilada (500ml), cuyo extremo superior se encontraba totalmente sellado. Posteriormente, la arcilla producto de este pretratamiento fue dispersada durante 15 minutos (bajo las mejores condiciones de dosificación de dispersante y pH) por medio de agitación mecánica, para a continuación transferirla a una probeta en la cual la pulpa así obtenida, fue dejada sedimentar a cada uno de los tiempos seleccionados (20, 40, 60 y 80 minutos).

4.5.6.3 Influencia de los Pretratamientos de Molienda y Atrición. En primer lugar, la arcilla “Run of Mine” producto del **pretratamiento de molienda** fue sometida de manera independiente a dos procesos de desarenamiento por sedimentación, los cuales fueron denominados *sedimentación con previa clasificación por malla #325 Tyler* (fracción $-45\mu\text{m}$) y *sedimentación directa* [fracción $-300\mu\text{m}$ (-48#Ty)]. Dichos procesos, fueron realizados manteniendo constantes parámetros tales como el porcentaje de sólidos (30%p/p), la velocidad de agitación (1250rpm) y las mejores condiciones de dispersión (dosificación de dispersante y pH) encontradas previamente. Así mismo, se escogieron como variable de estudio y de respuesta, el tiempo de sedimentación (10-30 minutos) y el MBI de los productos obtenidos, respectivamente.

Por otra parte, para la evaluación del **pretratamiento de atrición** así como para la posterior comparación de éste con el de molienda, se consideró suficiente con la ejecución de una sola prueba de sedimentación en la cual, la fracción -60 #Tyler (-250 μ m), producto de la etapa previa de separación por malla #4 y #60 Tyler¹, fue sometida a un proceso de dispersión durante un tiempo de 15 minutos, por medio de agitación mecánica (1250rpm) y mediante un reajuste de pH hasta el valor indicado por el estudio de dispersión. Posteriormente, la pulpa así obtenida fue depositada para dejarla sedimentar en una probeta de 500ml donde permaneció por 20minutos², tiempo después del cual fueron recogidos cada uno de los productos del proceso.

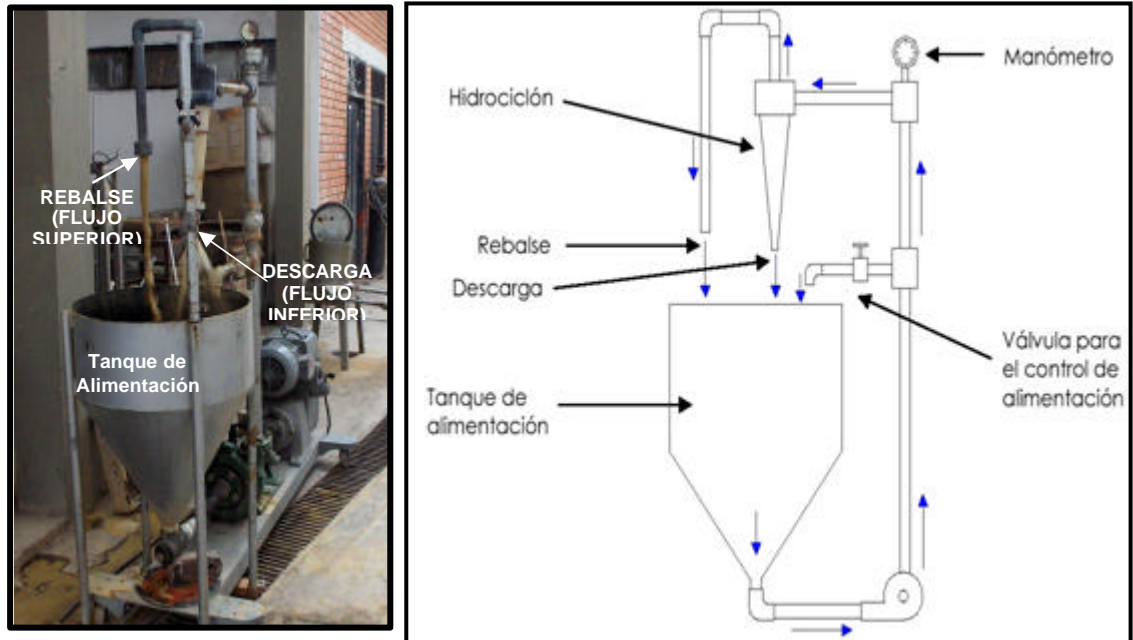
4.5.7 Estudio de Desarenamiento por Hidrociclón

Este proceso de desarenamiento fue practicado a la mena "Run of Mine" proveniente del pretratamiento de atrición/dispersión, el cual fue desarrollado partiendo de las mejores condiciones, (% sólidos, tiempo de disgregación, dosificación de dispersante y pH) encontradas bajo una velocidad de 2700rpm, realizando tanto la atrición como la dispersión en el mismo equipo. Es así como después de éste pretratamiento, la pulpa fue tratada por medio del proceso de separación por malla (#4 y #60 Tyler) después del cual, la fracción -60#Ty (-250 μ m) fue sometida al proceso de separación en el Hidrociclón Bauer (Figura 20), del Laboratorio de Procesos de Minerales adscrito a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS.

¹ Conjunto de mallas seleccionado con base en las consideraciones de resistencia física y de eficiencia planteadas inicialmente en el numeral 4.5.5

² Tiempo seleccionado con base en aquel que produjo un mayor MBI para el material suspendido, producto del proceso de *sedimentación directa* aplicado a la arcilla molida.

Figura 20. Sistema de desarenamiento por hidrociclón. a) Equipo Bauer. b) Dirección de flujo de la pulpa dentro del hidrociclón



a)

b)

Este tipo de hidrociclón se caracteriza por poseer una geometría o configuración convencional, en la cual los diámetros de rebalse y de descarga son de especial importancia, equivaliendo en este caso a 15.5 y 13mm, respectivamente. Es así como para el desarrollo de esta etapa de concentración, los parámetros de diseño fueron mantenidos constantes, en tanto que las variables de tipo operativo fueron manipuladas con base en algunas de las condiciones reportadas en la literatura [5]. De esta manera, se estudiaron parámetros tales como la concentración o % de sólidos y la presión de alimentación, cuyos rangos de trabajo se encuentran consignados en la Tabla 10.

Tabla 10. Variables operativas trabajadas en el desarenamiento por hidrociclón

% SÓLIDOS (p/p)	RANGO PRESIÓN DE TRABAJO (psi)
10	25 - 45
20	
30	

4.5.8 Estudio de Desarenamiento por Flotación Espumante

Con base en algunas investigaciones reportadas en la literatura consultada en las cuales, la ganga silícea fue separada de otros minerales constituyentes de la mena por medio de *flotación inversa* en presencia de colectores tales como las aminas [20, 21], se consideró necesaria la realización de algunas pruebas experimentales con el fin de observar la influencia de la concentración del colector Didecilamina $[\text{CH}_3(\text{CH}_2)_9]_2\text{NH}$ sobre la disminución del contenido de cuarzo presente en la fracción fina (-325#Ty) de la bentonita "Run of Mine", al dejar constantes parámetros tales como el porcentaje de sólidos de la alimentación (10%p/p), la dosificación del espumante (30ppm de isobutil-carbinol), la velocidad de agitación (450rpm), la alcalinidad del medio (pH = 8) y, los tiempos de acondicionamiento y de residencia (15 y 2 minutos, respectivamente) del mineral, en la celda Denver de flotación, del Laboratorio de Procesos de Minerales adscrito a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS. Teniendo en cuenta lo anterior, tal proceso de concentración fue llevado a cabo considerando dos dosificaciones de colector: 133.33 y 400g/ton.

4.5.9 Estudio de Separación Magnética

Este proceso de remoción de hierro fue practicado a la fracción -60#Ty (-250 μm) de la muestra bentonítica "Run of Mine" proveniente de la etapa de separación por malla (Figura 17) con previo tratamiento de atrición/dispersión bajo las condiciones más favorables encontradas previamente. Para la aplicación de este proceso, se trabajó con una pulpa de alimentación del 30% p/p, utilizando un separador magnético de alta intensidad (Modelo WHIMS -3x4L) del Laboratorio de Procesos de Minerales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales de la UIS, bajo la acción de una intensidad de campo 11.4 KTeslas, durante un tiempo de residencia de 30 minutos.

4.5.10 Estudio del Proceso de Lixiviación Ácida

De acuerdo con algunos de los trabajos reportados en la literatura consultada, en los cuales se propone el empleo de agentes lixiviantes orgánicos como una alternativa efectiva y ambientalmente amigable para la remoción del hierro presente en este tipo de menas [22], se consideró conveniente tratar con Ácido Oxálico Dihidratado $[(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ a cada una de las dos bentonitas seleccionadas.

4.5.10.1 Bentonita “Comercial”. Inicialmente, se realizó el estudio de lixiviación para la arcilla “comercial”, el cual fue aplicado a la misma en estado de recepción, manteniendo constantes tanto la concentración de sólidos de la alimentación (10% p/p) como la acidez del medio ($\text{pH} = 1.5 \pm 0.5$) y, efectuando la manipulación de parámetros tales como: el tipo de agitación, la concentración del agente lixivante, la temperatura de lixiviación y el tiempo de residencia del mineral en el sistema.

Al igual que en los procesos de beneficio aplicados con anterioridad, la efectividad del tratamiento se evaluó por medio tanto del cálculo de los porcentajes de hierro y aluminio disueltos (es decir, contenidos en el licor) como a través de la determinación del MBI de la arcilla lixiviada; de tal manera que, al sistema que proporcionara el mayor porcentaje de remoción de hierro, se le realizaban dos análisis adicionales relacionados con la determinación tanto del contenido de hierro como de la Capacidad de Intercambio Catiónico (Método Acetato de Amonio) presentados por la arcilla tratada con este tipo de agente lixivante.

Es así como para la puesta en marcha de dicho proceso de beneficio, se realizó igualmente un tratamiento previo de dispersión (conservando las mejores condiciones de dosificación de dispersante y pH encontradas) mediante la agitación mecánica de la pulpa (a 1250rpm) durante 15 minutos, después de los cuales dicha muestra fue puesta en contacto con el agente lixivante (bajo las condiciones establecidas para cada prueba de lixiviación) y, finalmente sometida

tanto a filtración como a centrifugación (mediante lavados sucesivos), con el fin de recolectar el licor (solución rica en hierro) y de igual manera, obtener una arcilla libre de residuos ácidos que fuera apta para la realización posterior de los respectivos análisis.

i. **Selección del Tipo de Agitación y de la Concentración del Agente Lixivante.** Con el fin de determinar tanto el tipo de agitación como la concentración de ácido oxálico más adecuadas para el desarrollo del proceso, fueron realizados una serie de ensayos bajo las mismas condiciones de temperatura de lixiviación y tiempo de residencia (80°C y 12h, respectivamente), mediante el empleo de dos tipos de agitadores diferentes (shaker -a un nivel del 20% de agitación- y, agitador mecánico convencional -800rpm-), variando la concentración del agente lixivante de 0.1 a 0.4M de ácido oxálico [8] .

ii. **Selección de la Temperatura de Lixiviación y del Tiempo de Residencia del mineral en el Sistema.** Con base en las mejores condiciones encontradas anteriormente para el tipo de agitación y para la concentración del agente lixivante, se llevaron a cabo otras series de pruebas en las que para cada una de las temperaturas estudiadas (25, 40, 60 y 80°C) fue variado el tiempo de residencia del mineral en el sistema entre 4, 8 y 12 horas. Igualmente, cada una de estas pruebas fue evaluada por medio de la determinación del porcentaje de hierro y aluminio disueltos.

4.5.10.2 Bentonita “Run of Mine”. Para el caso de ésta mena, fue igualmente practicado un proceso de lixiviación en el cual, la fracción -60#Ty (-250µm) proveniente de las etapas de atrición y separación por malla (Figura 17) fue sometida a este proceso de beneficio teniendo en cuenta las mejores condiciones de concentración del agente lixivante, el tipo de agitación, la temperatura de lixiviación y el tiempo de residencia encontradas para la arcilla “comercial”. En este caso, el proceso se desarrolló a diferentes porcentajes de pulpa de

alimentación (10, 20 y 30% p/p) y, fue evaluado por medio de la determinación del contenido de hierro presente en el licor.

4.6 EVALUACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y PROPUESTA DEL SISTEMA DE BENEFICIO

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en cada uno de los procesos ejecutados en la etapa anterior, se efectuó el análisis respectivo con el fin de seleccionar los procesos de beneficio más convenientes para la concentración de los minerales arcillosos (especialmente montmorillonita e illita) presentes en la mena bentonítica “Run of Mine”. Esta selección, fue realizada considerando los procesos que generaron un producto arcilloso con los mayores valores tanto de capacidad de adsorción (método MBI y método acetato de amonio) como de relaciones Al_2O_3/SiO_2 .

Finalmente, con base en dicha elección y de acuerdo con la información consultada en la literatura, se propuso un sistema de beneficio para la mena bentonítica “Run of Mine” extraída de un yacimiento localizado en el municipio de Lérída (Tolima), elaborando un diagrama de flujo para el sistema de beneficio propuesto y, por último realizando el balance de masa respectivo.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS MENAS A BENEFICIAR

5.1.1 Caracterización Geoquímica y Mineralógica de las Muestras Bentoníticas

5.1.1.1 Composición Química. Los resultados del análisis elemental para cada una de las muestras de arcilla recolectadas (Arcicol[®], SB-1, LR-2 y RR-3) se encuentran consignados en la Tabla 11.

Tabla 11. Composición química de las bentonitas nacionales recolectadas (sobre muestra seca, % en peso)

MUESTRA	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Na ₂ O	%CaO	%TiO ₂	%K ₂ O	%MgO	%LoI [*]	r ^{***}
Arcicol [®]	19.48	45.87	10.15	1.55	0.027	1.45	3.39	2.44	12.71	0.424
SB-1	13.07	56.46	6.52	2.31	0.11	N.D.**	2.95	2.56	9.95	0.231
LR-2	13.85	58.40	7.60	1.69	0.048	N.D.	3.08	1.93	8.19	0.237
RR-3	18.89	50.52	6.75	2.49	0.035	N.D.	2.90	2.43	10.91	0.374

^{*} Pérdidas por calcinación a 1000°C (Loss on Ignition)

^{**} No Determinado

^{***} Relación Alúmina / Sílice

De acuerdo con la tabla anterior, se observa en general la existencia de cantidades apreciables de especies comúnmente encontrados en menas arcillosas, tales como Al₂O₃, Fe₂O₃ y SiO₂, en donde estos dos últimos sugieren la presencia de impurezas tanto de hierro como de silicio, especialmente para el caso de las muestras Arcicol[®] y LR-2, respectivamente. Además, en las muestras se aprecian pequeños contenidos de Na₂O, K₂O y CaO dentro de los cuales, los

dos primeros son suficientes para inferir la posible existencia de montmorillonita de tipo sódica y de illita, respectivamente.

5.1.1.2 Composición Mineralógica. Los resultados de los análisis por Difracción de Rayos-X para cada una de las menas recolectadas (Arcicol[®], SB-1, LR-2 y RR-3) se encuentran registrados en la Tabla 12. De igual forma, los difractogramas correspondientes se reportan en el Anexo B.

Tabla 12. Composición mineralógica de las bentonitas nacionales recolectadas

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

* Análisis Cualitativo
 ** No Detectable

Con base en la tabla anterior, y considerando los planteamientos hechos en el análisis elemental, se ratifica para el caso de las muestras Arcicol[®], LR-2 y RR-3, la presencia de minerales arcillosos pertenecientes a los grupos de las micas (Illita, I), de las esmectitas (Montmorillonita Sódica, M-Na) y de la Caolinita (K), los cuales se encuentran en proporciones relativamente altas en todas ellas, alcanzando contenidos totales [I + (M-Na) + K] del 72.12, 63.4 y 71.43%, para los minerales Arcicol[®], LR-2 y RR-3, respectivamente. Por otra parte, con respecto a las impurezas, se observa en las cuatro muestras la presencia de cuarzo (Q), en especial la muestra LR-2 que presenta una cantidad considerable de esta impureza (27.97%). En el caso del mineral Arcicol[®], aunque contiene una

cantidad relativamente baja de cuarzo (9.03%), sin embargo presenta la especie feldespática Albita en una cantidad considerable (10.35%), corroborando así lo expuesto previamente en el análisis químico. Además, se hace necesario aclarar que a pesar de que en dicho análisis se reportó la presencia de una cantidad significativa de hierro, expresada como Fe_2O_3 , no se detectó como fases cristalinas en el análisis mineralógico, por lo que es posible que el hierro se encuentre en la estructura cristalina de los minerales arcillosos o haciendo parte de la fracción amorfa.

En el caso particular de la arcilla SB-1, no fue posible realizar una descripción cuantitativa de las fases cristalinas, debido a que la banda de la Montmorillonita es muy ancha, lo cual podría indicar tanto amorficidad de la muestra como que la misma se encuentra integrada por más de una fase perteneciente al grupo de las esmectitas.

5.1.2 Selección de las Menas a Beneficiar

Por las razones indicadas en el numeral 4.2.2, inicialmente se trabajó con la muestra “comercial” Arcicof[®]. Luego de que se pudieron adquirir las muestras “Run of Mine” por parte del grupo de trabajo de este proyecto, y de conocer los resultados de la caracterización química y mineralógica practicada a cada una de aquellas muestras, y considerando que en el caso de la mena SB-1 la cuantificación de las fases cristalinas no fue posible, la selección de las arcillas se enmarcó dentro de las muestras LR-2 y RR-3. Es así como además de la muestra “comercial” se escogió la mena LR-2 para la aplicación de los diferentes procesos de beneficio, con base tanto en los contenidos significativos de hierro presentes en la misma, como por la gran proporción de cuarzo y el menor contenido de minerales arcillosos (especialmente de montmorillonita), existentes en la muestra LR-2.

5.1.3 Caracterización Físicoquímica de las Menas a Beneficiar

Los resultados de la determinación de algunos parámetros físicoquímicos (humedad, densidad real, índice de hinchamiento, Acidez, Área Superficial Específica -SSA-, Capacidad de Adsorción) correspondientes a los minerales Arcicol[®] y LR-2, se encuentran reportados en la Tabla 13.

Tabla 13. Parámetros físicoquímicos de las menas Arcicol[®] y LR-2

MUESTRA	PROPIEDADES						
	HUMEDAD % (p/p)	DENSIDAD REAL (g/cm ³)	ÍNDICE HINCHAMIENTO (ml/2g ± 0.5ml)	ACIDEZ (pH)	AREA SUPERFICIAL ESPECIFICA (BET) (m ² /g ± 10 m ² /g)	CAPACIDAD DE ADSORCIÓN	
						MBI (±0.25 meq/100g)	CIC (meq/100g)
Arcicol [®]	8.43	2.12	20 (27-26 ± 0.5°C)	10.20	92.22	51.75	48
LR-2	5.83	2.49	5 (23-24 ± 0.5°C)	10.70	19.39	20.78	29

De acuerdo con la tabla anterior, y comparando los resultados de los parámetros de Densidad Real y Acidez determinados para la muestra Arcicol[®] con los encontrados para la arcilla LR-2, se observa gran similitud en las magnitudes de los mismos, destacándose su naturaleza alcalina.

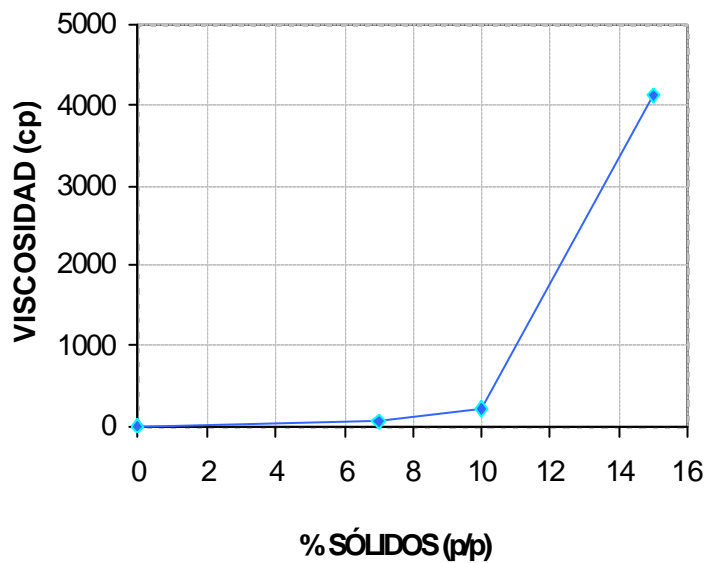
Por otra parte, en el caso de los parámetros restantes, se encuentra que estas propiedades son totalmente dependientes de la proporción y el tipo tanto de mineral arcilloso como de las impurezas existentes en la mena. De este modo, se observa que la muestra Arcicol[®] con un contenido de montmorillonita equivalente al 20.08%, es el mineral que presenta los mayores valores tanto de Área Superficial Específica como de Capacidad de Adsorción (independientemente del método ensayado) e Índice de Hinchamiento, evidenciando además la naturaleza sódica de la muestra.

5.1.3.1 Viscosidad de Pulpas. En la Tabla 14 se muestra los resultados de viscosidad para la bentonita Arcicol[®] a 7, 10 y 15 % de sólidos, ya que para porcentajes mayores fue imposible hacer mediciones, debido a que la pulpa tomó una apariencia muy pastosa. Como se muestra en la Figura 21, la viscosidad aumenta gradualmente a medida que se incrementa el porcentaje de sólidos hasta un 10%, sin embargo para porcentajes superiores a éste la viscosidad aumenta de una manera drástica, alcanzándose valores de 4117cp para pulpas con 15% de sólidos.

Tabla 14 . Viscosidad de pulpas para el mineral Arcicol[®]

% SÓLIDOS (p/p)	VISCOSIDAD (cp)
7	48.5
10	222.9
15	4117

Figura 21 . Viscosidad de pulpas para el mineral Arcicol[®]

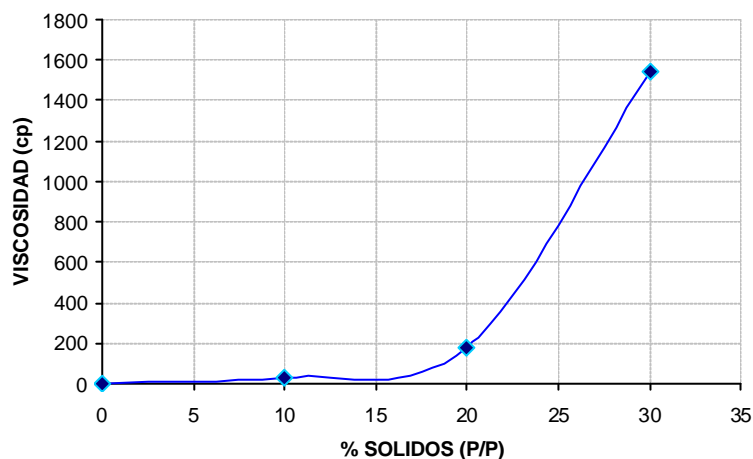


Para el caso de la mena LR-2, en la Tabla 15 se presentan los resultados de los ensayos de viscosidad realizados para ésta arcilla. En este caso se pudo trabajar con mayores porcentajes de sólidos (30%), ya que la pulpa mostró valores más bajos de viscosidad. En la Figura 22, se puede apreciar el comportamiento de la viscosidad con respecto al porcentaje de sólidos para el mineral LR-2.

Tabla 15 . Viscosidad de pulpas para el mineral LR-2

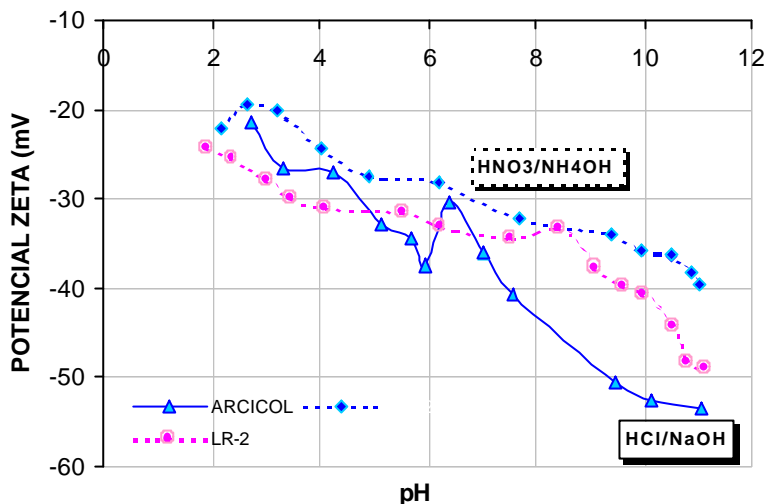
% SÓLIDOS (p/p)	VISCOSIDAD (cp)
10	32
20	180
30	1540

Figura 22. Viscosidad de pulpas para el mineral LR-2



5.1.3.2 Carga Eléctrica Superficial. Los resultados de la evaluación del Potencial Zeta bajo la acción de dos diferentes sistemas modificadores de pH (HCl/NaOH y HNO₃/NH₄OH) para las arcillas seleccionadas, se encuentran ilustrados en la Figura 23. De igual forma, en la Tabla 16 se reportan los valores máximos de potencial ($PZ_{Máx}$) encontrados para los minerales Arcicol[®] y LR-2 (en estado de recepción o natural), respectivamente.

