GEOLOGIA Y ECONOMIA DEL DEPOSITO DE ARCILLAS DE LADRILLERA DE LA COSTA LTDA. (MUNICIPIO DE ARIGUANÍ, DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA)

HERIBERTO COTES BRITO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2004

GEOLOGIA Y ECONOMIA DEL DEPOSITO DE ARCILLAS DE LADRILLERA DE LA COSTA LTDA. (MUNICIPIO DE ARIGUANÍ, DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA)

HERIBERTO COTES BRITO

Trabajo presentado para optar el título de Geólogo

Director
CARLOS ALBERTO RIOS REYES
Geólogo, M. Sc.

Co-Director
OSCAR MAURICIO CASTELLANOS A.
Geólogo, M. Sc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA
2004

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____
Presidente del Jurado

_____
Jurado

_____
Jurado

_____
Jurado

Bucaramanga, Marzo 2 de 2004

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Carlos Ríos Reyes y Oscar Castellanos, por su valioso apoyo y orientación durante la realización del estudio.

A la firma Ladrillera de la Costa Ltda., por permitirme realizar el estudio en su área minera.

A los funcionarios del Laboratorio de Difracción de Rayos-X, de la Escuela de Química (UIS), en especial al Doctor José A. Henao Martínez.

A Luis Garrido, funcionario del Laboratorio de Preparación de Muestras de la Escuela de Geología (UIS).

A Marta Uribe, secretaria de Coordinación de la Escuela de Geología (UIS).

A los profesores de la Escuela de Geología (UIS), que me orientaron y sentaron las bases para mi desempeño profesional.

DEDICATORIA

A Dios, dueño y señor de todos los proyectos en mi vida.

A mi madre, por su infinito apoyo y amor.

A mi esposa e hijos, quienes en todo momento me inspiran a seguir adelante.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	**16**
ABSTRACT	**17**
INTRODUCCIÓN	**18**
1. OBJETIVOS	**20**
1.1. OBJETIVO GENERAL	**20**
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	**20**
2. METODOLOGIA DE INVESTIGACIÓN	**22**
3. ESTADO DEL ARTE	**25**
3.1. ESTUDIOS PREVIOS EN EL AREA DE ESTUDIO	**25**
3.2. ESTUDIOS ACERCA DE LAS ARCILLAS	**26**
4. GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO	**28**
4.1. LOCALIZACIÓN	**28**
4.1.1. Macrolocalización	**28**
4.1.2. Microlocalización	**28**
4.2. CLIMA	**31**
4.2.1. Precipitación	**31**
4.2.2. Humedad Relativa	**32**
4.2.3. Temperatura	**32**
4.2.4. Brillo Solar	**32**
4.3. HIDROLOGIA	**33**
4.4. VEGETACIÓN	**33**
4.5. SUELOS	**33**
4.6. GEOMORFOLOGÍA	**35**
5. MARCO GEOLOGICO REGIONAL	**36**
5.1. ESTRATIGRAFIA	**38**
5.1.1. Formación Zambrano (NgZ)	**39**
5.1.2. Formación Jesús del Monte (Ngjm)	**39**

5.2. TECTONICA 41

5.3. HISTORIA GEOLÓGICA 43

5.3.1. Cretáceo tardío - Paleoceno (Cansoniense temprano) 43

5.3.2. Paleoceno - Eoceno medio (Cansoniense medio y tardío) 45

5.3.3. Orogenia - Pre-Andina (Eoceno medio) 45

5.3.4. Eoceno tardío - Oligoceno (Carmeniense temprano) 47

5.3.5. Diastrofismo Oligoceno – Mioceno 47

5.3.6. Mioceno temprano a medio (Carmeniense medio) 49

5.3.7. Mioceno tardío - Plioceno (Carmeniense tardío) 51

5.3.8. Orogenia Andina (Plio-Pleistoceno) 53

5.3.9. Pleistoceno - Holoceno (Tubariense) 55

6. PROPIEDADES Y USOS DE LAS ARCILLAS 56

6.1. TÉRMINO ARCILLA 56

6.2. ESTRUCTURA DE LOS FILOSILICATOS 58

6.3. CLASIFICACION DE LOS FILOSILICATOS 61

6.4. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS 61

6.4.1. Superficie específica 62

6.4.2. Capacidad de intercambio catiónico 63

6.4.3. Capacidad de absorción 63

6.4.4. Hidratación e hinchamiento 64

6.4.5. Plasticidad 65

6.4.6. Tixotropía 65

6.5. ARCILLAS INDUSTRIALES 66

6.5.1. Caolines y arcillas caoliníferas 66

6.5.2. Bentonitas 68

6.5.3. Paligorskita-Sepiolita 68

6.5.4. Otros tipos de arcillas especiales 69

6.6. EXTRACCIÓN Y PROCESAMIENTO INDUSTRIAL **69**
6.7. APLICACIONES INDUSTRIALES **70**
6.7.1. Arcillas comunes **70**
6.7.2. Caolín **70**
6.7.3. Bentonitas **71**
6.8. FABRICACION DE PRODUCTOS CERÁMICOS **78**
7. GEOLOGÍA DEL DEPOSITO DE ARCILLAS DE LA LADRILLERA DE LA COSTA LTDA. **80**
7.1. ESTRATIGRAFÍA **80**
7.1.1. Unidad AREN-1 **81**
7.1.2. Unidad ARC-1 **81**
7.1.3. Unidad AREN-2 **82**
7.1.4. Unidad ARC-2 **83**
7.1.5. Unidad AREN-3 **83**
7.2. ORIGEN DEL DEPOSITO DE ARCILLAS DE LADRILLERA DE LA COSTA LTDA. **88**
7.2. RASGOS ESTRUCTURALES **91**
8. CARACTERIZACION FISICOQUIMICA Y FISICOMECANICA DE LAS ARCILLAS **92**
8.1. ANALISIS DE DIFRACCION DE RAYOS X **92**
8.1.1. Técnica de preparación de muestras arcillosas para su estudio mediante difracción de rayos-X. **92**
8.1.2. Resultados **99**
8.2. LIMITES DE CONSISTENCIA O DE ATTERBERG **105**
8.2.1. Límite Plástico Superior (Límite Líquido) **105**
8.2.2. Límite Plástico Inferior (Límite Plástico) **107**
8.2.3. Índice de Plasticidad **108**
8.2.4. El diagrama de Casagrande **109**
8.2.5. Resultados **112**

9. GEOLOGIA ECONOMICA **119**
9.1. RESERVAS DE ARCILLOLITAS **119**
9.1.1. Criterios y Parámetros de Evaluación **119**
9.2. SISTEMA DE EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO **123**
9.2.1. Descapote **131**
9.2.2. Arranque y cargue **131**
9.2.3. Homogenización **131**
9.2.4. Secado, molturación, moldeo y quemado **132**
9.2.5. Clasificación, embalaje y despacho **132**
9.3. IMPACTO AMBIENTAL **133**
9.3.1. Área de explotación **133**
9.3.2. Patio de acopio y beneficio **134**
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **135**
BIBLIOGRAFÍA **142**

LISTADO DE TABLAS

Pág

Tabla 1. Producción nacional de productos fabricados a partir de arcillas. 19

Tabla 2. Estaciones meteorológicas consultadas en la climatología del área de estudio. 31

Tabla 3. Ejemplos de reacciones de intemperismo típicas que dan lugar a arcillas. 57

Tabla 4. Clasificación de los filosilicatos. 61

Tabla 5. Resultados de análisis por difracción de Rayos X de las muestras de arcillolitas del depósito de arcillas de la Ladrillera de La Costa Ltda. 100

Tabla 6. Resultados de Límites de Atterberg. 115

Tabla 7. Puntos de control litoestratigráfico en la Ladrillera de La Costa Ltda. 121

LISTADO DE FIGURAS

Pág

Figura 1. Macrolocalización geográfica de Ladrillera de La Costa Ltda. 29

Figura 2. Microlocalización del área de estudio (Ladrillera de La Costa Ltda.) en el departamento del Magdalena. 30

Figura 3. Zona de Vida, bosque seco tropical (bs-T) en el departamento del Magdalena. 34

Figura 4. Marco tectónico del nor-occidente de Colombia y del Caribe. 37

Figura 5. Secuencia estratigráfica generalizada del nor-occidente de Colombia. 38

Figura 6. Cartografía geológica a escala 1:300.000 de la región de Ariguaní - Pueblo Nuevo (departamento del Magdalena). 40

Figura 7. Características tectónicas y del basamento del Alto de El Difícil. 42

Figura 8. Paleogeografía del nor-occidente de Colombia entre el Cretaceo tardío y el Paleoceno (Cansoniense temprano). 44

Figura 9. Paleogeografía del noroccidente de Colombia inmediatamente después de la Orogenia Pre-Andina (Eoceno medio). 46

Figura 10. Paleogeografía del noroccidente de Colombia durante el Eoceno tardío - Oligoceno (Carmeniense temprano). 48

Figura 11. Paleogeografía del noroccidente de Colombia durante el Mioceno temprano - Mioceno medio (Carmeniense medio). 50

Figura 12. Paleogeografía del noroccidente de Colombia durante el Mioceno tardío - Plioceno (Carmeniense tardío). 52

Figura 13. Paleogeografía del noroccidente de Colombia inmediatamente después de la Orogenia Andina (Plioceno-Pleistoceno). 54

Figura 14. Capas tetraédricas en la estructura de los filosilicatos. 59

Figura 15. Estructura de la Paligorskita y la Sepiolita con hábito fibroso. 60

Figura 16. Columna Estratigráfica No. 3 de la Unidad AREN-1, Ladrillera

de La Costa Ltda. 85
Figura 17. Columna Estratigráfica No. 1 de las Unidades AREN-2 y ARC-1, Ladrillera de La Costa Ltda. 86
Figura 18. Columna Estratigráfica No. 2 de las Unidades AREN-3, AREN-2 y ARC-2, Ladrillera de La Costa Ltda. 87
Figura 19. Diagrama de flujo mostrando el proceso de preparación de las muestras para análisis de difracción de rayos-X. 98
Figuras 20, 21, 22 y 23. Resultados de DRX. 102, 103
Figura 24. Límite Plástico Superior. 105
Figura 25. El diagrama de Casagrande. 110
Figura 26. Zonas que corresponden a los diferentes tipos mineralógicos, según Casagrande. 111
Figura 27. LL para la Muestra 1. Arcillolita Gris. Unidad ARC-1B. 113
Figura 28. LL para la Muestra 2. Arcillolita Gris. Unidad ARC-1B. 114
Figura 29. Muestra 3. Mezcla de arcillolita gris (50%) y parda (50%). 114
Figura 30. Resultados obtenidos de ensayos de Atterberg sobre muestras de arcillolitas de la Ladrillera de La Costa Ltda. 117
Figura 31. Clasificación de arcillas de la Ladrillera de La Costa Ltda., según Casagrande en función de los límites de Atterberg. 118
Figura 32. Proceso de explotación y beneficio en la Ladrillera de La Costa Ltda. 124
Figura 33. Diagrama de flujo del proceso de explotación y beneficio en la Ladrillera de La Costa Ltda. 130

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1. Mapa Geológico.

Anexo 2. Columna Litoestratigráfica Generalizada.

RESUMEN

TITULO: GEOLOGIA Y ECONOMIA DEL DEPOSITO DE ARCILLAS DE LADRILLERA DE LA COSTA LTDA. (MUNICIPIO DE ARIGUANÍ, DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA)[*].

AUTORES: HERIBERTO COTES BRITO[**].

Palabras Clave: Alto de El Difícil, Formación Jesús del Monte (Ngjm), límites de Atterberg, difracción de rayos X, arcillas caoliníticas, arcillas illíticas.

El depósito de arcillas en explotación por la firma Ladrillera de la Costa Ltda., en el Municipio de Ariguaní, Departamento del Magdalena, está localizado, según la geología regional, en el Alto de El Difícil, y localmente en la Formación Jesús del Monte (Ngjm) de edad Mioceno a Plioceno. La secuencia litoestratigráfica de este depósito está dividida en tres sub-unidades: ARC-1A (Arcillolita parda), ARC-1B (Arcillolita gris), y ARC-1C (Arcillolita parda), las cuales constituyen la materia prima para la fabricación de ladrillos y vitrificados.

Por medio del presente estudio, en el cual se realizaron ensayos de límites de Atterberg y análisis de difracción de rayos-X, principalmente, se encontró que las arcillolitas pardas son illíticas o micáceas y las arcillolitas grises son caoliníticas de mediana plasticidad, aceptables desde el punto de moldeo y secado, según el diagrama de Casagrande, y que poseen minerales tales como pirita y sulfatos que pueden generar fenómenos de eflorescencias, indeseables en la manufactura de los vitrificados. Las fases cristalinas encontradas en las muestras sometidas al análisis de difracción de rayos-X, sugieren una misma fuente de sedimentos, que en este caso probablemente hallan sido las formaciones de rocas ígneas intrusivas ácidas (Batolito Central, Batolito Bolívar, etc.) y volcánicas (Ignimbrita de Los Tábanos, Riodacita de La Piña, etc.), y las metamórficas (Neis de Buritaca, Esquisto de Gaira, etc.) aflorantes en el flanco occidental del Macizo Sierra Nevada de Santa Marta.

Las reservas medidas de estas arcillolitas, en el área concedida por el Ministerio de Minas y Energía a la Ladrillera de La Costa Ltda., ascienden a 666700.30 m^3 para la Sub-unidad ARC-1A; 74030.30 m^3 para la Sub-unidad ARC-1B; y 192775.21 m^3 para la Sub-unidad ARC-1C.

[*] Proyecto de Grado modalidad Investigación.

[**] Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director Carlos Alberto Ríos R.

ABSTRACT

TITLE: GEOLOGY AND ECONOMY OF THE CLAY DEPOSIT OF THE LADRILLERA DE LA COSTA LTDA. (MUNICIPALITY OF ARIGUANÍ, DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA)[*].

AUTHORS: HERIBERTO COTES BRITO[**].

Key Words: Alto de El Difícil, Jesús del Monte Formation (Ngjm), limits of Atterberg, X-ray diffraction, caolinitc clays, illitic clays.

The deposit of clays in exploitation by the Ladrillera de La Costa Ltda. company, in the Municipality of Ariguaní, Department of Magdalena, is located, according to the regional geology, in the Alto de El Difícil, and locally in the Jesús del Monte Formation (Ngjm) of Miocene to Pliocene age. The lithoestratigraphic sequence of this deposit is divided into three sub-units: ARC-1A (brown shales), ARC-1B (gray shales), and ARC-1C (brown shales), which constitute the raw material for the production of bricks and vitrificates.

By means of the present study, in which were carried out tests of limits of Atterberg and analysis of X-ray diffraction, mainly, it was determined the brown shales are illitic or micaceous clays and the gray shales are caolinitic clays of medium plasticity, acceptable from the point of view of molding and drying, according to the diagram of Casagrande, and that they contain minerals such as pyrite and sulfates that can generate eflorescence phenomena, undesirable in the factory of the vitrificates. The crystalline phases found in the samples subjected to the analysis of X-ray diffraction suggest the same source of sediments, that in this case probably were the formations of acidic intrusive (Central Batholith, Bolívar Batholith, etc.) and volcanic (Los Tabanos Ignimbrite, La Piña Riodacite, etc.) igneous rocks, and the metamorphic rocks (Buritaca Gneiss, Gaira Schist, etc.), that crop out in the western flank of the Sierra Nevada de Santa Marta Massif.

The measured reserves of these shales, in the area granted by the Ministry of Mines and Energy to the Ladrillera de La Costa Ltda., reach up to 666700.30 m^3 for the Sub-unit ARC-1A, 74030.30 m^3 for the Sub-unit ARC-1B, and 192775.21 m^3 for the Sub-unit ARC-1C.

[*] Proyecto de Grado modalidad Investigación.

[**] Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director Carlos Alberto Ríos R.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio se enmarca en el campo de la Mineralogía Aplicada, específicamente con respecto a Rocas y Minerales industriales, y consiste en la caracterización geológica y mineralógica del depósito de arcillas explotado actualmente por la firma Ladrillera de La Costa Ltda., en el corregimiento de Pueblo Nuevo, municipio de Ariguaní, departamento del Magdalena, de acuerdo a la Licencia de Explotación No. 20253 otorgada por el Ministerio de Minas. La explotación de arcillas en este depósito se ha realizado tradicionalmente sin previo estudio geológico y mineralógico detallado, de tal manera que por años las arcillolitas pardas y grises aflorantes se habían convertido en la materia prima para la fabricación de vitrificados, pero simplemente por conocimiento empírico.

Las arcillas son unas rocas ligadas históricamente al ser humano en la Industria. En la actualidad, esta materia prima industrial está entre los recursos minerales más importantes por volumen explotado y por el valor de la producción.

Colombia exporta alrededor de US$ 214.7 millones de materiales de construcción de los cuales el 30.4% (US$ 65.260 millones) corresponden a la venta de productos manufacturados con arcilla. Según las recientes cifras de PROEXPORT, en Colombia se producen 376.947 toneladas mensuales de ladrillo, es decir 4.523.367 al año. El país cuenta con un total de 1.924 unidades productoras de ladrillo, de las cuales solo el 88%, es decir 1.694 se encuentran en operación; 2% (34) están liquidadas y 10.2% (96) están cerradas temporalmente. Lo anterior es una muestra de la amplia capacidad instalada que tiene Colombia para producir ladrillo de muy alta calidad (Calderón, 2003). En la Tabla 1 dada a continuación, se muestra la producción de productos manufacturados a partir de arcillas, en las distintas regiones de Colombia.

DEPARTAMENTO	% PARTICIPACION	PRODUCCIÓN TON/MES	($) MILLONES MENSUALES
Bogota (1)	49	184.704	15.500
Norte de Santander (2)	14.3	53.903	4.514
Antioquia (4)	9.5	35.809	3.014
Valle del Cauca (5)	7.8	29.401	2.458
Eje Cafetero (6)	7.1	26.763	2.233
Otros (3)	12.3	46.364	3.924

Tabla 1. Producción nacional de productos fabricados a partir de arcillas (tomado de Calderón, 2003).

Sin embargo, se está utilizando solo el 53.4% de esta capacidad, lo cual indica que es vital realizar acciones de diversa índole que permitan dinamizar la industria y jalonar nuevos negocios. Por lo tanto, no solo se debe pensar en vender localmente los productos sino aprovechar las oportunidades a nivel arancelario y la preferencia comercial que pueda existir por los productos colombianos en el exterior. Según datos reportados por el Departamento de Mercadeo de Corferias durante la ultima Feria Internacional de Expoconstrucción y Expodiseño, donde participaron 213 empresas nacionales y extranjeras de reconocida trayectoria en el sector de la construcción y el diseño, el 90% de los expositores hizo contactos comerciales importantes y negocios inmediatos y de cada 100 personas que ingresó al recinto 20 realizaron negocios. A dicha feria llegaron 30 compradores internacionales procedentes de Centroamérica, el Caribe, México, Suramérica y Estados Unidos con la intención de comprar tejas, cerámicas y pisos, entre otros por la calidad de estos productos colombianos. (PROEXPORT, en Calderón, 2003).

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar una caracterización geológica, fisicoquímica y fisicomecánica del depósito de arcillas explotado actualmente por la firma Ladrillera de La Costa Ltda., en el municipio de Ariguaní, departamento del Magdalena, considerando que en la actualidad esta materia prima industrial está entre los recursos minerales más importantes por volumen explotado y por el valor de la producción en nuestro país.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar una cartografía geológica a escala 1:1000 o mayor del depósito de arcillas de Ladrillera de La Costa Ltda.

- Levantar columnas litoestratigráficas a escala 1:100 de las unidades aflorantes en el área de estudio, identificando las unidades de arcillas económicamente explotables.

- Llevar a cabo una caracterización fisicoquímica y fisicomecánica de las arcillas a partir de análisis de difracción de rayos-X, límites de Atterberg, entre otros.

- Calcular las reservas de arcillas óptimas para la fabricación de vitrificados, y económicamente explotables en el área concedida por el Ministerio de Minas a Ladrillera de La Costa Ltda., según Licencia de Explotación No. 20253.

- Contribuir con el conocimiento de la geología de la región y su aplicabilidad en el planeamiento del desarrollo del municipio de Ariguaní.

- Promover la interacción y mutua colaboración entre la Escuela de Geología y las empresas del sector interesadas en el conocimiento y las aplicaciones industriales de las arcillas.

2. METODOLOGIA DE INVESTIGACION

La metodología usada en el presente estudio incluye análisis de la información bibliográfica, selección de muestras del depósito de arcillas para su caracterización fisicoquímica y fisicomecánica, análisis de DRX y ensayos para establecer los límites de Atterberg, procesamiento de los datos analíticos generados, entre otros aspectos. Cada uno de estos aspectos se describe a continuación.

Para el desarrollo del presente estudio se contempló la planificación y ejecución de las fases dadas a continuación.

Etapa 1: Recopilación y revisión de la información bibliográfica relacionada con la geología regional y local, mineralogía y aplicaciones industriales de las arcillas, tipos de ensayos y análisis de laboratorio para su caracterización. La recopilación de la información se realizó en la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, en diferentes centros de información, en páginas de Internet, haciéndose una revisión de dicha información con el fin de establecer los criterios de detalle que orientarán el trabajo de campo y experimental.

Etapa 2: Trabajo de campo, el cual permitió la cartografía a escala 1:1000 del área de estudio, a partir del desarrollo de transversas de manera perpendicular a la dirección de la estratificación de la roca expuesta, logrando de esta manera un reconocimiento geológico del área de estudio y de las unidades aflorantes en ésta y su relación con la topografía del lugar. Esto permitió igualmente la recolección de muestras representativas de las unidades aflorantes, especialmente aquellas que están siendo explotadas como materia prima en la fabricación de vitrificados.