Figura 23. Potencial Zeta de suspensiones de las arcillas Arcicol[®] y LR-2



Teniendo en cuenta la figura anterior, y considerando el caso específico de la muestra Arcicol[®], se puede observar una amplia diferencia en los valores de Potencial Zeta determinados con cada uno de los dos sistemas modificadores de pH, especialmente a medida que se avanza a través del rango comprendido entre pH 6.2 y 11.07. Es así como se encuentra que con el empleo del sistema HCl/NaOH se alcanzan valores de Potencial Zeta más negativos (hasta de -53.6mV a pH 11.07) en comparación a los obtenidos con los agentes HNO₃/NH₄OH (-39.5mV a pH 11.04), lo cual puede ser atribuido a una posible modificación estructural sufrida por el mineral, ya que como se ha encontrado en otras investigaciones [23], en algunos casos el tratamiento de la arcilla con HCl y subsecuente neutralización con NaOH, genera cambios en su composición química y estructura mineralógica. Por tal razón, se decidió escoger a la pareja de agentes HNO₃/NH₄OH como la más apropiada para el ajuste del pH del sistema, y de igual forma, el trabajo con el mineral LR-2 se restringió al empleo de estos agentes.

5.2 ESTUDIO DE DISPERSIÓN DE PULPAS DE LAS MENAS A BENEFICIAR

5.2.1 Mineral Arcicol®

El comportamiento del Potencial Zeta bajo la influencia de diferentes concentraciones de Silicato y Pirofosfato de Sodio en el rango de pH básico, se encuentra ilustrado en las figuras 24 y 25, respectivamente. De igual forma, en la Tabla 16 se registran los datos máximos de potencial hallados para las dosificaciones empleadas en cada uno de los casos, junto con su respectivo valor de pH.

Figura 24. Efecto de la dosificación de silicato de sodio sobre el potencial zeta del sistema arcilla-agua (mineral Arcicol®)

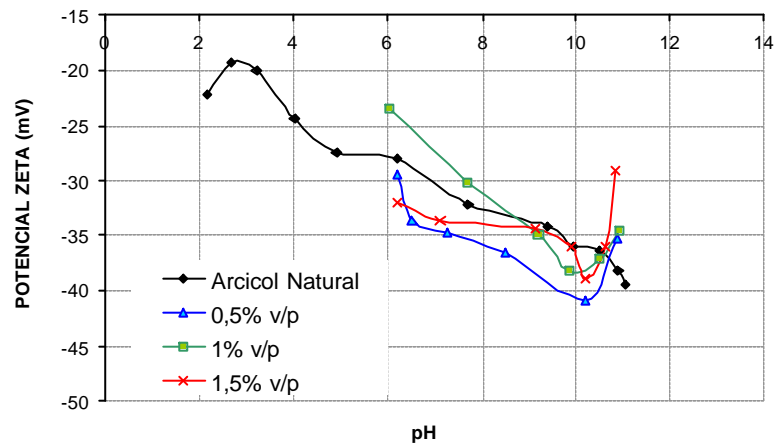


Figura 25. Efecto de la concentración de pirofosfato de sodio sobre el potencial zeta del sistema arcilla-agua (mineral Arcicol®)

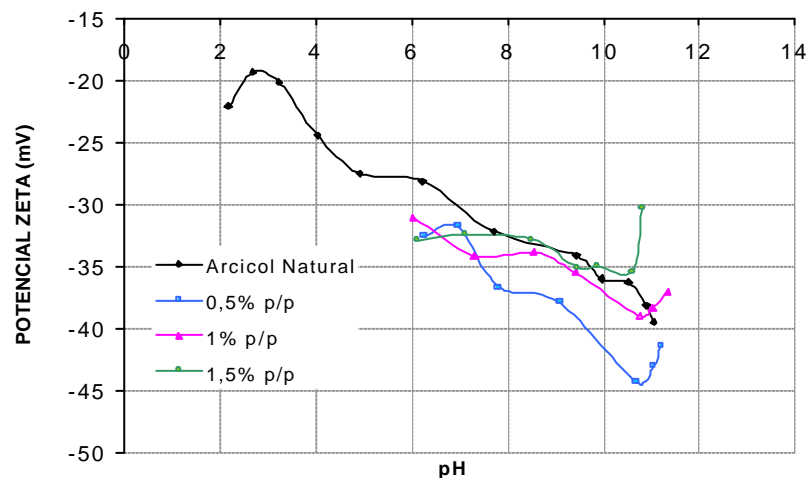


Tabla 16. Influencia de la dosificación de dispersantes sobre el potencial zeta del sistema arcilla-agua (mineral Arcicol®)

MUESTRA	AGENTE(S) MODIFICADOR(ES) DE pH	AGENTE DISPERSANTE	DOSIFICACIÓN DISPERSANTE	pH	PZ _{Máx} (mV)
Arcicol®	HNO ₃ / NH ₄ OH	Ninguno	0	11.04	-39.5
Arcicol® + Agente Dispersante	NH ₄ OH	Silicato de Sodio	0.5% v/p	10.21	-40.9
			1.0% v/p	9.86	-38.3
			1.5% v/p	10.20	-39.0
		Pirofosfato de Sodio	0.5% p/p	10.70	-44.4
			1.0% p/p	10.75	-39.0
			1.5% p/p	10.60	-35.4

De acuerdo con la Figura 24, se puede apreciar que independientemente de la dosificación de Silicato de Sodio empleada, el Potencial Zeta presenta un comportamiento generalizado en el que a medida que se incrementa el pH del medio, ocurre un aumento en la magnitud de dicho potencial hasta llegar a un máximo $-PZ_{Máx}$ (alrededor de pH 10.0), después del cual este parámetro empieza a disminuir.

Es así como teniendo en cuenta los datos presentados en la Tabla 16, se observa que no se alcanzan valores máximos de Potencial Zeta que superen de manera significativa a aquel presentado por la arcilla natural (a un pH de 11.04), y por consiguiente, se encuentra que este tipo de defloculante no es adecuado para la dispersión de este mineral.

Con base en la Figura 25 se puede apreciar que el Potencial Zeta en el sistema arcilla-agua disperso con Pirofosfato de Sodio, manifiesta un comportamiento similar al del caso anterior. No obstante, en esta situación, se encuentra que el $PZ_{Máx}$ se alcanza aproximadamente a un pH de 10.7. Además, considerando que éste sistema presenta una adecuada dispersión sólo cuando se trabaja con bajas dosificaciones de defloculante (0.5% p/p), lo cual es corroborado con la lectura del $PZ_{Máx}$ (Tabla 16) cuya magnitud indica una ligera superioridad con respecto al hallado para la arcilla natural, $PZ_{Máx}$ de -39.5 mV a un pH de 11.04, se encuentra

que dicho valor de $PZ_{M\acute{a}x}$ es de -44.4 mV a un pH de 10.7, es suficiente para que la dispersi3n adquiriera caracteristicas de "buena estabilidad" (Tabla 4).

Por lo anterior se puede concluir que una dosificaci3n de 0.5% p/p de Pirofosfato de Sodio a un pH de 10.7 son las condiciones mas apropiadas para llevar a cabo la dispersi3n del mineral Arcicol[®].

5.2.2 Mineral LR-2

En las figuras 26 y 27, se ilustran los resultados obtenidos en la evaluaci3n del Potencial Zeta bajo la influencia de diferentes concentraciones de Silicato y Pirofosfato de Sodio, respectivamente. Adicionalmente, en la Tabla 17 se reportan los datos maximos de potencial ($PZ_{M\acute{a}x}$) hallados para las dosificaciones ensayadas en cada uno de los casos, junto con su respectivo pH.

Figura 26. Efecto de la concentraci3n de silicato de sodio sobre el potencial zeta del sistema arcilla-agua (LR-2)

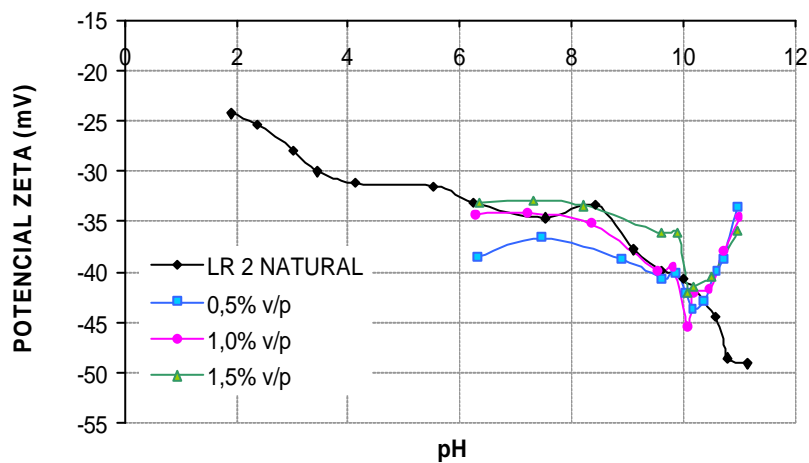


Figura 27. Influencia de la dosificación de pirofosfato de sodio sobre el potencial zeta del sistema arcilla-agua (LR-2)

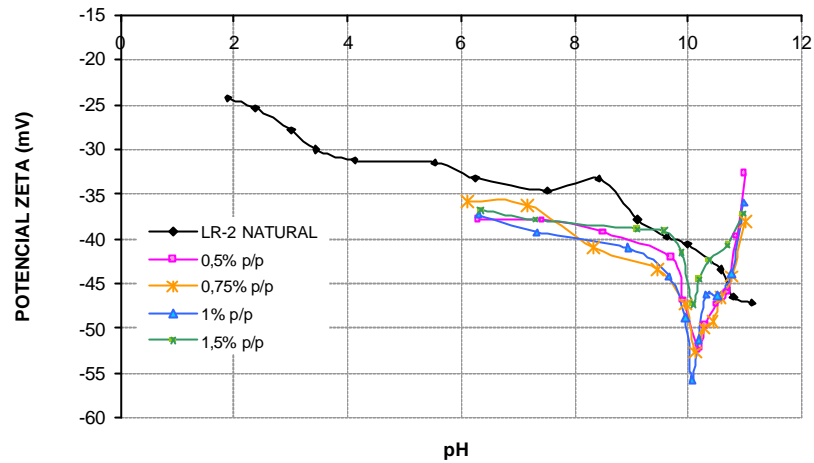


Tabla 17. Influencia de la dosificación de dispersantes sobre el potencial zeta del sistema arcilla-agua (LR-2)

MUESTRA	AGENTE(S) MODIFICADOR(ES) DE pH	AGENTE DISPERSANTE	DOSIFICACIÓN DISPERSANTE	pH	PZ _{Máx} (mV)
LR-2 Natural	HNO ₃ / NH ₄ OH	Ninguno	0	11.13	-49.1
LR-2 + Agente Dispersante	NH ₄ OH	Silicato de Sodio	0.5% v/p	10.16	-43.6
			1.0% v/p	10.08	-45.4
			1.5% v/p	10.08	-42.0
		Pirofosfato de Sodio	0.5% p/p	10.18	-53.4
			0.75% p/p	10.12	-53.7
			1.0% p/p	10.07	-55.7
		1.5% p/p	10.08	-47.3	

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla y las figuras anteriores, se puede observar en las mismas un comportamiento generalizado del Potencial Zeta muy similar a aquel presentado por el mineral Arcicol[®], sin embargo, en este caso se nota que un incremento en la concentración del agente dispersante implica también un aumento en la magnitud del PZ_{Máx}, hasta una cierta dosificación crítica después de la cual dicho potencial decrece nuevamente. Es así como teniendo en

cuenta los datos de Potencial Zeta presentados en la Tabla 17, se encuentra que para el caso particular del Silicato de Sodio, este tipo de defloculante no es adecuado para la dispersión del mineral LR-2, ya que las lecturas de potencial tomadas son inferiores a aquella encontrada para la arcilla natural a un pH de 11.13. Por otra parte, con base en el comportamiento del Potencial Zeta descrito con anterioridad, se aprecia que para el caso del Pirofosfato la concentración crítica de dispersante es del 1% p/p; sin embargo, teniendo en cuenta que la diferencia entre los datos de $PZ_{Máx}$ correspondientes a las dosificaciones de 0.5 y 1% p/p es mínima, y considerando que todos los valores se encuentran dentro del mismo rango de estabilidad -“muy buena estabilidad“- (Tabla 4), se puede concluir que la concentración de pirofosfato más adecuada para llevar a cabo la dispersión del mineral LR-2 es 0.5% p/p (pH 10.18).

5.3 ESTUDIO DE VISCOSIDAD DE PULPAS DE LAS MENAS A BENEFICIAR

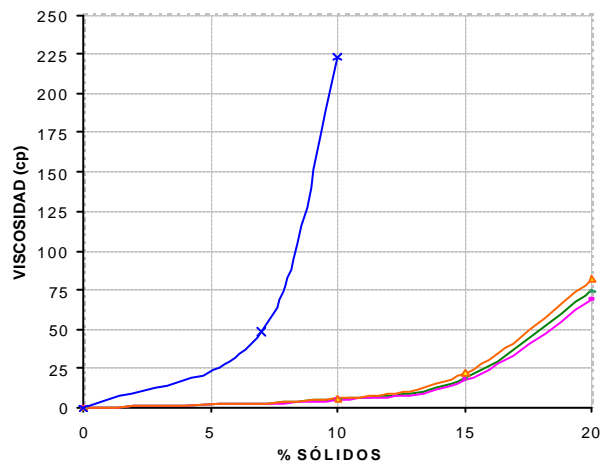
5.3.1 Mineral Arcicol®

Los resultados de la evaluación de la viscosidad de pulpa en función del contenido de sólidos y bajo las mejores condiciones de dispersión (0.5% p/p Pirofosfato de Sodio, pH 10.7 y 15min de agitación), se encuentran consignados en las tablas 18 y 19 para el caso de agitación mecánica y ultra-agitación, respectivamente. Así mismo, el comportamiento presentado por dicho parámetro con agitación mecánica se ilustra en la Figura 28.

Tabla 18. Viscosidad de pulpa para mineral Arcicol[®] en función del contenido de sólidos y de la velocidad de agitación mecánica en dispersión

SOLIDOS % (p/p)	VELOCIDAD DE AGITACIÓN (rpm)	VISCOSIDAD (cp)
10	750	5.83
	1000	5.62
	1250	5.12
15	750	22.2
	1000	19.0
	1250	17.4
20	750	82.0
	1000	74.5
	1250	68.4

Figura 28. Variación de la viscosidad de pulpa para mineral Arcicol[®] en función del contenido de sólidos a diferentes velocidades de agitación mecánica en dispersión



Comparando cada una de las curvas de viscosidad presentadas en la figura anterior, se puede apreciar que todos los sistemas presentan un comportamiento en el que a medida que el porcentaje de sólidos de la pulpa es incrementado, ocurre de igual forma un aumento progresivo en la viscosidad del medio, el cual empieza a agudizarse a partir de un contenido de sólidos del 15% (en peso),

poniendo de manifiesto la limitada cantidad de arcilla con la que pueden ser trabajadas estas pulpas minerales; lo anterior, puede ser atribuido tanto al alto contenido de montmorillonita sódica (20.08%) como al bajo porcentaje de cuarzo (9.03%) presentes en la mena, ratificando de esta manera el planteamiento hecho por Parfitt (1978) en cuanto a que la viscosidad de las suspensiones de arcilla es fuertemente dependiente de la composición mineralógica de las mismas [24].

Por consiguiente, teniendo en cuenta que la pulpa debe contar con unas características de flujo aceptables para el procesamiento, y considerando que a pesar de que las tres curvas ensayadas prácticamente se superponen en el rango de concentración inicial (hasta 15% de sólidos), se encuentra que de acuerdo con ensayos preliminares de laboratorio, las condiciones más favorables para el acondicionamiento de la pulpa son un contenido de sólidos del 10% p/p y una velocidad de agitación de 1250 rpm. A pesar de que a 750 rpm se obtuvo un comportamiento similar según los resultados presentados en la tabla y figura anteriores, se decidió trabajar con 1250 rpm, ya que para velocidades de agitación menores, la pulpa no se agitaba homogéneamente presentando una tendencia a adherirse a las paredes del recipiente usado.

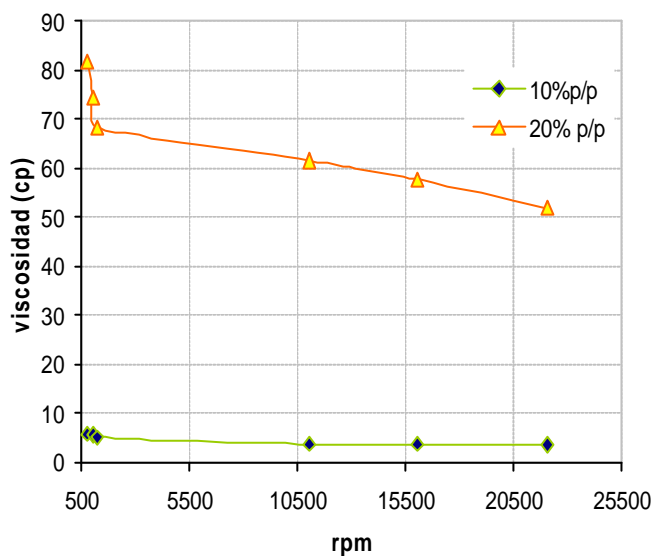
En el caso de los ensayos de ultra-agitación (Tabla 19) se puede decir que se observa una disminución significativa de los valores de viscosidad de pulpas, pero que aún se sigue presentando un limitado porcentaje de sólidos (10%) para que las pulpas con esta clase de arcillas tengan una buena fluidez, confirmando así la marcada influencia de las especies mineralógicas, especialmente la montmorillonita sódica, sobre el comportamiento al flujo del sistema.

La Figura 29 muestra el comportamiento de la viscosidad en función de la velocidad de agitación, desde 750 rpm para el caso de la agitación mecánica, hasta 22000 rpm en la ultra-agitación para 10 y 20 % p/p.

Tabla 19. Viscosidad de pulpas para el mineral Arcicol[®] en función del contenido de sólidos y de la velocidad de ultra-agitación en dispersión

SÓLIDOS % (p/p)	VELOCIDAD DE AGITACIÓN (rpm)	VISCOSIDAD (cp)
10	11000	3.66
	16000	3.77
	22000	3.56
20	11000	61.7
	16000	57.8
	22000	51.9

Figura 29. Viscosidad de pulpas del mineral Arcicol[®] en función de la velocidad de agitación en dispersión a diferentes porcentajes de sólidos



Como se puede apreciar en la Figura 29, la pulpa con 10% de sólidos presentó bajas viscosidades y un comportamiento aproximadamente constante a las diferentes velocidades de agitación. A pesar de que la pulpa de 20% sólidos mostró una marcada disminución en la viscosidad al ser sometida a ultra-agitación, las viscosidades obtenidas siguen estando muy por encima de las de la pulpa con 10% sólidos, haciéndola inmanejable para los procesos de beneficio.

De lo anterior, se pudo establecer que las condiciones más adecuadas para preparar la pulpa de mineral Arcicol[®] para los procesos de beneficio, son una concentración de los sólidos del 10% y una velocidad de agitación de 1250 rpm, ya que velocidades mayores implican elevados costos energéticos.

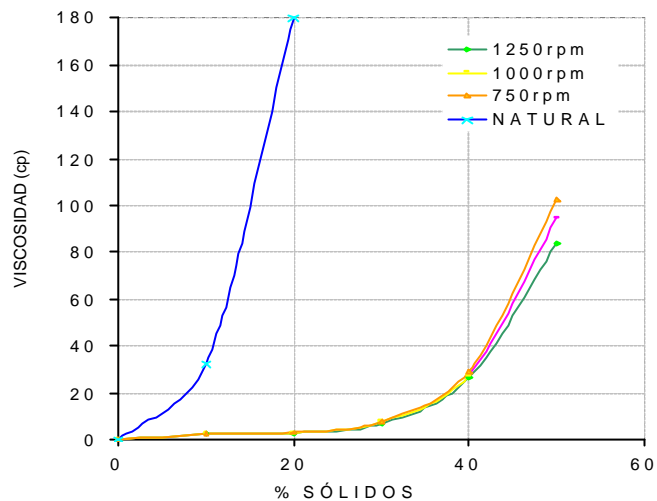
5.3.2 Mineral LR-2

Los resultados de las pruebas de viscosidad realizadas bajo las mejores condiciones de dispersión (0.5% Pirofosfato de Sodio, pH 10.18 y 15min de agitación), se encuentran consignados e ilustrados en la Tabla 20 y en la Figura 30, respectivamente.

Tabla 20. Viscosidad de pulpas para el mineral LR-2 en función del contenido de sólidos y de la velocidad de agitación mecánica en dispersión

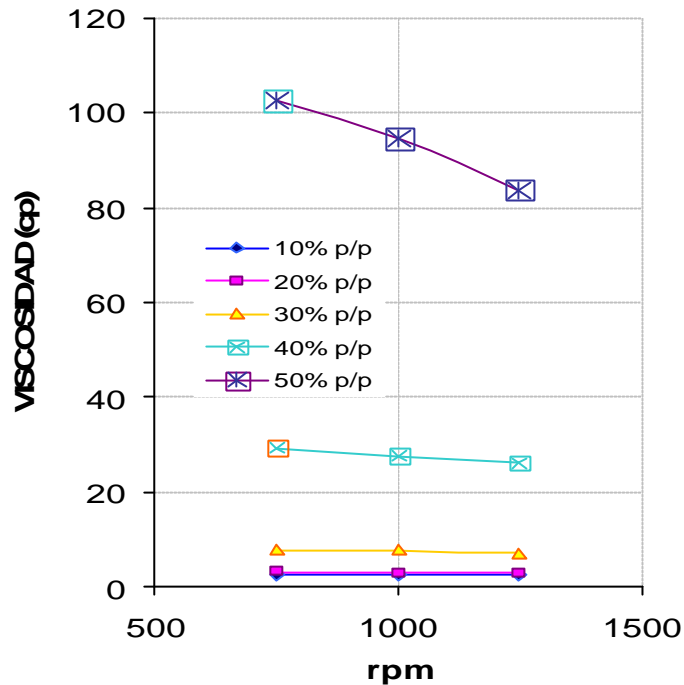
% SÓLIDOS (p/p)	VELOCIDAD DE AGITACIÓN (rpm)	VISCOSIDAD (cp)
10	750	2.35
	1000	2.38
	1250	2.35
20	750	3.13
	1000	2.88
	1250	2.81
30	750	7.61
	1000	7.64
	1250	6.90
40	750	29.3
	1000	27.6
	1250	26.3
50	750	102.4
	1000	94.4
	1250	83.7

Figura 30. Variación de la viscosidad de pulpas del mineral LR-2, en función del contenido de sólidos a diferentes velocidades de agitación mecánica en dispersión



Teniendo en cuenta las curvas ilustradas en la Figura 30, se encuentra que estas presentan un comportamiento similar a aquel característico del mineral Arcicol[®] bajo el mismo tipo de agitación. No obstante, en este caso se observa que la viscosidad se agudiza a un contenido de sólidos del 40%, contenido límite hasta el cual se aprecia una superposición de las curvas; por lo tanto, para éste mineral se establece un rango más amplio de trabajo, el cual se extiende hasta una concentración del 30% (en peso), situación que puede ser explicada tanto por el alto contenido de cuarzo (27.97%) como por la menor proporción de montmorillonita sódica (14.96%) presente en el mineral. Lo anterior se confirma con la Figura 31, que muestra el marcado aumento en la viscosidad de la pulpa cuando se trabaja con 40% p/p. Esta figura, ilustra la relación entre las revoluciones de agitación y la viscosidad a cada uno de los diferentes porcentajes de sólidos utilizados para el estudio reológico del mineral. Se puede ver cómo con aumentos en el porcentaje de sólidos, la viscosidad se incrementa significativamente después de un contenido de sólidos del 30%, haciendo más complicado el trabajo de las pulpas del mineral.

Figura 31. Viscosidad de pulpas del mineral LR-2, en función de las velocidades de agitación mecánica en dispersión a diferentes porcentajes de sólidos



De acuerdo con lo anterior, se pudo establecer que en el caso del mineral LR-2 las condiciones más convenientes para el acondicionamiento y manejo de la pulpa, son un porcentaje de sólidos del 30% (en peso) y una velocidad de agitación de 1250rpm. La velocidad se ajustó al mismo valor que para la muestra Arcicol[®], ya que presentó un comportamiento similar a ésta, al presentar adherencia a las paredes del recipiente utilizado, para velocidades de agitación menores.

5.4 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS MENAS A BENEFICIAR

5.4.1 Mineral Arcicol[®]

Los resultados del análisis granulométrico y microgranulométrico (en húmedo) para la arcilla en estado de recepción, pero ya disperso, se encuentran reportados en las tablas 21 y 22, respectivamente. Adicionalmente, en la Figura 32, se ilustra la distribución microgranulométrica obtenida.