Etapa 3: Levantamiento de columnas estratigráficas a escala 1:100, en puntos de control como frentes de explotación, apiques, trincheras, afloramientos. Igualmente, en estos puntos de control se tomaron datos de rumbo y buzamiento de las unidades aflorantes. Cartografía geológica preliminar a escala 1:1000. Para este proceso se siguieron los siguientes parámetros: (1) Localización del punto de referencia. En esta caso se tiene como punto de referencia la planta de procesamiento de la Ladrillera de La Costa Ltda. A partir de este punto se midieron las distancias hasta los puntos de control (donde se levantaron las columnas). (2) División de la columna. Debido a la presencia de sedimento inconsolidado, éste se removió de la sobrecarga de material erosivo de la superficie para exponer la estratificación original. (3) Medida de las capas. Una vez se distinguieron las principales capas, se midieron sus espesores. (4) Descripción de la litología. Cada tipo de litología se indicó de acuerdo a las convenciones estándar para la construcción de una columna estratigráfica. (5) Tamaño de grano. Se indico dentro de la columna igualmente con marcas la ocurrencia de lodo o arena de grano fino, medio o grueso. (6) Registro de estructuras sedimentarias. Se registro si la estratificación es horizontal o está buzando, si el sedimento estaba sorteado o no, si éste presentaba gradación o no. Igualmente se registró cualquier rasgo estructural (pliegues o fallas). (7) Recolección de muestras. Se recolectaron muestras de los diferentes niveles de las columnas estratigráficas levantadas, con el fin de realizar el análisis granulométrico a partir de tamizado de las mismas, las cuales se etiquetaron de manera clara e imborrable, indicando la capa de la cual ésta se tomó. (8) Fotografía. Se tomaron fotografías en cada punto de control, así como una breve descripción de las mismas.

Etapa 4: Preparación de las muestras con el fin de dividirlas en varias porciones para la realización de ensayos y análisis por diferentes métodos. Esto se llevó a cabo en el Laboratorio de preparación de muestras de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander.

Etapa 5: Caracterización mineralógica y tecnológica de las arcillas aflorantes y explotadas, mediante difracción de rayos-X y límites de Atterberg, respectivamente. Los análisis de difracción de rayos-X se llevaron a cabo en el Laboratorio de Química Estructural de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, usando un difractómetro, marca RIGAKU, modelo D-MAX-IIIB, bajo las siguientes condiciones analíticas: Voltaje: 40(kV); Corriente: 20(mA); Rendijas (Slits) DS 1.0°: RS 0.3 mm y SS 1.0°; Velocidad de Barrido: 3°/min; Muestreo: 0.02°; Rango de Medición: 2-70°; Radiación: CuKα; Monocromador: Grafito. Por otra parte, se utilizó la Base de Datos Cristalográfica: Powder Diffraction File (PDF-2) del Internacional Center for Diffraction Data (ICDD), Sets 1-51. Estos análisis contaron con la colaboración del doctor Antonio Henao. Los los ensayos para la determinación de los límites de Atterberg se realizaron en el laboratorio de preparación de muestras de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, con la colaboración del señor Luis Eduardo Garrido P.

Etapa 6: Cálculo de reservas del depósito de arcillas materia prima para la fabricación de vitrificados en Ladrillera de La Costa Ltda.

Etapa 7: Análisis e interpretación de los resultados obtenidos y discusión de los mismos.

Etapa 8: Elaboración y presentación del informe final para su evaluación, el cual incluye texto, Mapa Geológico a escala 1:1000, cortes geológicos a escala 1:100 perpendiculares al rumbo de las estructuras, columnas litoestratigráficas a escala 1:100, resultados de ensayos y análisis de laboratorio, y cálculo de reservas de arcillolitas económicamente explotables en el área.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. ESTUDIOS PREVIOS EN EL AREA DE ESTUDIO

Entre los estudios realizados respecto a la geología en esta zona de la esquina nor-occidental de Colombia se destacan los efectuados por: Durán (1964), Zimerlé (1968), Shepard et al. (1968), Krause (1971), Shepard (1973), Case (1974), y principalmente Duque Caro (1973, 1975, 1978), quien en sus estudios describe e interrelaciona las características estructurales y sedimentarias más distintivas tanto de las áreas costeras como de las submarinas, en un intento por definir más claramente la evolución geológica de esta esquina sur-occidental del Caribe. Estudios en la sub-cuenca de Plato han sido realizados por compañías petroleras como ECOPETROL, AQUITAINE y GEOCOLOMBIA, desde los 60s, algunos de los cuales llevados a cabo por tesistas de la UIS (y que reposan en la BIBLUIS), se enfocaron hacia la investigación geofísica en el Alto de El Difícil, arrojando como resultado la confirmación de la presencia de estratos no plegados que reposan sobre un basamento cristalino.

Recientemente, Clavijo, J., Garnica, M., y Royero, J. (2002), realizaron la Geología del Departamento del Magdalena a Escala 1:300.000, bajo el patrocinio de INGEOMINAS (Bucaramanga), en la cual definieron las unidades litoestratigráficas aflorantes y la tectónica en el sector de el Alto de El Difícil, así:

Formación Zambrano (NgZ): Consiste de capas medias a gruesas de arenitas bioclásticas a bioesparíticas, cuarzosas, arcillosas y areniscas calcáreas, con abundantes clastos de moluscos, interestratificadas con lodolitas calcáreas bioclásticas. Edad Plioceno.

Formación Jesús del Monte (Ngjm): Consiste de capas gruesas a muy gruesas de lodolitas de color gris a verde oliva, interestratificadas con capas medianas a finas de areniscas líticas. Edad mioceno.

3.2. ESTUDIOS ACERCA DE LAS ARCILLAS

Las arcillas están presentes en casi todos las rocas sedimentarias, de manera que debido al proceso de sedimentación natural se hallan "contaminadas" por sustancias inorgánicas que las tiñen, entre estas la Pirita FeS_2, Rutilo TiO_2.
Una vez separados estos minerales de la materia arcillosa, siempre queda una pequeña porción de óxidos extraños, se trata del sílice libre, de los metales alcalinos CaMg en forma de sales absorbidas y minerales de grano muy fino, así como algunas impurezas de origen orgánico. De esta forma de acuerdo con las posibilidades del empleo, las arcillas pueden clasificarse en cuatro grandes grupos (González Garza, 1990):

- Para la fabricación de porcelana sólo pueden tomarse en cuenta los caolines, pues solo estos proporcionan el deseado color blanco de cocción.
- Para productos refractarios solo se emplean arcillas plásticas de cocción clara, y que contienen hasta un 6% de óxidos como K_2O, Na_2O, MgO, Fe_2O_3.
- Para productos de gres deben utilizarse arcillas a temperaturas entre 1100 y 1300°C y que formen un cocido casi impermeable.
- Las arcillas para la fabricación de ladrillos deben presentar una gran proporción de fundente fierro.

La consulta y análisis de la información recopilada ha permitido establecer que en el estudio de las arcillas se combinan ensayos físicos y químicos, partiendo de una inspección visual y de textura, un tamizado y un ensayo de plasticidad en crudo, mezclando agua gradualmente por amasado a mano con la arcilla pulverizada y haciendo una estimación de la plasticidad, así, pobre, mediana, buena y excepcional.

González Garza, 1990, divide los ensayos para caracterización de arcillas en químicos y físicos. En sus trabajos describe como el análisis químico en arcillas

conocidas sirve como una comprobación de la uniformidad. Tratándose de nuevos depósitos de arcillas, estos ensayos pueden dar ideas cualitativas acerca de lo que puede esperarse. También resalta, que entre los métodos más importantes para la identificación y estimación de minerales de la arcilla se cuentan: la Difracción de Rayos X, el Microscopio Electrónico, la Difracción de Electrones, la Espectroscopía de Infrarrojo y de Microondas, y el Análisis Térmico Diferencial.

Entre los ensayos físicos, González Garza, 1990, describe como los de mayor aplicación: Determinación de Contenido de Humedad, Determinación de Densidad Relativa, Comportamiento de Fusión, Determinación de Tamaño de Grano.

Benavides, 1992, señala en sus estudios sobre arcillas, como la difracción de los rayos X es una técnica fundamental para el estudio de estos minerales, y de que para una buena caracterización mineralógica de las arcillas, es la correlación de más de una técnica, en lo posible.

Salmang H., 1954, en sus publicaciones encaminadas hacia la química y física de las arcillas, realiza importantes análisis sobre el origen de las impurezas en las arcillas y los fenómenos indeseados (p.e., eflorescencias) que estas ocasionan sobre las piezas de cerámica y vitrificados durante el proceso de cocción.

Camacho y Camargo, 1986, en sus estudios sobre mezclas de arcillas de Norte de Santander, realizan anotaciones claras y detalladas sobre el comportamiento y significado de la plasticidad, determinada a partir del ensayo de Limites de Atterberg, y el uso efectivo de los Diagramas de Casagrande.

Investigadores como Szu-Bin B. Lin y Y.R. Wang, 2001, describen la relación entre los politipos minerales hallados mediante Difracción de Rayos X y las posibles fuentes de proveniencia de los minerales de arcilla encontrados en depósitos sedimentarios en la Peninsula de Hengchun, China.

4. GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO

4.1. LOCALIZACIÓN

4.1.1. Macrolocalización

El área de estudio (Ladrillera de La Costa Ltda.), se halla ubicada en el sector centro-oriental del departamento del Magdalena, en la región caribe de la República de Colombia (Figura 1). Su posición estratégica le permite la comunicación rápida por vía terrestre con los departamentos de la Guajira, Cesar, Bolívar y Atlántico.

4.1.2. Microlocalización

El depósito de arcillas explotado actualmente por la firma Ladrillera de La Costa Ltda., y objeto del presente estudio, se encuentra en jurisdicción del Corregimiento de Pueblo Nuevo, Municipio de Ariguaní, Departamento del Magdalena (Figura 2). Se accede a él, desde el interior del país, tomando la carretera Troncal de Oriente (vía a La Costa) hasta el casco urbano del municipio de Bosconia, desde allí se toma la vía Bosconia-Plato (al occidente) hasta el kilómetro 25 (núcleo corregimental de Pueblo Nuevo), por último desde este punto se toma un carreteable que se desprende en dirección norte, hasta unos 300 m aproximadamente.

Figura 1. Microlocalización geográfica de Ladrillera de la Costa Ltda.

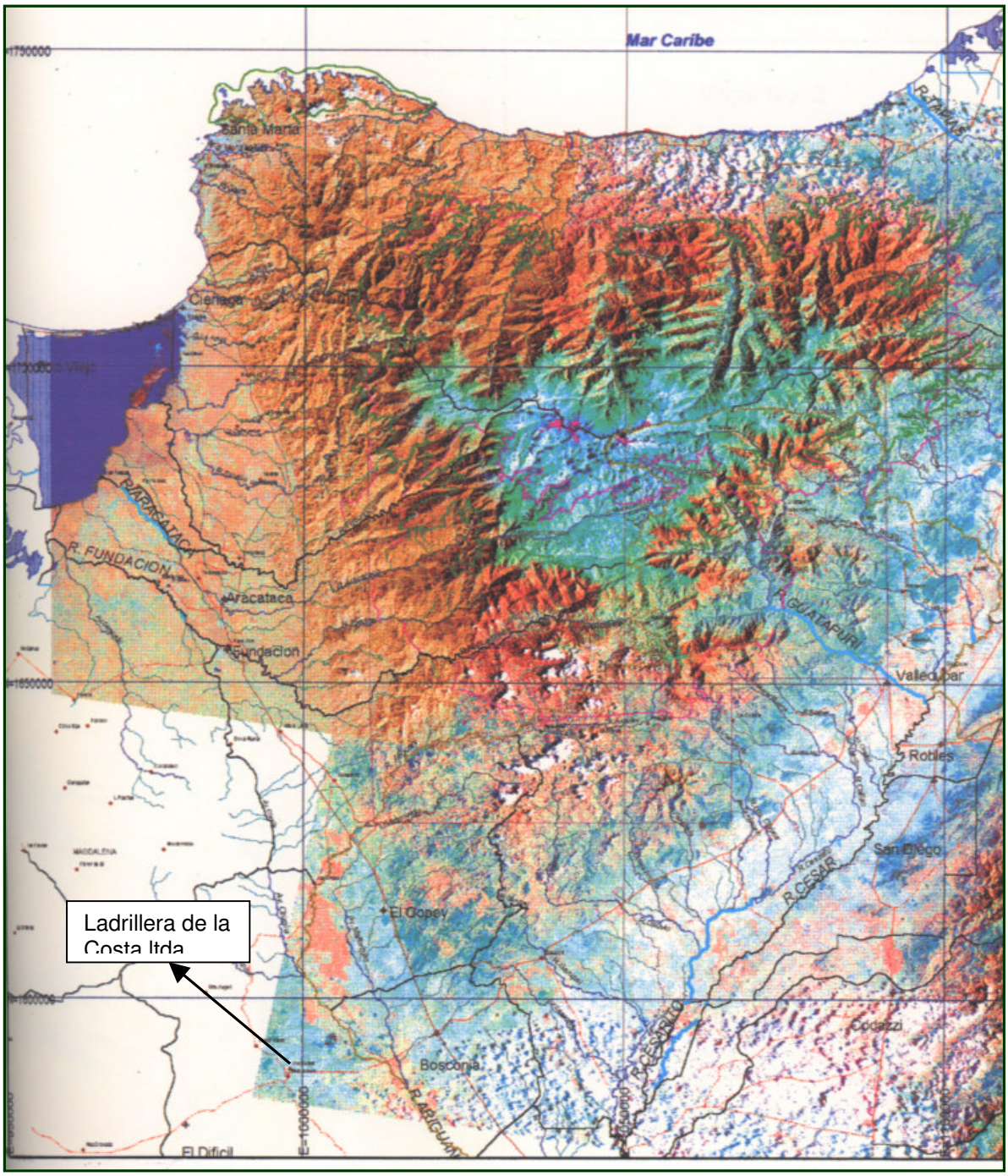


Figura 2. Microlocalización del área de estudio (Ladrillera de la Costa Ltda.) en el departamento del Magdalena. (Mosaico geocorregido de composiciones falso color de las bandas 4, 5 y 3 del satélite Landsat TM. Tomado de Fundación Prosierra Nevada de Santa Marta-Colombia, 1997).

4.2. CLIMA

De acuerdo con Koeppen (en IGAC, 1978), el área de estudio se halla dentro de la zona con el tipo de clima Bsw“h”, el cual corresponde a un clima de estepa muy caliente con vegetación xerofíticas y lluvias cenitales. Las principales características climatológicas del área de estudio se han definido según registros de estaciones meteorológicas durante el periodo de tiempo comprendido entre 1984 y 2000 (Tabla 2).

ESTACIÓN	PARAMETRO	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD	M.N.S.M.
Campo Difícil	Precipitación	Plato	0952N	7436W	0085
Media Luna	Temperatura	Pivijay	1031N	7431W	0020
Media Luna	Humedad Relativa	Pivijay	1031N	7431W	0020
Las Flores	Brillo Solar	El Banco	0900N	7558W	0034

Tabla 2. Estaciones meteorológicas consultadas en la climatología del área de estudio (Adaptado de PBOT-Mpio. de Ariguaní, 2000).

4.2.1. Precipitación

El régimen de lluvias en esta parte del municipio de Ariguaní es bimodal, es decir, se presentan dos épocas de lluvias, la primera de abril a mayo, y la segunda de octubre a noviembre; un periodo seco muy marcado entre diciembre y marzo y uno menos intenso entre julio y septiembre. Para el periodo comprendido entre 1994 y 2000, la precipitación media anual fue de 1272 mm/anual, presentándose un decremento de 950 y 935 mm/anuales en 1997 y 1998 respectivamente, teniendo en cuenta que para el año 1996 se registraron 1679 mm. Las máximas precipitaciones se registraron en 1996, con valores de 310 mm en el mes de octubre y 300 mm en el mes de mayo, valores de en el año de 1998 disminuyeron considerablemente, registrándose 170 mm, valor máximo en octubre y 145 en septiembre. Los valores mínimos mensuales se presentaron en diciembre y enero con precipitaciones entre 10 y 30 mm.(PBOT-Mpio. de Ariguaní, 2000).

4.2.2. Humedad Relativa

En el municipio de Ariguaní, los valores más altos de humedad relativa se presentan en junio, octubre y noviembre con valores de 82 y 85% respectivamente. El valor promedio para el municipio es de 81% Los mínimos valores se registran en el mes de marzo con promedios de 78%. De acuerdo con los registros, los meses con temperaturas más altas, presentan una humedad relativas más baja.

4.2.3. Temperatura

La temperatura máxima promedio anual es de 37°C. Los valores más altos se presentan en los meses de febrero, marzo y abril. La temperatura media en el municipio es de 28.3°C. El valor promedio anual de la temperatura mínima es de 19.3°C. Las temperaturas más bajas se presentan en el mes de marzo con 18.4°C. (PBOT-Mpio. de Ariguaní, 2000).

4.2.4. Brillo Solar

El periodo de mayor iluminación, según los registros de la estación Media Luna va de noviembre hasta febrero, con el mayor valor en el mes de febrero (269 h/m). El periodo de disminución de la intensidad de la iluminación comprende desde abril hasta julio, y de septiembre a octubre, con el mínimo valor en el mes de mayo (170h/m). El valor promedio se considera alto, con 2441 horas/anual. (PBOT-Mpio. de Ariguaní, 2000).

4.3. HIDROLOGIA

El municipio de Ariguaní se haya atravesado por numerosos cauces intermitentes, siendo el relieve el factor determinante en la dirección de éstos, pero en su mayoría son tributarios de la cuenca del río Ariguaní y de la cuenca del río Magdalena, ya que los arroyos confluyen en otros que drenan a la ciénaga de Playa Afuera y ésta a su vez al río Magdalena. El río Ariguaní nace en el departamento del Cesar, en la cuchilla Yoneicaraugaca, a 3000 m.s.n.m., desciende por estrechos valles, y cuando llega a la zona plana describe una curva que sirve de límite natural a los departamentos del Cesar y Magdalena, siguiendo su curso natural sobre las ricas llanuras de San Pedro hasta desembocar en la Ciénaga de El Paso y ésta a su vez al río Cesar (Figura 2).

Localmente, en el área de estudio corren varios drenajes efímeros, los cuales sólo poseen agua en épocas de lluvias, este es el caso del Caño o Canal Jericó que corriendo de sur a norte divide el predio de la Ladrillera de La Costa (Véase Anexo 1, Mapa Geológico).

4.4. VEGETACION

De acuerdo con la clasificación propuesta por Holldridge (en IGAC, 1978), el área de estudio se encuentra en la zona de Bosque Seco Tropical (bs-T) (Figura 3). La vegetación se haya representada por especies como Aromo, Trupillo, Lumbre, Guacamayo, Santa Cruz, Zarza, Tuno, Topa Botijo, entre otras.

4.5. SUELOS

Según IGAC (1978), el horizonte edáfico del área de estudio corresponde de acuerdo a su aptitud agrológica a la Clase VII (Asociación Difícil). Estos suelos

tienen horizontes salinos y cristales de yeso en el subsuelo y substrato. Algunos suelos presentan horizontes salino-sódicos. Debido al relieve, éstos son susceptibles a la erosión. Muchos sectores ya han perdido la parte superior del perfil y en otros afloran los materiales parentales (arcillolitas, limolitas, etc). Las pendientes varían entre 12 y 50%. Son de textura moderadamente fina a fina. Los horizontes superficiales tienen colores oscuros sobre pardo fuerte o rojo amarillento.

Figura 3. Zona de Vida, bosque seco tropical (bs-T) en el departamento del Magdalena (Adaptado de IGAC, 1978)

4.6. GEOMORFOLOGÍA

El área de estudio se caracteriza por presentar un paisaje de lomerío adyacente a una llanura aluvial cubierta por sedimentos arrastrados por los ríos desde la Sierra Nevada de Santa Marta y los canales y caños tributarios de la cuenca del río Magdalena. En este aspecto, se caracteriza por dos sectores de lomas (con una altura máxima de 57 m.s.n.m.), uno oriental y otro occidental, y en el centro una zona relativamente plana (con una altura de 34 m.s.n.m.) cubierta por sedimentos depositados por el caño Jericó. El proceso morfodinámico predominante es la erosión pluvial.

5. MARCO GEOLOGICO REGIONAL

El depósito de arcillas actualmente en explotación por parte de la Ladrillera de La Costa está ubicado en el Alto de El Difícil, definido así por Duque-Caro en sus publicaciones de los años 1973, 1975 y 1978. Duque-Caro (1978), agrupa los rasgos topográficos de la costa caribe en el nor-occidente de Colombia en dos elementos geotectónicos principales: una región estable o de plataforma que suprayace a una corteza continental (no plegada), y una región geosinclinal que suprayace a una corteza oceánica (plegada).

La región estable o de plataforma, coincide con el llamado Valle Inferior del Magdalena, y sus limites son: al sur, la Serranía de San Lucas; al oriente, el Macizo Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de San Lucas; al occidente, los anticlinorios de San Jerónimo, San Jacinto y Luruaco, fisiográficamente llamados serranías. La topografía de esta región es plana, cenagosa y muy susceptible a las inundaciones. Esta región de plataforma comprende cinco elementos tectónicos, cuatro de los cuales son muy prominentes: el Alto de Cicuco, el Alto de El Difícil, la Geofractura de Plato y la Depresión Tectónica de Sucre (Figura 4).