Tabla 21. Distribución granulométrica del mineral Arcicol[®]

FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA (# TYLER)	DIÁMETRO PARTÍCULA (D_p) (μm)	ACUMULADO RETENIDO % (p/p)	ACUMULADO PASANTE % (p/p)
48	300	0.0	100
60	250	0.016	99.98
100	150	0.36	99.64
140	106	0.92	99.08
200	75	1.45	98.55
270	53	2.22	97.78
325	45	2.67	97.33

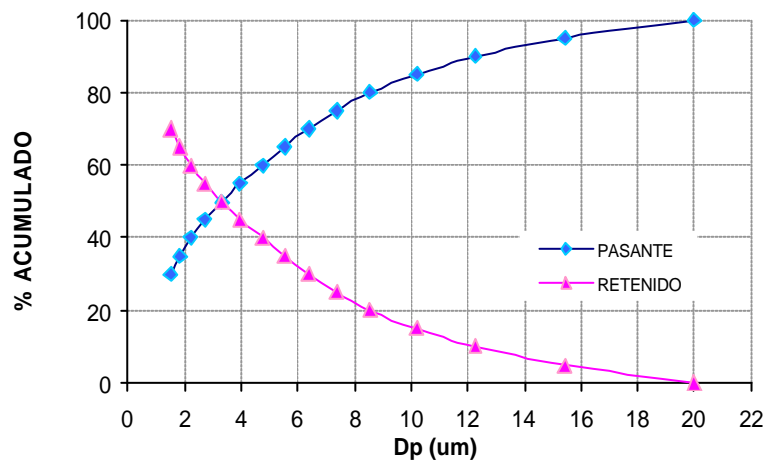
Con base en los datos presentados en la tabla anterior, se observa que el 97% de la muestra presenta en estado de recepción un tamaño de partícula inferior a 45μm, lo cual soporta los resultados de la caracterización mineralógica, en la que se establece que la mena está constituida por una cantidad considerable de minerales arcillosos (72.12%). Igualmente, se encuentra que sólo un 2.67% de la muestra contiene partículas con tamaños superiores a 45μm, con lo cual se puede inferir que la mayoría del cuarzo presente en el mineral, se encuentra en forma de partículas finas.

En el caso de la microgranulometría, de acuerdo con la Figura 32 se puede apreciar que el 50% de la muestra empleada para esta determinación presenta tamaños inferiores a 3.33μm, ratificando de esta manera lo expuesto con anterioridad en cuanto a que el mineral está compuesto principalmente por especies arcillosas.

Tabla 22. Distribución microgranulométrica del mineral Arcicol[®]

DIÁMETRO PARTÍCULA (D _p) (μm)	% ACUMULADO PASANTE	% ACUMULADO RETENIDO
20.00	100	0
15.41	95	5
12.28	90	10
10.20	85	15
8.55	80	20
7.37	75	25
6.38	70	30
5.53	65	35
4.77	60	40
3.97	55	45
3.33	50	50
2.72	45	55
2.23	40	60
1.85	35	65
1.51	30	70

Figura 32. Distribución microgranulométrica del mineral Arcicol[®]



5.4.2 Mineral LR-2

Los resultados obtenidos del análisis granulométrico y microgranulométrico para éste mineral sometido a los pretratamientos de molienda y atrición, se presentan a continuación.

5.4.2.1 Pretratamiento de Molienda. Los resultados de la evaluación granulométrica y microgranulométrica de la arcilla, se encuentran consignados en las tablas 23 y 24, respectivamente. De igual forma, en la Figura 33 se representa la curva de distribución microgranulométrica obtenida con este pretratamiento.

Tabla 23. Distribución granulométrica del mineral LR-2 preparado por molienda

FRACCIÓN GRANULOMETRICA (# TYLER)	DIÁMETRO PARTÍCULA (D _p) (µm)	ACUMULADO RETENIDO % (p/p)	ACUMULADO PASANTE % (p/p)
48	300	0.0	100
60	250	0.090	99.91
100	150	0.90	99.10
140	106	2.33	97.67
200	75	4.93	95.07
325	45	13.19	86.81

Teniendo en cuenta los datos presentados en la tabla anterior, se puede observar que cerca del 87% del mineral producto de esta etapa de molienda, se caracteriza por presentar un tamaño de partícula inferior a la malla #325 Tyler (45µm); por consiguiente, gran parte del cuarzo constituyente de la mena (27.97%) pasa a formar parte de la fracción fina de la misma, ya que tan solo un 13.19% representa el material grueso retenido en la malla #325 Tyler; en consecuencia, se puede decir que probablemente el proceso de molienda generó una reducción excesiva en el tamaño de las partículas de cuarzo.

Adicionalmente al análisis granulométrico, se efectuó el análisis químico de Al_2O_3 y SiO_2 para las fracciones granulométricas 100/140, 140/200, y 200/325, junto con la determinación del índice de azul de metileno MBI, y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24. Evaluación del MBI y de la relación $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ para las fracciones >325# Tyler del mineral LR-2 después de la molienda

FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA (# TYLER)	ACUMULADO RETENIDO % (p/p)	% Al_2O_3	% SiO_2	r^*	MBI ± 0.25 (meq/100g)
>140	2.33	4.97	78.98	0.0629	4.13
140/200	4.93	15.94	83.27	0.191	8.24
200/325	13.19	4.24	82.96	0.0511	3.95

Relación $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$

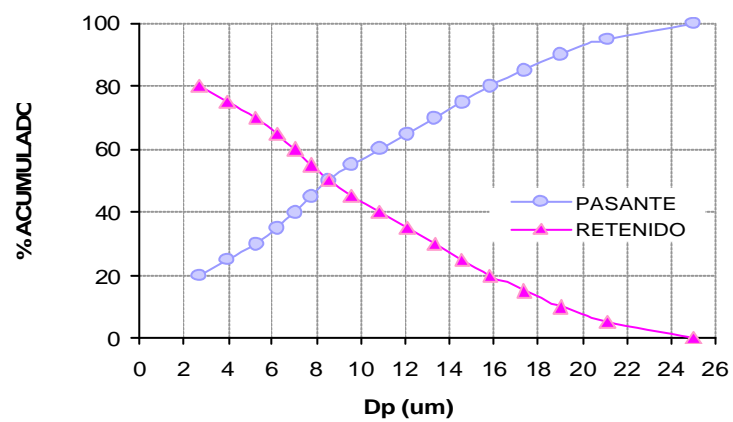
Con base en los bajos valores de r y MBI reportados en la tabla anterior, se confirma que el 13.19% del material retenido en estas mallas está constituido mayormente por cuarzo, pero que comparado este valor con el 27.97% de cuarzo en el mineral total, se confirma que un porcentaje bastante significativo queda en la fracción fina de -325# Tyler.

Para el caso de la microgranulometría, de acuerdo con la información presentada en la Tabla 25 e ilustrada en la Figura 33, se aprecia que el 50% de la muestra posee un tamaño de partícula inferior a $8.54\mu\text{m}$.

Tabla 25. Distribución microgranulométrica del mineral LR-2 preparado por molienda

DIÁMETRO PARTÍCULA (D_p) (μm)	ACUMULADO PASANTE % (p/p)	ACUMULADO RETENIDO % (p/p)
25.0	100	0
21.11	95	5
18.99	90	10
17.36	85	15
15.84	80	20
14.55	75	25
13.33	70	30
12.08	65	35
10.83	60	40
9.58	55	45
8.54	50	50
7.77	45	55
7.02	40	60
6.21	35	65
5.24	30	70
3.96	25	75
2.71	20	80

Figura 33. Curva de distribución microgranulométrica del mineral LR-2 preparado por molienda



5.4.2.2 Pretratamiento de Atrición. Estos resultados corresponden a la pruebas de atrición con la cual se obtuvieron los mejores resultados (% sólidos, velocidad de agitación, tiempos de atrición y dispersión).

Los datos obtenidos de distribución granulométrica y microgranulométrica del mineral sometido a este tipo de pretratamiento, se reportan en las tablas 26 y 27 respectivamente. Así mismo, en la Figura 34 se encuentra ilustrada la distribución microgranulométrica del mineral LR-2 preparado por el pretratamiento de atrición.

Tabla 26. Distribución granulométrica del mineral LR-2 preparado por atrición

FRACCIÓN GRANULOMÉTRICA (#TYLER)	DIÁMETRO PARTÍCULA (D _p)	ACUMULADO RETENIDO % (p/p)	ACUMULADO PASANTE % (p/p)
4	4.75mm	3.08	96.92
60	250µm	5.12	94.88
100	150µm	7.43	92.57
140	106µm	9.94	90.06
200	75µm	16.23	83.77
325	45µm	42.00	58.00

De acuerdo con los datos mostrados en la tabla anterior, se observa que el 58% del material producto de esta etapa de atrición, presenta un tamaño de partícula inferior a 45µm (#325 Tyler), demostrando con ello que el proceso de disgregación evita la reducción excesiva de tamaño y a la vez permite la eliminación de una mayor cantidad de material grueso.

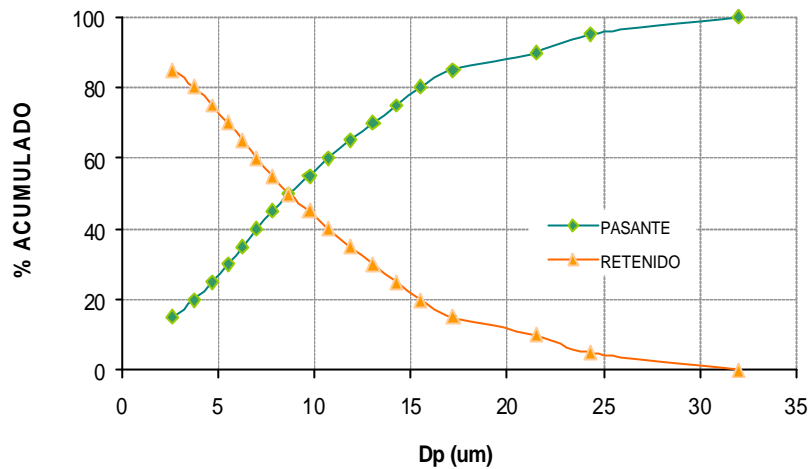
En el caso de la microgranulometría, teniendo en cuenta los resultados ilustrados en la Tabla 27 y en la Figura 34, se detalla que el 50% de la muestra empleada en esta determinación presenta un tamaño de partícula inferior a 8.66µm, valor

que es prácticamente igual a aquel obtenido con el pretratamiento anterior (8.54 μ m), lo cual podría sugerir que la etapa de atrición además de eliminar gran parte de la fracción gruesa del mineral, permite una adecuada liberación de las partículas de arcilla.

Tabla 27. Distribución microgranulométrica del mineral LR-2 preparado por atrición

DIÁMETRO PARTÍCULA (D_p) (μm)	ACUMULADO PASANTE % (p/p)	ACUMULADO RETENIDO % (p/p)
32.0	100	0
24.33	95	5
21.51	90	10
17.19	85	15
15.51	80	20
14.23	75	25
13.05	70	30
11.86	65	35
10.72	60	40
9.73	55	45
8.66	50	50
7.80	45	55
6.97	40	60
6.26	35	65
5.52	30	70
4.65	25	75
3.77	20	80
2.61	15	85

Figura 34. Curva de distribución microgranulométrica del mineral LR-2 preparado por atrición



5.5 VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA DE AZUL DE METILENO COMO MÉTODO PARA DETERMINAR LA CANTIDAD DE ESPECIES ARCILLOSAS

La técnica de azul de metileno fue usada para determinar el índice MBI de las arcillas estudiadas antes y después de los procesos de beneficio a los que fueron sometidas, fue comparada con los resultados de la relación r (Al_2O_3/SiO_2) en los diferentes productos arcillosos para validarla como una prueba relativamente rápida para inferir acerca de la evolución de dichos procesos.

La Figura 35 muestra una comparación entre los resultados del MBI comparados con el valor de Al_2O_3/SiO_2 (r) para diferentes porcentajes de acumulado retenido en la arcilla LR-2. Como puede observarse en la gráfica, los cambios de r en cada uno de los tamaños de partícula, son reflejados también por el índice MBI de una manera proporcional, lo cual indica que éste método es sensible para detectar los cambios en las cantidades de las especies arcillosas y cuarzo presentes en las muestras analizadas.

Por otra parte, para demostrar la sensibilidad de ésta técnica a cambios menos notorios en los contenidos de cuarzo y especies arcillosas, es decir a la relación Al_2O_3/SiO_2 (r), los datos del hidrociclón fueron útiles a la hora de comparar el

comportamiento de la capacidad de adsorción de la arcilla. Como se nota en la Figura 36, ambas curvas se comportan de manera similar a diferentes contenidos de sólidos en la pulpa de mineral LR-2, lo que quiere decir que el índice MBI determinado con la técnica de Azul de Metileno puede relacionarse con el parámetro r (Al_2O_3/SiO_2) obtenido de los resultados de análisis químico.

Figura 35. Influencia del acumulado retenido sobre el MBI y la relación Al_2O_3 / SiO_2 de cada malla

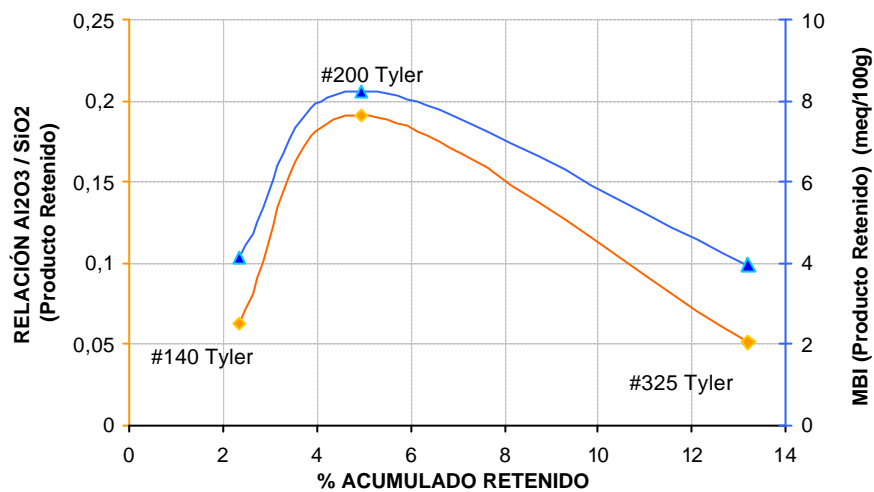
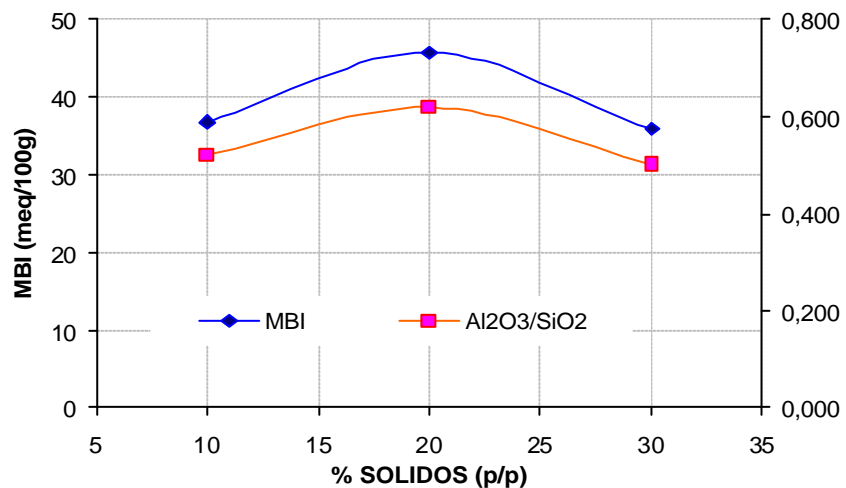


Figura 36. Comparación entre la relación Al_2O_3/SiO_2 (r) y MBI del producto del rebalse del hidrociclón para diferentes porcentajes de sólidos en la arcilla LR-2



De esta forma se pudo comprobar la efectividad de la técnica de azul de metileno en la evaluación de los diferentes productos obtenidos en cada proceso de beneficio.

5.6 PROCESOS DE BENEFICIO APLICADOS A LAS MENAS ESCOGIDAS

5.6.1 Desarenamiento por Separación por Malla en Húmedo

Los resultados de la evaluación de este primer proceso de desarenamiento tanto para el mineral Arcicol[®] como para el mineral LR-2, se muestran a continuación.

5.6.1.1 Mineral Arcicol[®]. Los datos de composición química y mineralógica de los productos de la etapa de separación por malla #325 Tyler, se encuentran consignados en las tablas 28 y 29 para el caso del producto pasante y, en las tablas 30 y 31, para el material retenido. Así mismo, en las figuras 37 y 38, se presentan los difractogramas obtenidos en el análisis mineralógico del material pasante y retenido, respectivamente.

Tabla 28. Composición química del producto pasante de la malla #325 Tyler para el mineral Arcicol[®]

MUESTRA	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Na ₂ O	%CaO	%TiO ₂	%K ₂ O	%MgO	%LoI	r ^{**}
Producto Pasante	23.93	50.60	9.18	1.51	0.018	N.D.*	1.58	2.59	8.46	0.472

* No Determinado

** Relación Alúmina/Sílice

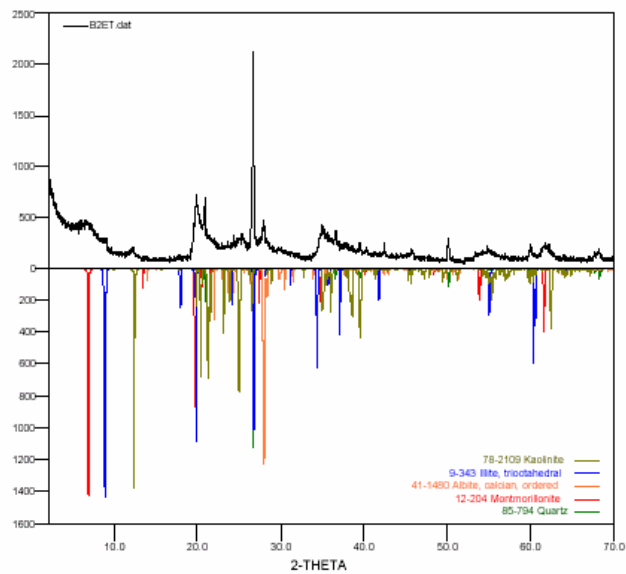
Considerando los datos presentados en la tabla anterior, se puede observar que el producto pasante de la malla #325 Tyler presenta en su composición un incremento tanto en el contenido de alúmina (Al₂O₃), como de SiO₂. Sin embargo, la relación Al₂O₃/SiO₂ pasa de 0.424 para la arcilla comercial, a 0.472 para el material pasante. Los resultados anteriores se reflejan en el aumento de la capacidad de adsorción del producto pasante, cuyo valor para el caso del índice MBI es de 53.42 ± 0.25 meq/100g y, para el CIC con Acetato de Amonio es de

55 meq/100g, los cuales equivalen a un incremento del 3.23% y del 14.58%, respectivamente. De igual forma, en esta tabla se aprecia una disminución en el contenido de K_2O , lo cual pone de manifiesto que probablemente una proporción considerable de un mineral, tal como la Illita, podría haber quedado en el producto retenido por la malla (+325# Tyler).

Tabla 29. Composición mineralógica del producto pasante por la malla 325 #Tyler para el mineral Arcicol[®]

MUESTRA	FASES CRISTALINAS					% AMORFOS
	% MONTMORILLONITA SÓDICA (M-Na)	% ILLITA (I)	% CAOLINITA (K)	% ALBITA (A)	% CUARZO (Q)	
Producto Pasante	28.38	25.89	21.19	4.93	7.95	11.66

Figura 37. Difractograma del producto pasante por la malla 325# Tyler para el mineral Arcicol[®]



Con base en los datos reportados en la Tabla 29, se puede ratificar lo expuesto anteriormente en cuanto a que el proceso de separación por malla #325 Ty produjo una retención de cierta cantidad de Illita (I) en el producto retenido, ya que la proporción de la misma dentro del material pasante se redujo aproximadamente

en un 38.78%. Así mismo, se observa un ligero incremento en el contenido de Montmorillonta Sódica (M-Na), así como una pequeña disminución en la cantidad de Cuarzo (Q), lo cual indica que en el producto pasante de la malla #325 Ty ha habido una pequeña concentración de la Montmorillonita, resultado confirmado por los valores de los parámetros r, MBI y CIC reportados. También, en esta tabla se puede apreciar un incremento significativo en el contenido de Caolinita (K) sugiriendo con ello que ésta especie arcillosa presenta tamaños de partícula muy inferiores a 45µm; en tanto que en el caso de la Albita (A), especie feldespática, ésta presenta una reducción considerable, lo cual puede ser indicio de que la misma se encuentra compuesta en su mayoría por tamaños de partícula superiores a la malla 325# Tyler (45µm).

Tabla 30. Composición química del producto retenido por la malla 325# Tyler para el mineral Arcicol[®]

MUESTRA	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Na ₂ O	%CaO	%TiO ₂	%K ₂ O	%MgO	%LoI	r**
Producto Retenido	11.99	66.85	10.0	0.068	0.019	N.D.*	2.03	0.012	9.86	0.179

* No Determinado

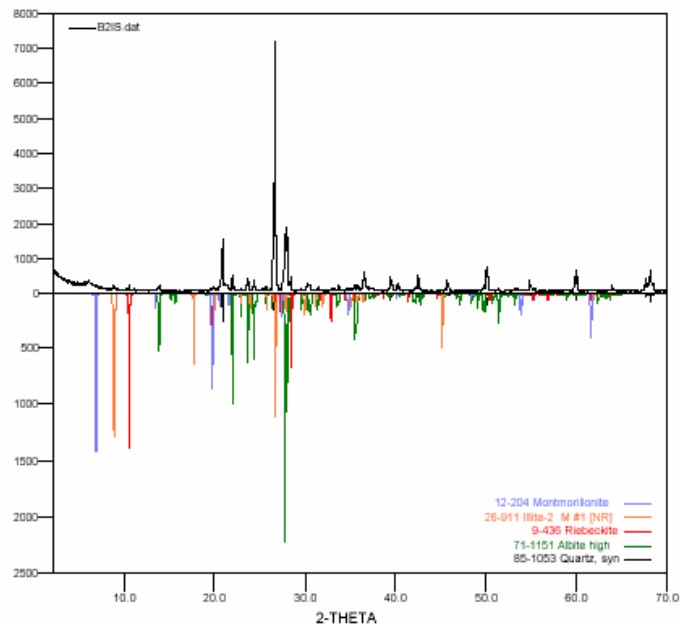
** Relación Alúmina/Sílice

Teniendo en cuenta los datos mostrados en la tabla anterior, se puede observar una notable reducción en el contenido de alúmina así como un incremento considerable en la proporción de sílice, lo que ratifica una vez más la importancia de la determinación de los parámetros indicativos de la presencia y concentración de especies arcillosas, los cuales presentan valores de 0.179 para el r, de 2±0.25 meq/100g y 10meq/100g, para el MBI y el CIC con Acetato de Amonio, respectivamente. Adicionalmente, se puede destacar la existencia en el material retenido de ciertas cantidades de Na₂O y especialmente de K₂O, las cuales probablemente se deban a la presencia en el producto retenido de Albita (A) e Illita (I), respectivamente.

Tabla 31. Composición mineralógica del producto retenido por la malla 325# Tyler para el mineral Arcicol[®]

MUESTRA	FASES CRISTALINAS					% AMORFOS
	% MONTMORILLONITA SÓDICA (M-Na)	% ILLITA (I)	% ALBITA (A)	% RIEBECKITA (R)	% CUARZO (Q)	
Producto Retenido	8.20	11.48	21.48	2.37	44.46	12.01

Figura 38. Difractograma del producto retenido por la malla 325# Tyler para el mineral Arcicol[®]



Con base en la información de la tabla anterior, se confirma la presencia de minerales arcillosos (Illita y Montmorillonita) en la fracción retenida, explicando así el contenido de alúmina encontrado mediante el análisis químico. Igualmente se corrobora lo expuesto en el análisis mineralógico del material pasante, en cuanto a que la caolinita contenida en el mineral Arcicol[®], presenta un tamaño de partícula muy inferior a los 45µm. Adicionalmente, se observa la existencia de fases cristalinas no arcillosas de Albita (A) y Riebeckita (R), las cuales explican los

contenidos de sodio encontrados mediante el análisis químico, así como la presencia de una gran cantidad de Cuarzo (Q) como principal mineral retenido.

5.6.1.2 Mineral LR-2

i. **Influencia del Pretratamiento de Molienda.** En la Tabla 32 se encuentran consignados los resultados del análisis químico realizado a la fracción pasante por la malla 325# Tyler del mineral molido.

Tabla 32. Composición química del producto pasante por la malla # 325 Tyler del mineral LR-2

MUESTRA	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Na ₂ O	%CaO	%K ₂ O	%MgO	%LoI
Producto Pasante	26.96	53.27	6.98	1.56	0.034	2.01	1.51	6.95

De acuerdo con los datos presentados en la tabla anterior, se puede observar que mediante la aplicación de esta etapa de desarenamiento se logra un incremento significativo en el contenido de alúmina, pasando de 13.85% para la arcilla natural a 26.96% para el producto pasante por la malla 325# Tyler, lo que equivale a un aumento de aproximadamente el 95%, siendo esto un buen indicativo de la concentración de las especies arcillosas de la mena. Tales resultados coinciden con el comportamiento presentado por el parámetro MBI, el cual pasa de 20.78 ± 0.25 meq/100g (arcilla natural) a 29.88 ± 0.25 meq/100g, correspondientes a un incremento cercano al 44%. Además, se puede destacar de los datos de esta tabla una disminución en los contenidos de Fe₂O₃ y de SiO₂.

Por otra parte, de acuerdo con el análisis realizado para la fracción retenida en la malla #325 Tyler (Tabla 24), se encontró que ésta presenta un contenido de Al₂O₃ de 4.24% y de SiO₂ de 82.96%, con lo que se obtiene una relación Al₂O₃/SiO₂ de 0.0511, la cual se relaciona muy bien con el bajo valor obtenido para el parámetro MBI de 3.95 ± 0.25 meq/100g.

i.i Influencia del Pretratamiento de Atrición. Los resultados del índice MBI del material pasante por la malla #325 Tyler obtenidos para la evaluación de este pretratamiento, a dos diferentes tiempos de disgregación (30 y 60min), se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33. Variación del índice MBI de la fracción pasante por la malla 325# Tyler con el tiempo de atrición del mineral LR-2

SOLIDOS % (p/p)	TIEMPO ATRICIÓN (min)	MBI (Fracción pasante #325 Tyler) (±0.25 meq/100g)
30	30	33.82
	60	34.78
50	15	33.84
	30	34.80

Teniendo en cuenta la tabla anterior, se puede observar que bajo las condiciones de disgregación/dispersión ensayadas (0.5% p/p de Pirofosfato de Sodio, pH 10.18 y 30% sólidos), un tiempo de atrición de 30min produce el valor MBI más conveniente para continuar la evaluación de esta etapa de pretratamiento. Es así como al estudiar el efecto de una mayor concentración de sólidos (50% p/p) bajo el tiempo de atrición seleccionado anteriormente, se mejora la concentración de especies arcillosas puesto que se alcanza un valor del índice MBI aceptable de 34.80 ± 0.25 meq/100g. Al evaluar un tiempo de atrición de 15min con un contenido de sólidos de 50%p/p, se logró un índice MBI semejante al obtenido con 30 minutos de atrición, situación por la cual se considera que este tiempo de 15 minutos es el más conveniente.

Comparando los resultados de la distribución granulométrica y de la capacidad de adsorción de la fracción del mineral pasante por la malla #325 Tyler, obtenidos tanto para la molienda como para la atrición, se puede decir que éste último pretratamiento, es el que otorga al mineral las mejores condiciones para la aplicación de los posteriores procesos de beneficio.

5.6.2 Desarenamiento por Sedimentación

Los resultados de la evaluación de este proceso, se presentan a continuación. Para el caso del mineral LR-2, se muestran los datos obtenidos para la evaluación complementaria de los pretratamientos de molienda y de atrición; mientras que para el mineral Arcicol[®], se presentan los resultados que permiten determinar la influencia tanto del tipo de agitación durante la dispersión como del pretratamiento de hidratación.

5.6.2.1 Mineral Arcicol[®]

i. **Influencia del Tipo de Agitación Durante la Dispersión.** Los resultados del MBI encontrados para el material suspendido en la evaluación del comportamiento a la sedimentación, bajo la influencia de diferentes tipos de agitación, se encuentran consignados e ilustrados en la Tabla 35 y en la Figura 39, respectivamente. No obstante, previamente en la Tabla 34, se presentan los valores de este parámetro obtenidos para la selección de la velocidad de ultra-agitación más adecuada para el proceso de sedimentación a un tiempo de 40 minutos.

Tabla 34. MBI del material suspendido obtenido bajo influencia de velocidades de ultra-agitación diferentes para el mineral Arcicol[®]

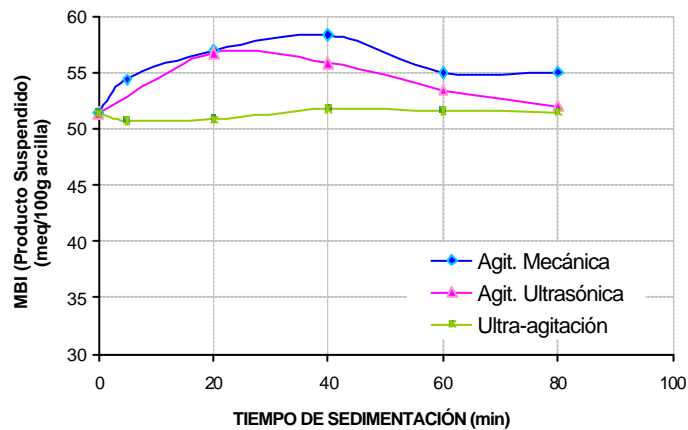
VELOCIDAD DE ULTRA-AGITACIÓN EN DISPERSION (rpm)	MBI _{Producto Suspendido} (± 0.25 meq/100g)
11000	52.29
16000	52.84
22000	53.91

Teniendo en cuenta los datos de la tabla anterior, se aprecia que el MBI del material suspendido presenta un comportamiento prácticamente constante bajo velocidades de ultra-agitación incrementadas desde 11000 a 22000 rpm.

Tabla 35. Variación del índice MBI del producto suspendido en función del tiempo de sedimentación bajo diferentes clases de agitación en la dispersión del mineral Arcicol®

CLASE DE AGITACIÓN EN DISPERSION	TIEMPO SEDIMENTACIÓN (min)	MBI Producto Suspendido (± 0.25 meq/100g)
Mecánica 1250 rpm	0	51.42
	5	54.39
	20	57.00
	40	58.32
	60	55.00
	80	55.01
Ultrasónica	0	51.42
	20	56.74
	40	55.86
	60	53.44
	80	52.00
Ultra-agitación 11000 rpm	0	51.42
	5	50.73
	20	50.85
	40	51.80
	60	51.61
	80	51.52

Figura 39. Variación del índice MBI del producto suspendido en función del tiempo de sedimentación bajo diferentes clases de agitación en la dispersión del mineral Arcicol®



Con base en la figura anterior, se puede observar que para el caso específico de la agitación mecánica, el MBI presenta un comportamiento en el cual a medida que transcurre el tiempo, este sufre un incremento hasta alcanzar un valor máximo de 58.32 ± 0.25 meq/100g (40min), lo que pone de manifiesto que en este punto se logra la máxima concentración de mineral arcilloso; posteriormente, se observa que el índice empieza a disminuir hasta alcanzar un valor constante a partir de un tiempo de sedimentación de 60min, comportamiento que podría ser atribuido a los fenómenos de hidratación e hinchamiento sufridos por la montmorillonita sódica, los cuales pueden llegar a producir con el tiempo un incremento en el tamaño y peso de las partículas de arcilla, generando de esta forma la sedimentación de las mismas.

En segundo lugar, en el caso del ultrasonido, se aprecia un comportamiento similar al anteriormente descrito, logrando un MBI máximo de 56.74 ± 0.25 meq/100g en un tiempo de 20min; sin embargo, en este ensayo a 80min todavía se presenta un decrecimiento del parámetro MBI. Por último, de acuerdo con los datos reportados en la Tabla 35 para el caso de la ultra-agitación, se puede observar que prácticamente el índice permanece constante a lo largo del tiempo, lo que puede ser atribuido al modo de funcionamiento del equipo dispersor, el cual hace que durante el proceso, los bordes agudos de las partículas choquen entre sí y, estas sean conminuidas también por los esfuerzos de corte acompañantes [25], generando de esta forma una reducción excesiva del tamaño de las partículas de cuarzo, lo cual prolonga la caída de las mismas a través del seno del fluido, situación que se refleja en los bajos valores de MBI alcanzados mediante este tipo de agitación. En consecuencia, se determina que el agitador mecánico convencional es el equipo más adecuado para el acondicionamiento de las pulpas alimento de procesos posteriores de beneficio aplicados al mineral Arcicol[®].

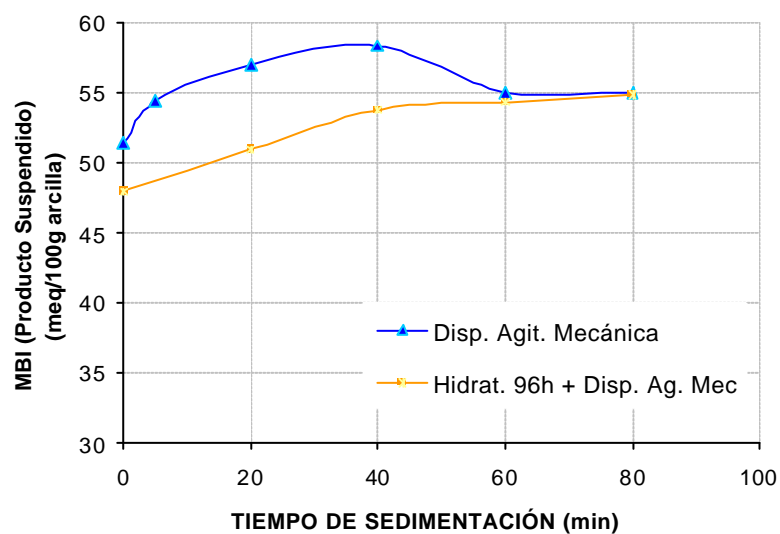
ii. **Influencia del Pretratamiento de Hidratación**. Adicionalmente, y con base en el resultado anterior, en la Tabla 36 y en la Figura 40, se muestran los resultados

del MBI obtenidos para la determinación de la influencia del pretratamiento de hidratación sobre el proceso de sedimentación, con previa agitación mecánica.

Tabla 36. Influencia del pretratamiento de hidratación y del tiempo de sedimentación sobre el índice MBI del producto suspendido del mineral disperso de Arcicol®

TIPO DE PRETRATAMIENTO	TIEMPO SEDIMENTACIÓN (min)	MBI _{Producto Suspendido} (± 0.25 meq/100g)
Dispersión con agitación mecánica a 1250rpm	0	51.42
	5	54.39
	20	57.00
	40	58.32
	60	55.00
	80	55.01
Hidratación (96h) + dispersión con agitación mecánica 1250rpm	0	47.95
	20	50.91
	40	53.75
	60	54.30
	80	54.82

Figura 40. Efecto del pretratamiento de hidratación y del tiempo de sedimentación sobre el índice MBI del producto suspendido del mineral disperso de Arcicol®



Teniendo en cuenta la figura anterior, se puede observar que el tratamiento de hidratación genera valores de azul de metileno inferiores a aquellos obtenidos en ausencia del mismo, los cuales presentan un comportamiento ascendente durante los primeros 40min del proceso. Además, se aprecia que a partir de un tiempo de 60min, se logra la estabilización del MBI y que las magnitudes del mismo son similares a las obtenidas en ausencia de hidratación, determinando así que tal comportamiento probablemente es fuertemente influenciado por otra propiedad de la montmorillonita sódica, como es el hinchamiento.

iii. Características del Producto Arcilloso Concentrado por Sedimentación.

Por consiguiente, comparando estos resultados se encuentra que el mayor índice MBI del producto suspendido o arcilla concentrada, es alcanzado mediante el sometimiento a dispersión de la pulpa a agitación mecánica de 1250 rpm y posterior sedimentación durante un periodo de tiempo de 40min. En las tablas 37 y 38 (Figura 41), se reportan los resultados de composición química y mineralógica encontrados para este caso.

Tabla 37. Composición química del producto suspendido obtenido bajo 40min de sedimentación del mineral Arcicol[®]

MUESTRA	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Na ₂ O	%CaO	%TiO ₂	%K ₂ O	%MgO	%Lol	r**	MBI***
Suspendido	25.37	48.11	10.54	1.62	0.016	N.D.*	1.76	2.34	8.28	0.527	58.32

* No Determinado

** Relación Alúmina/Sílice

*** Índice Azul de Metileno ($\pm 0.25\text{meq}/100\text{g}$)

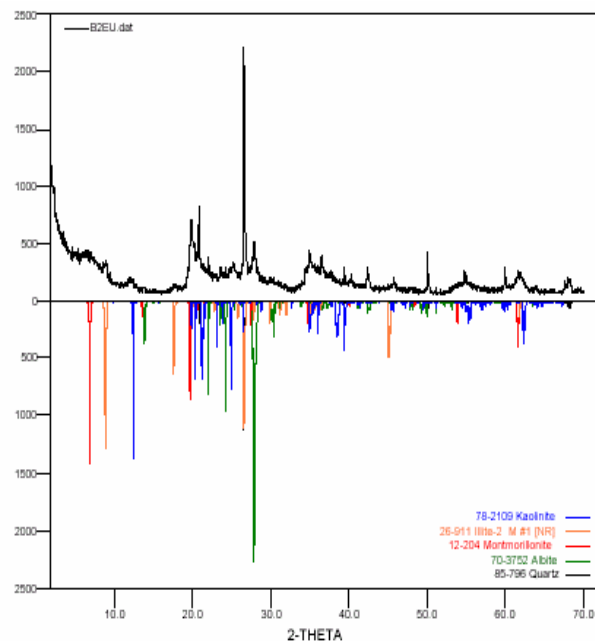
Considerando los resultados presentados en la tabla anterior, se observa que el material suspendido presenta un contenido de alúmina del 25.37%, lo cual se refleja en un valor del MBI que pasa de 51.42 a $58.32 \pm 0.25\text{meq}/100\text{g}$, equivalente a un aumento del 13.42%. De igual forma, se encuentra que en el caso de la CIC determinada por el método del Acetato de Amonio, esta pasa de 48 a $56\text{meq}/100\text{g}$, correspondientes a un incremento del 16.67%. Así mismo, a partir de la tabla se puede observar un pequeño aumento en el contenido de Na₂O, el

cual sugiere un ligero incremento en el contenido de montmorillonita. Además, se encuentra una reducción significativa en la cantidad de Lol y K₂O, que para el último caso sugiere que la muestra obtenida presenta un menor contenido de Illita.

Tabla 38. Composición mineralógica del producto suspendido obtenido después de 40min de sedimentación para el mineral Arcicol[®]

MUESTRA	FASES CRISTALINAS					% AMORFOS
	% MONTMORILLONITA SÓDICA (M-Na)	% ILLITA (I)	% CAOLINITA (K)	% ALBITA (A)	% CUARZO (Q)	
Producto Suspendido	26.62	25.73	17.06	3.58	7.14	19.87

Figura 41. Difractograma del producto obtenido después de 40min de sedimentación para el mineral Arcicol[®]



Teniendo en cuenta los datos presentados en la Tabla 38, así como los planteamientos hechos en el análisis químico, se corrobora lo expuesto en cuanto a que el producto suspendido, presenta mayores contenidos de minerales arcillosos, tales como montmorillonita sódica y caolinita. Además, a partir de la

tabla se puede observar una reducción considerable en el contenido de albita e illita, en donde este ultimo caso concuerda con la disminución de la cantidad de K_2O encontrada en la composición química del producto; lo anterior, puede ser atribuido tanto a las sustituciones isomórficas de las especies arcillosas como a la diferencia en densidades, que para el caso de la Illita corresponde a $2.65g/cm^3$ en comparación con la montmorillonita ($2.45g/cm^3$), lo cual ocasiona que gran proporción de Illita pase a formar parte del lecho de sedimento.

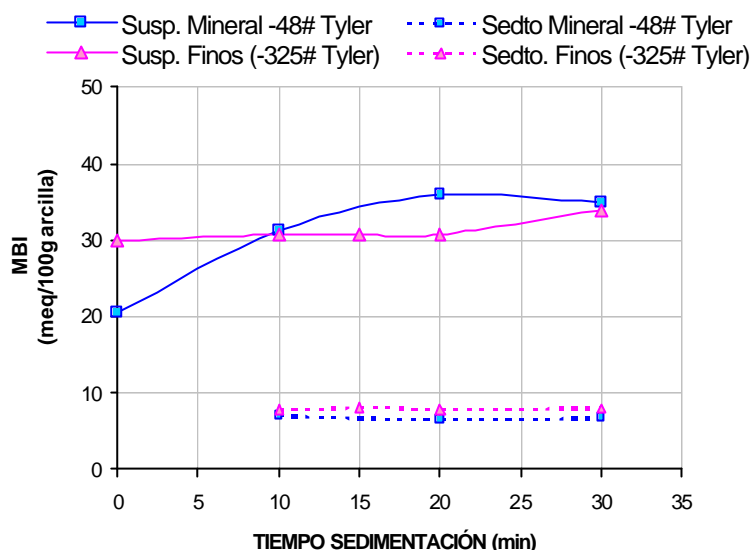
5.6.2.2 Mineral LR-2

i. **Influencia del Pretratamiento de Molienda.** Los resultados del índice de adsorción MBI de los productos (suspendido y sedimento) obtenidos por medio del proceso de sedimentación aplicada al mineral molido a -48# Tyler (fracción -300 μ m) y del proceso de sedimentación aplicada a la fracción de finos (325# Tyler) del mineral molido (fracción -45 μ m), se encuentran reportados en la Tabla 39 e ilustrados en la Figura 42.

Tabla 39. Influencia del tiempo de sedimentación sobre el índice de adsorción MBI de los productos suspendido y sedimento del mineral LR-2 previamente molido a -48# Tyler

MUESTRA	TIEMPO SEDIMENTACIÓN (min)	PRODUCTO SUSPENDIDO MBI (± 0.25 meq/100g)	SEDIMENTO MBI (± 0.25 meq/100g)
Mineral molido a -48# Tyler	10	31.16	6.95
	20	35.87	6.53
	30	34.85	6.69
Fracción de finos (325# Tyler) del mineral molido	10	30.65	7.73
	15	30.66	7.98
	20	30.71	7.84
	30	33.89	7.93

Figura 42. Efecto del tiempo de sedimentación sobre el índice de adsorción MBI de los productos suspendido y sedimentado del mineral LR-2 previamente molido a -48# Tyler



Teniendo en cuenta la figura anterior, se observa que para el caso de la sedimentación del mineral molido a -48# Tyler, y analizando específicamente el comportamiento presentado por el MBI del producto suspendido, se observa que bajo las condiciones ensayadas, a medida que se incrementa el tiempo de sedimentación, igualmente ocurre un aumento en el índice de adsorción MBI de la arcilla, hasta alcanzar un valor máximo de $35.87 \pm 0.25 \text{ meq/100g}$ a un tiempo de 20min, lo cual es atribuido a la disminución progresiva de la cantidad de cuarzo por acción de la fuerza de la gravedad, permitiendo de esta forma un aumento en la concentración de las especies arcillosas en el producto suspendido, situación que se corroboró con los análisis químicos, con los cuales se determinó una relación $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ de 0.568, que corresponde a un incremento del 139.66%. Así mismo, se aprecia que a tiempos superiores a 20min, el parámetro MBI empieza a disminuir, comportamiento que puede ser atribuido a la naturaleza hinchable de la montmorillonita sódica, como ya ha sido explicado con anterioridad. Por otra parte, en el caso del producto sedimentado se observa un comportamiento prácticamente constante del MBI con el transcurso del tiempo; sin embargo, se

aprecia que en un periodo de 20min, el valor del índice MBI es ligeramente menor, resultado que ratifica que en este punto se alcanza la mayor eliminación de cuarzo.

En segundo lugar, en el caso de la sedimentación de la fracción de finos (-325# Tyler) del mineral molido se aprecia que el parámetro MBI presenta un comportamiento más o menos constante hasta los 20 minutos de sedimentación y que sólo se alcanza un incremento a los 30min, obteniéndose un índice MBI de 33.89 y un r de 0.514, que equivale a un aumento del 116.88% en este último parámetro. De este modo, se corrobora que el tamaño de partícula afecta notoriamente este proceso de desarenamiento, ya que partículas de cuarzo con tamaños inferiores a 45µm, cuarzo coloidal, tardan más tiempo en sedimentar.

Con base en lo expuesto anteriormente, se encuentra que para la sedimentación con material grueso (-48# Tyler), a un tiempo de 20min se logra un MBI de $35.87 \pm 0.25\text{meq}/100\text{g}$, mientras que para la sedimentación de material fino (-325# Ty), se alcanza un índice de $33.89 \pm 0.25\text{meq}/100\text{g}$ en un tiempo de 30min, resultados que demuestran la marcada influencia ejercida por el tamaño de partícula sobre el proceso sedimentación. Es así como se determina que para la aplicación del proceso de sedimentación, la etapa previa de clasificación por malla 325# Tyler no es recomendable. Teniendo en cuenta lo anterior, se determinó la CIC (Método Acetato de Amonio) del producto suspendido de la sedimentación del mineral molido a -48# Tyler, el cual arrojó un valor de $32\text{meq}/100\text{g}$, que corresponde a un incremento de tan solo un 10.34% con respecto a la arcilla natural.

En las tablas 40 y 41 se presentan los resultados de la caracterización química y mineralógica (Figura 43) del producto suspendido obtenido en el proceso de sedimentación del mineral molido a -48# Tyler.

Tabla 40. Composición química del producto suspendido obtenido por sedimentación del mineral LR-2 molido a -48# Ty

MUESTRA	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Na ₂ O	%CaO	%K ₂ O	%MgO	%LoI	r*
Producto Suspendido	27.31	48.06	8.80	1.16	0.019	3.12	2.39	6.80	0.568

*Relación Alúmina/Sílice

Teniendo en cuenta los resultados presentados en la tabla anterior, se aprecia un incremento significativo en la cantidad de Al₂O₃, la cual pasa de 13.85% (arcilla natural) a 27.31%, lo que corresponde a un aumento del 97.18%. Así mismo, se observan disminuciones en los contenidos de SiO₂ y Na₂O, en donde este último sugiere la pérdida de montmorillonita durante el proceso. De igual forma, la tabla muestra un incremento en la cantidad de K₂O, el cual podría ser atribuido a la concentración de la especie Illítica del mineral.

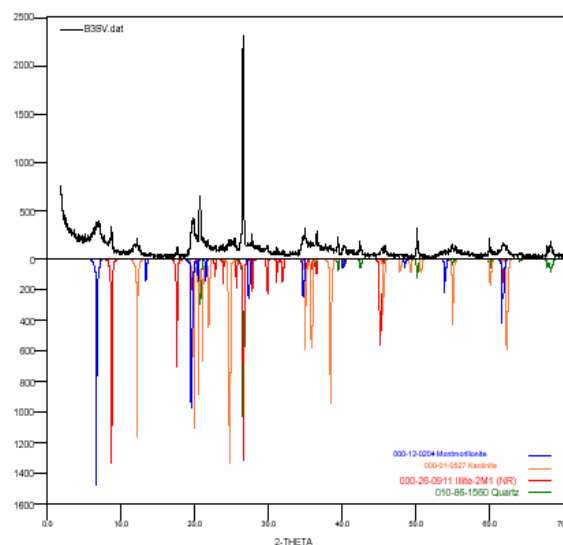
Tabla 41. Composición mineralógica del producto suspendido obtenido por sedimentación del mineral LR-2 molido a -48# Tyler

MUESTRA	FASES CRISTALINAS				% AMORFOS
	% MONTMORILLONITA SÓDICA (M-Na)	% ILLITA (I)	% CAOLINITA (K)	% CUARZO (Q)	
Producto Suspendido	2.19	45.17	10.11	10.81	31.72

Del análisis de los resultados presentados en la tabla anterior, se aprecia una disminución considerable en la cantidad de Montmorillonita Sódica (M-Na), lo cual coincide con el decrecimiento del contenido de Na₂O encontrado en el análisis químico, y cuya disminución podría ser la consecuencia de fenómenos de hidratación e hinchamiento sufridos por las partículas de montmorillonita, los cuales hacen que con el transcurso del tiempo, dichas partículas adquieran mayor tamaño y peso, y en consecuencia, caigan al sedimento. Contrariamente, se observa un aumento en la proporción de Illita, la cual pasa de 36.11 (arcilla

natural) a 45.17%, lo que guarda concordancia tanto con el aumento de K_2O encontrado mediante el análisis químico como con la naturaleza no-hinchable de esta especie arcillosa. Así mismo, se ratifica la disminución de cuarzo y, se destaca el incremento en la amorficidad de la muestra, la cual pudo de alguna manera afectar la proporción de minerales arcillosos cuantificados.

Figura 43. Difractograma del producto suspendido obtenido por sedimentación del mineral LR-2 molido a -48# Tyler



ii. **Influencia del Pretratamiento de Atrición.** Los productos obtenidos mediante el proceso de sedimentación directa de la fracción $-250\mu\text{m}$ (-60# Ty), arrojaron valores MBI de 34.88 y $6.24 \pm 0.25\text{meq}/100\text{g}$, para el caso del material suspendido y del sedimento, respectivamente. De acuerdo con esto, se observa que el producto concentrado presenta un incremento en su índice de adsorción MBI del 67.85% con respecto a la arcilla natural. Sin embargo, también se encuentra que dicha propiedad evaluada por medio del método del Acetato de Amonio (CIC) presenta un valor de $31\text{meq}/100\text{g}$, el cual equivale tan solo a un aumento de 6.9% con respecto a la muestra natural.