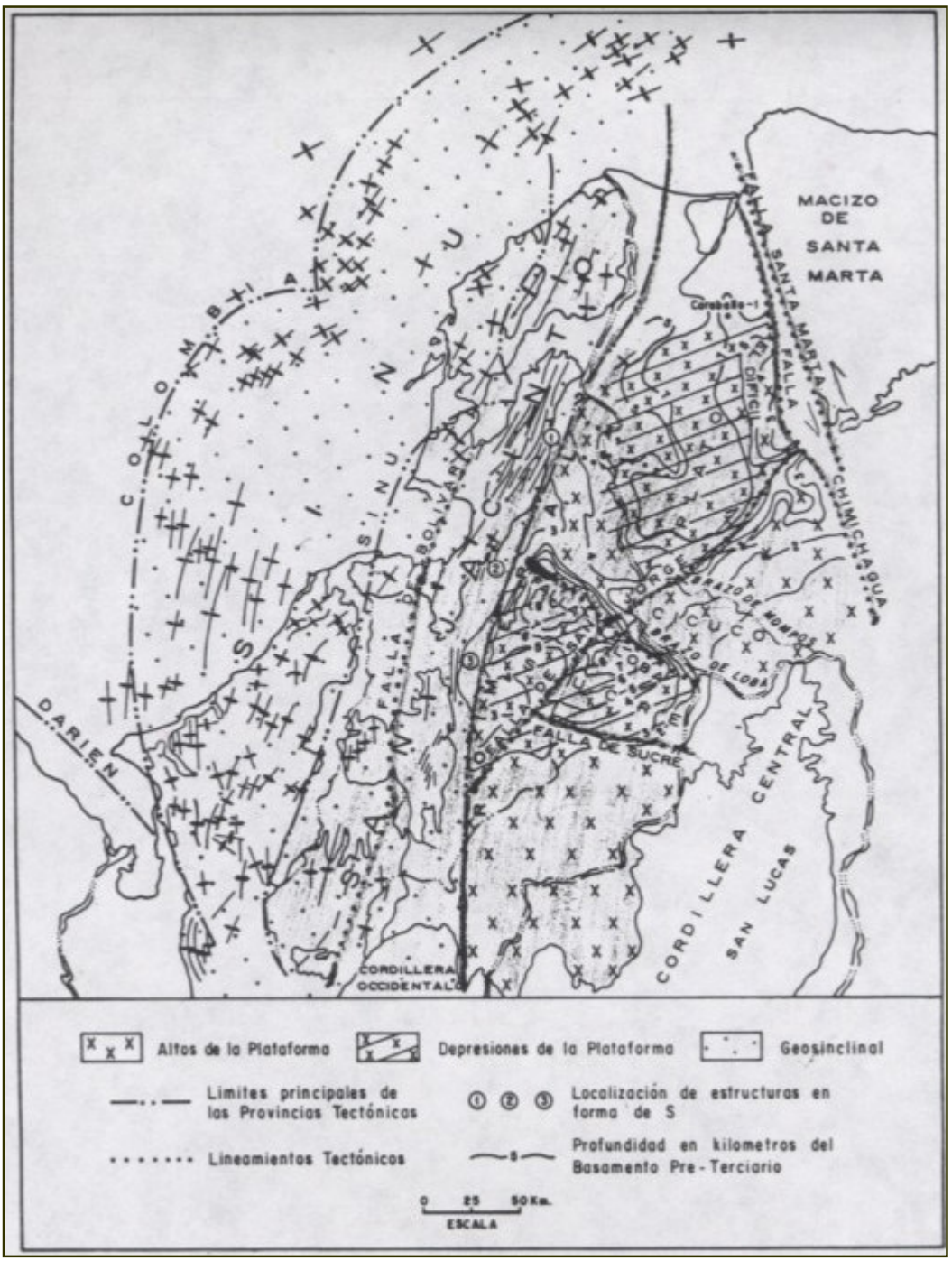


Figura 4. Marco tectónico del noroccidente de Colombia y del Caribe.
(Adaptado de Duque Caro, 1978)

5.1. ESTRATIGRAFIA

El Alto de El Difícil bajo el subsuelo está compuesto de rocas ígneas félsicas y metamórficas con una edad de Paleozoico a Cretáceo tardío, según correlaciones con edades absolutas de la Cordillera Central y de la Sierra Nevada de Santa Marta, relacionadas geológicamente (Irving, 1971, en Duque-Caro, 1978).

La secuencia estratigráfica en el Alto de El Difícil comienza con 800 a 1200 m de facies de carbonatos de edad Oligoceno a Mioceno medio, con inclusiones ocasionales de calizas arrecifales reposando directamente sobre el basamento cristalino. Estos estratos están cubiertos por sedimentos fluvio-lacustres de edad Pleistoceno a Reciente, con espesores hasta de 1500 m (Figura 5). El espesor total de la secuencia no pasa de los 3000 m (Duque-Caro, 1978).

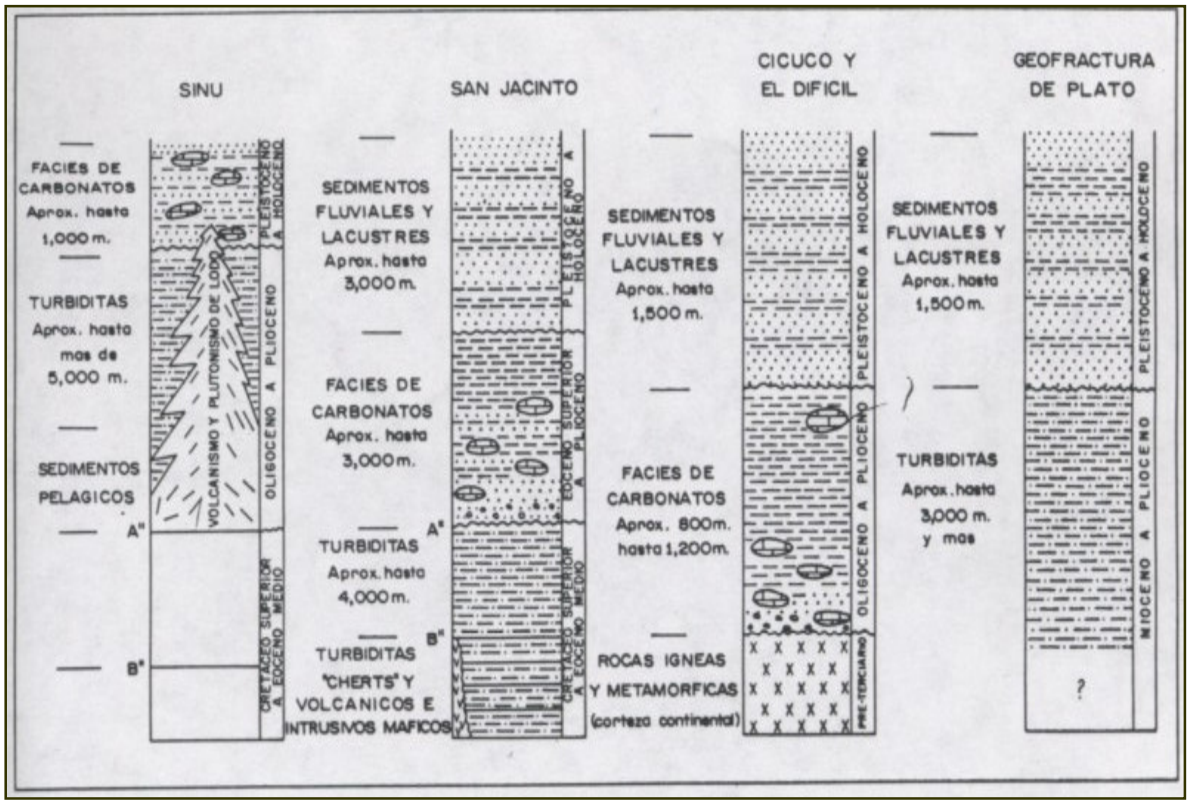


Figura 5. Secuencia estratigráfica generalizada del noroccidente de Colombia.(Adaptado de Duque Caro, 1978).

Estudios recientes (e.g., Clavijo et al., 2002) definen, entre otras, dos formaciones en la regiones del Alto de El Difícil y de la geofractura de Plato, así: Formación Zambrano (NgZ) y Formación Jesús del Monte (Ngjm) (Figura 6).

5.1.1. Formación Zambrano (NgZ)

Consiste de capas medias a gruesas de arenitas bioclásticas a bioesparíticas, cuarzosas, arcillosas y areniscas calcáreas, con abundantes clastos de moluscos, interestratificadas con lodolitas calcáreas bioclásticas. Edad Plioceno.

5.1.2. Formación Jesús del Monte (Ngjm)

Consiste de capas gruesas a muy gruesas de lodolitas de color gris a verde oliva, interestratificadas con capas medianas a finas de areniscas líticas. Edad mioceno.

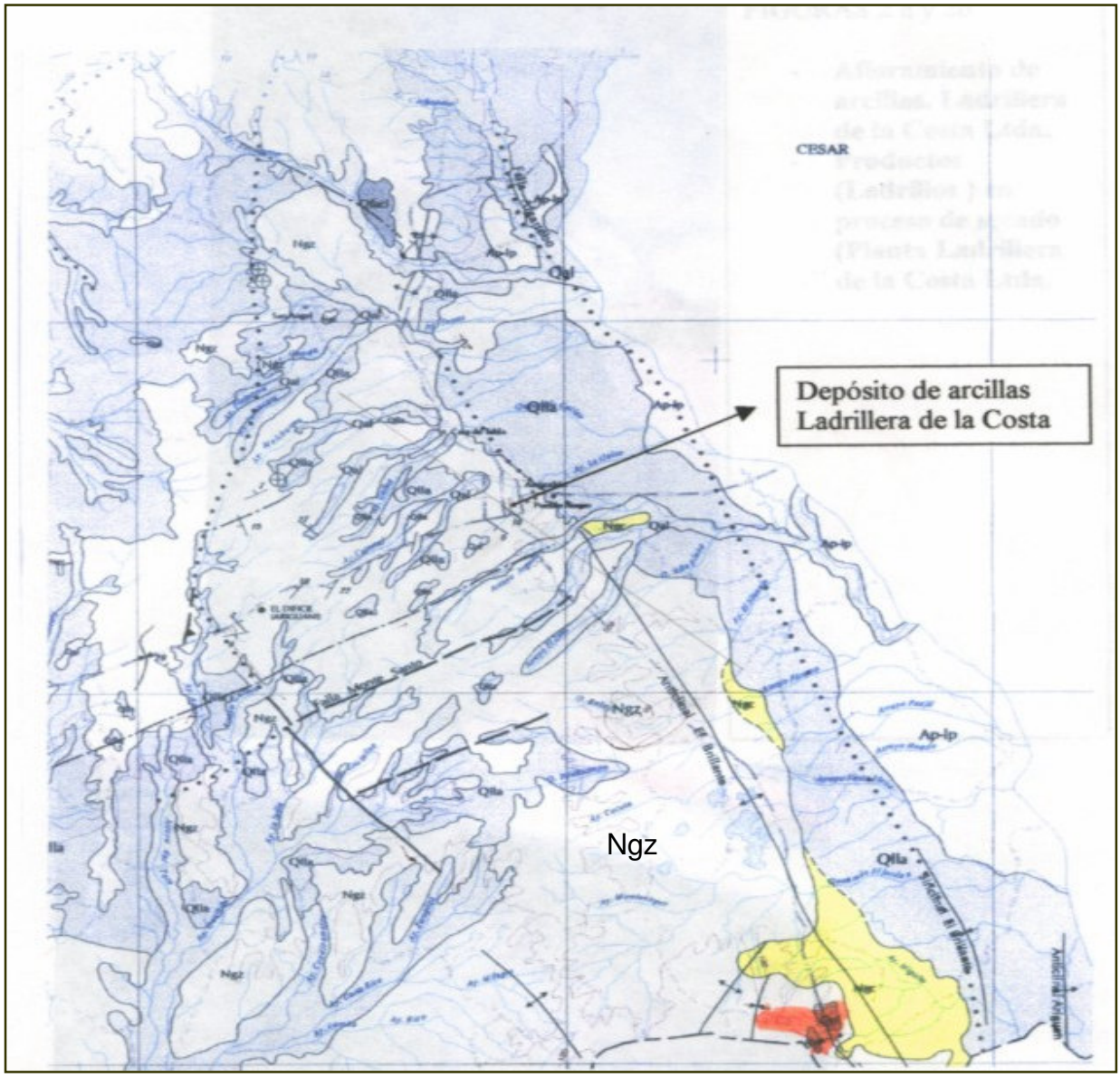


Figura 6. Cartografía geológica a escala 1:300.000 de la región de Ariguaní - Pueblo Nuevo (Departamento del Magdalena).(Adaptado de Clavijo, Garnica y Royero, 2002)

5.2. TECTONICA

Una característica importante del Alto de El Difícil es que este se encuentra bordeado en sus flancos por unas pendientes muy pronunciadas, lo cual se puede observar en los contornos del basamento especialmente en el flanco occidental; el flanco oriental se halla limitado por la Falla de Chimichagua (Figura 7). La cima de este alto en la plataforma es prácticamente horizontal y comúnmente controlada por fallamiento en bloques (Duque-Caro, 1978).

De acuerdo con estudios sísmicos realizados por las compañías petroleras, la secuencia estratigráfica sobre este alto se observa como reflectores casi horizontales con flexiones suaves y muy amplias, siempre paralelas al reflector del basamento. En términos generales, se trata de una secuencia de sedimentos no plegados.

Entre los rasgos tectónicos regionales a destacar en el sector de la sub-cuenca de Plato (en el ámbito petrolero nacional) se encuentran el Anticlinal El Brillante, la Falla Monte Santo, y la Falla de Algarrobo (hace parte del Sistema de Fallas de Santa Marta-Bucaramanga, el cual, según Tschanz (1969), es un sistema de rumbo sinextral con orientación N15°W, y que límita el macizo estructural complejo de la Sierra Nevada de Santa Marta en su flanco occidental (Figura 6).

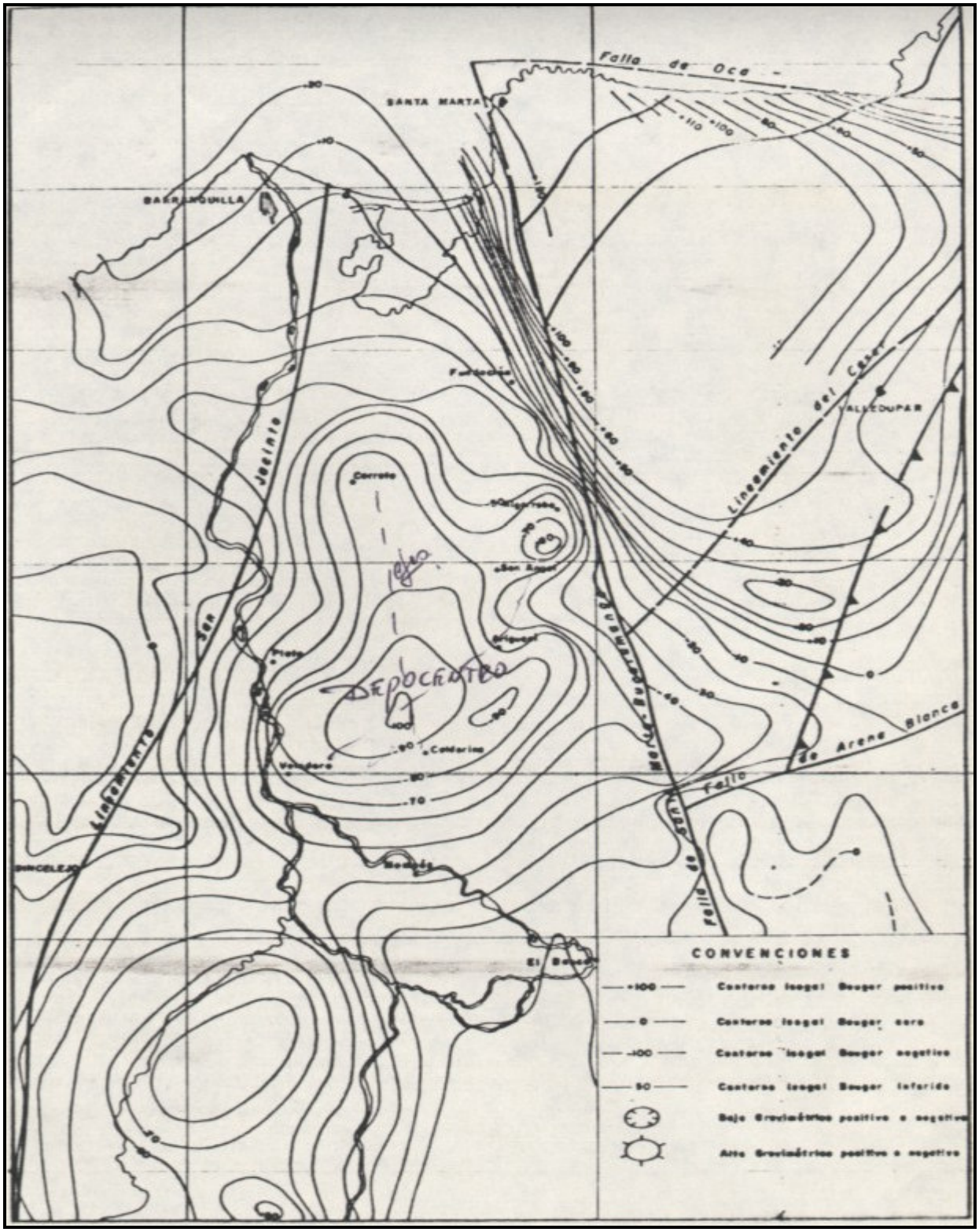


Figura 7. Características tectónicas y del basamento del Alto de El Difícil.(Adaptado de Duque Caro, 1978)

5.3. HISTORIA GEOLOGICA

La evolución geológica de esta región, descrita por algunos investigadores (e.g., Duque-Caro, 1978), se considera a partir del Cretáceo tardío debido a las limitaciones estratigráficas. De esta forma los ciclos sedimentarios propuestos, se describen a continuación.

5.3.1. Cretáceo tardío - Paleoceno (Cansoniense temprano)

Durante este intervalo, la plataforma se hallaba emergida, la Cordillera Central y la Sierra Nevada de Santa Marta estaban sujetas a erosión, y las áreas restantes sumergidas con un ambiente oceánico al occidente. El margen occidental de la plataforma estaba limitado por el surco de Romeral, muy pendiente, con una longitud de por lo menos 1700 km hasta el Golfo de Guayaquil, siempre bordeando el margen occidental de la cordillera Central. En el dominio oceánico al oeste de la plataforma tenía lugar una sedimentación pelágica con abundante microfauna planctónica y de turbiditas constituidas principalmente por combinaciones de arcillas, arenas y conglomerados con mucho aporte terrígeno. La ausencia de sedimentos en la geofractura de Plato y la depresión de Sucre de este intervalo, sugiere que estas dos formas estructurales no existían durante el Cretáceo tardío - Paleoceno, indicando posiblemente que la Sierra Nevada de Santa Marta pudo estar acoplada a la Cordillera Central durante esta época, siguiendo la dirección del Brazo de Mompós (Figura 8).

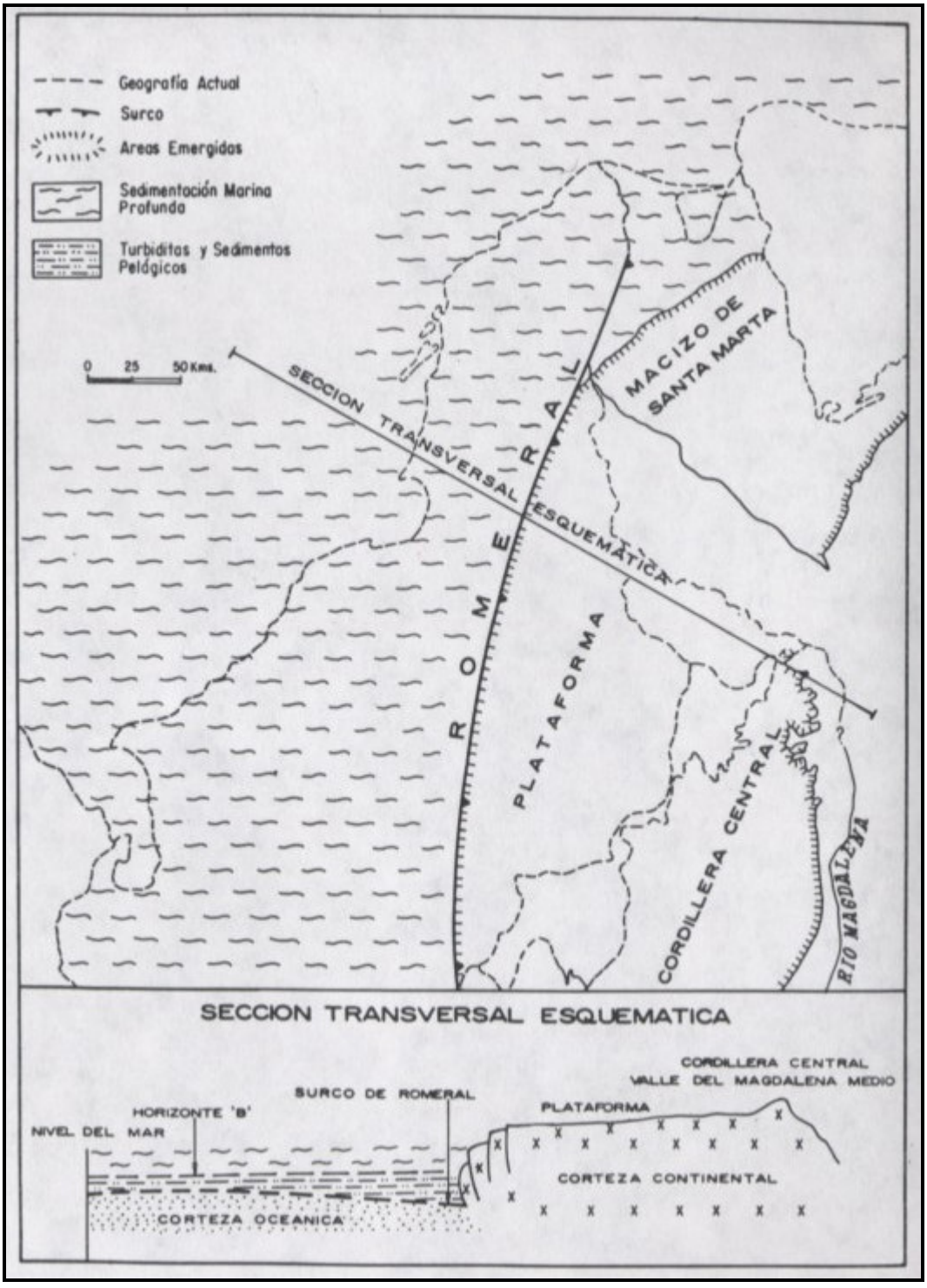


Figura 8. Paleogeografía del noroccidente de Colombia entre el Cretaceo tardío y el Paleoceno (Cansoniense temprano).(Adaptado de Duque Caro, 1978).