Tabla 42. Composición química del producto concentrado obtenido mediante sedimentación del mineral LR-2 disgregado y tamizado a $-250\mu\text{m}$ (-60# Ty)

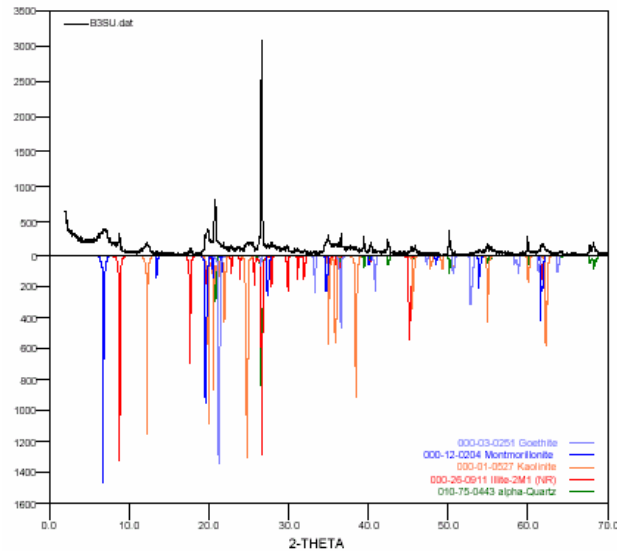
MUESTRA	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Na ₂ O	%CaO	%K ₂ O	%MgO	%LoI
Producto Concentrado	27.03	52.67	8.05	1.08	0.012	3.21	2.41	6.05

Con base en los datos reportados en la tabla anterior, se puede inferir que el proceso aplicado al mineral produce un incremento significativo en el contenido de minerales arcillosos, el cual se ve reflejado principalmente en la cantidad de alúmina presente en el suspendido, que pasa de 13.85 a 27.03%, correspondiente a un aumento del 95.16%, que comparado con el obtenido en el pretratamiento de molienda (97.18%), es ligeramente inferior tal y como se corrobora con el valor MBI encontrado para cada uno de ellos. Además, a partir de la tabla se observa una reducción en el contenido de Na₂O y SiO₂, sugiriendo con ello una disminución de la especie montmorillonítica y del cuarzo en el material concentrado; de la misma forma, se aprecia un aumento en la cantidad de K₂O, el cual indica que posiblemente se ha concentrado la Illita del mineral.

Tabla 43. Composición mineralógica del producto suspendido obtenido por sedimentación del mineral LR-2 disgregado y tamizado a $-250\mu\text{m}$ (-60# Ty)

MUESTRA	FASES CRISTALINAS					% AMORFOS
	% MONTMORILLONITA SÓDICA (M-Na)	% ILLITA (I)	% CAOLINITA (K)	% GOETITA (G)	% CUARZO (Q)	
Producto Suspendido	3.06	46.76	9.54	2.19	10.47	27.98

Figura 44. Difractograma del concentrado obtenido por sedimentación del mineral LR-2 disgregado y tamizado a $-250\mu\text{m}$ (-60# Ty)



De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 43, se puede observar una disminución en la proporción de las fases cristalinas caolinita, montmorillonita y cuarzo, que para el caso de las dos últimas especies es muy considerable, corroborando de esta forma los resultados obtenidos mediante el análisis químico del concentrado. Además, se aprecia un aumento significativo en la cantidad de illita contenida en la muestra y de igual manera, se destaca la presencia de mineral de hierro en la forma cristalina de goethita.

Finalmente, se puede establecer con base en estos resultados que al igual que en el caso de la separación por malla, la etapa de atrición es la más conveniente en la preparación de pulpas para el desarrollo de los posteriores procesos de beneficio.

5.6.3 Desarenamiento por Hidrociclón

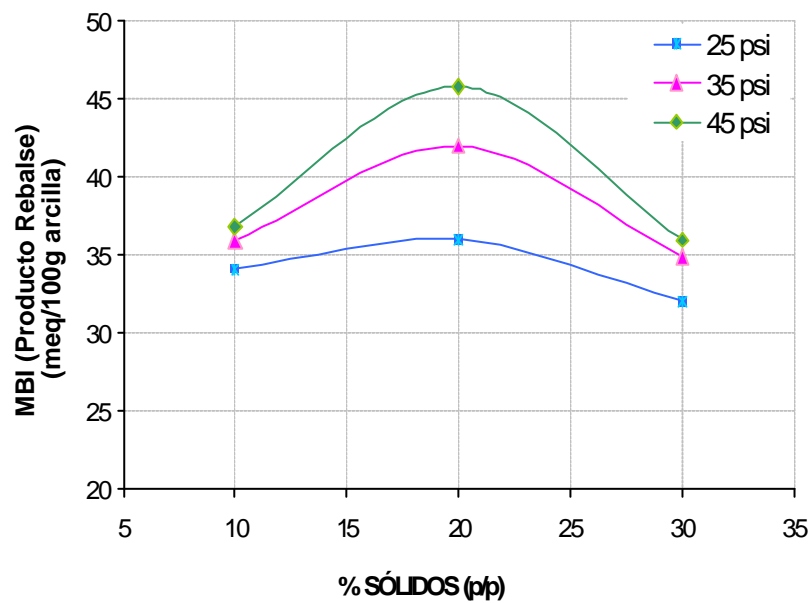
Los resultados MBI del producto concentrado (rebalse) obtenidos al someter la fracción $-250\mu\text{m}$ (-60# Ty) de la mena LR-2 al proceso de separación por

hidrociclón, se encuentran reportados e ilustrados en la Tabla 44 y en la Figura 45, respectivamente.

Tabla 44. Influencia del contenido de sólidos y la presión de trabajo sobre el MBI del rebalse para el mineral LR-2

PRESIÓN DE TRABAJO (psi)	% SÓLIDOS (p/p)	MBI _{Producto Rebalse} (± 0.25 meq/100g)
25	10	34,05
	20	35,95
	30	31,99
35	10	35,88
	20	41,95
	30	34,88
45	10	36,79
	20	45,75
	30	35,93

Figura 45. Efecto del contenido de sólidos y la presión de trabajo sobre el MBI del rebalse en el mineral LR-2



Con base en las curvas ilustradas en la figura anterior, se puede apreciar que en general, el MBI del rebalse presenta un comportamiento en el cual a medida que se incrementa el porcentaje de sólidos de la alimentación, igualmente ocurre un aumento en el índice de adsorción MBI del producto concentrado, hasta lograr una concentración límite (20% de sólidos) después de la cual, dicho parámetro empieza a disminuir. Este comportamiento, puede ser atribuido a que una mayor presencia de partículas minerales en la pulpa, generan obstrucción de la acción separadora de las fuerzas que actúan sobre las mismas.

Por consiguiente, teniendo en cuenta los datos reportados en la Tabla 44, se observa que bajo la concentración límite obtenida (20% p/p) y a presiones de trabajo incrementadas, se logran valores MBI cada vez mayores. Es así como a una presión de 45psi, se alcanza el mayor valor en el índice de adsorción del producto del rebalse, el cual pasa de 20.78 ± 0.25 meq/100g para la arcilla natural a 45.75 ± 0.25 meq/100g para el mineral concentrado, cuyo incremento en dicha propiedad equivale al 120.16%, a partir del cual se puede inferir que bajo estas condiciones, el proceso genera una alta concentración de minerales arcillosos. De igual forma, bajo esta condición se encuentra que la CIC produce un valor de 34meq/100g, el cual equivale a un incremento del 17.24% en esta propiedad.

5.6.3.1 Características del Producto Arcilloso Concentrado por Hidrociclón

En las tablas 45 y 46 (Figura 46) se registran los datos de la caracterización química y mineralógica practicada al producto del rebalse obtenido bajo las condiciones anteriormente indicadas (20% sólidos a una presión de 45psi).

Tabla 45. Composición química de la fracción fina del mineral LR-2 obtenida en la separación por hidrociclón (20% p/p y 45psi)

MUESTRA	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Na ₂ O	%CaO	%K ₂ O	%MgO	%LoI	r*
Producto Rebalse	27.81	44.87	9.91	1.58	0.019	3.24	3.09	6.27	0.619

*Relación Alúmina/Sílice

De acuerdo con los datos presentados en la tabla anterior, se detalla que en este caso el producto concentrado (rebalse), manifiesta un gran incremento en el contenido de Al_2O_3 con respecto al presentado por la arcilla natural, el cual pasa de 13.85 a 27.81%; así mismo, se observa una reducción en la cantidad de cuarzo, lo que pone de manifiesto que la fracción fina presenta un cambio considerable en el parámetro r , pasando de 0.237 a 0.619, lo que corresponde a un aumento del 161.18%, el cual guarda concordancia con el cambio sufrido por el MBI del mineral. Adicionalmente, se encuentra un ligero incremento tanto en el contenido de Fe_2O_3 como en el de K_2O , lo que podría sugerir en el primer caso que el mineral de hierro contenido en la mena, se caracteriza por presentar un tamaño de partícula muy fino que dificulta su remoción por medios mecánicos, mientras que en el segundo, la posible concentración de la Illita presente en la mena. Finalmente, se aprecia una ligera disminución en el contenido de Na_2O , lo que plantea la posibilidad de que por medio de este proceso, parte de la esmectita se pierde en las colas.

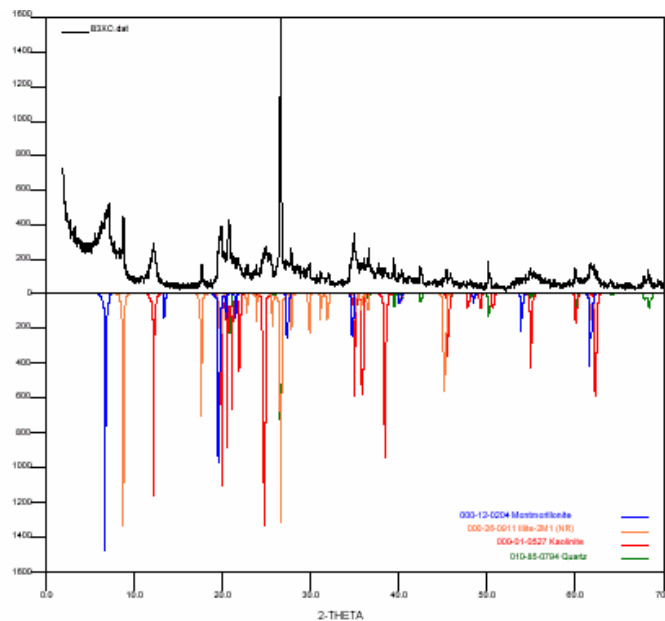
Tabla 46. Composición mineralógica del rebalse del mineral LR-2 obtenido en la separación por hidrociclón (20% p/p y 45psi)

MUESTRA	FASES CRISTALINAS				% AMORFOS
	% MONTMORILLONITA SÓDICA (M-Na)	% ILLITA (I)	% CAOLINITA (K)	% CUARZO (Q)	
Producto Rebalse	12.43	40.64	13.45	5.73	27.75

Con base en los datos consignados en la tabla anterior, se observa que con respecto a la arcilla natural, el producto concentrado presenta una clara disminución en las proporciones de Montmorillonita (M-Na) y Cuarzo (Q), ratificando así lo encontrado mediante el análisis químico, en cuanto a los cambios sufridos en los contenidos de Na_2O y SiO_2 , respectivamente. Así mismo, se aprecia una clara concentración de Caolinita (K) e Illita (I), a pesar del alto grado

de amorficidad presentado por la muestra, soportando así los altos valores de índice MBI encontrados en la misma.

Figura 46. Composición mineralógica del rebalse producto de la separación por hidrociclón (LR-2, 20% p/p y 45psi)



Por otra parte, en forma complementaria se presentan los resultados de los análisis adicionales practicados al producto concentrado, que consistieron en la medición del SSA y en la determinación del porcentaje de recuperación, los cuales presentaron valores de $21.02 \pm 10 \text{ m}^2/\text{g}$ y 63.8%, respectivamente.

5.6.3.2 Características de las Colas o Descarga del Hidrociclón. El producto de la descarga del hidrociclón presenta valores de $4.08 \pm 0.25 \text{ meq}/100\text{g}$ y $16 \text{ meq}/100\text{g}$, en el caso del índice MBI y del la CIC por el método Acetato de Amonio, respectivamente; resultados que permiten inferir que dicho producto se encuentra compuesto en su mayoría por mineral de cuarzo.

Por otra parte, los resultados de la caracterización química y mineralógica efectuada al producto de la descarga se reportan en las tablas 47 y 48 (Figura 47), respectivamente.

Tabla 47. Composición química de las colas obtenidas en la separación por hidrociclón para el mineral LR-2 (20% p/p y 45psi)

MUESTRA	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Na ₂ O	%CaO	%K ₂ O	%MgO	%LoI	r*
Producto Descarga	12.81	76.18	4.35	0.015	0.009	2.05	1.05	4.52	0.168

* Relación Alúmina/Sílice

De acuerdo con los datos presentados en la tabla anterior, se puede destacar la cantidad de Al₂O₃ contenida en la descarga, ya que a pesar de ser inferior a la presentada por la arcilla natural, su valor siempre es significativo considerando que se trata de las colas obtenidas en el proceso, resultado que indica la presencia de minerales arcillosos en este producto. Además, se aprecia una reducción en el contenido de Fe₂O₃. De igual forma, se observan cantidades apreciables de K₂O y SiO₂, lo que sugiere la presencia tanto de Illita como de cuarzo en la descarga del hidrociclón.

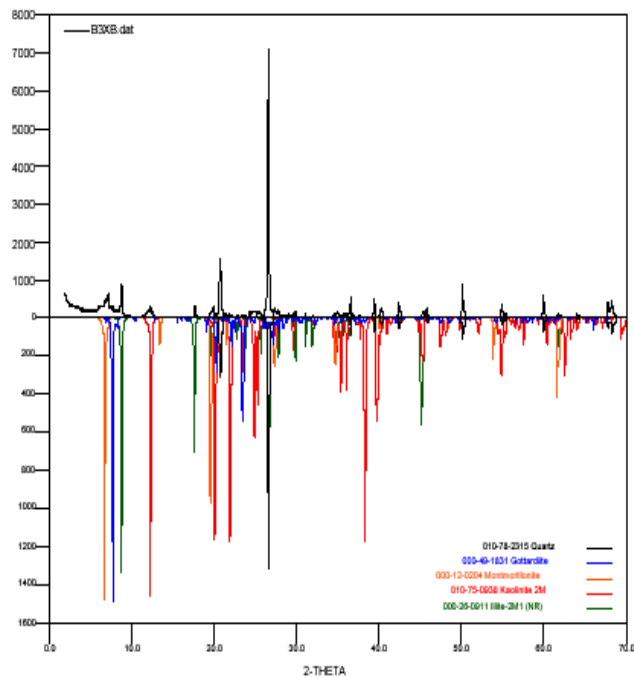
Teniendo en cuenta los datos anteriores, se encuentra que el parámetro r pasa de 0.237 (arcilla natural) a 0.168, lo que representa un decrecimiento del 29.11%, lo cual concuerda con los resultados del índice de adsorción MBI encontrados.

Tabla 48. Composición mineralógica del producto de la descarga del hidrociclón para el mineral LR-2 (20% p/p y 45psi)

MUESTRA	FASES CRISTALINAS					% AMORFOS
	% MONTMORILLONTA SÓDICA (M-Na)	% ILLITA (I)	% CAOLINITA (K)	% GOTTARDIITA (GT)	% CUARZO (Q)	
Producto Descarga	0.70	12.14	5.81	N.D.*	51.07	30.28

* No Detectable

Figura 47. Difractograma del producto de la descarga del hidrociclón (LR-2, 20% p/p y 45psi)



Considerando los datos presentados en la tabla anterior, se puede observar que las colas se encuentran constituidas por una cantidad apreciable de minerales arcillosos (18.65%), indicando con ello el arrastre de finos en la corriente de descarga. Así mismo, se destaca la presencia de gran cantidad de cuarzo (51.07%), y se observa que mediante el análisis cualitativo por DRX se detecta la existencia de gottardiita, una zeolita natural, que debido a la menor intensidad de las bandas no pudo ser cuantificada.

5.6.4 Desarenamiento por Flotación Espumante

Los resultados encontrados para la determinación de la influencia de la concentración de Didecilamina sobre la capacidad de adsorción de los productos de flotación del mineral LR-2, se encuentran consignados en la Tabla 49.

Tabla 49. Influencia de la dosificación de colector sobre el MBI de los productos de flotación del mineral LR-2

DOSIFICACIÓN COLECTOR (g/ton)	MBI_{Producto no Flotado} (±0.25 meq/100g)	MBI_{Producto Flotado} (±0.25 meq/100g)
133.33	26.48	12.60
400	30.98	10.05

Teniendo en cuenta los datos presentados en la tabla anterior, se puede observar que a una mayor dosificación de colector se logra un mayor MBI del producto no flotado (fracción fina). Sin embargo, se encuentra que en comparación con los otros procesos de desarenamiento aplicados al mineral, estos resultados son inferiores. Adicionalmente, a partir de la tabla se puede inferir que el producto flotado además de contener ganga silíceas, se compone también de minerales arcillosos debido a los altos valores de índice de adsorción MBI encontrados para dicho producto.

5.6.5 Mejor Proceso de Desarenamiento de la Mena LR-2

Finalmente, al comparar los resultados encontrados en cada uno de los procesos de desarenamiento practicados al mineral LR-2, se encuentra que la etapa de separación por hidrociclón es la que produce una mayor concentración de minerales arcillosos y por consiguiente, aquella que genera los mayores valores de índice de adsorción MBI en el mismo.

5.6.6 Remoción de Hierro por Separación Magnética

Los resultados de este proceso de remoción de hierro para la mena LR-2, reportan un contenido de Fe_2O_3 en la fracción no magnética de 7.23%, valor que es similar al encontrado para la fracción $-250\mu m$ ($-60\#$ Ty) producto de la etapa de separación por malla, el cual fue de 7.26%; por consiguiente, se encuentra que este tipo de mineral, bajo las condiciones ensayadas, no presenta una disminución en el contenido de hierro, lo cual sugiere que probablemente éste no se encuentra

en el mismo en forma de partículas discretas magnéticas, sino que posiblemente se encuentra como óxidos amorfos no magnéticos o lo mas probable como ya se ha dicho anteriormente, éste se encuentre en la estructura cristalina de las especies arcillosas.

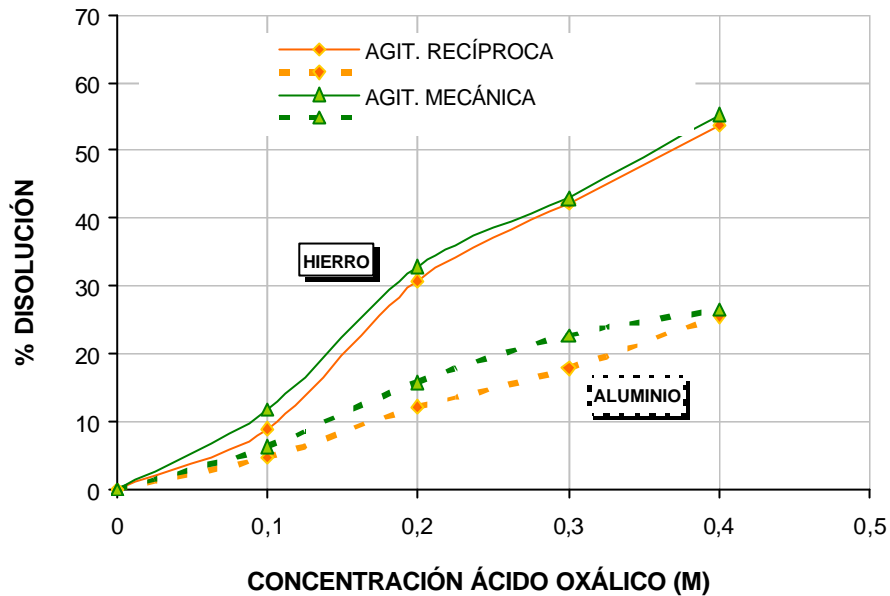
5.6.7 Remoción de Hierro por Lixiviación Ácida para el Mineral Arcicol®

5.6.7.1 Selección del Tipo de Agitación y de la Concentración del Agente Lixivante. Los resultados obtenidos para la determinación tanto del tipo de agitación como de la concentración de ácido oxálico más apropiado para remover el hierro del mineral arcilloso mediante lixiviación, se encuentran registrados en la Tabla 50. Así mismo, en la Figura 48 se ilustra el efecto de estos dos parámetros sobre la disolución del hierro y el aluminio presentes en la arcilla.

Tabla 50. Influencia del tipo de agitación y de la concentración de ácido oxálico sobre la disolución del hierro y el aluminio mediante lixiviación ácida del mineral Arcicol®
(12h, 80°C, 10% p/p, pH 1.5 ± 0.5)

TIPO DE AGITACIÓN	CONCENTRACIÓN ÁCIDO OXÁLICO (M)	% DISOLUCIÓN HIERRO	% DISOLUCIÓN ALUMINIO
Recíproca	0.1	8.90	4.76
	0.2	30.72	12.17
	0.3	42.34	17.85
	0.4	53.80	25.55
Mecánica	0.1	11.76	6.35
	0.2	32.86	15.87
	0.3	42.95	22.75
	0.4	55.20	26.50

Figura 48. Efecto de la concentración de ácido oxálico sobre la lixiviación de hierro y aluminio del producto beneficiado del mineral Arcicol[®], bajo la acción de dos diferentes tipos de agitación



De acuerdo con la Figura 48, se observa que bajo las condiciones ensayadas e independientemente del tipo de agitación empleada en el proceso, a medida que aumenta la concentración del agente lixiviante en el sistema, la cantidad de hierro removido se incrementa en una forma significativa. Por otra parte, el análisis de los lixiviados indica la presencia de aluminio, en cuyo caso la disolución ocurre en una menor proporción, tal como se ilustra en la Figura 48. Es así como la existencia de este metal en el licor, puede ser atribuida a la disolución ácida sufrida por algunas especies arcillosas, conclusión a la que llegaron investigadores brasileiros, en la que afirman que el tratamiento ácido de la esmectita hace que los bordes de sus cristales se abran, exponiendo a los cationes de la lámina octaédrica (tales como Al^{+3} y Mg^{+2}) al ataque, ocasionando de esta manera la disolución de los mismos [27].

Al analizar la influencia del tipo de agitación, se observa un efecto ligeramente mayor sobre la lixiviación del hierro (a todas las concentraciones de ácido

ensayadas) cuando la suspensión de arcilla es agitada mecánicamente, alcanzándose un valor máximo de remoción equivalente al 55.2%. Teniendo en cuenta que en este caso el efecto de la condición de agitación no es tan significativo, se seleccionó la agitación recíproca para la evaluación de los parámetros de lixiviación restantes, ya que por cuestiones prácticas, el shaker era el medio más indicado. Para el trabajo del laboratorio se escogió una concentración de 0.3M de ácido oxálico por las siguientes razones:

- a. Independientemente del medio de agitación ensayado (shaker o agitador mecánico), bajo esta dosificación se logran valores de disolución de hierro similares: 42.34% para el primero y, 42.95% para el segundo.

- b. El empleo de mayores concentraciones, puede presentar altos consumos de agente lixivante y por ende altos costos de operación, lo cual conlleva a una baja viabilidad económica a escala industrial.

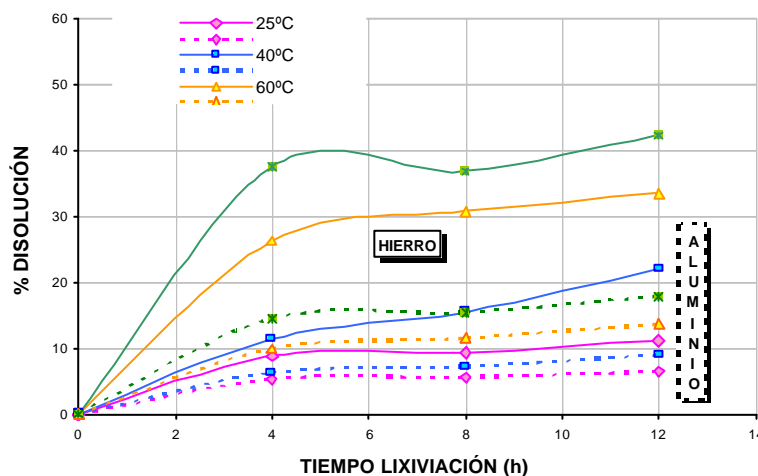
De acuerdo a estos resultados se plantea la posibilidad de que el control de la reacción sea de tipo químico.

5.6.7.2 Selección de la Temperatura de Lixiviación y del Tiempo de Residencia del Mineral en el Sistema. En la Tabla 51 se presentan los resultados de disolución de hierro y aluminio encontrados para la evaluación de la temperatura y el tiempo de lixiviación del mineral Arcicol[®]. De igual forma, en la Figura 49 se ilustra el efecto de dichas variables sobre la disolución de estos dos metales.

Tabla 51. Influencia del tiempo de lixiviación del producto beneficiado del mineral Arcicol[®] sobre la disolución de hierro y aluminio a diferentes temperaturas (0.3M ácido oxálico, 10% p/p, pH 1.5 ± 0.5, agitación recíproca)

TEMPERATURA (°C)	TIEMPO LIXIVIACIÓN (h)	% DISOLUCIÓN HIERRO	% DISOLUCIÓN ALUMINIO
25	4	8.84	5.33
	8	9.42	5.56
	12	11.19	6.48
40	4	11.45	6.25
	8	15.49	7.17
	12	22.01	9.01
60	4	26.24	9.92
	8	30.81	11.53
	12	33.43	13.60
80	4	37.50	14.52
	8	36.85	15.44
	12	42.34	17.85

Figura 49. Efecto del tiempo de contacto en la lixiviación del producto beneficiado del mineral Arcicol[®] sobre la disolución de hierro y aluminio a diferentes temperaturas de lixiviación (0.3M ácido oxálico, 10% p/p, pH 1.5 ± 0.5, agitación recíproca)



Teniendo en cuenta la figura anterior, se puede apreciar que a temperatura ambiente (25°C) el tiempo de residencia del mineral en el sistema después de 4

horas no ejerce una influencia significativa sobre la lixiviación tanto del hierro como del aluminio. Por otra parte, se observa que un incremento en la temperatura (especialmente a 60 y 80°C), hace que en general la cantidad de hierro y aluminio disueltos se incremente de un modo significativo para el primer metal, y de una manera muy ligera en el caso del segundo, independientemente del tiempo de contacto ensayado. También, se puede observar que una prolongación de dicho tiempo, genera una diferencia cada vez más estrecha en el porcentaje de disolución de hierro a medida que la temperatura del sistema se aumenta, tal como se puede apreciar en la Tabla 51, en donde a 40°C se alcanzan valores de remoción de hierro equivalentes a 11.45% y 22.01% para tiempos de lixiviación de 4 y 12h, respectivamente; mientras que a 80°C, se obtienen valores de disolución de 37.50 y 42.34% en cada caso, siendo este último valor el máximo porcentaje de remoción encontrado, bajo las condiciones de ensayo estudiadas. De esta forma, se corrobora lo planteado inicialmente en cuanto a que el control de la reacción probablemente es de tipo químico.

Por otra parte, con base en la coloración amarilla presentada por cada uno de los licores obtenidos, se encuentra que esta es coincidente con el color característico del complejo $[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{-3}$ formado por el ión oxálico y el hierro en solución, el cual se genera a partir de las reacciones [27].

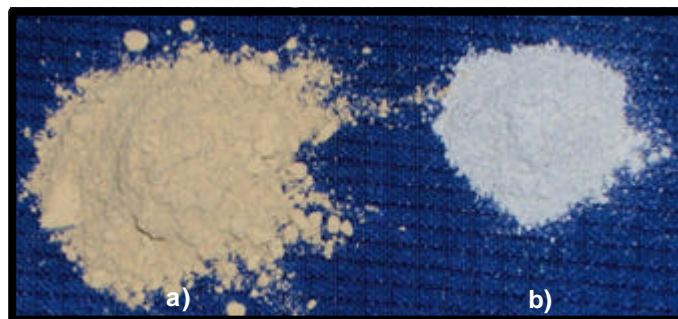


Teniendo en cuenta que a medida que dicha reacción (2) procede, el pH en la interfase sólido-solución se eleva por encima de pH 4 debido al consumo de iones hidrógeno, permitiendo de esta forma que el oxalato exista principalmente como $[(\text{C}_2\text{O}_4)^{-2}]$ [28].

Como consecuencia de lo anterior, se observa que cada uno de los materiales arcillosos producto de este proceso de lixiviación poseen una coloración grisácea,

cuyo grado de intensidad va disminuyendo a medida que las condiciones del mismo (temperatura y tiempo de reacción) se incrementan, alcanzándose así una tonalidad como la que se puede apreciar en la Figura 50b, la cual corresponde al mineral Arcicol[®] tratado bajo las condiciones que generan la máxima remoción de hierro (0.3M, 80°C, 12h); tal coloración, difiere notoriamente de la que posee la arcilla natural, la cual se caracteriza por presentar un color beige (Figura 50a).

Figura 50. Fotografía del mineral Arcicol[®] en estado natural (a) y lixiviado (b) (0.3M ácido oxálico, 80°C, 12h)



Adicionalmente, en la Tabla 52 y en la Figura 51, se presentan los resultados obtenidos para la determinación de la influencia del tiempo de tratamiento sobre los parámetros Capacidad de Adsorción y (r) del mineral Arcicol[®] con 0.3M de ácido oxálico a 80°C.

Como se puede observar en la Figura 51, al considerar el caso específico de la Capacidad de Adsorción determinada tanto por el MBI como por el método del Acetato de Amonio (CIC), se puede apreciar un comportamiento generalizado en el cual, durante las cuatro primeras horas de tratamiento se presenta un decrecimiento en dicha variable; tal efecto, se hace mucho más notorio para el primer método, en donde se pasa de un MBI de 51.75 a 25.66 meq/100g, lo cual equivale a una disminución del 50.42%, en contraste con un 16.67% alcanzada con el segundo método. Adicionalmente, se observa una tendencia a la estabilización de dicho comportamiento a partir de un tiempo de lixiviación de 8h, obteniéndose finalmente para el mineral, valores de Capacidad de Adsorción de

21.56 y 36 meq/100g, los cuales representan reducciones del 58.34% y del 25%, logradas mediante el MBI y el método del Acetato de Amonio, respectivamente.

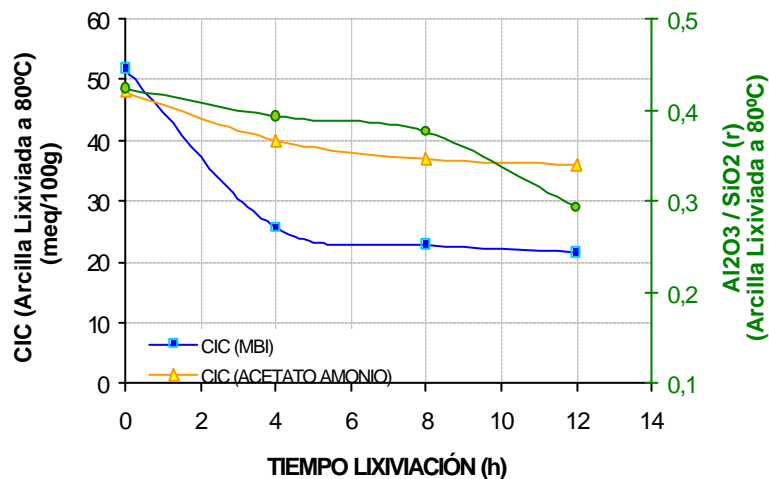
Tabla 52. Relación $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ (r) y la Capacidad de Adsorción del mineral Arcicol[®] tratado con 0.3M de ácido oxálico a 80°C durante tiempos de lixiviación de 4, 8 y 12h, respectivamente

TIEMPO LIXIVIACIÓN (h)	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	r*	CAPACIDAD DE ADSORCIÓN	
				CIC POR ACETATO AMONIO (meq/100g)	MBI (± 0.25 meq/100g)
0	19.48	45.87	0.424	48**	51.75**
4	21.17	53.74	0.393	40	25.66
8	19.22	51.04	0.376	37	22.86
12	16.86	57.41	0.293	36	21.56

* Relación $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$

** Valores de CIC de Arcicol[®] Natural

Figura 51. Efecto del tiempo de lixiviación sobre los parámetros Capacidad de Adsorción y r del mineral Arcicol[®] tratado por lixiviación ácida (0.3M ácido oxálico, 80°C)



Por otra parte, con respecto al caso de la relación $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ (r), la Figura 51 muestra una disminución progresiva de la misma con el transcurso del tiempo, la cual a diferencia de la Capacidad de Adsorción, se agudiza cuando la arcilla es sometida a largos periodos de reacción (12h), tal y como se muestra en la Tabla 52, en donde dicha relación pasa de 0.424 a 0.293, lo cual representa un decrecimiento del orden del 30.9% en este parámetro.

Es así, como de acuerdo con las observaciones hechas anteriormente, el comportamiento de estas dos variables (Capacidad de Adsorción y r) probablemente puede ser explicado teniendo en cuenta que el tratamiento ácido practicado al mineral, además de lixiviar cationes de las láminas octaédrica y tetraédrica, reemplaza los cationes intercambiables con iones hidrógeno[29], ocasionando de esta manera un detrimento significativo en la capacidad de adsorción de la arcilla durante las primeras horas del proceso, así como una notable reducción de la relación $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ al final del mismo.

Adicionalmente, a partir de la evaluación del Área Superficial Específica (SSA) de la arcilla tratada bajo las condiciones que producen la máxima remoción de hierro (0.3M, 80°C y 12h), se encuentra que el proceso de lixiviación ácida genera un incremento en dicha propiedad, haciendo que esta pase de 92.22 a $156.81\text{m}^2/\text{g} \pm 10\text{m}^2/\text{g}$, lo cual representa un aumento del 70% en el SSA del mineral; tal aumento, guarda concordancia con resultados obtenidos en estudios previos [30, 31] y, podría ser atribuido a una posible delaminación de la arcilla, la cual hasta una cierta extensión, ocasiona el realce del SSA de la misma.

5.6.7.3 Composición Química y Mineralógica del Producto Arcilloso Obtenido después del Proceso de Lixiviación

Los resultados del análisis químico y mineralógico de la muestra Arcicol® sometida al tratamiento de lixiviación (bajo las condiciones máximas de disolución de

hierro), se encuentran consignados en la Tabla 53 para el primer caso, y en la Tabla 54 y Figura 52, para el segundo.

Tabla 53. Composición química del producto del mineral Arcicol[®] lixiviado con 0.3M de ácido oxálico, a 80°C durante 12h (% en peso, sobre muestra seca)

MUESTRA	%Al ₂ O ₃	%SiO ₂	%Fe ₂ O ₃	%Na ₂ O	%CaO	%TiO ₂	%K ₂ O	%MgO	%LoI	r*
Arcicol [®] Lixiviada	16.86	57.41	5.75	0.054	0.010	1.42	2.16	1.90	9.77	0.293

* Relación Alúmina/Sílice

Comparando la composición química registrada en la tabla anterior con aquella presentada en la Tabla 11 para el mineral Arcicol[®] en estado natural, se observa una disminución en los porcentajes de los principales óxidos (Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O y MgO), lo cual ratifica que el proceso de lixiviación ácida además de producir una considerable disolución del hierro presente en el mineral, genera también la remoción de otros metales, especialmente aquellos de naturaleza intercambiable, repercutiendo de forma negativa sobre la CIC de la arcilla. De igual forma, se aprecia en el mineral tratado un incremento significativo en la cantidad de sílice.

Tabla 54. Composición mineralógica de la muestra Arcicol[®] lixiviada

MUESTRA	FASES CRISTALINAS					% AMORFOS
	% MONTMORILLONITA SÓDICA (M)	% ILLITA (I)	% CAOLINITA (K)	% ALBITA (A)	% CUARZO (Q)	
Arcicol [®] Lixiviada	11.52	37.85	1.87	14.84	8.31	25.61

Por consiguiente, teniendo en cuenta los resultados presentados con anterioridad para este proceso y, partiendo del hecho de que la Capacidad de Adsorción de la arcilla es una de las principales propiedades que define su posible aplicación como material adsorbente de metales pesados, se determina que este tipo de tratamiento no es apto para la preparación de aquellos materiales. Sin embargo, con base en la composición química del producto lixiviado, se plantea la posibilidad de que este pueda ser utilizado como una bentonita de grado cerámico, tal como se puede apreciar en la tabla del Anexo C (columna H), en donde se observa especialmente una similitud en los contenidos de r ($\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$), Fe_2O_3 y Lol.

5.6.8 Remoción de Hierro por Lixiviación para el Mineral LR-2

En la Tabla 55 y Figura 53, se encuentran reportados los resultados obtenidos para la disolución del hierro y del aluminio en función del contenido de sólidos, teniendo en cuenta que este tratamiento fue aplicado con base en las condiciones que produjeron la mayor disolución de hierro en el mineral Arcicol[®] (0.3M, 80°C, 12h, pH 1.5 ± 0.5 , agitación recíproca).

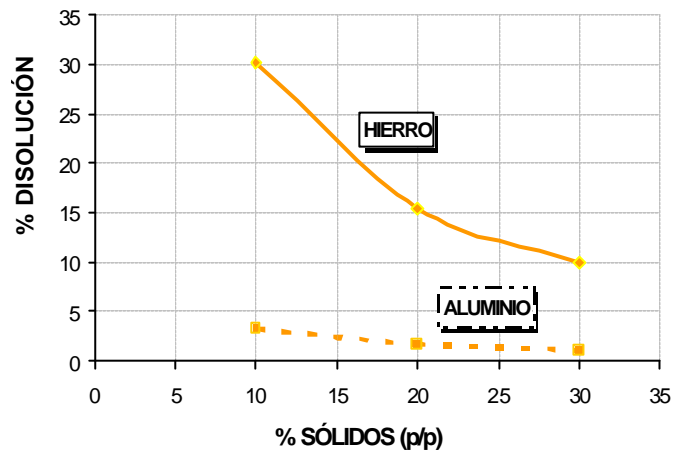
Tabla 55. Influencia del porcentaje de sólidos sobre la remoción de hierro y aluminio del mineral LR-2

% SÓLIDOS (p/p)	% DISOLUCIÓN HIERRO (p/p)	% DISOLUCIÓN ALUMINIO (p/p)
10	30.16	3.23
20	15.46	1.70
30	9.90	1.09

De acuerdo con la Figura 53, se puede observar que a medida que se incrementa el porcentaje de sólidos de la pulpa, ocurre una disminución en la cantidad de

hierro y aluminio disueltos, situación que de acuerdo con los datos presentados en la Tabla 55, es mucho más aguda en el caso del primer metal. Tal comportamiento, puede ser explicado teniendo en cuenta que a mayores concentraciones de sólidos, la viscosidad del medio se incrementa, de tal modo que se restringe la libre mezcla de las partículas de arcilla con la solución lixiviante, lo cual se ve reflejado en una disminución de la velocidad de reacción [8] y por consiguiente, en el porcentaje de remoción de hierro.

Figura 53. Efecto del contenido de sólidos sobre la remoción de hierro y aluminio en la lixiviación ácida del mineral LR-2



De este modo, se encuentra que sometiendo la pulpa (10% p/p) al contacto con una solución 0.3M de ácido oxálico a 80°C durante un periodo de agitación de 12h, se alcanza una remoción de hierro del 30.16%, la cual es suficiente para producir un cambio notable en la coloración de la arcilla, tal como puede apreciarse en la Figura 54, en la que al igual que en el caso del mineral Arcicol[®], esta pasa de un color beige (en estado natural) a un color grisáceo de menor intensidad.

Figura 54. Fotografía del mineral LR-2 en estado natural (a) y lixiviado (b) (0.3M ácido oxálico, 80°C, 12h, 10% p/p)



Adicionalmente, se encuentra que al igual que en el caso del mineral Arcicol[®], la arcilla LR-2 tratada bajo aquellas condiciones, sufre un detrimento en su Capacidad de Adsorción, pasando de un MBI de 20.78 (en estado natural) a 13.6 ± 0.25 meq/100g, lo que corresponde a una disminución del 34.55% en dicha propiedad; ratificando de esta manera que bajo las condiciones ensayadas, la lixiviación ácida no es un proceso de beneficio conveniente para la purificación de ésta arcilla con posibilidades de ser evaluada como material adsorbente de metales pesados.

6. PROPUESTA DEL SISTEMA DE BENEFICIO

6.1 EVALUACION DEL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD ADSORTIVA DE LAS MENAS BENEFICIADAS

Con base en los resultados presentados en el capítulo anterior para cada una de las muestras seleccionadas, Arcicol[®] y LR-2, y teniendo en cuenta que el objetivo general de éste proyecto fue el de proponer un sistema de beneficio para una arcilla montmorillonítica nacional que permitiera incrementar la fracción de la especie arcillosa predominante en la misma, se encontró que en el caso específico de la bentonita “comercial” (mineral con muy buenas características fisicoquímicas en estado de comercialización), la aplicación de los procesos de desarenamiento no generó un incremento notorio en los parámetros r e índice de adsorción MBI iniciales (24.29% y 12.7%, respectivamente), lo cual permitió corroborar lo planteado en la sección 4.2.2 en cuanto a que posiblemente éste mineral ya había sido sometido a algún tipo de proceso de beneficio antes de su comercialización. Por tal razón, no se considera factible la alternativa de someter este mineral a un proceso de beneficio adicional, ya que en las condiciones que se distribuye actualmente, éste presenta muy buenas propiedades adsorbentes.

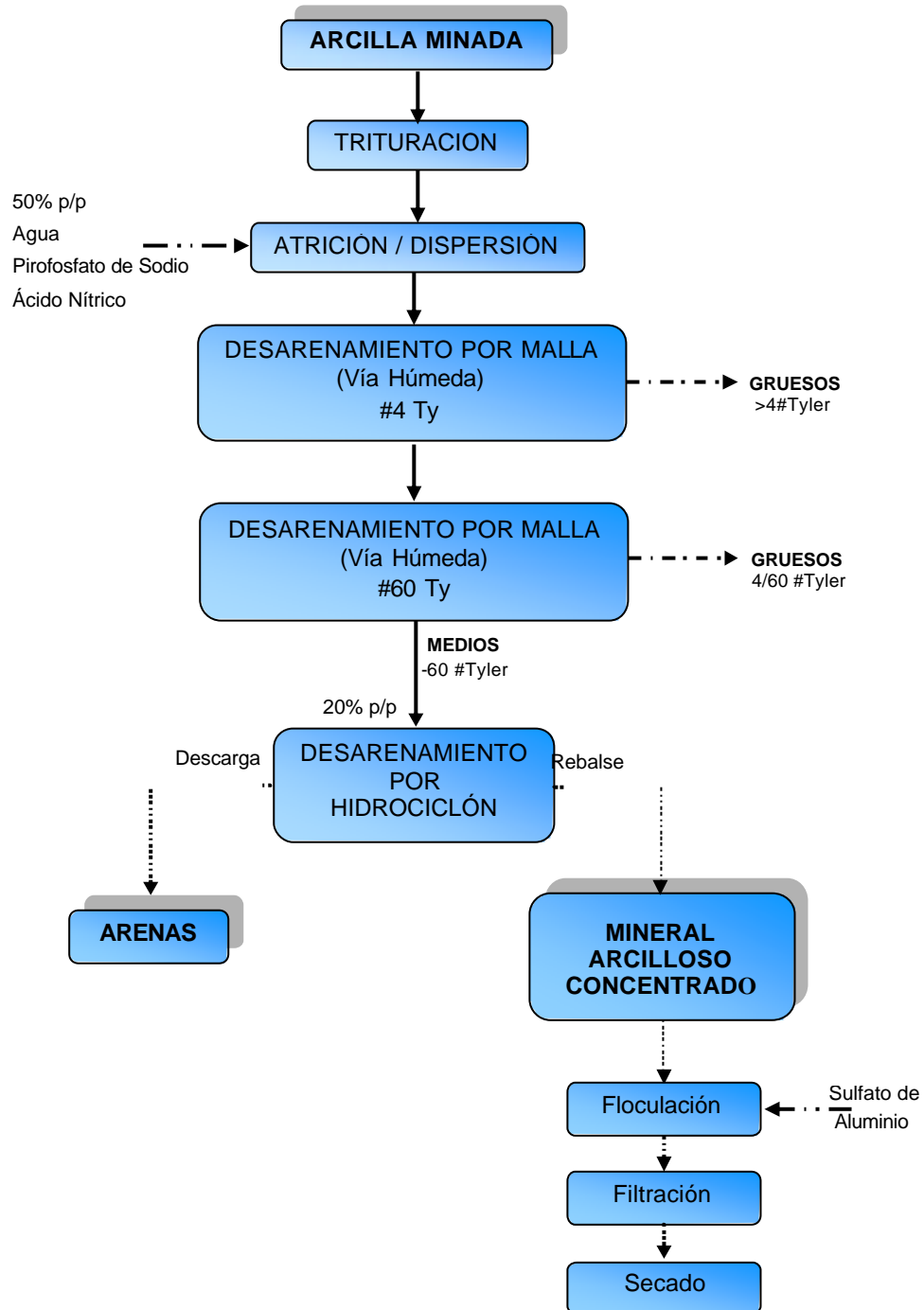
En el caso de la mena “Run of Mine” LR-2, la aplicación de los diferentes procesos de beneficio, especialmente el de desarenamiento por hidrociclón, permitió lograr un aumento considerable en la magnitud de los parámetros r e índice de adsorción MBI en una proporción de 161.18% para el primero y de 120.16% para el segundo, con lo cual se pudo demostrar que este mineral es susceptible de mejorar notoriamente su calidad en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas, especialmente la capacidad de adsorción.

De acuerdo con lo anterior, la propuesta del sistema de beneficio con el fin de preparar un material apto para ser empleado como adsorbente de metales pesados, se encaminó al tratamiento de la mena “Run of Mine” LR-2 procedente del municipio de Lérída (Tolima).

6.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL DIAGRAMA DE FLUJO PROPUESTO

La evaluación de los diferentes procesos de beneficio aplicados a la mena “Run of Mine”, arrojó que el sistema más adecuado para la concentración de las especies arcillosas está constituido por una serie de etapas cuyo orden de aplicación se esquematiza en la Figura 55. Así mismo, se determinó que como parte de la preparación de este mineral para su posible aplicación como material adsorbente, es más conveniente la utilización de procesos de tipo físico, ya que estos son ambientalmente amigables y además no ocasionan el detrimento de la capacidad de adsorción, la cual es una propiedad fisicoquímica determinante en este tipo de aplicaciones.

Figura 55. Esquema general del sistema de beneficio propuesto para la mena bentonítica LR-2



Teniendo en cuenta el diagrama anterior, se puede observar que el sistema de beneficio propuesto se encuentra constituido básicamente por una serie de etapas

de desarenamiento vía húmeda, las cuales están precedidas por una etapa de conminución (trituración) y otra de preparación de la pulpa mineral (atrición / dispersión). De este modo, se tiene que el circuito de beneficio propuesto comienza con una etapa de explotación minera después de la cual, el mineral así obtenido es sometido a una reducción de tamaño, por medio del empleo de una trituradora de rodillos. Posteriormente, el material conminuido es conducido hacia las celdas de atrición en las cuales se lleva a cabo el pretratamiento del mismo, consistente en la disgregación y posterior dispersión de las partículas minerales. Una vez acondicionada la pulpa, ésta es sometida a una etapa de separación por malla vía húmeda, en la que el mineral es pasado a través de una serie de tamices (#4 y #60 Tyler), después de lo cual la fracción - 250µm (-60#Ty) es conducida hacia una etapa subsecuente de desarenamiento por hidrociclón, en el que una de sus corrientes (rebalse) es sometida a una etapa posterior de recuperación de la fracción arcillosa por medio de los procesos de floculación, filtración y secado.

6.3 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE CADA PROCESO PROPUESTO

A continuación se presentan las condiciones de cada proceso propuesto a partir de la etapa de conminución. Del proceso de explotación se hace referencia a que normalmente una planta para el beneficio de arcilla, en condiciones de operación normales, maneja un tonelaje diario de mineral equivalente a 50 Ton/día, y también se hace mención a que dicha etapa de explotación, se realiza a cielo abierto por medio de buldózeres, después de lo cual el mineral es transportado hasta el sitio de acopio por medio de cargadores.

6.3.1 Etapa de Trituración

Esta etapa de reducción de tamaño comprende la trituración del material explotado que proviene de la mina en forma de bloques con dimensiones promedio de 25cm x 25cm x 25cm. El mineral así extraído, es conducido hacia

una trituradora de rodillo triple en donde se produce la fragmentación de los terrones, logrando obtener un tamaño que oscila entre los 3cm y 4cm.

El mineral triturado es posteriormente cargado a una tolva, la cual alimenta a una banda transportadora que sirve como medio para conducir el mineral hacia la etapa posterior de atrición/dispersión, a la que llega el mineral LR-2 con un contenido de humedad del 5.83% y una composición química como la que se muestra en la Tabla 59.

6.3.2 Etapa de Atrición / Dispersión

Esta etapa es llevada a cabo en una celda, en la cual por medio de la adición continua y controlada de agua y de agentes tales como dispersante y acondicionador de pH, se desarrolla durante 30min la disgregación / dispersión de las partículas de arcilla, con el objeto de liberarlas y mantenerlas en suspensión, bajo la influencia de agitación mecánica. En la Tabla 56, se muestran las condiciones bajo las cuales se debe llevar a cabo el proceso.

Tabla 56. Condiciones requeridas para la etapa de atrición / dispersión de la mena "Run of Mine" LR-2

CONDICIONES REQUERIDAS	
Pulpa de Alimentación	50% p/p
Contenido de Humedad	5.83%
Agente Dispersante	Pirofosfato de Sodio (0.5% p/p)
Agente Modificador de pH	HNO ₃ *
pH	10.18
Velocidad Atrición / Dispersión	2700rpm
Tiempo Atrición / Dispersión	30min

Adición de HNO₃ puesto que la mena LR-2 es altamente básica

6.3.3 Etapa de Desarenamiento por Malla en Húmedo

Esta etapa de desarenamiento es alimentada por la corriente proveniente del rebalse de la celda de atrición, y tiene como fin la eliminación de las fracciones gruesas (cuarzo libre) provenientes de dicha etapa. Para ello, el sistema hace uso de dos cribas de clasificación, #4 y #60 Ty, de las que la fracción de mineral pasante de esta última malla (fracción $-250\mu\text{m}$), servirá de alimento a la siguiente etapa del sistema. De igual forma, en la Tabla 57, se registran las características de este proceso requeridas para la elaboración del balance de masa respectivo.