5.3.2. Paleoceno - Eoceno medio (Cansoniense medio y tardío)

Durante esta época, el área de la plataforma, la cordillera Central y la Sierra Nevada de Santa Marta continuaron emergidas. El surco de Romeral sufrió un hundimiento como consecuencia de los esfuerzos compresivo normales al margen de la plataforma, lo cual se reflejó en un ambiente sedimentario mucho más profundo, con profundidades de aguas superiores a los 4000 m (Duque-Caro, 1973; 1975). A finales de este período se depositaron sedimentos silíceos registrados por medio de estudios sísmicos en las áreas de San Antero y San Onofre. Simultáneamente, se produjo un vulcanismo marginal a la plataforma, que corresponde con la fase inicial embrionaria del levantamiento del cinturón fragmentado de San Jacinto.

5.3.3. Orogenia - Pre-Andina (Eoceno medio)

La plataforma continuó emergida pero sufriendo un basculamiento hacia el occidente, dando origen a la configuración inicial de la cuenca de San Jorge. Los esfuerzos compresivos laterales alcanzaron su máxima expresión durante esta orogenia (Van der Hammen, 1953; Irving, 1971), lo cual dio origen al plutonismo tonalítico de Chalán (Sucre), un metamorfismo de bajo grado a lo largo del margen occidental de la plataforma (Zona de Romeral) y el primer levantamiento importante del cinturón de San Jacinto y de la Cordillera occidental. Este desplazamiento vertical, del orden de 5000 m, según cálculos de la profundidad de compensación del carbonato de calcio (Duque-Caro, 1972; 1973), dejó emergidas las áreas de San Antero, San Onofre y la Cordillera Occidental. El flanco occidental del cinturón quedó separado de la llanura abisal por el nuevo surco de Sinú, resultando así una migración al occidente del fenómeno anteriormente descrito como surco de Romeral (Figura 9).

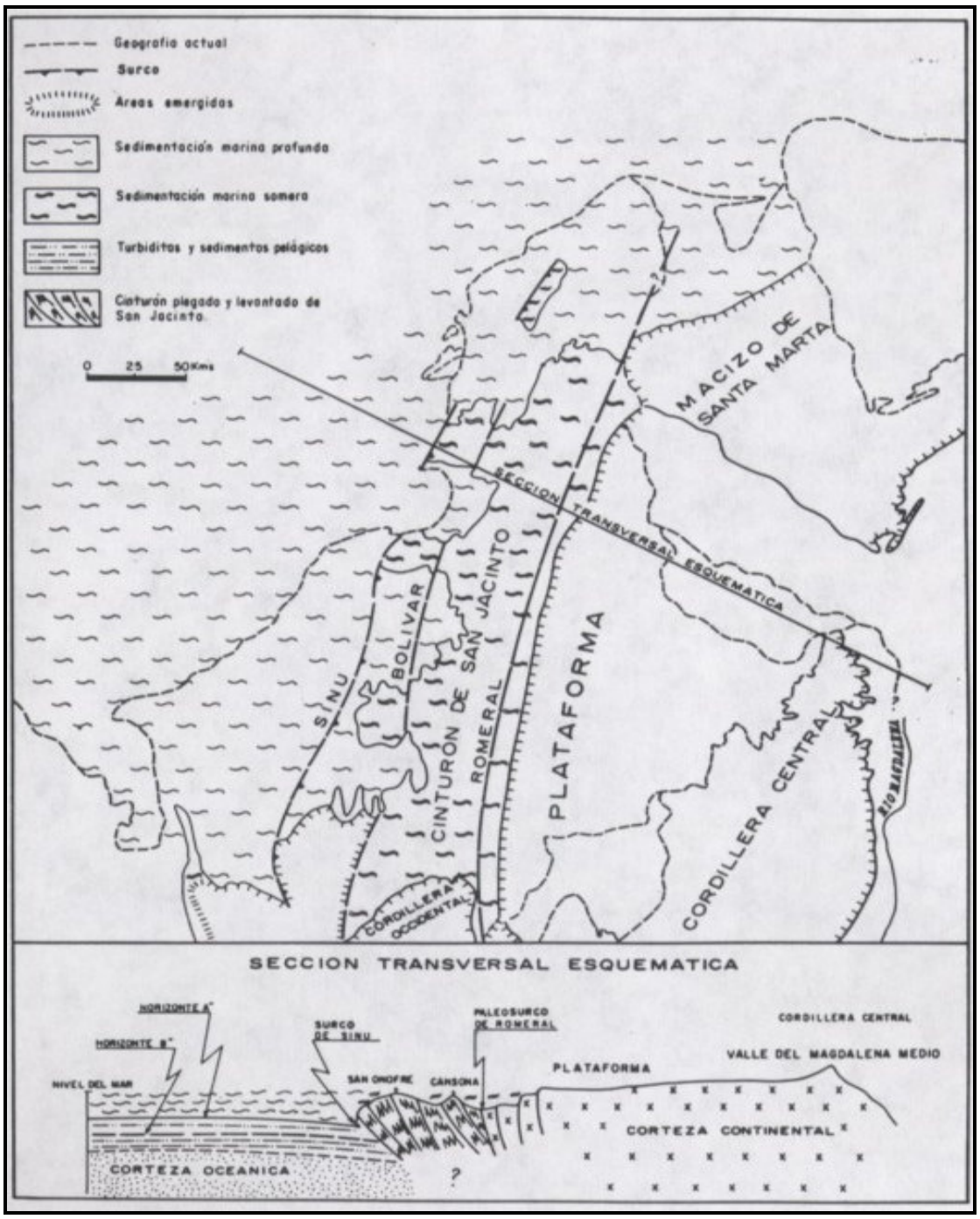


Figura 9. Paleogeografía del noroccidente de Colombia inmediatamente después de la Orogenia Pre-Andina (Eoceno medio).(Adaptado de Duque Caro, 1978).

5.3.4. Eoceno tardío - Oligoceno (Carmeniense temprano)

Luego de la orogenia Pre-Andina, la fisiografía de La Costa nor-occidental colombiana permitió una invasión progresiva del mar. Comenzando desde el nor-occidente con facies de carbonatos en el norte, con conglomerados, areniscas y shales, lo mismo que calizas arrecifales, pasando en el sur a facies deltáicas en el área de Ciénaga de Oro. Hacia el oriente, el mar ya alcanzaba las partes más bajas a lo largo del margen de la plataforma. Se depositaron facies de carbonatos en el área del flanco oriental del anticlinorio de Luruaco, en las depresiones del anticlinorio de San Jacinto en el flanco occidental. A finales del Oligoceno, la sedimentación ya era de aguas más profundas, con sedimentos arcillosos con abundante fauna planctónica de foraminíferos y radiolarios de las zonas de *Globigerina ciperoensis* y porción inferior de la de *Globigerina kugleri* (Duque-Caro, 1975). A lo largo del surco de sinú, tenía lugar una sedimentación eminentemente pelágica con poco o ningún aporte terrígeno, compuesta por margas o lodos silíceos, muy ricos en radiolarios y foraminíferos planctónicos (Figura 10).

5.3.5. Diastrofismo Oligoceno - Mioceno

Esta fase tectónica, denominada así por Stainforth (1968), corresponde a la fase proto-Andina de Van Der Hammen (1958). Se originó como consecuencia de otro aumento de los esfuerzos compresivos existentes sobre las márgenes de la plataforma, manifestándose con un basculamiento hacia el occidente de la plataforma y un nuevo levantamiento del cinturón de San Jacinto. Este basculamiento ocasionó la profundización de la cuenca, muy notable a lo largo de la zona de Romeral y asociada con una invasión marina, que posteriormente cubriría todo el área de la plataforma (Duque-Caro, 1975).

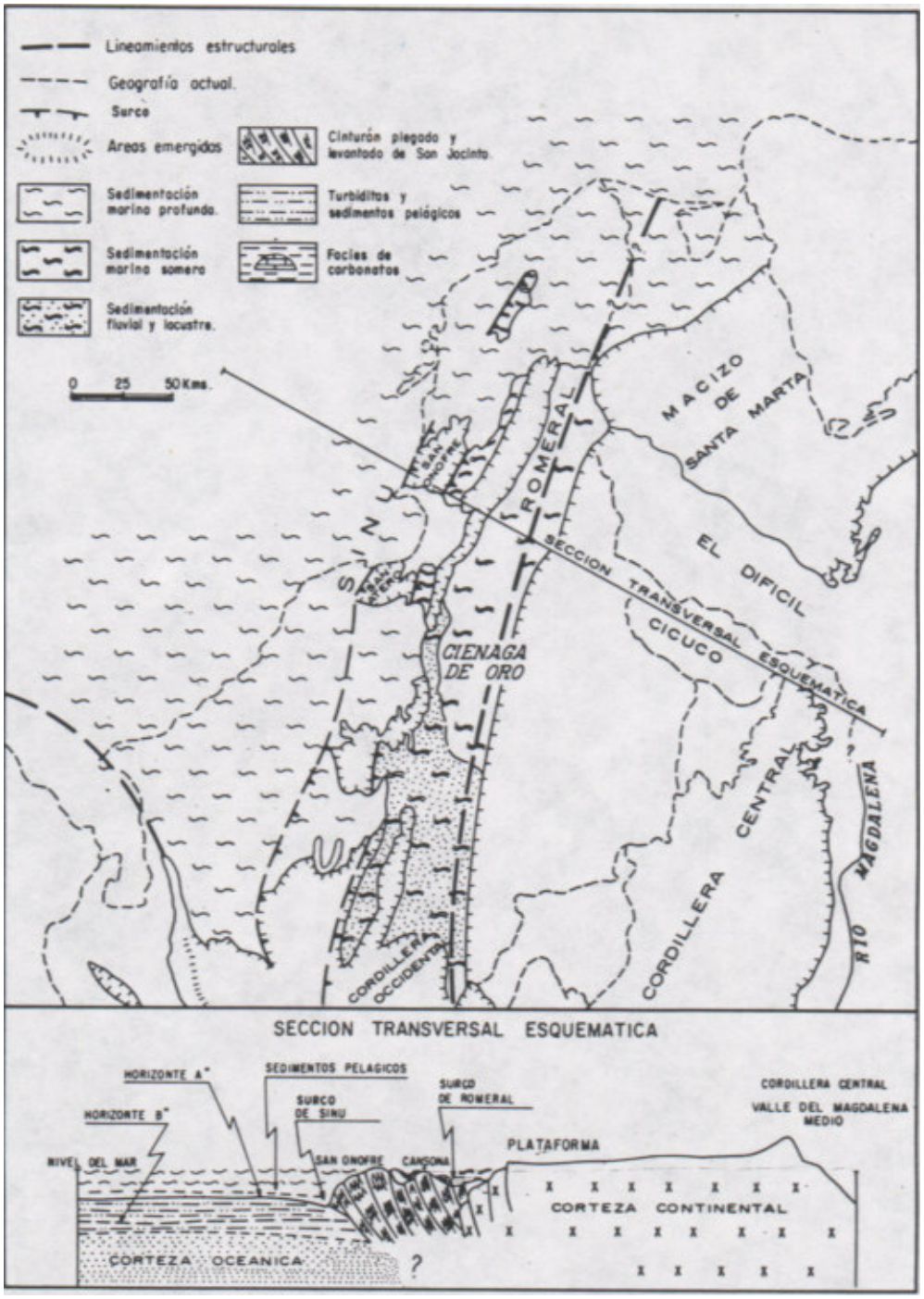


Figura 10. Paleogeografía del nor-occidente de Colombia durante el Eoceno tardío-Oligoceno (Carmeniense temprano).(Adaptado de Duque Caro, 1978).

5.3.6. Mioceno temprano a medio (Carmeniense medio)

El diastrofismo anterior originó un nuevo ciclo sedimentario en la cuenca de San Jorge (área de plataforma). La invasión marina se extendió mucho más hacia el sur, hasta el borde norte de la cordillera occidental, y hacia el oriente sobre gran parte de la plataforma, cubriendo los altos de Cicuco y de El Difícil. La sedimentación se caracterizó por facies de carbonatos, muy parecida a la sedimentación iniciada durante el Eoceno tardío. Las áreas del flanco occidental del cinturón de San Jacinto emergieron totalmente. Al occidente del surco de sinú, continuó la sedimentación pelágica característica del Eoceno tardío - oligoceno (Carmeniense temprano) (Figura 11).

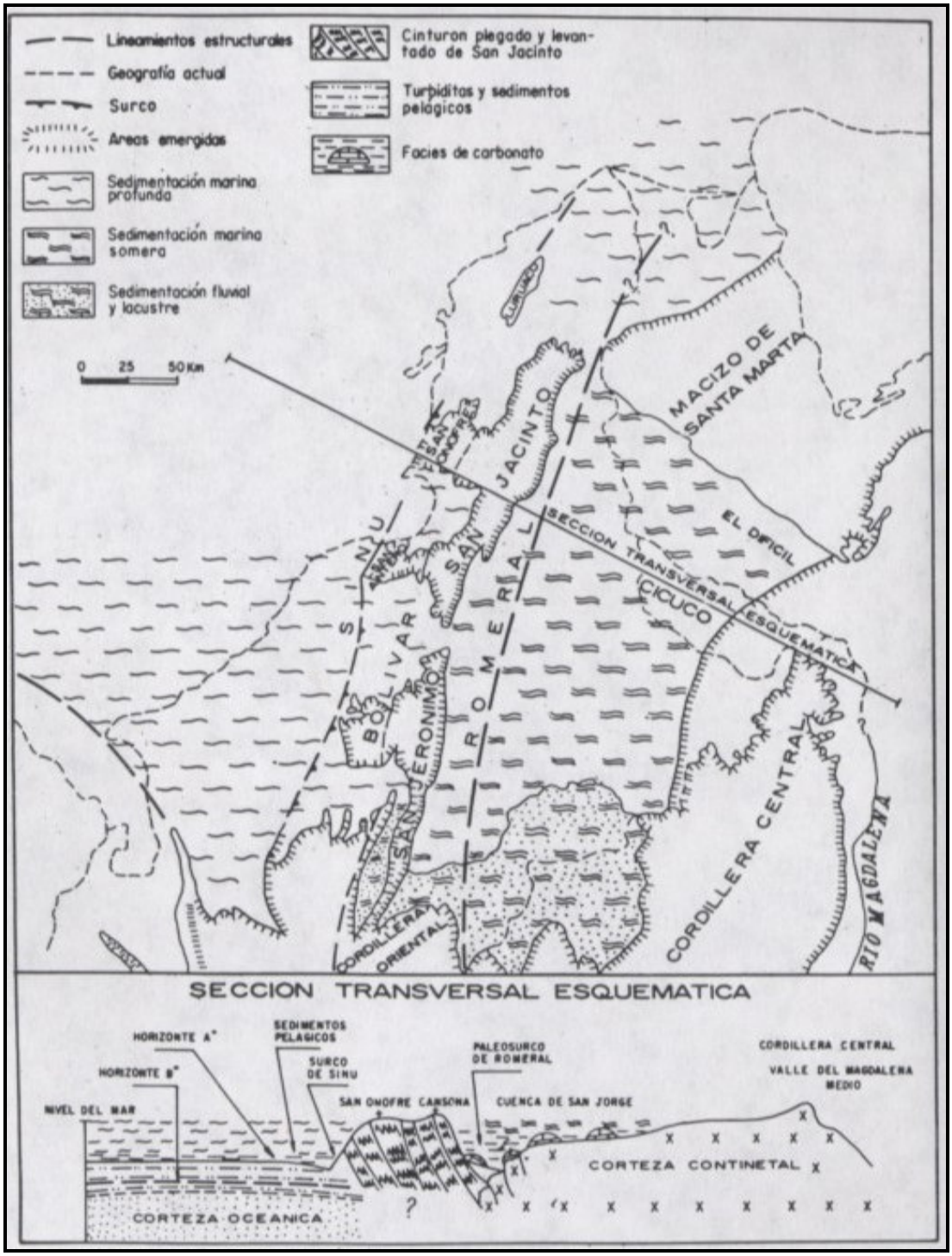


Figura 11. Paleogeografía del noroccidente de Colombia durante el Mioceno temprano – Mioceno medio (Carmeniense medio).(Adaptado de Duque caro, 1978).

5.3.7. Mioceno tardío - Plioceno (Carmeniense tardío)

El aumento de los esfuerzos compresivos laterales (compresión orogénica de Kugler (1968)), trajo como consecuencia la separación relativa de la Sierra Nevada de Santa Marta de la cordillera Central a lo largo de la falla de San Jorge y la formación de la geofractura de Plato y de la depresión tectónica de Sucre. El Río Magdalena fue cambiado de su curso original (desembocaba en el golfo de Maracaibo), para verter sus aguas en la geofractura de Plato y depresión tectónica de Sucre, que a partir de este momento se comportaron como cañones submarinos: la sedimentación era de alta energía (turbiditas) con derrumbes y deslizamientos de grandes proporciones, de tal forma que el aporte sedimentario se vio incrementado por el levantamiento de las áreas adyacentes. La sedimentación en la llanura abisal, al occidente del cinturón de San Jacinto y a lo largo del surco de Sinú fue turbidítica con gran aporte terrígeno, donde los paleocañones de Plato y Sucre se comportaron como inmensos canales de descargue del gran volumen de sedimentos provenientes del continente. Las máximas acumulaciones de estos sedimentos ocurrieron en el área del cinturón del Sinú, donde se registran más de 5000 m de espesor. Los conglomerados que afloran en Tucurá y Luruaco confirman que los sedimentos clásticos más gruesos de este modelo de depósito, se depositaron muy cerca al margen continental, a lo largo del surco de Sinú, en las intersecciones con los cañones submarinos, especialmente los de Plato y Sucre (Figura 12).

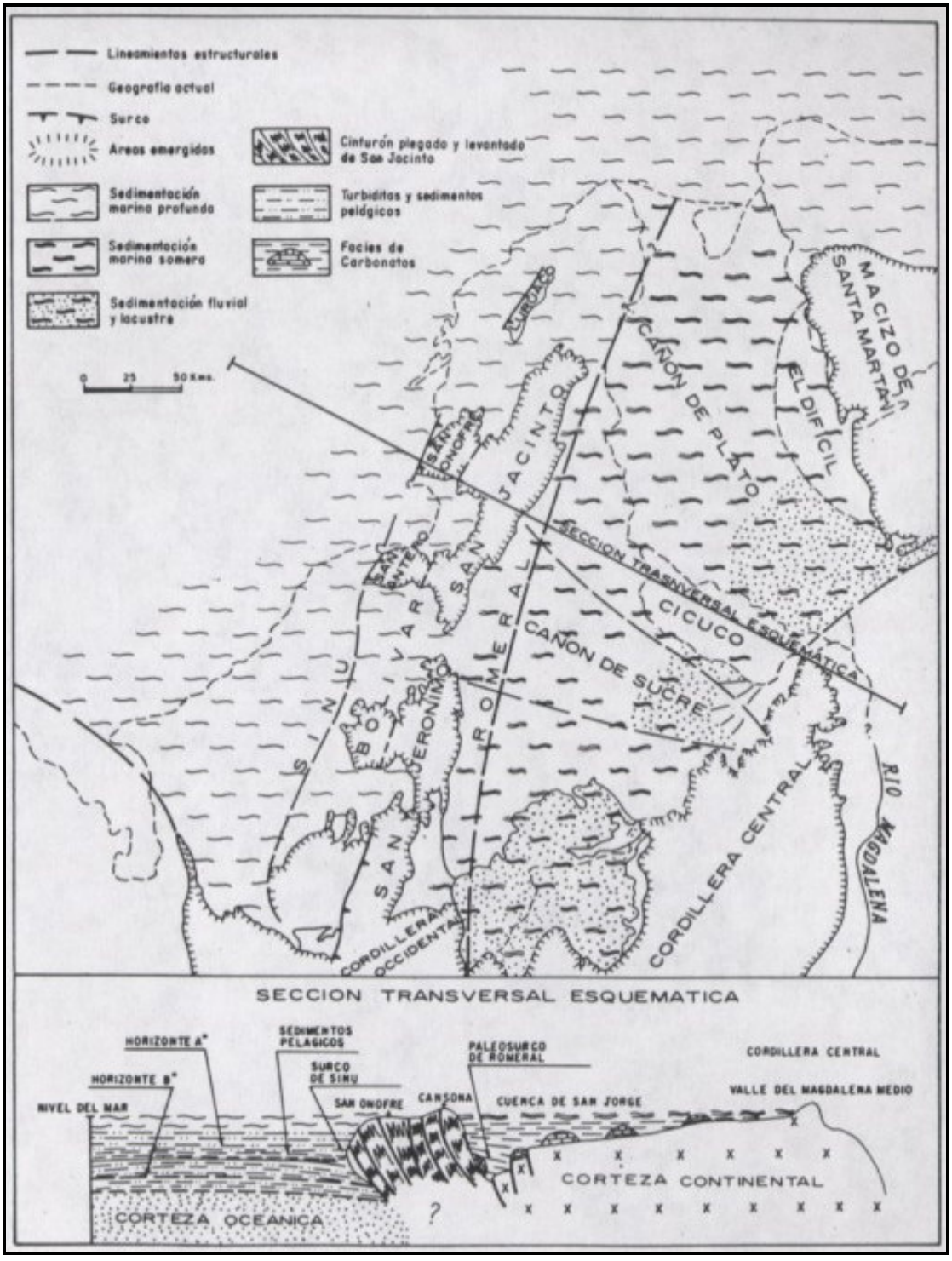


Figura 12. Paleogeografía del noroccidente de Colombia durante el Mioceno tardío - Plioceno (Carmeniense tardío).(Adaptado de Duque Caro, 1978).