Tabla 57. Características generales de la etapa de separación por malla practicada a la mena "Run of Mine" LR-2

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Acumulado Retenido en Malla #4 Tyler	3.08% p/p
Contenido de humedad de la Fracción Retenida en Malla #4 Tyler secado en la estufa	7.0%
Acumulado Retenido en Malla #60 Tyler	5.12% p/p
Contenido de humedad de la Fracción Retenida en Malla #60 Tyler	7.2%
Tamaño de Partícula de la Fracción Pasante de la Malla #60 Tyler secada en la estufa	$-250\mu\text{m}$
Microgranulometría de la pulpa disgregada y tamizada	El 50% tiene tamaños inferiores a $8.66\mu\text{m}$

6.3.4 Etapa de Desarenamiento por Hidrociclón

La fracción $-250\mu\text{m}$ ($-60\#$ Ty) producto de la anterior etapa de separación, es sometida a la acción de la fuerza centrífuga producida por un hidrociclón, con el fin de lograr la concentración del mineral arcilloso. En este proceso, se obtienen dos productos con características diferentes; el primero de ellos, denominado descarga (underflow), el cual contiene la ganga silíceas y, el segundo, denominado rebalse (overflow), cuya corriente está constituida por la fracción fina y corresponde al producto concentrado de mineral arcilloso (Illita, Montmorillonita y

Caolinita) obtenido por este sistema de beneficio. En la Tabla 58, se encuentran registradas las principales condiciones y características de este proceso de desarenamiento; igualmente, en la Tabla 59, se encuentran consignados los datos de composición química y mineralógica del mineral concentrado obtenido mediante el proceso.

Tabla 58. Características generales del proceso de desarenamiento por hidrociclón practicado a la mena "Run of Mine" LR-2

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Pulpa de Alimentación	20% p/p
Presión de Trabajo	45psi
Porcentaje de Recuperación del Rebalse (Fracción Arcillosa)	63.8%
Contenido de Humedad de la Fracción Arcillosa seca	6.5%
Porcentaje de Sólidos en el Rebalse	14.5%
Contenido de Humedad de la Descarga seca	6.0%

6.3.5 Etapa de Recuperación

Esta etapa comprende los procesos de floculación, filtración y secado del mineral concentrado. Para llevar a cabo el proceso de floculación, la pulpa procedente del rebalse del hidrociclón es alimentada a un tanque, en el cual se adiciona sulfato de aluminio en una cantidad tal, que facilite la filtración del mineral arcilloso. Posteriormente, la pulpa así obtenida es transportada hasta un filtro de tambor rotatorio del cual se obtiene una torta mineral que es a continuación sometida a un proceso de secado y subsecuente pulverización, para después ser conducido el producto final por medio de una banda transportadora hasta el sitio de almacenamiento y embarque.

6.4 BALANCE DE MASA Y DIAGRAMA DE FLUJO PROPUESTO PARA EL BENEFICIO DE LA ARCILLA LR-2

El balance de masa para el sistema de beneficio propuesto fue realizado con base en los resultados obtenidos experimentalmente, los cuales se encuentran sintetizados en la Tabla 59. En la Figura 56, se presenta en forma resumida dicho balance y, en la Figura 57 se esquematiza el diagrama de flujo del sistema de beneficio propuesto para la concentración de los minerales arcillosos presentes en la mena bentonítica “Run of Mine” LR-2.

Tabla 59. Características generales y condiciones de la planta de beneficio de la mena bentonítica “Run of Mine” LR-2

CARACTERÍSTICAS GENERALES		
Capacidad de mineral de mina seco	50	Ton/día
Humedad del mineral	5.83	% p/p
Densidad Real del mineral	2.49	g/cm ³
Acidez (pH)	10.70	pH
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LA MENA		
Montmorillonita Sódica	14.96	%
Illita	36.11	%
Caolinita	12.33	%
Cuarzo	27.97	%
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MENA		
Al ₂ O ₃	13.85	%
SiO ₂	58.40	%
Fe ₂ O ₃	7.60	%
Na ₂ O	1.69	%
K ₂ O	3.08	%
CaO	0.048	%
MgO	1.93	%
LoI	8.19	%
ETAPA DE TRITURACIÓN		
Tamaño mineral de alimento	25	cm
Tamaño mineral del producto	3-4	cm
ETAPA DE ATRICIÓN / DISPERSIÓN		
Porcentaje de sólidos de la pulpa	50	%p/p
Contenido de Humedad	5.83	%

Agente Dispersante	Pirofosfato de Sodio	
Dosificación de Dispersante	0.5	%p/p
Agente modificador de pH	Ácido Nítrico	
pH de pulpa	10.18	
Tiempo de Atrición / Dispersión	30	min
Velocidad de Atrición / Dispersión	2700	rpm
ETAPA DE DESARENAMIENTO POR MALLA EN HUMEDO		
Cribas	#4	Ty
	#60	Ty
Acumulado Retenido en Malla #4Ty	3.08	%p/p
Acumulado Retenido en Malla #60Ty	5.12	%p/p
Contenido de Humedad de la Fracción Retenida #4Ty	7.0	%
Contenido de Humedad de la Fracción Retenida #60 Ty	7.2	%
ETAPA DE DESARENAMIENTO POR HIDROCICLON		
Pulpa de Alimentación	20	%p/p
Presión de Trabajo	45	psi
Porcentaje de Recuperación del Rebalse (Fracción Arcillosa)	63.8	%
Contenido de Humedad de la Fracción Arcillosa	6.5	%
Porcentaje de Sólidos en el Rebalse	14.5	%
Contenido de Humedad de la Descarga	6.01	%
Composición Mineralógica del Rebalse		
Montmorillonita Sódica	12.43	%
Illita	40.64	%
Caolinita	13.45	%
Cuarzo	5.73	%
Composición Química del Rebalse		
Al ₂ O ₃	27.81	%
SiO ₂	44.87	%
Fe ₂ O ₃	9.91	%
Na ₂ O	1.58	%
CaO	0.019	%
K ₂ O	3.24	%
MgO	3.09	%
Lol	6.27	%

Figura 56. Balance de masa para el sistema de beneficio propuesto

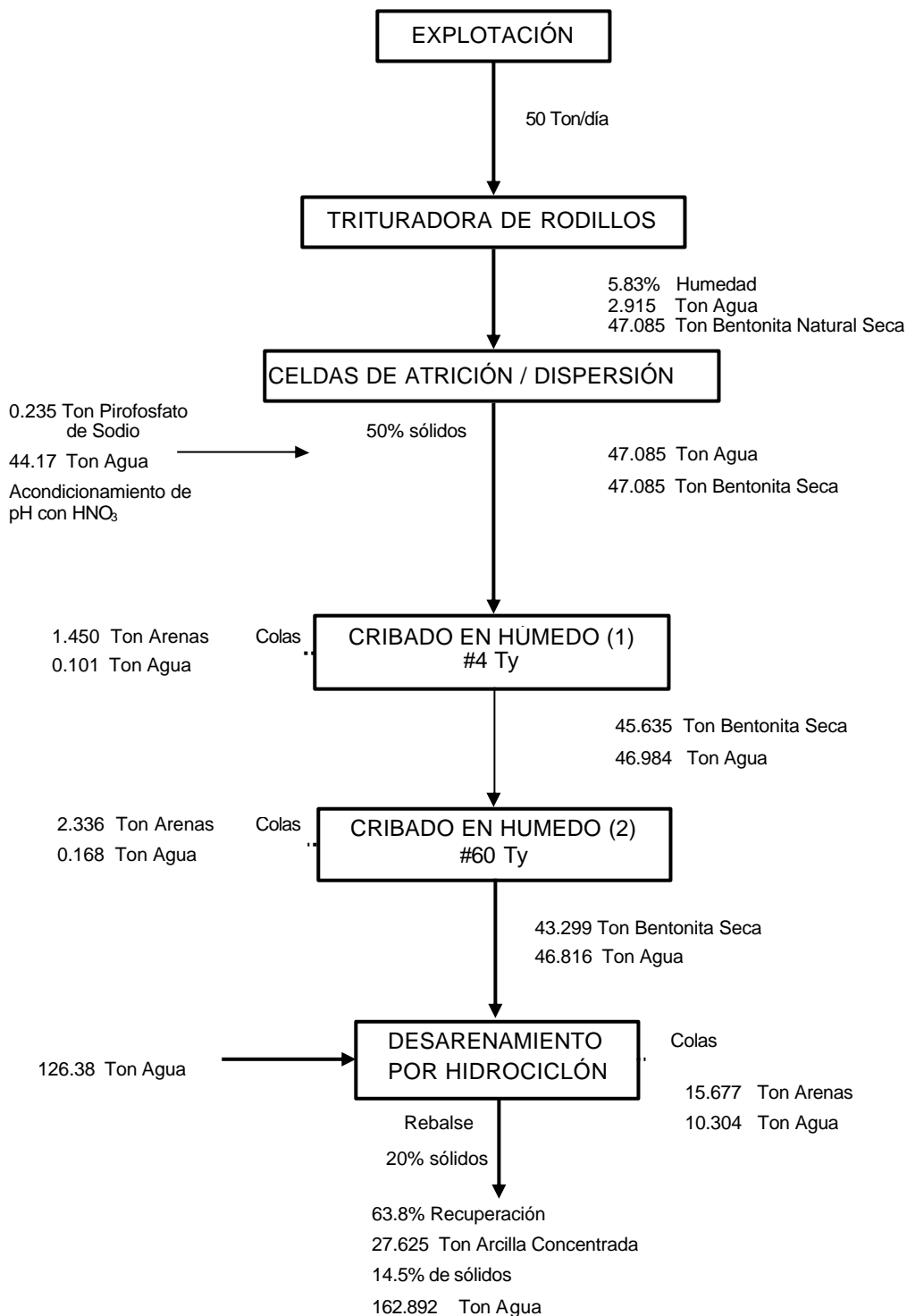
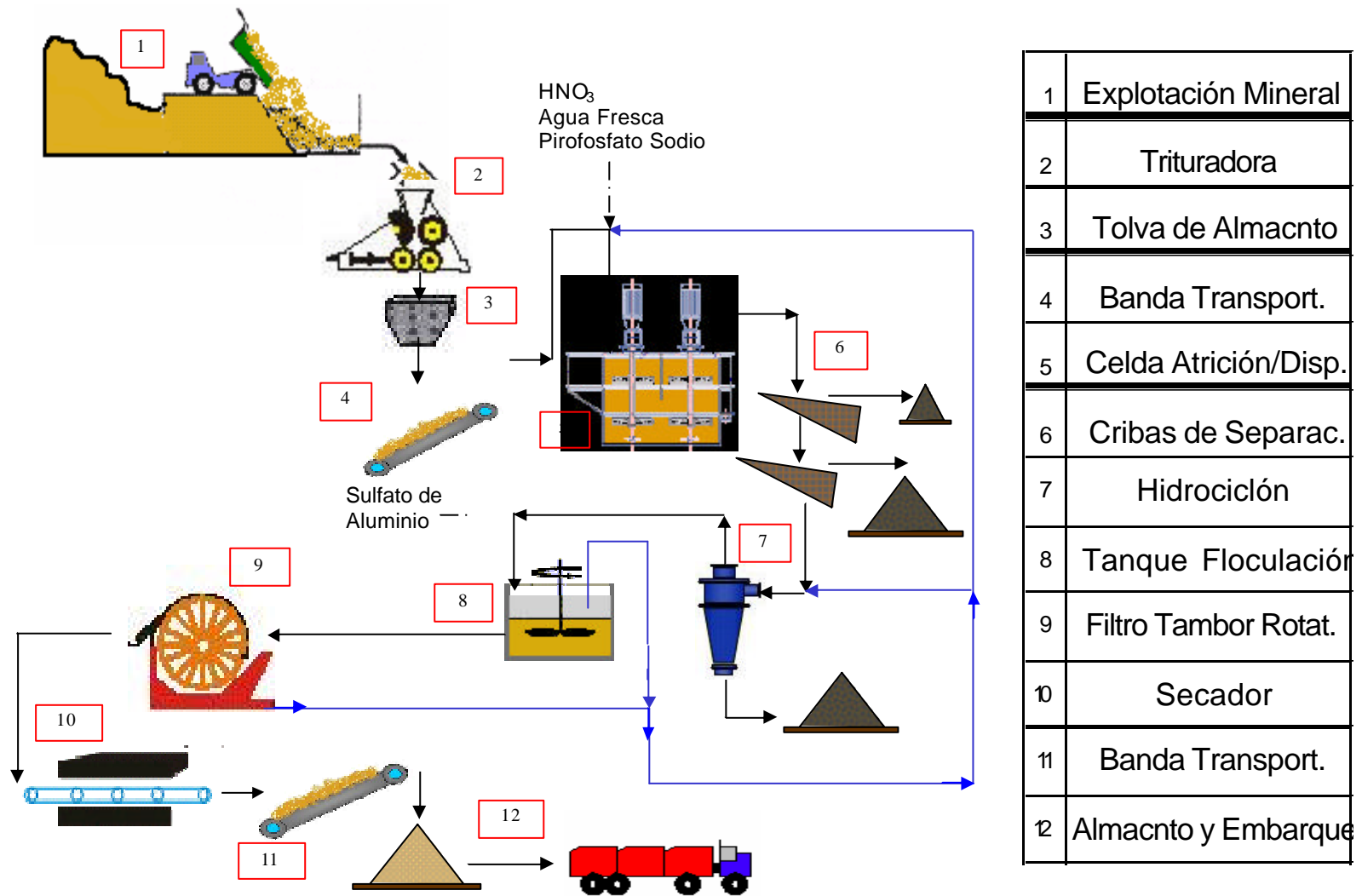


Figura 57. Diagrama de Flujo de la Planta Propuesta para el Beneficio de la mena "Run of Mine" LR-2



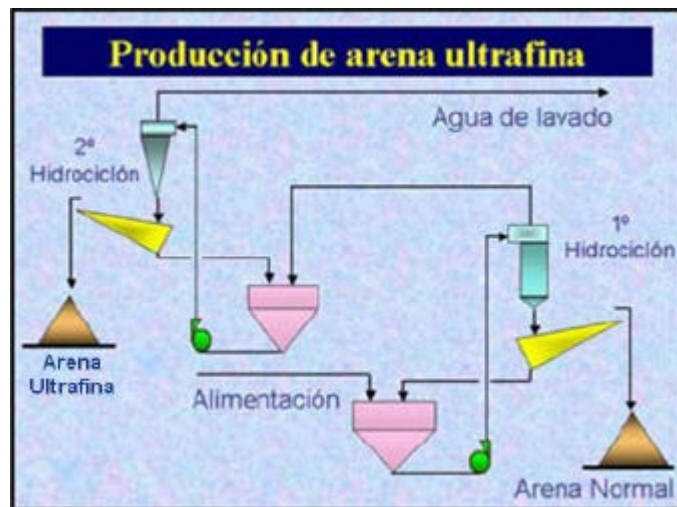
6.5 TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS

Teniendo en cuenta que el sistema de beneficio vía húmeda propuesto para la mena “Run of Mine” LR-2, además de producir un concentrado rico en especies arcillosas, genera también una serie de residuos que de no ser tratados y dispuestos adecuadamente, pueden ocasionar impactos ambientales significativos, se consideró necesario hacer referencia al tratamiento que en forma general y de acuerdo con la literatura [43], podría ser utilizado en este tipo de procesos.

En primer lugar, en el caso específico de los relaves de desarenamiento por hidrociclón (descarga), éstos contienen sólidos en suspensión, los cuales en alguna proporción son de naturaleza arcillosa, lo que dificulta las etapas de clarificación de aguas y filtración de lodos, necesarias para evitar los problemas de contaminación. Por tal razón, el tratamiento de estos relaves consistiría básicamente, en una primera etapa de recuperación de partículas sólidas de tamaño medio, la cual se llevaría a cabo mediante hidrociclones; una segunda etapa de clarificación de las aguas entregadas por estos equipos, mediante tanques clarificadores; y una etapa final de filtración de los lodos de clarificación, mediante el empleo de filtros prensa.

En la *etapa de hidrociclonado*, se tratarían las arenas en un circuito cerrado (Figura 58), integrado por un conjunto de hidrociclón y escurridor (filtro vibrante); éste último realizaría la función de desaguado, el cual recibiría la descarga del hidrociclón, y generaría un producto sólido con un contenido de humedad mínimo, que lo haría fácilmente manejable y apilable. De este modo, se podrían recuperar partículas con granulometrías entre 10 y 30 μ m, denominadas “arenas ultrafinas”, las cuales de obtenerse limpias, es decir, exentas de arcillas y limos, tendrían un valor económico, especialmente en la industria del vidrio y la fundición.

Figura 58. Circuito empleado para el tratamiento de relaves y la producción de arena ultrafina



Fuente: BOUSO, J. L. Soluciones Medioambientales para las Plantas de Tratamiento de Minerales no Metálicos. Simposio Internacional de Mineralurgia, TECSUP. 2002. p. 5

Finalmente, mediante el *proceso de clarificación*, el cual sería efectuado en tanques clarificadores o espesadores, se obtendrían simultáneamente la fracción sólida en forma de pulpa espesa, así como el agua clarificada lista para su reutilización o su vertido inocuo. Los lodos así obtenidos, podrían ser eventualmente enviados a tanques, mediante transporte por camión o bombeo, y preferiblemente a una última etapa de *filtración*. Estos relaves, una vez secos podrían ser extraídos y transportados hasta un lugar final de vertido, ya sea para la preparación de explotaciones agrícolas, o para su empleo como material de relleno; en este último caso, el relleno con lodos secos de zonas ya explotadas de un yacimiento, presenta la gran ventaja de disminuir el impacto ambiental de la explotación.

En segundo lugar, en el caso de las colas generadas en el proceso de desarenamiento por malla aplicado a la mena LR-2, la disposición final de estos residuos consistiría básicamente en el secado y almacenamiento de los mismos, para la posterior aplicación de un proceso de refinación que posibilitara su uso como materia prima en la industria del vidrio.

CONCLUSIONES

- Los resultados de la caracterización geoquímica, mineralógica y de índice de hinchamiento encontrados para cada una de las arcillas seleccionadas, permitieron establecer de acuerdo con la clasificación industrial de bentonitas, que el mineral Arcicol[®] corresponde a una arcilla bentonítica altamente hinchable, debido tanto a su elevado contenido de montmorillonita sódica (20.08%) como a su alto índice de hinchamiento (20ml/2g ± 0.5ml). Así mismo, en el caso de la mena LR-2, se encontró que ésta es una arcilla bentonítica poco hinchable, lo cual es soportado por la menor proporción de montmorillonita sódica (14.96%) presente en la mena, así como por el bajo índice de hinchamiento (5ml/2g ± 0.5ml) que caracteriza a la misma.
- El estudio del potencial zeta hizo posible determinar que para la dispersión de menas arcillosas con presencia de montmorillonita como una de las principales fases cristalinas, fue más efectivo el pirofosfato de sodio en un pH básico. Se encontró que a un pH de 10.70 y 10.18, para el mineral Arcicol[®] y la arcilla LR-2, respectivamente, una dosificación de dispersante de 0.5%p/p proporcionó en ambos casos la mejor acción defloculante al sistema arcilla-agua.
- Mediante el estudio de viscosidad desarrollado para los minerales Arcicol[®] y LR-2 se encontró que el manejo de pulpas bentoníticas es fuertemente influenciado por la composición mineralógica de las mismas, especialmente cuando la montmorillonita sódica se halla presente como una de las principales fases cristalinas de la mena; razón por la cual, el porcentaje

máximo de sólidos con que fue posible el manejo adecuado de las pulpas para los minerales Arcicol[®] y LR-2 fue de 10 y 30 % p/p, respectivamente.

- El método del Índice Azul de Metileno (MBI) fue ratificado como una técnica adecuada para la determinación de la evolución de los diferentes procesos de desarenamiento practicados a cada uno de los minerales seleccionados, con base en la relación directa obtenida entre una propiedad fisicoquímica de la arcilla tal como la capacidad de adsorción, con un parámetro indicativo de la concentración del mineral arcilloso, como lo es la relación Al_2O_3/SiO_2 (r).
- Las etapas de pretratamiento practicadas a la mena “Run of Mine” LR-2 permitieron establecer que el proceso de atrición/dispersión acompañado de un desarenamiento por malla en húmedo (#4 y # 60 Ty), fueron las etapas más adecuadas para la eliminación de gran parte de la ganga silícea contenida en la mena, debido a que se evitan los inconvenientes de sobrerreducción del tamaño del cuarzo libre, así como los prolongados tiempos de tratamiento presentados con la aplicación del pretratamiento de molienda.
- Dentro de las etapas de desarenamiento practicadas al mineral LR-2, se encontró que la separación por hidrociclón a una presión de 45psi y 20% de sólidos, precedida por un pretratamiento de atrición/dispersión, fue el proceso que arrojó los mejores resultados en cuanto a eliminación de ganga silícea, con lo que se logró un cambio en la relación Al_2O_3 / SiO_2 de 0.237 para la arcilla natural a 0.619 para el producto concentrado, equivalente a un incremento del 161.18%, lo cual fue soportado con el aumento en el MBI, cuya magnitud pasó de 20.78 ± 0.25 meq/100g (arcilla natural) a 45.75 ± 0.25 meq/100g, representando un incremento del 120.16% en este parámetro.

- El estudio de lixiviación practicado a los minerales Arcicol[®] y LR-2 bajo las condiciones ensayadas (80°C, 12h, 0.3M ácido oxálico y agitación recíproca), produjo una remoción de hierro del 42.34 y 30.16%, respectivamente. Además, se presentó una notable alteración de algunas de las propiedades fisicoquímicas de la arcilla, tales como la capacidad de adsorción y el área superficial específica, en donde para el caso del mineral Arcicol[®], se presentó una reducción del 58.34% en el MBI y un incremento del 70% en el Área Superficial Específica. Así mismo, para la mena LR-2 se encontró que el MBI presentó una disminución del 34.55%. De esta manera, se pudo inferir que dicho proceso generó la disolución de hierro y aluminio constitutivos de las especies arcillosas y, por consiguiente la destrucción parcial de la estructura cristalina de las mismas, haciendo que tal proceso fuese inadecuado para la preparación de estos minerales como materiales adsorbentes de metales pesados.

- Los procesos de desarenamiento practicados al mineral Arcicol[®] hicieron posible la determinación de las buenas propiedades adsorptivas presentadas por el mismo en estado de comercialización, lo cual permitió establecer que se trataba de un mineral ya beneficiado, para el que la aplicación de un proceso de beneficio adicional no es justificable.

- El sistema de beneficio propuesto para la mena LR-2 permitió la obtención de un producto concentrado rico en la especie arcillosa predominante, la illita, la cual junto con la caolinita y la montmorillonita, fueron suficientes para la generación de un incremento en las propiedades fisicoquímicas del mineral, tales como la capacidad de adsorción en un 120.16% y del área superficial específica en un 8.41%. De igual forma, se logró una reducción significativa del cuarzo presente en la mena, el cual pasó de 27.97% a 5.73% equivalente a una disminución del 79.51%.

RECOMENDACIONES

- Realizar estudios de beneficio vía seca para la concentración de la especie montmorillonítica contenida en la mena LR-2, con el objeto de evitar los inconvenientes de hidratación e hinchamiento presentados en los procesos de beneficio en húmedo aplicados a la misma.
- Ampliar el estudio de viscosidad practicado a cada una de las menas ensayadas, determinando la influencia tanto del tiempo de agitación como del tiempo de envejecimiento, con el fin de establecer el carácter tixotrópico de las mismas.
- Estudiar la posible aplicación como materia prima, a nivel industrial, de las arenas producidas en la etapa de separación por hidrociclón.
- Empezar estudios que permitan el planteamiento de una metodología estándar para el análisis por Difracción de Rayos X de menas arcillosas, especialmente montmorilloníticas, con el fin de facilitar la cuantificación de las diferentes especies mineralógicas presentes en las mismas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] COLOMBIA. INGEOMINAS. Recursos Minerales de Colombia. Tomo II, 1987.
- [2] KRYVORUCHKO, A., ATAMANENKO, I. y KORNILOVICH, B. A Role of the Clay Minerals in the Membrane Purification Process of Water from Co(II)-ions. Elsevier, 2001. p. 487 – 492.
- [3] Da FONSECA, M., De OLIVEIRA, M. y ARAKAKI, L. Natural Vermiculite as an Exchanger Support for Heavy Cations in Aqueous Solution. Sao Paulo : Elsevier, 2004. p. 50 – 55.
- [4] JIANG, J., COOPER, C. y OUKI, S. Comparison of Modified Montmorillonite Adsorbents. Part I: Preparation, Characterization and Phenol Adsorption. Pergamon, 2001. p. 711 – 716.
- [5] HASSAN, M.S. y ABDEL-KHALEK, N.A. Beneficiation and Applications of an Egyptian Bentonite. Elsevier, 1998. p. 99 – 115.
- [6] ODER, R. Process for improved magnetic beneficiation of clays. United States Patent, 4281799. San Francisco, 1981
- [7] SAIKIA, N.J., BHARALI, D.J., SENGUPTA, P., y BORDOLOI, D. Characterization, Beneficiation and Utilization of a Kaolinite Clay from Assam, India. India : Elsevier, 2003. p. 93 – 103.