5.3.8. Orogenia Andina (Plio-Pleistoceno)

La orogenia Andina generó esfuerzos en otro clímax diastrófico que produjo además de levantamiento, plegamiento y fallamiento normales al esfuerzo principal, un fenómeno tectónico mucho más variado y complejo acompañado por fallamiento transcurrente y flexiones paralelas a los trenes estructurales mayores. Entre los fenómenos característicos de esta orogenia en el nor-occidente de Colombia se destacan:

Vulcanismo y plutonismo de lodo dentro de la franja de sedimentos acumulados en el surco de Sinú, levantando y deformando inicialmente el cinturón, lo que causó un cambio brusco en la batimetría (Duque, 1975) y la formación del surco de Colombia a lo largo de la margen occidental. De esta forma se produce otra nueva migración al occidente del surco original de Romeral.

Estrechamiento estructural del Cinturón de Sinú en su extremo meridional e inflexión estructural en su parte media, posiblemente como resultado de esfuerzos compresivos convergentes.

Levantamiento y plegamiento completos del cinturón de San Jacinto asociados con cierres estructurales en S a lo largo del flanco oriental, los que también pudieron ser consecuencias de las mismas causas que originaron la inflexión del cinturón de Sinú y al movimiento transcurrente a lo largo del lineamiento de Romeral.

Emergencia sin plegamiento de la cubierta sedimentaria del área de plataforma.

Corrimiento sinistro lateral del macizo Sierra Nevada de Santa Marta lo largo del lineamiento Santa Marta - Bucaramanga (Raasveldt, 1956; Campbell, 1968) (Figura 13).

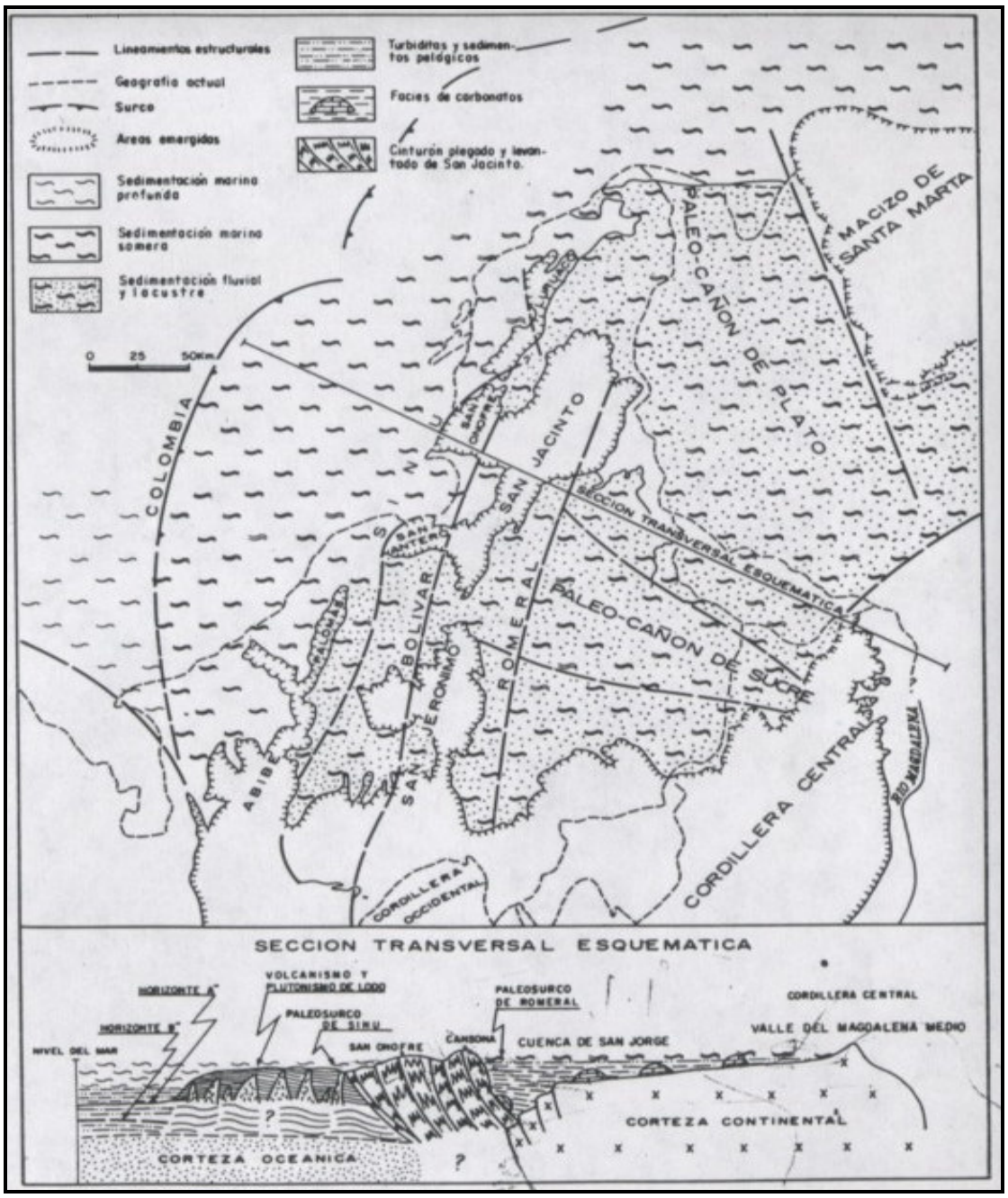


Figura 13. Paleogeografía del noroccidente de Colombia inmediatamente después de la Orogenia Andina (Plioceno-Pleistoceno).(Adaptado de Duque Caro, 1978).

5.3.9. Pleistoceno - Holoceno (Tubariense)

En las porciones sumergidas del cinturón de Sinú imperó una sedimentación marina de facies de carbonatos, la cual consistió en arenas, calizas arrecifales, shales y en menor cantidad conglomerados, depositados en un ambiente nerítico hasta de 200 m de profundidad de agua. Por otra parte, en la cuenca de San Jorge imperaba una sedimentación fluvial y deltáica lo largo de canales remanentes del río, dejados por los paleocañones de Plato y Sucre. Se cree que estos sedimentos alcanzaron espesores hasta de 4000 m en el paleocañón de Sucre, hacia su parte más profunda en el flanco oriental del anticlinorio de San Jacinto. La áreas adyacentes a los drenajes mayores estuvieron caracterizadas por sedimentación lacustre. En la llanura abisal la sedimentación fue eminentemente turbidítica. El cinturón de Sinú continuó emergiendo, producto tanto de la compresión lateral como de la alta presión almacenada dentro del cinturón. Lo que provocó a su vez que el vulcanismo de lodo, causa principal de la deformación del cinturón, siguiera y aún siga activo (Higgins y Saunders, 1974). Como se observa actualmente en las continuas erupciones volcánicas explosivas de lodo a lo largo del cinturón, especialmente al occidente de Montería en el área de Arboletes y también en las elevaciones topográficas por encima del nivel del mar de las islas que bordan la llanura costera. Estas islas consecuencia del vulcanismo y plutonismo de lodo están recubiertas por facies de carbonato.

6. PROPIEDADES Y USOS DE LAS ARCILLAS

6.1. TÉRMINO ARCILLA

Las arcillas han sido explotadas desde la Edad de Piedra, y en la actualidad están entre los minerales más importantes usados a nivel industrial. El estudio acerca de sus propiedades, mecanismos de formación y comportamiento durante la meteorización son importantes para establecer cómo y donde se formaron estos minerales y suministrar a la industria la información necesaria para decidir cómo y donde pueden desarrollarse seguramente los depósitos de arcillas minimizando el efecto ambiental.

El término arcilla por lo general posee diferentes significados. *Mineralógico*, agrupa a una serie de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, con propiedades fisico-químicas que dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 μm). *Petrológico*, la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayoría de los casos de origen detrítico, con características texturales bien definidas. *Sedimentológico*, la arcilla es un término granulométrico que incluye los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 μm. *Económico*, las arcillas son un grupo de minerales industriales con diferentes características mineralógicas y genéticas y con distintas propiedades tecnológicas y aplicaciones (principalmente en el sector de la construcción). Para un artesano de la cerámica, una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica.

Así, el término arcilla no sólo tiene significación mineralógica, sino también de tamaño de partícula, en este sentido se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 2 μm. De acuerdo con esto todos los filosilicatos

pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes a este grupo, como cuarzo, feldespatos, etc., pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan las 2 μm. Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan. Las arcillas son los productos más comunes del intemperismo químico de rocas terrestres y reacciones autigénicas que ocurren en el agua de mar. En la Tabla 3 se presentan algunos ejemplos de reacciones típicas de intemperismo que dan origen a arcillas.

Ejemplos de reacciones de intemperismo típicas
$Al_2Si_2O_5(OH)_4(s) + 5H_2O = 2H_4SiO_4 + Al_2O_3{\cdot}3H_2O(s)$ **caolinita** **gibbsita**
$NaAlSi_3O_8(s) + 5.5H_2O = Na^+ + OH^- + 2H_4SiO_4 + 0.5Al_2Si_2O_5(OH)_4(s)$ **albita** **caolinita**
$CaAl_2Si_2O_8(s) + 3H_2O = Ca^{2+} + 2OH^- + Al_2Si_2O_5(OH)_4(s)$ **anortita** **caolinita**
$3KAlSi_3O_8(s) + 2H_2CO_3 + 12H_2O = 2K^+ + 2HCO_3^- + 6H_4SiO_4 + KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2(s)$ **feldespato-K** **mica**
$7NaAlSi_3O_8(s) + 6H^+ + 20H_2O = 6Na^+ + 10H_4SiO_4 + 3Na_{0.33}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2(s)$ **albita** **montmorillonita-Na+**
$KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2(s) + 7H_2CO_3 + 0.5H_2O = K^+ + 3Mg^{2+} + 7HCO_3^- + 2H_4SiO_4 + 0.5Al_2Si_2O_5(OH)_4(s)$ **biotita** **caolinita**
$KAlSi_3O_8(s) + Na^+ = K^+ + NaAlSi_3O_8(s)$ **ortoclasa** **albita**

Tabla 3. Ejemplos de reacciones de intemperismo típicas que dan lugar a arcillas. (tomado de Huerta, 2002).

Las reacciones de intemperismo y autigénicas generan una variedad de arcillas de las cuales **illita**, **caolinita**, **montmorillonita** y **clorita** son las más abundantes formas marinas. Debido a su estructura cristalina, las arcillas son intercambiadores de iones muy eficaces. Las arcillas poseen una carga neta superficial negativa que les permite absorber cationes y materia orgánica. Lo anterior tiene un gran

impacto en la composición química de ríos y agua de mar. La sedimentación de arcillas es un proceso importante de transporte de cationes y materia orgánica a los sedimentos marinos. Las arcillas están siempre presentes en sedimentos marinos de los cuales en general representan la mayor parte. Aunque en la naturaleza la mayor parte de los materiales de tamaño arcilla son minerales de arcilla, y la mayor parte de las partículas de minerales de arcilla son del tamaño de arcillas, la correspondencia entre los distintos términos no es necesariamente correcta. La fracción de arcillas (tamaño de grano) de suelos y sedimentos generalmente contiene cuarzo, feldespatos, óxidos de hierro y carbonatos además de los minerales arcillosos. Caolinita y clorita generalmente se presentan con tamaños de grano superiores a los 2 µm.

6.2. ESTRUCTURA DE LOS FILOSILICATOS

Las propiedades de las arcillas son reflejo de sus características estructurales. Por ello es imprescindible conocer la estructura de los filosilicatos para poder comprender sus propiedades. Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos $(SiO)_4$ se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula $(Si_2O_5)^{2-}$, 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. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos $(OH)^-$ de la capa brucita o gibsita, de forma que, en este plano, quede un $(OH)^-$ en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los $(OH)^-$ son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros (Figura 14).

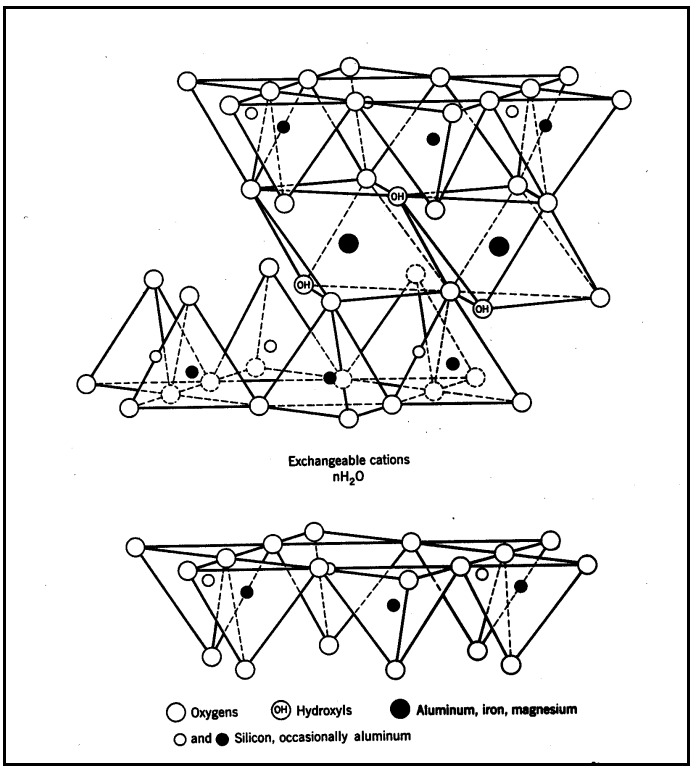


Figura 14. Capas tetraédricas en la estructura de los filosilicatos (tomado de García y Suárez, 2002).

Una unión similar puede ocurrir 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**. Si todos los huecos octaédricos están ocupados, la lámina se denomina **trioctaédrica** (Mg^{2+} dominante en la capa octaédrica). Si solo 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). En ciertos filosilicatos, como 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, en el espacio interlaminar, o espacio existente entre dos láminas consecutivas, de cationes (como por ejemplo en el grupo de las micas), cationes hidratados (como en las vermiculitas y esmectitas) o grupos hidroxilo coordinados octaédricamente,

similares a las capas octaédricas, como sucede en las cloritas. A éstas últimas también se las denomina **T:O:T:O** o **2:1:1**. La unidad formada por una lámina más la interlámina es la unidad estructural. Los cationes interlaminares más frecuentes son alcalinos (Na y K) o alcalinotérreos (Mg y Ca). Las fuerzas que unen las diferentes unidades estructurales son más débiles que las existentes entre los iones de una misma lámina, por ese motivo los filosilicatos tienen una clara dirección de exfoliación, paralela a las láminas. También pertenecen a este grupo de minerales la sepiolita y la paligorskita (Figura 15), a pesar de presentar diferencias estructurales con el resto de los filosilicatos. Estructuralmente están formadas por láminas discontinuas de tipo mica. A diferencia del resto de los filosilicatos, que son laminares, éstos tienen hábito fibroso (figura siguiente), ya que la capa basal de oxígenos es continua, pero los oxígenos apicales sufren una inversión periódica cada 8 posiciones octaédricas (sepiolita) o cada 5 posiciones (paligorskita). Esta inversión da lugar a la interrupción de la capa octaédrica que es discontinua.

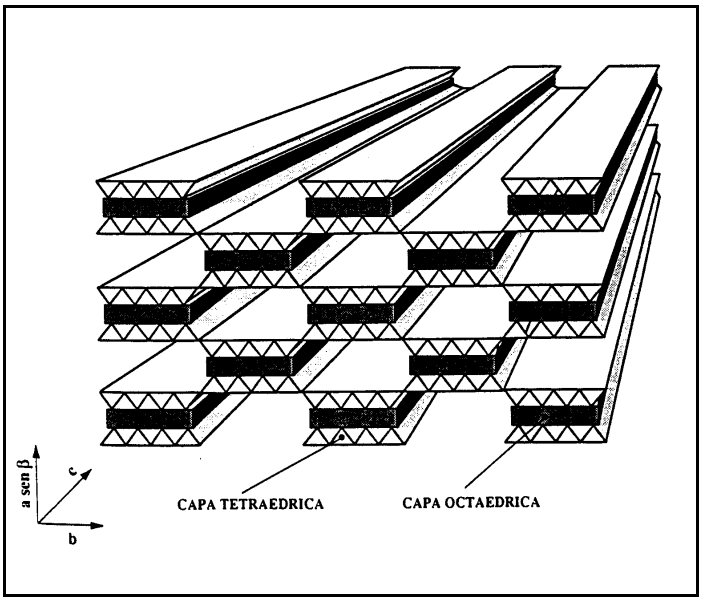


Figura 15. Estructura de la Paligorskita y la Sepiolita con hábito fibroso (tomado de García y Suárez, 2002).

6.3. CLASIFICACION DE LOS FILOSILICATOS

Los filosilicatos se clasifican atendiendo a que sean bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos (Tabla 4). De manera que pertenecen a los filosilicatos grupos de minerales tan importantes como las micas y las arcillas.

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

Tabla 4. Clasificación de los filosilicatos (tomado de García Romero y Suárez Barrios, 2002).

6.4. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales se cimentan en sus propiedades físico-químicas, las cuales derivan, principalmente, de (1) su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 µm); (2) su morfología laminar (filosilicatos); (3) las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el

espacio interlaminar. Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas. Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, como ya se ha citado, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales.

6.4.1. Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g. Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

A continuación se describen algunos ejemplos de superficies específicas de arcillas: Caolinita de elevada cristalinidad hasta 15 m^2/g; Caolinita de baja cristalinidad hasta 50 m^2/g; Halloisita hasta 60 m^2/g; Illita hasta 50 m^2/g; Montmorillonita 80-300 m^2/g; Sepiolita 100-240 m^2/g; Paligorskita 100-200 m^2/g.

6.4.2. Capacidad de intercambio catiónico

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes: (1) sustituciones isomórficas dentro de la estructura; (2) enlaces insaturados en los bordes y superficies externas; (3) disociación de los grupos hidroxilos accesibles. El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina.

A continuación se presentan algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico (en meq/100 g): Caolinita: 3-5; Halloisita: 10-40; Illita: 10-50; Clorita: 10-50; Vermiculita: 100-200; Montmorillonita: 80-200; Sepiolita-paligorskita: 20-35.

6.4.3. Capacidad de absorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmectitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita). La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de

procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato). La capacidad de absorción se expresa en porcentaje de absorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

6.4.5. Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de 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 como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

6.4.6. Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento. Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez et al., 1975). La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

6.4.7. Tixotropía

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido.

Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

6.5. ARCILLAS INDUSTRIALES

Actualmente, las arcillas comerciales, aquellas que sirven como materia prima industrial, figuran entre los recursos minerales más importantes, tanto por el volumen explotado como por el valor de la producción. Un 90 % de la producción se dedica, preferentemente a la fabricación de materiales de construcción y agregados. Sólo un 10 % se dedica a otras industrias (fabricación de papel, caucho, pinturas, absorbentes, decolorantes, arenas de moldeo, productos químicos y farmacéuticos, agricultura, etc.). En general al primer tipo (las que se utilizan en construcción) se las denomina arcillas cerámicas, arcillas para la construcción o arcillas comunes, son arcillas compuestas por dos o más minerales de la arcilla, generalmente illita y esmectita, con importantes cantidades de otros minerales que no son filosilicatos (carbonatos, cuarzo..). Se utilizan para la fabricación de materiales de construcción y agregados. Al segundo tipo se las denomina arcillas especiales, son arcillas constituidas fundamentalmente por un sólo tipo de mineral de la arcilla, y sus propiedades dependen esencialmente de las características de ese mineral. Estas, a pesar de ser mucho menos importantes en volumen, suponen más del 70 % del valor de las arcillas comerciales, y son objeto de comercio internacional. Las arcillas especiales se pueden dividir en caolines y arcillas caoliníferas, y bentonitas, sepiolita y paligorskita.

6.5.1. Caolines y arcillas caoliníferas

Un caolín es una roca que contiene una cierta proporción de minerales del grupo de caolín, que puede ser económicamente extraída y concentrada. Se trata,

generalmente, de una arcosa o arena caolínifera, granito o neis caolinitizado, que es necesario procesar para enriquecer en minerales del grupo del caolín. La arcilla caoliníferа es también un caolín en sentido amplio. Igualmente, se trata de una arcilla compuesta, fundamentalmente, de minerales del grupo del caolín. Esta no se procesa, se usa tal cual, e inicialmente los porcentajes en minerales del grupo del caolín son más altos que en el caolín (>50%). Cuando el caolín se usa para cerámica blanca recibe la denominación de China Clay.

El caolín, tal como se obtiene en una explotación mineral (caolín bruto/todo uno) posee un contenido variable de caolinita y/o halloysita que, a veces no llega al 20 %, además suele tener cuarzo, feldespatos, micas, y, dependiendo de la roca madre otro tipo de minerales accesorios. Para concentrar el mineral es preciso someterlo a diferentes procesos que eleven el contenido en filosilicatos por encima del 80 %. El producto final, generalmente, recibe el nombre de caolín lavado. Como la caolinita tiene un tamaño de partícula muy pequeño, el lavado de las fracciones groseras conduce a un material con alto contenido en caolinita. Es evidente que cuanto mayor sea el contenido en fracciones finas del caolín bruto, mayor será también el porcentaje en caolinita. Un caolín comercial de alta calidad a penas deberá tener partículas superiores a las 20µm, lo que garantizaría una riqueza en caolinita superior al 80%. Otro término utilizado para arcillas especiales, con un indudable significado industrial, es el de arcillas refractarias: Arcillas caoliníferas utilizadas para la fabricación de materiales cerámicos refractarios. Dentro de este grupo pueden incluirse las denominadas ball-clays, o arcillas caoliníferas plásticas y dispersables en agua, que son grises o negras pero que cuecen blanco. Son los materiales más interesantes para la fabricación de cerámica blanca de gran calidad. Las fire-clays o arcillas refractarias propiamente dichas, suelen tener óxidos de hierro, lo que hace que no cuezan blanco. Las flint-clays o arcillas caoliníferas duras, carentes de plasticidad se utilizan fundamentalmente para la fabricación de refractarios silicoaluminosos. Por último las Tonsteins (Underclays), son muy similares a las flint-clays, son niveles volcánicos.

6.5.2. Bentonitas

Una bentonita es una roca compuesta esencialmente por minerales del grupo de las esmectitas, independientemente de cualquier connotación genética. Los criterios de clasificación utilizados por la industria se basan en su comportamiento y propiedades fisico-químicas; así la clasificación industrial más aceptada establece tipos de bentonitas en función de su capacidad de hinchamiento en agua: (1) bentonitas altamente hinchables o sódicas; (2) bentonitas poco hinchables o cálcicas; (3) bentonitas moderadamente hinchables o intermedias

El término fuller'earth, también conocido en español como tierras de batán, los ingleses lo usan para denominar a arcillas constituidas fundamentalmente por montmorillonita con Ca como catión de cambio, mientras que los americanos se lo dan a arcillas paligorskíticas. A las bentonitas cálcicas que los ingleses denominan fuller'earth los americanos las llaman bentonitas no hinchables. Otras clasificaciones se basan en criterios distintos, así, por ejemplo, en USA se utiliza el término "Bentonitas del Sur" (Southern Bentonites) como equivalentes de bentonitas cálcicas, ya que la mayor parte de la bentonita cálcica norteamericana se explota cerca del Golfo de México, denominándose "bentonita tipo Wyoming" a las bentonitas sódicas.

6.5.3. Paligorskita-Sepiolita

Las sepiolitas y paligorskitas son arcillas con un contenido en dichos minerales superior al 50 %. Son minerales con hábito fibroso con una enorme área superficial debida tanto al pequeño tamaño de partícula como la porosidad estructural que presenta su estructura. La superficie específica teórica se calcula alrededor de los 900 m^2/g, aunque la superficie accesible es muy inferior. Su peculiar estructura les confiere una serie de propiedades, entre ellas las de formar

suspensiones poco afectadas por la concentración iónica y una enorme capacidad sorcitiva, por lo que son poderosos decolorantes y absorbentes. También tienen propiedades reológicas, son capaces de formar geles y suspensiones estables de alta viscosidad a bajas concentraciones de sólido. Al igual que las esmectitas, son susceptibles de ser activadas mediante tratamientos térmicos y ácidos.

6.5.4. Otros tipos de arcillas especiales

También pueden considerarse arcillas especiales las halloysitas, compuestas fundamentalmente por halloysita, mineral del grupo del caolín y las hectoritas, compuestas por hectorita (una esmectita), Las arcillas halloysiticas también pueden considerarse caolines, y las hectoritas un tipo de bentonitas. Ambos tipos son muy escasos en el mundo. Recientemente el termino arcilla especial ha sido restringido aún más por algunos autores y lo reservan para arcillas raras como la sepiolita o hectorita, poco abundantes, o como la paligorskita y bentonitas blancas. También lo usan para arcillas modificadas químicamente como las bentonitas activadas con tratamientos ácidos o organofílicas, quedando fuera de la denominación de arcillas especiales los caolines, bentonitas y, por supuesto las arcillas comunes.

6.6. EXTRACCIÓN Y PROCESAMIENTO INDUSTRIAL

La explotación, normalmente, se efectúa a cielo abierto, utilizando medios mecánicos convencionales. La potencia del recubrimiento a remover varía de unos yacimientos a otros, pero, generalmente, en la mayor parte de las explotaciones son inferiores a los 15 m. El procesamiento industrial del producto de cantera viene fijado por la naturaleza y uso a que se destine. Generalmente es sencillo, reduciéndose a un machaqueo previo y eliminación de la humedad y finalmente, a

una molienda hasta los tamaños de partícula deseados. La temperatura de secado depende de la utilización posterior de la arcilla.

6.7. APLICACIONES INDUSTRIALES

Desde el punto de vista industrial, la mayor parte de las aplicaciones no requieren especificaciones estrictas en cuanto a composición química (composición de las capas tetraédrica y octaédrica). Sin embargo, en el caso de las bentonitas si tiene importancia la química del espacio interlaminar y sus propiedades fisico-químicas.

6.7.1. Arcillas comunes

El principal uso de estos materiales arcillosos se da en el campo de la cerámica de construcción (tejas, ladrillos, tubos, baldosas..), alfarería tradicional, lozas, azulejos y gres. Uso al que se destinan desde los comienzos de la humanidad. Prácticamente todas las arcillas son aptas para estos usos, primando las consideraciones económicas. Son así mismo utilizadas en la manufactura de cementos, como fuente de alúmina y sílice, y en la producción de áridos ligeros (arcillas expandidas).

6.7.2. Caolín

Se trata de un mineral muy importante desde el punto de vista industrial. Ha sido utilizando desde antiguo para numerosos usos. En el siglo XVI adquirió gran fama entre la nobleza la porcelana fabricada a base de pastas cerámicas ricas en caolín. Los principales usos a los que se destina en la actualidad son:

Fabricación de papel

El principal consumidor de caolín es la industria papelera, utilizando más del 50 % de la producción. En esta industria se usa tanto como carga, como para proporcionarle al papel el acabado superficial o estucado. Para que pueda ser destinado a este uso las especificaciones de calidad requeridas son muy estrictas, tanto en pureza como en color o tamaño de grano.

Cerámica y refractarios

También es importante el uso del caolín en la fabricación de materiales cerámicos (porcelana, gres, loza sanitaria o de mesa, electrocerámica) y de refractarios (aislantes térmicos y cementos). Al igual que en el caso del papel las especificaciones requeridas para el uso de caolines en cerámica y refractarios son estrictas en cuanto a pureza y tamaño de grano.

Otros usos

Además se utilizan caolines, en menores proporciones, en otras industrias: como carga más económica sustituyendo a las resinas en pinturas, aislantes, caucho. También como carga de abonos, pesticidas y alimentos de animales. La industria química consume cantidades importantes de caolín en la fabricación de sulfato, fosfato y cloruro de Al, así como para la fabricación de ceolitas sintéticas. A partir del caolín calcinado se obtienen catalizadores y fibras de vidrio. La industria farmacéutica utiliza caolín como elemento inerte en cosméticos y como elemento activo en absorbentes estomacales.

6.7.3. Bentonitas

Son muy numerosos los usos industriales de las bentonitas, tanto que resulta difícil enumerarlos todos. Los más importantes son:

Arenas de moldeo

A pesar de que la industria ha evolucionado considerablemente en las últimas décadas y ha ido sustituyendo a las bentonitas por otros productos en la fabricación de moldes para fundición, éste sigue siendo su uso principal. Las arenas de moldeo están compuestas por arena y arcilla, generalmente bentonita, que proporciona cohesión y plasticidad a la mezcla, facilitando su moldeo y dándole resistencia suficiente para mantener la forma adquirida después de retirar el moldeo y mientras se vierte el material fundido. La proporción de las bentonitas en la mezcla varia entre el 5 y el 10 %, pudiendo ser ésta tanto sódica como cálcica, según el uso a que se destine el molde. La bentonita sódica se usa en fundiciones de mayor temperatura que la cálcica por ser más estable a altas temperaturas, suelen utilizarse en fundición de acero, hierro dúctil y maleable y en menor medida en la gama de los metales no férreos. Por otro lado la bentonita cálcica facilita la producción de moldes con más complicados detalles y se utiliza, principalmente, en fundición de metales no férreos. El aumento de los costes de las materias primas está forzando a las fundiciones a recuperar las mayores cantidades posibles de mezclas de arenas para ser usadas de nuevo, si bien generalmente esto no afecta de forma sensible al consumo de bentonita. El reciclado, en la mayoría de los casos, no es posible, pues la mezcla alcanza temperaturas superiores a los 6501°C, y a esas temperaturas la arcilla pierde parte de su agua de constitución, proceso que es irreversible, y pierde con ello sus propiedades, no pudiendo ser recuperada.

Lodos de perforación

A pesar de los importantes cambios que van sufriendo con el tiempo las formulaciones de los lodos de perforación, (comenzó a utilizarse a principios del siglo XX) este sigue siendo uno de los mercados más importantes de las bentonitas. Las funciones que debe cumplir el lodo son: (1) extracción del ripio y limpieza del fondo del pozo; (2) enfriamiento de la herramienta de perforación; (3) control de presiones de formación y estabilización de las paredes; (4) mantenimiento en suspensión del ripio; (5) transmisión de potencia hidráulica al

tricono; (6) soportar parte del peso de la sarta de perforación; (7) permitir la adición de agentes densificantes. Las bentonitas de Wyoming son las más utilizadas para la preparación de lodos de perforación.

Peletización

La bentonita se ha venido usando desde los años 50 como agente aglutinante en la producción de pelets del material previamente pulverizado durante las tareas de separación y concentración. La proporción de bentonita añadida es del 0,5%, en la mayor parte de los casos. Aunque no existen especificaciones estandarizadas para este uso, se emplean bentonitas sódicas, naturales o activadas, puesto que son las únicas que forman buenos pelets con las resistencias en verde y en seco requeridas, así como una resistencia mecánica elevada tras la calcinación.

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. Se utiliza además como soporte de productos químicos, como por ejemplo herbicidas, pesticidas e insecticidas, posibilitando una distribución homogénea del producto tóxico. En los últimos años, además, están compitiendo con otras arcillas absorbentes (sepiolita y paligorskita) como materia prima para la fabricación de lechos de animales. La demanda de bentonitas para este uso varia 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.

Material de sellado

La creciente importancia que está tomado en los últimos años, por parte de los gobiernos de toda Europa, la legislación en lo referente a medio ambiente, ha favorecido la apertura y desarrollo de todo un mercado orientado hacia el uso de

bentonitas como material de sellado en depósitos de residuos tanto tóxicos y peligrosos, como radiactivos de baja y media actividad. Durante muchos años las bentonitas se han venido utilizando en mezclas de suelos en torno a los vertederos, con el fin de disminuir la permeabilidad de los mismos. De esta forma se impide el escape de gases o lixiviados generados en el depósito. Esta mezcla se podía realizar in situ o sacando el suelo de su emplazamiento, mezclándolo con la bentonita y volviéndolo a colocar en su sitio, la ventaja de la primera alternativa es que supone un gasto menor pero, sin embargo, implica una mezcla menos homogénea. La segunda alternativa, sin embargo, es más cara pero asegura una mejor homogeneización de la mezcla bentonita-suelo. Por otro lado, esto disminuye la cantidad de bentonita necesaria (5-6 %), frente a 7-8 % para la utilizada en mezclas in situ. Más recientemente ha surgido una nueva tendencia en el diseño de barreras de impermeabilización que se basa en la fabricación de complejos bentonitas-geosintéticos (geomembranas y geotextiles). Consiste en la colocación de una barrera de arcilla compactada ente dos capas, una de geotextil y otra de geomembrana (plásticos manufacturados, como polietileno de alta densidad o polipropileno, entre otros). La geomembrana es impermeable, mientras que el geotextil es permeable, de modo que permite a la bentonita hinchar, produciendo la barrera de sellado compactada. La normativa varía de un país a otro en cuanto a los valores que tienen que cumplir las arcillas compactadas para dicho fin. Esta utilidad de las bentonitas como material de sellado se basa fundamentalmente en algunas de sus propiedades características, como son: su elevada superficie específica, gran capacidad de hinchamiento, buena plasticidad y lubricidad, alta impermeabilidad, baja compresibilidad. Las bentonitas más utilizadas para es fin son las sódicas, por tener mayor capacidad de hinchamiento. Así mismo, se utilizan bentonitas sódicas como material impermeabilizante y contenedor en los siguientes campos: (1) como contenedores de aguas frescas: Estanques y lagos ornamentales, campos de golf, canales..; (2) como contenedores de aguas residuales: Efluentes industriales (balsas); (3) en suelos contaminados: Cubiertas, barreras verticales; (4) en el sellado de pozos de aguas

subterráneas contaminadas; (5) en depósitos de residuos radiactivos: Repositorios subterráneos, sellado de fracturas en granitos, etc.

Ingeniería Civil

Las bentonitas se empezaron a utilizar para este fin en Europa en los años 50, y se desarrolló más tarde en Estados Unidos. Se utiliza para cementar fisuras y grietas de rocas, absorbiendo la humedad para impedir que esta produzca derrumbamiento de túneles o excavaciones, para impermeabilizar trincheras, estabilización de charcas, etc. Para que puedan ser utilizadas han de estar dotadas de un marcado carácter tixotrópico, viscosidad, alta capacidad de hinchamiento y buena dispersabilidad. Las bentonitas sódicas o cálcicas activadas son las que presentan las mejores propiedades para este uso. Los usos en este campo se pueden resumir en: (1) creación de membranas impermeables en torno a barreras en el suelo, o como soporte de excavaciones; prevención de hundimientos. En las obras, se puede evitar el desplome de paredes lubricándolas con lechadas de bentonita; (3) protección de tuberías: como lubricante y rellenando grietas; (4) en cementos: aumenta su capacidad de ser trabajado y su plasticidad; (5) en túneles: Ayuda a la estabilización y soporte en la construcción de túneles. Actúa como lubricante (un 3-5 % de lodo de bentonita sódica mantenida a determinada presión soporta el frente del túnel); (6) también es posible el transporte de los materiales excavados en el seno de fluidos bentoníticos por arrastre; (7) en tomas de tierra: Proporciona seguridad en el caso de rotura de cables enterrados; (8) transporte de sólidos en suspensión.

Alimentación animal

Una aplicación de las bentonitas que está cobrando importancia en los últimos tiempos es su utilización como ligante en la fabricación de alimentos pelletizados para animales. Se emplea en la alimentación de pollos, cerdos, pavos, cabras, corderos, y ganado vacuno, fundamentalmente. Actúa como ligante y sirve de soporte de vitaminas, sales minerales, antibióticos y de otros aditivos. En 1992 se empezó a fabricar con bentonitas 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. La bentonita tiene una doble misión: actúa como promotor del crecimiento y como atrapador de toxinas. Esto se debe a que el alimento mezclado con bentonita, debido a su gran capacidad de adsorción, permanece más tiempo en la zona intestinal, la arcilla adsorbe el exceso de agua, y hace que los nutrientes permanezcan más tiempo en el estómago, siendo mayor su rendimiento (mayor producción). Por otro lado adsorben toxinas, no pudiendo éstas, por tanto, atravesar las paredes intestinales. La mayor adsorción de agua de los nutrientes, además, hace que los excrementos sean menos húmedos, así los lechos permanecen más tiempo limpios y se reduce la probabilidad de epidemias y la proliferación de moscas y parásitos. Las aves que comen este tipo de alimentos excretan un 26 % más de toxinas y adsorben un 42 % más de proteínas.

Catálisis

El uso de aluminosilicatos en diferentes campos de la catálisis es tan antiguo como el propio concepto de catálisis. Son muchas las aplicaciones de las arcillas como catalizadores o soporte de catalizadores en diferentes procesos químicos. Así, son utilizadas en reacciones de desulfuración de gasolina, isomerización de terpenos, polimerización de olefinas, cracking de petróleo, etc. Las propiedades catalíticas de las bentonitas son resultado directo de su elevada superficie específica y tipo de centros activos. La pilarización consiste en introducir, en el espacio interlaminar de una esmectita, un policatión muy voluminoso que, tras calcinación, da lugar a un oxido estable que determina una porosidad fija y permanente de tamaño controlado (tamices moleculares).

Industria farmacéutica

Desde hace tiempo las arcillas se vienen usando como excipiente por la industria farmacéutica. Debido a que no son tóxicas, ni irritantes, y a que no pueden ser

absorbidas por el cuerpo humano se utilizan para la elaboración de preparaciones tanto de uso tópico como oral. Se utiliza como adsorbente, estabilizante, espesante, agente suspensor y como modificador de la viscosidad. Su principal uso es 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 ralentizar 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.

Otros usos

Las posibles aplicaciones de las bentonitas son tan numerosas que es casi imposible citarlas todas. Además de los campos de aplicación industrial indicados anteriormente, las bentonitas se utilizan: (1) en la industria de detergentes, como emulsionante y por su poder ablandador del agua, debido a su elevada capacidad de intercambio catiónico; (2) para la fabricación de pinturas, grasas, lubricantes, plásticos, cosméticos, se utilizan arcillas organofílicas, capaces de hinchar y dispersarse en disolventes orgánicos, y utilizarse, por lo tanto, como agentes gelificantes, tixotrópicos o emulsionantes; (3) para desarrollar el color en leucocolorantes, en papeles autocopiativos, se utilizan bentonitas activadas con ácido; (4) en agricultura, para mejorar las propiedades de suelos arenosos o ácidos. Así mismo se utilizan esmectitas sódicas para recubrir ciertos tipos de semillas, de forma que su tamaño aumente, y resulte más fácil su distribución mecánica, a la vez que se mejora la germinación; (5) en la obtención de membranas de ósmosis inversa, para la desalinización de aguas.

6.8. FABRICACION DE PRODUCTOS CERÁMICOS

El procedimiento que se debe seguir para la elaboración de un producto cerámico, en este caso el ladrillo cerámico, es el siguiente:

- **Selección de la Materia Prima:** La materia prima de un ladrillo es la arcilla, la cual, para ser apta debe tener la siguiente composición química: Contenido de álcalis y ácidos: menor del 0.2%. Puede causar eflorescencias con un porcentaje mayor. Sustancias solubles (sales y sulfatos): menor al 0.04%. Igual al anterior produce eflorescencias con un porcentaje mayor. Sulfuros de hierro (Pirita): Su exceso puede producir un deposición sulfúrica en el momento de la cocción, ocasionando coloraciones indeseables y cuarteaduras sobre el material. Contenido de alúmina: 20%-30%. Imparte plasticidad a la arcilla, y una exceso provoca contracciones altas en el secado. Contenido de sílice: 50%-60%. Da baja contracción, previene el agrietamiento, imparte uniformidad al ladrillo. Asociada con la durabilidad. Su exceso disminuye la cohesión entre partículas. Oxido de hierro: Imparte coloración rojiza a la cerámica. Su exceso produce una coloración azul oscura. Generalmente no ocasiona otra molestia. Cal: Debe estar dispersa (diámetro 0.2 mm) o sea cal viva más agua. Es un fundente que permite bajar la temperatura de la sílice. Si hay un exceso puede fundir demasiado provocando agrietamiento y deformación de la pieza. MgO: Imparte coloración amarilla a la cerámica. Ayuda a decrecer la deformación. Su exceso produce deterioro o expansión de la superficie. Además la arcilla debe tener un bajo contenido de materia orgánica para que en el proceso de cocción no queden espacios vacíos por el consumo de este material.

- **Adecuación de la materia prima:** Ajuste granulométrico, el cual se hace por medios mecánicos, y dependiendo de la finura de la arcilla esta tendrá mayor o menor grado de plasticidad; Ajuste por contracción, el cual consiste en agregar arenas o arcillas no plásticas; Ajuste por humedad, el cual se realiza teniendo en cuenta las especificaciones dadas por los límites de Atterberg; Mezcla

homogénea para lograr una misma composición en toda la matriz, ya sea por bestia, por batidora, o por otros procesos mecánicos.

- **Moldeo:** Depende del proceso de producción, ya sea con equipo de extrusión, en donde se utiliza una boquilla para impartir la forma del ladrillo, o por moldeo manual, en donde se utiliza un molde para dar la forma a la arcilla.

- **Secado:** Tiene por objeto eliminar la humedad libre y parte de la combinada por exposición al ambiente, lo cual se hace así por costos, velocidad de contracción, lo que nos da una mejor calidad.

- **Cocción:** Proceso mediante el cual se somete al fuego la arcilla moldeada y seca, para producir una sinterización intensa de la arcilla, y una vitrificación adecuada. A continuación se exponen los efectos más importantes del calor sobre las arcillas: eliminación del agua higroscópica se da a una temperatura de aproximadamente 100°C, aún no pierde su agua de composición y conserva la propiedad de dar masas plásticas; con una temperatura entre 300 y 400°C el agua llamada de combinación es liberada, perdiendo la propiedad de dar masas plásticas aunque se le reduzca a polvo y se le añada suficiente agua; entre 600 y 700° C el agua en la arcilla es totalmente eliminada; por la acción del calor entre 700 y 800°C adquiere propiedades tales como dureza, contracción y sonoridad, la sílice y la alúmina comienzan a formar un silicato anhidro (Mullita: Al_2O_3 SiO_2); esta combinación se completa al parecer entre 1100 y 1200°C; hacia los 1500°C aparecen los primeros síntomas de vitrificación.

7. GEOLOGÍA DEL DEPOSITO DE ARCILLAS DE LA LADRILLERA DE LA COSTA LTDA.

En este capítulo se describen las características geológicas del depósito de arcillas explotado por la firma Ladrillera de La Costa Ltda., ubicado en el municipio de Ariguaní, Magdalena, mediante cartografía geológica a escala 1:1000. El levantamiento de las columnas litoestratigráficas se diseñó de manera que fuera posible describir e identificar las capas de roca y sedimento y determinar los procesos geológicos que ocurrieron en el área de estudio. Los códigos y las descripciones son las utilizadas universalmente por la mayoría de geólogos. El procedimiento se llevó a cabo considerando los siguientes aspectos: localización de la estación de trabajo, selección de las columna, medida de las capas, descripción de la litología, determinación del tamaño del sedimento, registro de estructuras sedimentarias, recolección de muestras, elaboración de esquemas y toma de fotografías, interpretación de los datos.