- [8] MANDAL, S.K. y BANERJEE, P.C. Iron Leaching from China Clay with Oxalic Acid: Effect of Different Physico-Chemical Parameters. *Mineral Processing*, 2004. p. 263-270
- [9] RAGHANVAN, P. y CHANDRASEKHAR, S., VOGT, V. y GOCK, E. Separation of Titaniferrous Impurities from Kaolin by High Shear Pretreatment and Froth Flotation. *Applied Clay Science*, 2003.
- [10] HANG, P. T. y BRINDLEY, G. W. Methylene Blue Adsorption by Clay Minerals. Determination of Surface Areas and Cation Exchange Capacities. *Clays and Clay Minerals*, 1970.
- [11] CHIAPPONE, A., MARELLO, S., SCAVIA, C. y SETTI, M. Clay Mineral Characterization through the Methylene Blue Test : Comparison with other Experimental Techniques and Applications of the Method. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004. p. 1168-1178
- [12] CARRILLO, L. Análisis de arcillas en rocas sedimentarias mediante difracción de Rayos X. Bucaramanga, 1985. Trabajo de grado (Químico Puro). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química.
- [13] World Health Organization. Environmental Health Criteria 231. Bentonite, Kaolin and Selected Clay Minerals. Geneva, 2005. p. 9
- [14] LANDIS, Ch. y MAUBEUGE, K. Activated and Natural Sodium Bentonites and their Markets. *Mining Engineering. ProQuest Science Journals*, 2004. p. 17-22
- [15] ESPINOZA, G. E. y QUIROGA, E. A. Estudio de Factibilidad del Empleo de Arcillas Nacionales en un Fluido de Perforación como Sustituto de la Bentonita. Bucaramanga, 1992. Trabajo de grado (Ingeniero de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.

- [16] RHOADES, J. Cation Exchange Capacity. En: Methods of Soil Analysis. Comparación de la CIC en Dos Suelos, Utilizando Acetato de Amonio, Acetato de Sodio y Cloruro de Amonio. 2002, p. 254
- [17] RAMOS-TEJADA, M.M., ARROYO, F.J., PEREA, R. y DURÁN, J.D.G. Scaling Behavior of the Rheological Properties of Montmorillonite Suspensions: Correlation between Interparticle Interaction and Degree of Flocculation. Journal of Colloid and Interface Science, 2001. p. 251-259.
- [18] Disponible en: www.floatex.co.uk
- [19] MOORE, D. y REYNOLDS, R. X-Ray Diffraction and the Identification and Analisis of Clay Minerals.
- [20] Richard Klimpel assigned to The Dow Chemical Company. Froth Flotation of Silica or Siliceous Gangue. Patent N° 5124028. Minerals Engineering, Vol. 6, N° 3, 1993. p. 339-340
- [21] ATA, S. y YATES, P.D. Stability and Flotation Behaviour of Silica in the Presence of a Non-polar Oil and Cationic Surfactant. Colloids and Surfaces, 2005. p. 1-7
- [22] DE MESQUITA, L.M.S., RODRIGUES, T. y GOMES, S.S. Bleaching of Brazilian Kaolins Using Organic Acids and Fermented Médium. Minerals Engineering, Vol. 9, N° 9, 1996. p. 965-971
- [23] . VENGRIS, T., BINKIENE, R. y SVEIKAUSKAITE, A.. Nickel, Copper and Zinc Removal from Waste Water by a Modified Clay Sorbent. Applied Clay Science, 2001. p. 183-190
- [24] PARFITT, R. L. Anion Adsorption by Soils and Soil Materials. En: Applied Clay Science, 1990. p.193-201.

- [25] Betriebsanleitung Operating Manual Instructions de Service ULTRA-TURRAX. JANKE & KUNKEL GMBH & CO. KG.
- [26] DOMBROWSKY y HENDERSON. En: Quim. Nova, Vol. 24, N°3, 2001. p. 345-353.
- [27] TERRAZAS, G., IBARRA, J., ORTIZ, U. y TORRES, L. Iron Leaching of a Mexican Clay of Industrial Interest by Oxalic Acid. Azojomo, Vol. 1. December, 2005.
- [28] SUONG OH LEE, TAM TRAN, YI YONG PARK, SEONG JUN KIM y MYONG JUN KIM. Study on the Kinetics of Iron Oxide Leaching by Oxalic Acid. International Journal of Mineral Processing, 2006. p. 144-152
- [29] VALENZUELA, F. y DE SOUZA, P. Estudios on the Acid Activation of Brazilian Smectitic Clays. Quim. Nova, Vol. 24, N°3, 2001. p. 345-353.
- [30] AMBIKADEVI, V.R. y LALITHAMBIKA, M. Effect of Organic Acids on Ferric Iron Removal from Iron-Stained Kaolinite. Applied Clay Science, 2000. p. 133–145
- [31] MORALES, A., FORTES, A., MENDES, J. y CARRIÓN, P. Estado del Arte de la Bentonita de la Provincia del Guayas y su Proyección a la Península de Santa Elena, Ecuador. p. 1-12
- [32] FOLETTO, E. L., VOLZONE, C. y L. M. PORTO. Clarification of Cottonseed Oil: How Structural Properties of Treated Bentonites by Acid Affect Bleaching Efficiency. Latin American Applied Research, 2006.
- [33] GARCÍA R., E Y SUÁREZ B., M. Las Arcillas: Propiedades y Usos. Madrid. p. 3-10.
- [34] Disponible en: www.cumate.com/VeegumVangel%20Spanish.pdf
- [35] Disponible en: www.zeta-meter.com
- [36] Bentonite, Pyrophyllite and Talc in the Republic of South Africa. Department Minerals and Energy Republic of South Africa, 2004

- [37] BENVINDO DA LUZ, A. Estudo de Reoxidação e Redução de Ferro Contenido em Caulins. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas, São Paulo, 1998.
- [38] BENVINDO DA LUZ, A. y CHAVES P., A. Tecnología del Caolín: Enfoque a la Industria del Papel. Serie Rocas e Industrias Minerales. Brasil, 2000
- [39] Disponible en: www.uclm.es/users/higueras/MGA/Tema_09_OtrosMin_2_1.htm
- [40] Emisión Estimation Technique Manual for Mining and Processing of Non-Metallic Minerals. National Pollutant Inventory. Versión 2.0., 2000. p. 15
- [41] TRAWINSKI, H. Aplicaciones y Funcionamiento Práctico de los Hidrociclones. p. 15
- [42] Disponible en: www.dme.gov.za/publications/
- [43] BOUSO, J. L. Soluciones Medioambientales para las Plantas de Tratamiento de Minerales no Metálicos. Simposio Internacional de Mineralurgia, TECSUP. 2002. p. 1 – 12.

ANEXOS

**ANEXO A. MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS EN LA CARACTERIZACIÓN
DE LAS MENAS BENTONITICAS A BENEFICIAR**

▪ **DETERMINACIÓN DE LA SÍLICE TOTAL (SiO₂) Y ÓXIDOS METÁLICOS EN ARCILLAS [ASTM C 323-56 (Reaprobada en 1999)]**

Materiales y Equipos

- ✓ Balanza analítica
- ✓ Crisoles de platino
- ✓ Mufla
- ✓ Placa de calentamiento
- ✓ Espectrofotómetro de Absorción Atómica
- ✓ Vaso de precipitados de 600ml
- ✓ Varilla de vidrio con policía
- ✓ Vidrio de reloj

Reactivos

- ✓ Carbonato de sodio (Na₂CO₃)
- ✓ Ácido clorhídrico (HCl) puro
- ✓ Ácido fluorhídrico (HF) puro
- ✓ Ácido Perclórico (HClO₄)
- ✓ Hidróxido de Amonio (NH₄OH)

Procedimiento

- ✓ Pesar 3g de carbonato de sodio en un crisol de platino
- ✓ Tarar y pesar 0.25g (W_m) de la muestra de arcilla sobre la medida anterior
- ✓ Mezclar muy bien con un alambre (preferiblemente de platino), y agregar una capa de carbonato de sodio sobre la mezcla
- ✓ Tapar el crisol y llevar a la mufla hasta 950°C
- ✓ Realizar un montaje con un vaso de precipitados de 600ml, un vidrio reloj que cubra el vaso y una varilla de vidrio con policía
- ✓ Introducir el crisol después de la calcinación de la muestra en el vaso con el montaje, introduciendo en el crisol la varilla.
- ✓ Agregar cuidadosamente HCl 1:1 dentro del crisol de platino.

- ✓ Esperar durante un tiempo hasta que la muestra termine de burbujear y, lavar cuidadosamente el crisol (teniendo cuidado de que la muestra quede totalmente dentro del vaso).
- ✓ Adicionar entre 15 y 20ml de HClO₄ y dejar secar en una plancha
- ✓ Adicionar 5ml de HCl puro y agua caliente
- ✓ Dejar enfriar y aforar en un balón de 100ml
- ✓ Filtrar y recoger el filtrado para la lectura de los metales (Al, Fe, Ca, K, Ti, Mg, Na) por Espectrofotometría de Absorción Atómica
- ✓ Adicionar tres gotas de NH₄OH al papel de filtro y, calcinarlo a 1000°C durante 5min
- ✓ Pesar el calcinado (W₁)
- ✓ Adicionar sobre el calcinado 5ml de HF y, dejar evaporar completamente la sílice
- ✓ Calcinar el crisol de platino con tapa (1000°C)
- ✓ Introducir en un desecador y pesar (W₂)

Sílice Total:

$$\%SiO_2 = [(W_1 - W_2) / W_m] * 100$$

• **PREPARACIÓN DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS DRX**

Metodología

i. Preparación y Montaje de las Muestras

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

ii. Toma de Datos de Difracción

Se realizó en un difractómetro de polvo marca RIGAKU modelo D/MAX IIIIB bajo las condiciones que se muestran en la Tabla 1.

Análisis por Difracción de Rayos-X

i. Identificación de Fases

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

ii. Cuantificación de Fases

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

Tabla 1. Condiciones de ensayo para análisis de muestras por DRX

Toma de datos de difracción:		
Voltaje		30kV
Corriente		15mA
Rendijas (Slits)	DS	1.0°
	RS	0.3mm
	SS	1.0°
Muestreo		0.02° 2theta
Rango de Medición		2-70° 2theta
Radiación		CuKa1
Monocromador		Grafito
Identificación de fases:		
Tipo de barrido		A pasos
Velocidad de barrido		2 segundos
Cuantificación de fases:		
Tipo de barrido		A pasos
Tipo de muestreo		2 segundos

• **MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD LIBRE EN ARCILLAS (ASTM C 324-01^{e1})**

Materiales y Equipos

- ✓ Balanza analítica
- ✓ Estufa
- ✓ Desecador
- ✓ Vidrio Reloj

Procedimiento

- ✓ Pesar 1.00g de la muestra

- ✓ Calentar a una temperatura entre 105 y 110°C hasta peso constante (dejar enfriar la muestra en un desecador)
- ✓ Registrar la pérdida de peso como contenido de humedad

$$\% \text{ Humedad} = [(W_m - W_{ms}) / W_m] * 100$$

Donde

W_m : Peso de la muestra (g)

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

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

- ✓ Secar la muestra a una temperatura de 110±5°C.
- ✓ La granulometría del mineral debe ser -4.75mm.
- ✓ Pesar el picnómetro vacío, M_f , previamente limpio y seco (secar en estufa de laboratorio).
- ✓ Introducir dentro del picnómetro el mineral en estudio (ocupando entre la mitad y las $\frac{3}{4}$ partes del volumen del picnómetro) y pesar, restar la masa del picnómetro vacío (M_f), y así determinar el peso de la muestra seca (M_b) (para muestras con partículas de tamaño máximo de 2mm el peso mínimo de la muestra es de 20g, para tamaños máximos de 4.75mm son 100g).
- ✓ Adicionar líquido para humectar completamente el sólido y sacar todas las burbujas de aire que están presentes
- ✓ El líquido elegido debe humectar completamente el mineral de tal forma que penetre fácilmente en el interior de los poros y además no presente ninguna reacción con el sólido.
- ✓ Completar con el líquido hasta llenar el picnómetro (tener en cuenta la tapa y el capilar) y pesar, M_b .
- ✓ Vaciar el picnómetro y limpiarlo
- ✓ Llenar el picnómetro con el líquido elegido y pesar, M_a .

- ✓ Introducir el termómetro en el agua y registrar la temperatura, con 0.5°C de precisión

Cálculo de la densidad

$$\rho = (M_o * \rho_i) / [M_o + (M_a - M_b)]$$

Donde

ρ : Densidad real del mineral

M_o : Peso de la muestra sólida seca

ρ_i : Densidad del líquido

M_a : Peso del picnómetro lleno de agua

M_b : Peso del picnómetro con agua más muestra

• MÉTODO DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA EL ÍNDICE DE HINCHAMIENTO DE UN COMPONENTE MINERAL ARCILLOSO (ASTM D 5890-02)

Materiales y Equipos

- ✓ Estufa
- ✓ Mortero
- ✓ Desecador
- ✓ Balanza Analítica
- ✓ Vidrio de Reloj
- ✓ Probeta Graduada (100ml)
- ✓ Termómetro
- ✓ Espátula

Procedimiento

- ✓ Moler la muestra de arcilla hasta que el 100% pase a través de la malla 100 y, hasta que mínimo el 65% pase a través de la malla 200.

- ✓ Secar una porción de la muestra hasta peso constante hasta $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- ✓ Pesar $2.00 \pm 0.01\text{g}$ de arcilla seca
- ✓ Agregar 90ml de agua a una probeta graduada de 100ml
- ✓ Remover cada vez, fracciones no superiores a 0.1g de muestra.
- ✓ Permitir al mineral arcilloso humectarse, hidratarse, y sedimentar hacia el fondo de la probeta por un periodo mínimo de 10min.
- ✓ Agregar incrementos adicionales del mineral arcilloso, tal como se describió en el numeral anterior, hasta que el total de la muestra (2.00g) haya sido agregada.
- ✓ Después de que el incremento final haya sedimentado, lavar cuidadosamente cualquier partícula adherida a las paredes de la probeta, completando el volumen de agua hasta la marca de 100ml. Sumergir cuidadosamente el termómetro en el agua, sin perturbar la arcilla sedimentada y registrar la temperatura de la pulpa hasta $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
- ✓ Tapar la probeta y dejarla en reposo por un periodo de 16h después de haber adicionado el último incremento. Sin embargo, cuando hayan corrido 2h, inspeccionar la hidratación del mineral arcilloso en la probeta, en búsqueda de aire atrapado o separación de agua en la columna. Si hay presencia de los mismos, inclinar suavemente la probeta a un ángulo de 45° y deslizarla lentamente hasta homogenizar la masa de mineral arcilloso sedimentado, y permitir a la probeta con el mineral arcilloso hidratado, permanecer sin perturbaciones por un periodo mínimo de 16h antes de registrar el volumen y temperatura de la masa de arcilla hidratada.
- ✓ Registrar el nivel del volumen en ml ($\pm 0.5\text{ml}$)
- ✓ Sumergir cuidadosamente el termómetro y medir la temperatura de la pulpa. Registrar la temperatura del mineral arcilloso hidratado con $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

- **DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE ACIDEZ (ASTM 11D 4972-89)**

Materiales y Reactivos

- ✓ Balanza analítica
- ✓ pH metro
- ✓ Vaso de precipitados
- ✓ Agua destilada

Procedimiento

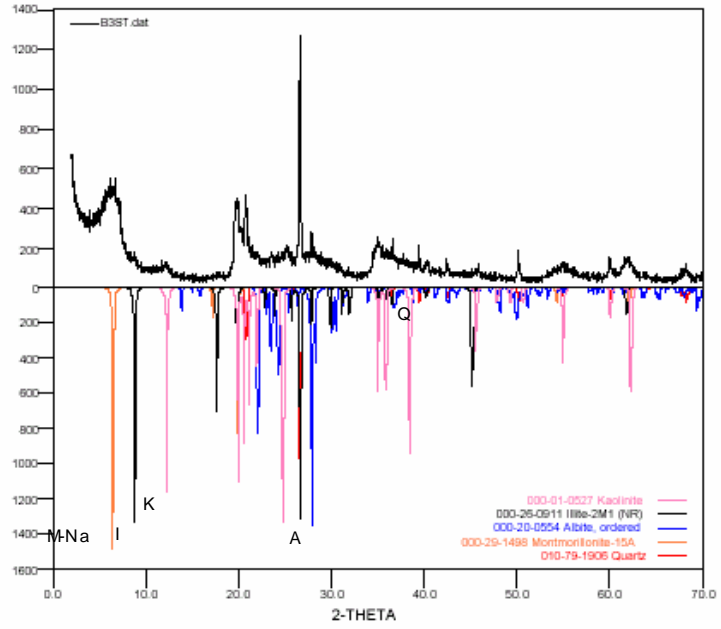
- ✓ Tomar 10g de mineral con granulometría menor a 2mm
- ✓ Llevarlo a un recipiente de vidrio adicionándole 100ml de agua destilada
- ✓ Mezclar y dejar reposar por 1h
- ✓ Leer el pH

- **CONDICIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE ÁREA BET**

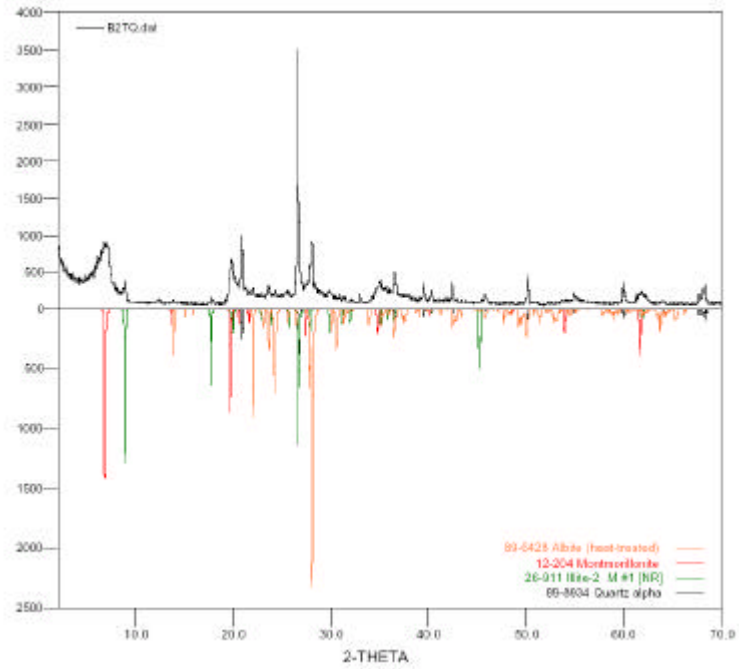
- ✓ Pesar alrededor de 0.2g de muestra
- ✓ Desgasificar por 12h a una temperatura de 120°C a Presión de vacío
- ✓ La medición se hace utilizando datos de adsorción de N₂ líquido a 77K de temperatura.
- ✓ La determinación del área se realiza por el método lineal

**ANEXO B. DIFRACTOGRAMAS DE LAS MENAS NACIONALES
RECOLECTADAS**

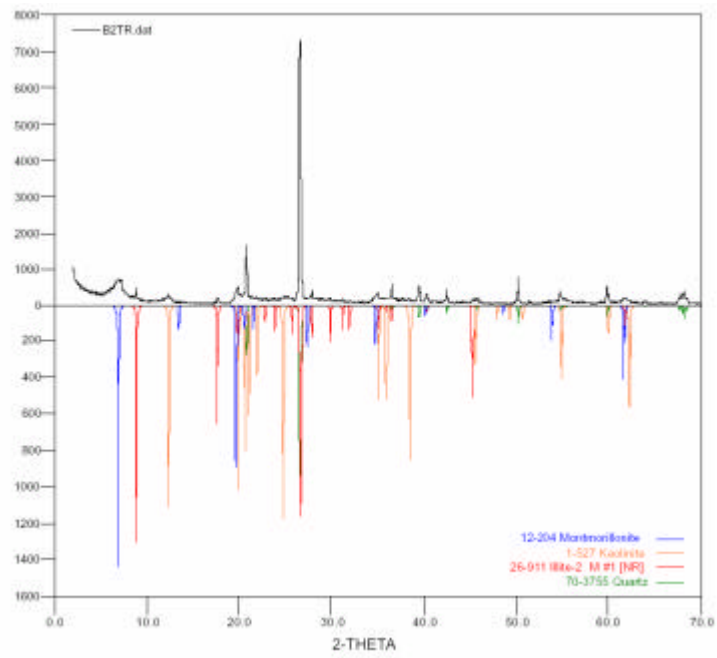
Arcicol®



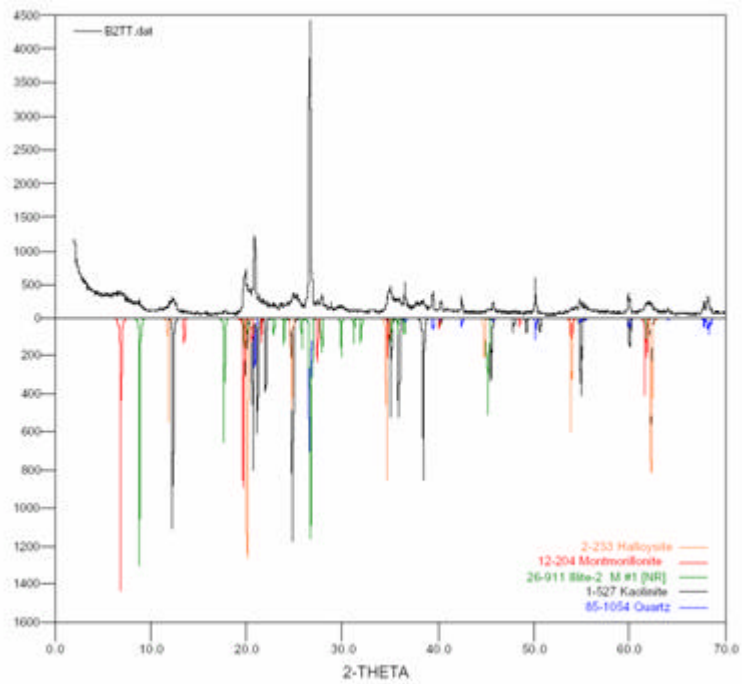
SB-1



LR-2



RR-3



**ANEXO C. COMPOSICIONES QUÍMICAS (VALORES GUÍA) DE ALGUNAS
BENTONITAS EMPLEADAS MUNDIALMENTE A ESCALA INDUSTRIAL**

COMPOSICIÓN QUÍMICA ^T	SUDAFRICA							OTROS PAÍSES							
	Bentonita Ca / Mg			Bentonita Na / Ca				Bentonita Trimex, India	Bentonita Surrey (Bentonita - Ca), UK	Mylos Activada- Ácido, Grecia	Bentonita Wyoming, BKU, USA [#]	Bentonita Wyoming, USA	Ayun Musa, Egipto	Volclay, Bentonita- Na GP ^{II}	Distrito Ozurgeti, Georgia (Rusia)
	Usos Generales [*]	Usos en [*] Perforación	Usos en Fundición [*]	Sellantes de Suelo [*]	Usos en Fundición [*]	Lodos de Perforación [*]	Decolorante de Vino & Jugo de Fruta [*]								
	A	B	C	D	E	F	G								
SiO ₂	59.1	59.1	59.1	66.8	65.9	64.9	66.0	52.0	55.2	54.2	66.0	55.6	52.5	61.0	55.1
Al ₂ O ₃	18.6	18.6	18.6	17.0	18.0	17.6	17.0	17.0	13.7	16.4	17.6	18.1	17.6	19.0	18.5
Fe ₂ O ₃	4.4	4.4	4.4	3.1	2.8	5.4	2.5	6.0	8.1	5.6	4.0	3.6	8.4	4.0	1.8
TiO ₂	na	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.1	na	0.7	na	0.2	0.1	1.2	na	0.4
CaO	1.9	1.9	1.9	0.5	0.3	0.4	1.0	1.2	6.3	4.6	1.0	1.0	2.8	2.0	1.5
MgO	4.0	4.0	4.0	3.4	4.0	2.1	3.0	na	3.3	3.4	1.8	1.9	1.5	2.0	3.3
K ₂ O	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4	1.1	0.4	0.2	0.6	0.5	0.5	0.4	1.3	na	2.7
Na ₂ O	2.5	2.5	2.5	3.0	2.6	1.6	2.5	1.5	<0.1	2.7	2.2	1.6	2.0	3.0	2.3
LOI	8.9	na	8.9	6.6	5.4	6.6	7.5	10.0	9.9	10.3	na	8.0	12.1	6.0	11.3

^I Expresión de elementos como óxidos, resultado del método estándar de análisis químico

^{*} Productos activados con Na

^{**} Bentonita grado cerámico, localidad regional desconocida

[#] BKU - Bentonita Inalterada Black Hills

^{II} GP – Bentonita -Na Granular, Procesada

Fuente: Bentonite, Pyrophyllite and Talc in the Republic of South Africa, 2004. Department Minerals and Energy, Republic of South Africa, Report R46, 2005. p. 17 (www.dme.gov.za/publications/)