7.1. ESTRATIGRAFÍA

La características litológicas de la secuencia estratigráfica que aflora en el área de estudio, de acuerdo con la cartografía geológica realizada por Clavijo et al. (2002) (Figura 6), corresponderían a aquellas de la Formación Zambrano (NgZ) de edad Plioceno, la cual según estos autores consiste de capas medias a gruesas de arenitas bioclásticas a bioesparíticas, cuarzosas, arcillosas y areniscas calcáreas, con abundantes clastos de moluscos, interestratificadas con lodolitas calcáreas bioclásticas. Sin embargo, de acuerdo con la cartografía geológica desarrollada en el presente trabajo, la secuencia estratigráfica levantada está mucho más relacionada con la Formación Jesús del Monte (Ngjm) de edad Mioceno, la cual infrayace a la Formación Zambrano (NgZ) y que, según Clavijo et al. (2002),

consiste de capas gruesas a muy gruesas de lodolitas de color gris a verde oliva, interestratificadas con capas medianas a finas de areniscas líticas.

La secuencia estratigráfica que se cartografió en el área de estudio posee un espesor total aproximado de 50 m (ver Anexo 2, Columna Litoestratigráfica Generalizada). A continuación se describen las unidades litológicas detalladas en el depósito de Ladrillera de La Costa Ltda., de base a techo en la secuencia estratigráfica:

7.1.1. Unidad AREN-1

Corresponde a la unidad litológica cartografiada al este del arroyo Jericó, en la loma del "corral" (ver Anexo 1, Mapa Geológico). Consiste de una secuencia de arcillolitas laminares, fisibles, de color pardo amarillento, con espesores de 1.5-1.8 m, con capas de areniscas de grano fino, con matriz arcillosa, líticas y de color pardo amarillento que poseen espesores entre 0.8 y 1.5 m y que aparecen hacia la base y la parte media de la secuencia, respectivamente. El espesor total de esta sección litológica es de 5.60 m (Anexo 2 y Figura 16).

7.1.2. Unidad ARC-1

Esta unidad consiste de una gruesa secuencia de arcillolitas con un espesor total de 12.50 m que afloran en las lomas del sector occidental del predio de Ladrillera de La Costa Ltda. Sobre esta unidad es precisamente donde se ubican los dos frentes de explotación (ver Anexo 1, Mapa Geológico, Anexo 2 y Figura 17). Esta secuencia de arcillolitas se halla compuesta por las siguientes sub-unidades:

ARC-1C: Arcillolita laminar, fisible, pardo-amarillenta, con lentecillos de yeso y alta presencia de oxidación. Espesor medido: 3.0 m.

ARC-1B: Arcillolitas laminares, compactas, color gris oscuro, plásticas. Esta sub-unidad se ha venido explotando como materia prima para la fabricación de ladrillos y adoquines, principalmente. Espesor medido: 1.0 m.

ARC-1A: Arcillolitas laminares, fisibles, de color pardo-amarillento, con lentecillos de yesos hasta de 1.0 cm de espesor diseminados en toda la sección. Espesor medido: 6.8 m. Estas arcillolitas igualmente se explotan para la fabricación de ladrillos y adoquines.

7.1.3. Unidad AREN-2

Esta unidad aflora en las lomas del sector occidental del predio de la Ladrillera de La Costa Ltda. (ver Anexo 1, Mapa Geológico, Anexo 2, Figuras 17 y 18), suprayaciendo a la Unidad ARC-1. Consiste de una secuencia de areniscas y arcillolitas con un espesor total de 4.5 m, descritas a continuación de base a techo.

Arenisca de grano fino, bien calibrada, lítica, de color pardo-amarillento, matriz arcillosa, estratificación plano-paralela. Espesor medido: 0.4 m.

Arcillolita pardo-amarillenta, laminar, fisible, con lentecillos de yeso diseminados. Espesor 0.9 m.

Arenisca de grano fino, pardo-amarillenta, lítica, matriz arcillosa. Espesor medido: 0.3 m.

Arenisca de grano fino, lítica, friable, de color blanco-amarillento, con laminación plano-paralela. Espesor medido: 0.9 m.

Arcillolita laminar, fisible, pardo-amarillenta, con lentecillos de yeso diseminados. Espesor medido: 1.5 m.

Arenisca de grano fino, lítica, pardo-amarillenta, matriz arcillosa. Espesor medido: 0.5 m.

7.1.4. Unidad ARC-2

Esta unidad se halla presente en las lomas del sector occidental del predio de la Ladrillera de La Costa Ltda. (ver Anexo 1, Mapa Geológico, Anexo 2 y Figura 18). Se trata de una capa de arcillolita laminar, fisible, de color gris, con un espesor total de 3.0 m. No se halló evidencia de lentecillos de yeso en esta unidad.

7.1.5. Unidad AREN-3

Esta unidad se constituye en la última unidad cartografiada en el depósito de arcillas de la Ladrillera de La Costa Ltda. (ver Anexo 1, Mapa Geológico, Anexo 2, Figura 18), aflorando en las lomas del sector occidental del área de estudio, suprayaciendo a las unidades descritas anteriormente. Consiste de dos estratos

de 1.0 y 0.5 m, respectivamente, de areniscas de grano fino, líticas, color pardo-amarillento y matriz arcillosa, interestratificados con una capa de 0.48 m de espesor de arcillolitas pardo-amarillenta, laminar y fisible.

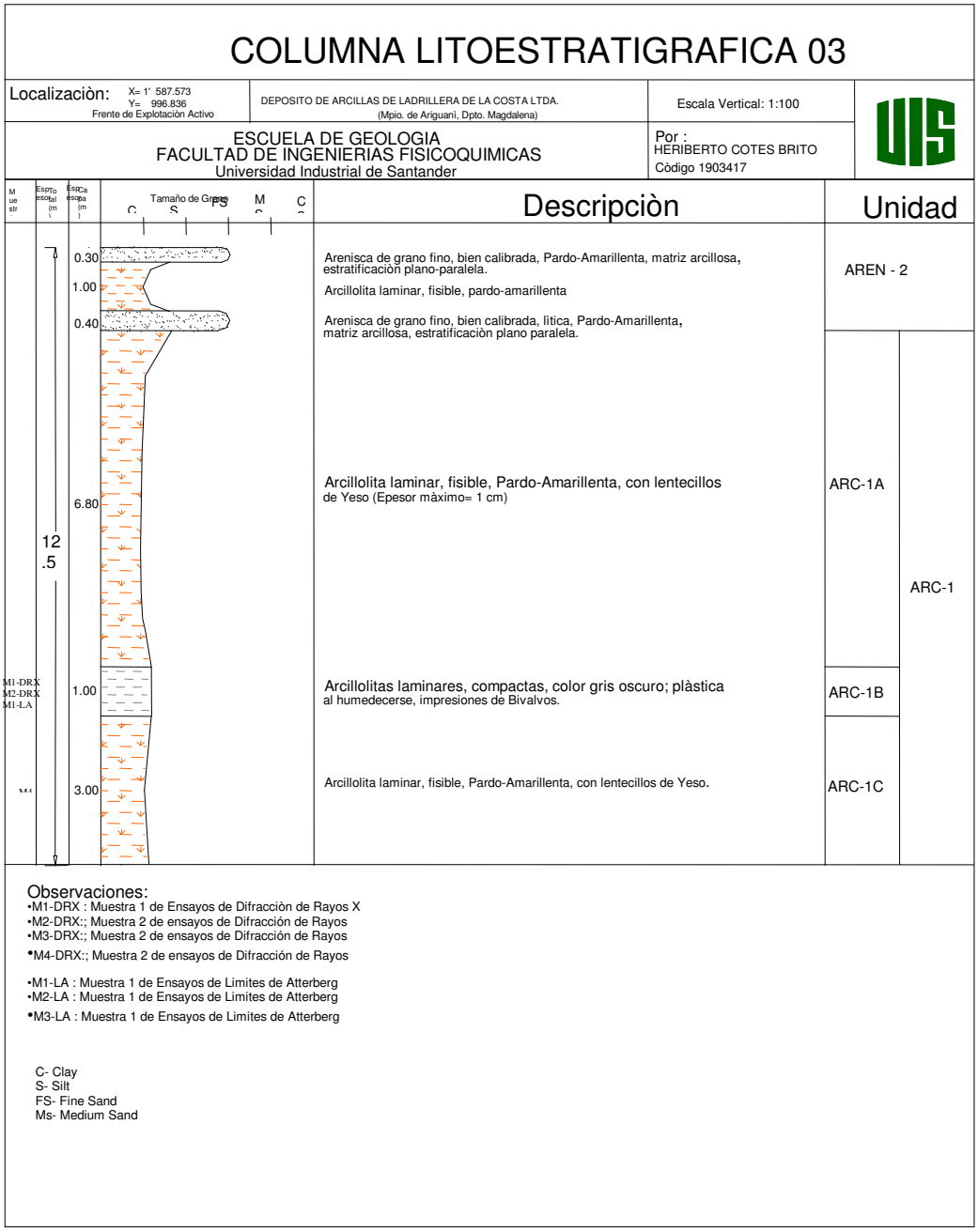
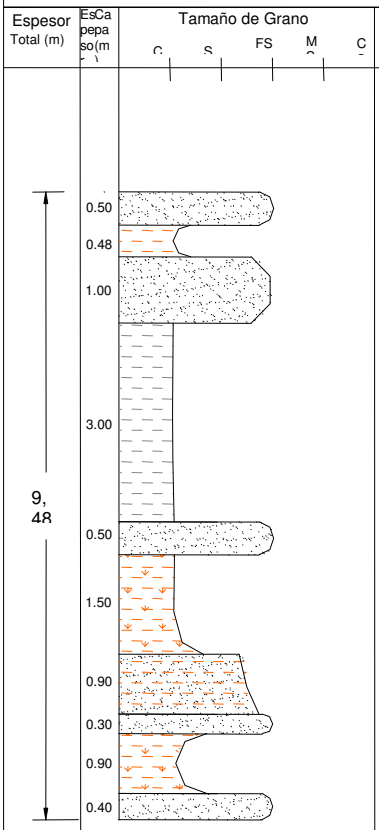


Figura 16 Columna Estratigráfica No. 3. Ladrillera de la Costa Ltda.

COLUMNA LITOESTRATIGRAFICA 01

Localizaciòn: X= 1' 587.699 Y= 996.957 Frente de Explotaciòn Inactivo	DEPOSITO DE ARCILLAS DE LADRILLERA DE LA COSTA LTDA. (Mpio. de Ariguanì, Dpto. Magdalena)	Escala Vertical: 1:100	UIS
ESCUELA DE GEOLOGIA FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS Universidad Industrial de Santander		Por : HERIBERTO COTES BRITO Còdigo 1903417	



Descripción	Unidad
Arenisca de grano fino, calibrada, matriz arcillosa, color Pardo-Amarillenta, estratificaciòn plano-paralela. Arcillolita laminar, fisible, pardo-amarillenta Arenisca de grano fino bien calibrada, matriz arcillosa, color Pardo-Amarillenta, estraficaciòn plano - paralela.	AREN-3
Arcillolita laminar, fisible, gris.	ARC-2
Arenisca de grano fino,litica Pardo-Amarillenta, matriz arcillosa Arcillolita, laminar fisible, con lentecillos de Yeso, Pardo-Amarillenta. Arenisca de grano fino, friable, con laminaciòn plano-paralela, color Blanco-Amarillento, con moscovita, lentecillos de Yeso. Arenisca de grano fino, matriz arcillosa, Pardo-Amarillenta, litica. Arcillolita, Pardo-Amarillenta, fisible, laminar, lentecillos de Yeso. Arenisca de grano fino, bien calibrada, litica, matriz arcillosa, color Pardo-Amarillenta, estratificaciòn plano-paralela.	AREN-2

•M1-LA : Muestra 1 de Ensayos de Limites de Atterberg
M2-LA : Muestra 1 de Ensayos de Limites de

C- Clay
S- Silt
FS- Fine Sand
Ms- Medium Sand

Figura 17 Columna Estratigráfica No. 1. Ladrillera de la Costa Ltda.

COLUMNA LITOESTRATIGRAFICA 02

Localizaciòn: X= 1' 587.700 Y= 997.291 Al oriente de Arroyo Jericò	DEPOSITO DE ARCILLAS DE LADRILLERA DE LA COSTA LTDA. (Mpio. de Ariguanì, Dpto. Magdalena)	Escala Vertical: 1:100	
ESCUELA DE GEOLOGIA FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS Universidad Industrial de Santander		Por : HERIBERTO COTES BRITO Còdigo 1903417	

Espesor Total (m)	Escala de separación (m)	Tamaño de Grano (C, S, FS, M, CS)	Descripciòn	Unidad
5,60	1.80		Arcillolitas, laminares, fisibles, color Pardo-Amarillenta.	AREN-1
	1.50		Arenisca de grano fino, lìtica, con matriz arcillosa, color Pardo-Amarillenta, con 0.20 m de arcillolita fisible, Pardo-Amarillenta.	
	1.50		Arcillolita laminar, fisible, color Pardo-Amarillento	
	0.80		Arenisca de grano fino,lìtica con matriz arcillosa, color Pardo-Amarillenta.	

•M1-LA : Muestra 1 de Ensayos de Limites de Atterberg
M2-LA : Muestra 1 de Ensayos de Limites de

C- Clay
S- Silt
FS- Fine Sand
Ms- Medium Sand

Figura 18 Columna Estratigráfica No. 2. Ladrillera de la Costa Ltda.

7.2. ORIGEN DEL DEPOSITO DE ARCILLAS DE LADRILLERA DE LA COSTA LTDA.

El origen del Depósito de Arcillas de Ladrillera de la Costa Ltda., se plantea tomando como base los siguientes aspectos:

Las arcillas y minerales de la arcilla ocurren bajo un rango bastante limitado de condiciones geológicas. Los ambientes de formación incluyen horizontes de suelo, sedimentos continentales y marinos, los campos geotérmicos, depósitos volcánicos, y meteorización de formaciones rocosas. La mayoría de minerales de la arcilla se forman donde las rocas están en contacto con agua, aire, o vapor. Los ejemplos de estas situaciones incluyen meteorización de cantos rodados en una ladera, sedimentos en el mar o fondos de lagos, sedimentos profundamente enterrados que contienen agua en poros, y rocas en contacto con agua calentada por magma (roca fundida). Todo estos ambientes pueden causar la formación de minerales de la arcilla a partir de minerales preexistentes. La alteración extensa de rocas a minerales de la arcilla puede producir relativamente depósitos puros de arcillas que son de interés económico (por ejemplo, los bentonitas usadas en perforación y arcillas usadas en cerámicas).

Erosión, transporte y depositación de arcillas y minerales de la arcilla producidas a partir de las rocas continentales y marinas más antiguas, son partes importantes del ciclo que forma rocas sedimentarias. El registro de la roca sedimentaria está compuesto de aproximadamente 70% de lodolitas (que contiene aproximadamente 50% arcilla-según clasificación de tamaño de grano) y shales (que es más tosco que la lodolita pero que puede contener partículas arcilla-clasificadas según tamaño) (Blatt y otros, 1980). Hoy, ambientes sedimentarios que contienen lodos cubren cerca 60% de las plataformas continentales marinas y 40% de las cuencas oceánicas profundas; los ambientes acuáticos continentales como lagos, ríos, estuarios, y deltas también contienen proporciones altas de sedimentos de grano

fino (Montuoso, 1995, pág. 162). Claramente, las arcillas y minerales de la arcilla son componentes críticos de ambientes sedimentarios antiguos y modernos.

Diagenesis es la alteración en el lugar de un mineral a las formas más estables, excluyendo la alteración superficial (que es meteorización); la diagenesis ocurre, por ejemplo, cuando minerales estables en un ambiente deposicional se expone a otro por enterramiento y consolidación. Silicatos comúnes como cuarzo, feldespatos, y vidrios volcánicos, así como los carbonatos, óxidos de hierro no cristalinos, y los minerales de la arcilla primarios, se transforman principalmente durante la diagenesis en los minerales de la arcilla más estables por disolución y recristallización.

La formación de bentonita (minerales en capas que contienen minerales de arcilla del grupo de la esmectita incluso la montmorillonita) y las fuller´earth (un tipo de arcilla que posee una alta capacidad de absorber agua) pueden ocurrir principalmente por diagenesis, aunque algunos depósitos también pueden formarse por procesos hidrotermales. Las capas de Bentonita normalmente se forman de la ceniza volcánica alterada, pero otros tipos de roca también pueden servir como fuentes. La meteorización de las rocas es la manera primaria en que las arcillas y minerales de la arcilla se forman en la superficie de la Tierra hoy. El proceso del desgaste involucra disgregación física y descomposición química que cambia los minerales originales a minerales de la arcilla; la meteorización es desigual, y pueden encontrarse muchas etapas de alteración en la misma muestra de arcilla. Factores que gobiernan la meteorización de la roca y la formación del suelo incluye el tipo inicial de roca, la proporción de agua en la roca, la temperatura, la presencia de organismos y el material orgánico, y el tiempo. Los tipos de minerales de la arcilla encontrados en rocas meteorizadas controla fuertemente como se comporta la roca bajo las diferentes condiciones climáticas (como condiciones húmedo-tropicales, seco-tropicales, y templadas).

La Caolinita se encuentra en la mayoría de las zonas meteorizadas y perfiles de suelos. La Montmorillonita que es químicamente más compleja que la Caolinita, es común en las partes más bajas de perfiles de suelos, más cercano la roca, donde la química ejerce un fuerte control en la mineralogía. Minerales de la

arcilla complejos (como illita-esmectita) es abundante en asociaciones de arcillas que se desarrollan a partir de rocas precursoras que contienen micas, como los plutones de granito que ocurre en regiones templadas del nor-este de los Estados Unidos. Por ejemplo, un componente importante de suelos formados por meteorización de granitos puede consistir en moscovita metaestable, biotita, y clorita. Estos minerales se alterarán progresivamente a minerales de la arcilla.

La formación Jesús del Monte (Ngjm), descrita por Clavijo, Garnica y Royero, 2002, posee una edad Mioceno a Plioceno, época en la que según la reconstrucción tectónica realizada por Duque Caro, (1978), el flanco sur-oeste de la Sierra Nevada de Santa Marta (macizo que ha sido desplazado hacia el norte por el sistema de fallas de rumbo sinextral de Santa Marta-Bucaramanga) (véase figuras 11 y 12) se hallaba muy cerca de la zona de El Difícil, que se sugiere como área fuente de los sedimentos que dieron origen a estas rocas sedimentarias arcillosas. En este flanco, afloran rocas ígneas instrusivas, efusivas de composición ácida e intermedia, y rocas metamórficas (neises y esquistos) (Tschanz, Jimeno y Cruz, 1969), entre las cuales se citan:

- Batolito de Aracataca (Jar), Edad: Jurásico medio.
- Batolito de Pueblo Bello (Jcm), Edad: Jurásico Tardío.
- Riodacita de los Tábanos (Jt), Edad: Jurásico Reciente.
- Rocas Volcánicas No Diferenciadas (Kjv), Edad: Jurásico reciente.
- Granulita de los Mangos (PEg), Edad: Precámbrico.
- Esquisto de Gaira (eg), Edad: Paleoceno.
- Neis de Buritaca (nb), Edad: Pérmico a Triásico.
- Rocas Metamórficas No Diferenciadas (mn), Edad: Triásico a Jurásico

Así, los sedimentos provenientes de la meteorización física y química de las formaciones rocosas mencionadas arriba, en un ambiente húmedo tropical, fueron arrastrados por torrenciales ríos que corrían en dirección sur-oeste, de manera que fueron depositados en un ambiente lacustre (Duque Caro, 1978),

tectónicamente estable, y que se extendía desde la base del macizo montañoso hasta lo que hoy se conoce como la ribera este del río Magdalena.

7.2. RASGOS ESTRUCTURALES

La secuencia estratigráfica en el área de estudio se dispone formando un monoclinal, con actitud de capas, con rumbo N27°E-N30°E y buzamiento 4-7°W (ver Anexo 1, Mapa Geológico). Este monoclinal parece corresponder al flanco occidental del anticlinal El Brillante, el cual según Clavijo et al. (2002), se extiende a 2 kilómetros al sur-este del área de estudio, y cuyo eje posee una orientación nor-oeste (ver Figura 6). En términos generales la tectónica del área es simple, no se halló evidencia de fallamientos ni de replegamientos que de una u otra forma afectaran la disposición espacial de las capas en la secuencia estratigráfica descrita con anterioridad.

8. CARACTERIZACION FISICOQUIMICA Y FISICOMECANICA DE LAS ARCILLAS

8.1. ANALISIS DE DIFRACCION DE RAYOS X

8.1.1. Técnica de preparación de muestras arcillosas para su estudio mediante difracción de rayos-X

No existe un único modo de preparar las muestras para su estudio mediante difracción de rayos-X, ya que esto dependerá de muchos factores. Lo primero que hay que hacer, en cualquier caso, con la muestra es secarla, esto se hace en una estufa a 50º C durante un mínimo de 24 horas. La proporción de muestra que se debe secar dependerá del propósito del análisis, si bien unos 100 gr pueden ser una cantidad suficiente para un estudio completo. Una vez seca la muestra hay que proceder a una disgregación o molienda de la misma que permita su posterior estudio. Dependerá del tipo de muestra que tengamos, de si se encuentra suelta o cementada, y del tamaño de grano, pues hay que evitar triturar los granos con objeto de no falsear el tamaño de grano de los filosilicatos. Posteriormente, se procede a su estudio mediante difracción de rayos-X. El polvo total nos permite conocer la mineralogía global (filosilicatos y no filosilicatos). Pero cuando se trata de muestras arcillosas es necesario, además, conocer cuales son los distintos filosilicatos presentes, para ello hay que proceder a la separación de estos, tanto debido a la poca intensidad de las reflexiones (00l) en polvo, como al enmascaramiento de estas por las de otros minerales. Muchos de los minerales que acompañan a las arcillas pueden ser eliminados extrayendo una fracción lo suficientemente fina. Pero, en general, lo que se hace es preparar lo que se denominan Agregados Orientados (AO) en los que las reflexiones basales se

refuerzan, a la vez que los minerales que no sean filosilicatos suelen estar ausentes. Una vez molida la muestra, se procede a un cuarteo, tras el cual se separa una porción de muestra de aproximadamente 2 o 3 gr que se destina al estudio de la composición global (Polvo). Esta porción se muele hasta un tamaño de unas 53μm, se tamiza y se realiza un difractograma hasta 65º. El resto de la muestra se destina al estudio de la fracción arcillosa. Para ello hay que preparar suspensiones de arcilla en agua. Se obtienen añadiendo a la muestra agua destilada (unos 100 gr en 2 litros de agua, aproximadamente, si bien depende del tipo de muestra). Se agita un mínimo de 2 horas a varios días hasta que, tras un reposo de 10 minutos, no se observen signos de floculación.

Según Mantilla (2003), existen básicamente cuatros métodos (preparación de la muestra) para lograr que las arcillas se separen de la muestra para luego ser concentradas: (a) disgregación mecánica, (b) disgregación por hidratación, (c) disgregación criogénica, y (d) trituración. Otros posibles métodos pueden derivarse de la mezcla de los anteriores.

Disgregación mecánica, se recomienda martillar la muestra a mano muy suavemente, sobre un papel blanco limpio en una base metálica (yunque). El papel evita que se pierda parte del material disgregado, el cual posteriormente se vierte en un vaso precipitado con aproximadamente 1.5 litros de agua destilada, para ser sometido posteriormente a agitación mecánica.

Disgregación por hidratación, simplemente se pone la muestra limpia en un recipiente con unos 1.5 litros de agua destilada y se deja hidratar durante varios días, dependiendo de las características de cada muestra. Este proceso permite una disgregación lenta de la muestra debido al reblandecimiento que va generando su hidratación. Este proceso puede resultar más efectivo, poniendo el vaso precipitado en un recipiente de baño de ultrasonidos o simplemente sometiendo su contenido a una agitación mecánica.

Disgregación criogénica, consiste en enfriar una muestra que ha sido previamente impregnada de agua destilada, para que el congelamiento de esta a una temperatura entorno a –10°C y su posterior calentamiento a temperatura ambiente, repetidas veces, produzca un efecto similar a los procesos de meteorización física tipo gelifracción.

Disgregación por trituración, consiste en machacar la roca con la ayuda de un molino para posteriormente pulverizarla en un mortero de ágata y luego verter el material en un vaso precipitado con 1.5 ltr. de agua destilada para ser agitado mecánicamente.

De todos los métodos de preparación de muestras antes citados, el menos recomendado es el relacionado con la disgregación mediante trituración, debido a que este método puede generar partículas muy finas durante la trituración y pulverización de la muestra, lo cual aumenta significativamente la proporción de contaminantes (p. ej. cuarzo). En nuestro caso, se ha llevado a cabo el método de disgregación por hidratación de las muestras para luego eliminar los carbonatos y la materia orgánica en el caso que estas tengan.

Eliminación de Carbonatos

La eliminación de carbonatos se debe realizar teniendo presente que este proceso no debe producir alteraciones en los minerales de la roca. Uno de los métodos que se suele utilizar es empleando HCl (Gault y Weiler, 1955; Ostrom, 1961, en Mantilla, en edición), pero este procedimiento no es recomendable, debido a que puede atacar a los filosilicatos. Por esta razón, se sugiere seguir el método propuesto por Jackson (1969) y resumido en Moor y Reynolds (1989), en Mantilla (2003). Este método, enriquecido en algunos aspectos adicionales, consiste básicamente en preparar una solución con 82 gr de acetato sódico en 900 ml de agua destilada, al que se añaden 27 ml de acetato acético glacial y se ajusta el pH

a un valor de 5 mediante la adición de hidróxido sódico o acetato acético. La solución se diluye a un litro de agua destilada (se debe obtener en total un litro de solución). Esta solución se vierte en un recipiente (vaso precipitado), donde esta la muestra previamente disgregada (300-500 gramos) siguiendo las recomendaciones antes señaladas. La muestra se debe agitar a temperatura ambiente hasta que no se observe efervescencia alguna. Luego, tapando el vaso, se pone en una estufa a baja temperatura (sin llegar a ebullición, preferiblemente no mayor a 80°C), durante al menos ½ hora. A continuación, la muestra es lavada repetidamente, siempre y durante todo el tratamiento con agua destilada, con el propósito de eliminar las sales formadas. Durante este proceso se debe tener en cuenta que la solución se elimina cuando no se observe una evidente presencia de material en suspensión, de lo contrario estaríamos eliminando las fracciones más finas e importantes. Para evitar esto, se recomienda dejar reposar la muestra mínimo 30 horas.

<u>Eliminación de la materia Orgánica</u>

Para la eliminación de la materia orgánica se recomienda poner en suspensión unos 150 gramos de muestra disgregada en 500 ml de agua destilada (tomar esto como una relación proporcional) y se añade 100 ml de H_2O_2 (al 30%- Perhidrol), para luego agitar la muestra durante una hora y/o someterla a ultrasonidos durante unos 15-20 minutos. De igual manera se puede someter la muestra a un baño-maría a 70º C, agitándola durante un tiempo no menor a 30 minutos. Luego de cesar la efervescencia, se procede a lavar la muestra mediante sucesivas decantaciones, siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente en la eliminación de carbonatos.

Para agilizar el proceso de lavado antes descrito, si dispuso de una centrifuga, en la cual la suspensión se pone a centrifugar durante una hora a 4500 r.p.m. Al final, el material que decanta en el fondo de los vasos de la centrífuga se agita con agua

destilada, para así garantizar su lavado (eliminación de sales), y nuevamente se somete a centrifugación mínimo unas tres veces en total.

Separación de las fracciones 2.0- 0.4μm, 0.4-0.2μm y <0.2μm

Una vez se ha eliminado la materia orgánica y los carbonatos, se agrega entre 300 y 500 gr de muestra a un litro de agua destilada y se somete a agitación mecánica durante 8 horas (intercalando 45 min. de agitación y 15 min. de reposo, regulando esto con un temporizador), luego de las cuales se deja reposar la muestra cerca de 8 horas para extraer la fracción <2.0 μm. El tiempo de reposo necesario para extraer la fracción de interés esta determinado por la temperatura y la altura de la columna de agua (Ley de Stokes). Se recomienda repetir este proceso 4 o 5 veces, para lograr con ello la extracción de al menos el 95% de dicha fracción.

La separación de la suspensión con las fracciones de interés, es posible según las siguientes dos formas: (1) utilizando una jeringa o una manguera, evitando la reagitación y por lo tanto la incorporación de partículas más gruesas que quedan en el fondo del vaso precipitado, se succiona la suspensión (agua destilada con las partículas del tamaño de interés en suspensión), y (2) mediante la utilización de una centrifuga. En el caso de una centrífuga de un rotor con cuatro vasos, cada uno con capacidad para 100 ml, se somete la suspensión que queda luego de las ocho horas de agitación a 1000 r.p.m. durante 100 s (ó a 1500 r.p.m. durante 50 s). La suspensión que queda en cada vaso de la centrífuga, contiene la fracción <2μm. Con una centrífuga de las características señaladas, los componentes de tamaño entre 0.4-0.2μm y <0.2μm, se separan sometiendo la suspensión con la fracción <2μm a 5000 r.p.m. durante 10 min. y 3500 r.p.m. durante 5 min., respectivamente.

Debido a que las partículas con la granulometría de interés aun se encuentran en suspensión y se necesita concentrarlas, se recomienda evaporar el agua con

ayuda de un horno (se recomienda no calentar la muestra más de 80°C) o simplemente utilizando papel filtro. Este último, se puede utilizar incluso en reemplazo de la centrífuga desde un comienzo para separar las fracciones de interés.

Estudio de las fracciones mediante XRD

Una vez separadas las suspensiones con las fracciones de interés, se debe estudiar cada una de ellas mediante XRD, con el propósito de identificar fundamentalmente las fases minerales presentes que puedan acompañar la illita, grado de pureza, cristalinidades, politipos y demás características. Para esto, se recomienda analizar la misma muestra en agregado orientado, sometida a solvatación con líquidos orgánicos (etilenglicolada) y tratada térmicamente.

No obstante, hay que procurar someter la muestra al mínimo número posible de procesos tanto químicos como físicos, ya que estos pueden modificar sus características. En especial hay que evitar los tratamientos químicos debido a la gran reactividad que presenta la superficie de las láminas de los filosilicatos.

En síntesis, el procedimiento antes descrito se resume en el diagrama de flujo de la Figura 19.

Figura 19. Diagrama de flujo mostrando el proceso de preparación de las muestras para análisis de difracción de rayos-X. (Adaptado y modificado de Mantilla, 2003).

8.1.2. Resultados

Los análisis de difracción de rayos-X se llevaron a cabo en el Laboratorio de Química Estructural de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, usando un difractómetro, marca RIGAKU, modelo D-MAX-IIIB, bajo las siguientes condiciones analíticas: Voltaje: 40(kV); Corriente: 20(mA); Rendijas (Slits) DS 1.0°: RS 0.3 mm y SS 1.0°; Velocidad de Barrido: 3°/min; Muestreo: 0.02°; Rango de Medición2-70°; Radiación: CuKα; Monocromador: Grafito. Por otra parte, se utilizó la Base de Datos Cristalográfica: Powder Diffraction File (PDF-2) del Internacional Center for Diffraction Data (ICDD), Sets 1-51.

La identificación cualitativa de las fases presentes en las muestras se realizó mediante comparación de las reflexiones del perfil observado con las reflexiones de los perfiles de difracción reportados en la base de datos Powder Diffraction File (PDF-2) del International Center for Difraction Data (ICDD), Sets 1-51, utilizando el correspondiente software. En el proceso de identificación se aplicó el método de Hanawalt. El análisis de difracción de rayos-X arrojó los resultados dados en la Tabla 5 (véase Figuras 20, 21, 22 y 23).

La nimita $(Ni, Mg, Al)_6(Si, Al)_4 O_{10} (OH)_8$, filosilicato tetragonal del grupo de la clorita, la cual se halla asociada al talco y a la serpentina, aparece en los resultados de los análisis de difracción de rayos-X sobre las cuatro muestras analizadas, tanto en las arcillas grises (Sub-unidad ARC-1B) como en las pardas (Sub-unidades ARC-1A y ARC-1C).

La espangolita $(Cu_6 Al(SO_4)(OH)_{12}Cl(H_2O_3))$, mineral de la clase de los sulfatos, aparece en los resultados del análisis de difracción de rayos-X en tres de las cuatro muestras analizadas: M1 (arcilla gris de la Sub-unidad ARC-1B), M3 (arcilla parda de la Sub-unidad ARC-1C) y M4 (arcilla parda de la Sub-unidad ARC-1A).

Muestra 1. Arcillolita Gris. Subunidad ARC-1B	
Nombre	**Fase Cristalina**
Pirita	FeS_2
Anortita sodio, intermedia	$Na_{0.45}Ca_{0.55}Al_{1.55}Si_{2.45}O_8$
Albita calcio baja	$(Na_{0.75}Ca_{0.25})(Al_{1.26}Si_{2.74}O_8)$
Cuarzo bajo	SiO_2
Nimita-1M	$(Ni,Mg,Al)(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
Dickita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4(HCONH_2)$
Espangolita	$Cu_6Al(SO)_4(OH)_{12}Cl(H_2O)_3$
Muestra 2. Arcillolita Gris. Subunidad ARC-1B	
Nombre	**Fase Cristalina**
Cuarzo bajo	SiO_2
Nimita-1M	$(Ni,Mg,Al)(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
Albita calcio rica. ordenada	$(Na,Ca)Al(Si,Al)_3O_8$
Mica	$K\text{-}Fe\text{-}Mg\text{-}Al\text{-}Si\text{-}O\text{-}H_2O$
Dickita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4(HCONH_2)$
Muestra 3. Arcillolita Parda. Subunidad ARC-1C	
Nombre	**Fase Cristalina**
Cuarzo	SiO_2
Illita-2M1	$(KH_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$
Vermiculita	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)$
Nimita-1M	$(Ni,Mg,Al)(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
Albita alta	$Na(AlSi_3O_8)$
Espangolita	$Cu_6Al(SO)_4(OH)_{12}Cl(H_2O)_3$
Muestra 4. Arcillolita Parda. Subunidad ARC-1A	
Nombre	**Fase Cristalina**
Cuarzo bajo	SiO_2
Moscovita-1M	$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$
Vermiculita-2M	$(Mg,Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2.4(H_2O)$
Nimita-1M	$(Ni,Mg,Al)(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
Albita calcio baja	$(Na_{0.75}Ca_{0.25})(Al_{1.26}Si_{2.74}O_8)$
Espangolita	$Cu_6Al(SO)_4(OH)_{12}Cl(H_2O)_3$

Tabla 5. Resultados de análisis por difracción de Rayos X de las muestras de arcillolitas del depósito de arcillas de la Ladrillera de La Costa Ltda.

La dickita ($AL_2Si_2O_5$ $(OH)_4(HCONH_2)$), mineral monoclínico del grupo de las caolinitas, posee la misma fórmula química que minerales tales como caolinita, nacrita y halloysita, pero tiene diferente estructura cristalina. Este mineral se observó en los resultados de los análisis de difracción de rayos-X en las muestras

M1 (arcilla gris de la Sub-unidad ARC-1B) y M2 (arcilla gris de la Sub-unidad ARC-1B).

Los resultados de difracción de rayos-X muestran que las arcillas pardas no presentan dickita, pero en la muestra M3 (arcilla parda de la Sub-unidad ARC-1C) se destaca la presencia de illita (K, H_3O)(Al, Mg, Fe)$_2$(Si, Al)$_4$ O_{10}((OH)$_2$, H_2O), un mineral formador de arcillas, originado por la meteorización de otros minerales ricos en aluminio y que efectivamente para su identificación requiere de análisis de difracción de rayos-X. Su estructura, aunque similar a la de la montmorillonita, el aluminio reemplaza en un 10 a 15% a la sílice, lo cual destruye la propiedad de expandirse con el agua, a diferencia de la montmorillonita, debido a que los débiles enlaces son reemplazados por fuertes enlaces iónicos de potasio. Así, estructuralmente la illita se sitúa en un punto intermedio entre la montmorillonita y la moscovita. La montmorillonita se convierte en illita en sedimentos, y la illita en moscovita al someterse a condiciones de metamorfismo de bajo grado (Leet, 1982).

En la muestra M1 (arcillolita gris de la Sub-unidad ARC-1B), el análisis de difracción de rayos-X, señala la presencia de pirita (FeS_2). Este hecho resulta importante, si se considera que al almacenarse al aire libre la arcilla, la pirita se oxida transformándose en sulfato (Salmang, 1954). Si lo anterior se suma a la presencia de yeso ($CaSO_4.2H_2O$), en las arcillolitas pardas de las Sub-unidades ARC-1C y ARC-1A, se puede tener un problema importante de eflorescencias. Salmang, (1954), anota, a manera de ejemplo, que el contenido de SO_4 en una arcilla durante un almacenaje de nueve meses pasó de 10 a 50 ppm, es decir, se quintuplicó. Las sales que contienen las arcillas pueden pasar a la superficie, debido o a efectos de la corriente capilar que se produce durante la desecación, cristalizando sobre la misma, o a la cocción de la parte que no se ha descompuesto. Según Camerman, 1949, en Salmang, 1954, las eflorescencias desarrollan fuerzas de cristalización de tal magnitud, que la parte exterior de los muros de mampostería pueden desmoronarse totalmente y derrumbarse.

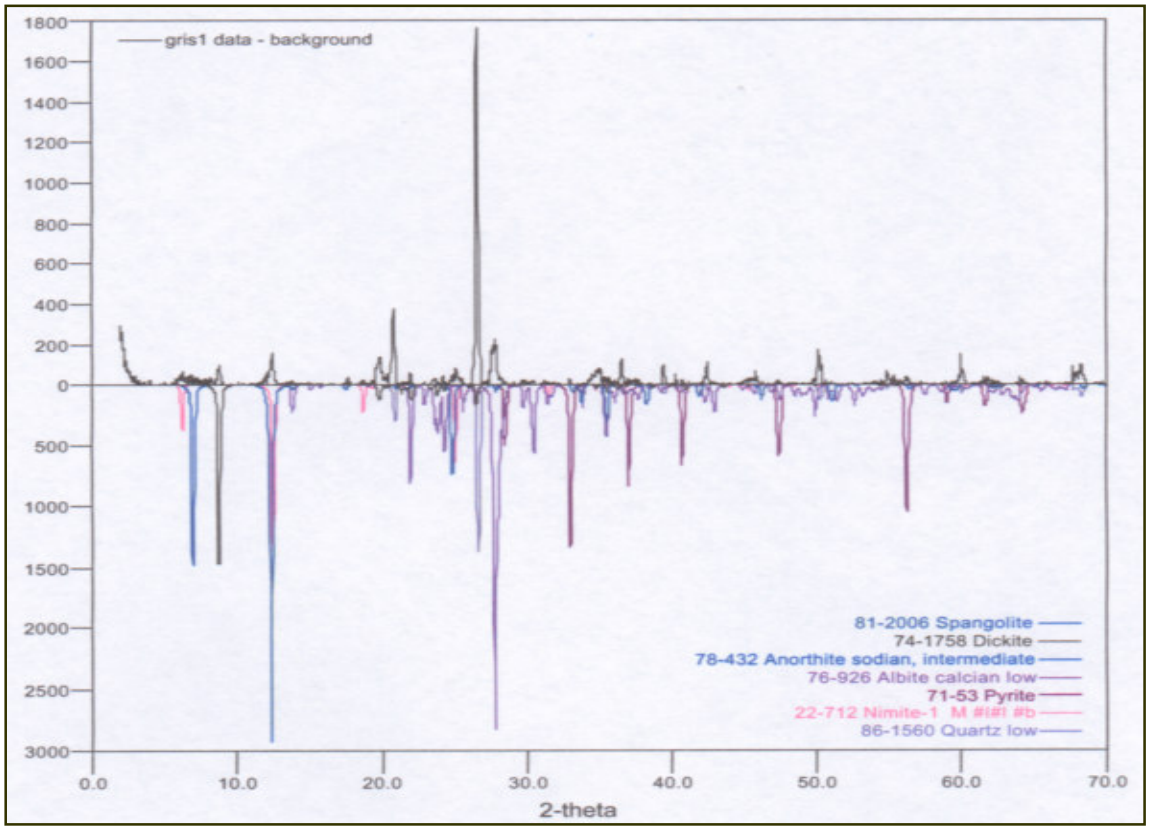


Figura 20**.** Difractograma de Muestra 1, Arcillolita Gris. Sub-unidad ARC-1B.

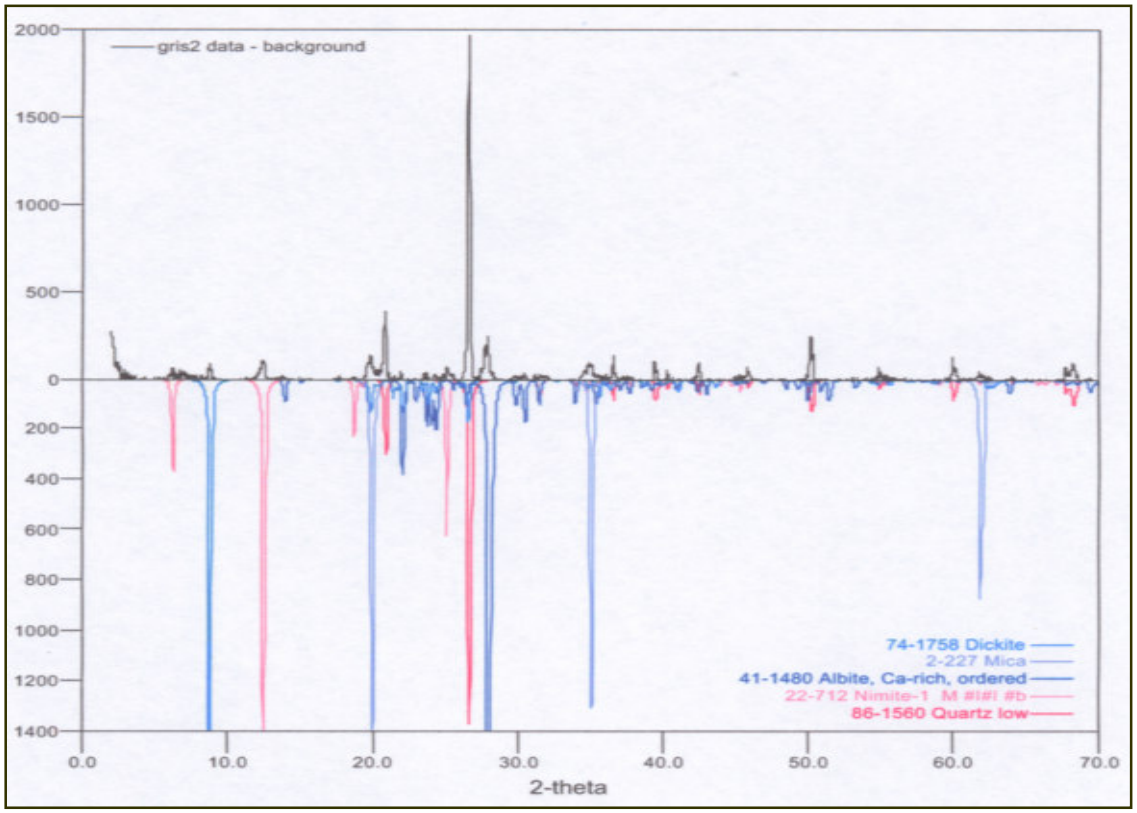


Figura 21. Difractograma de Muestra 2, Arcillolita Gris. Sub-unidad ARC-1B.

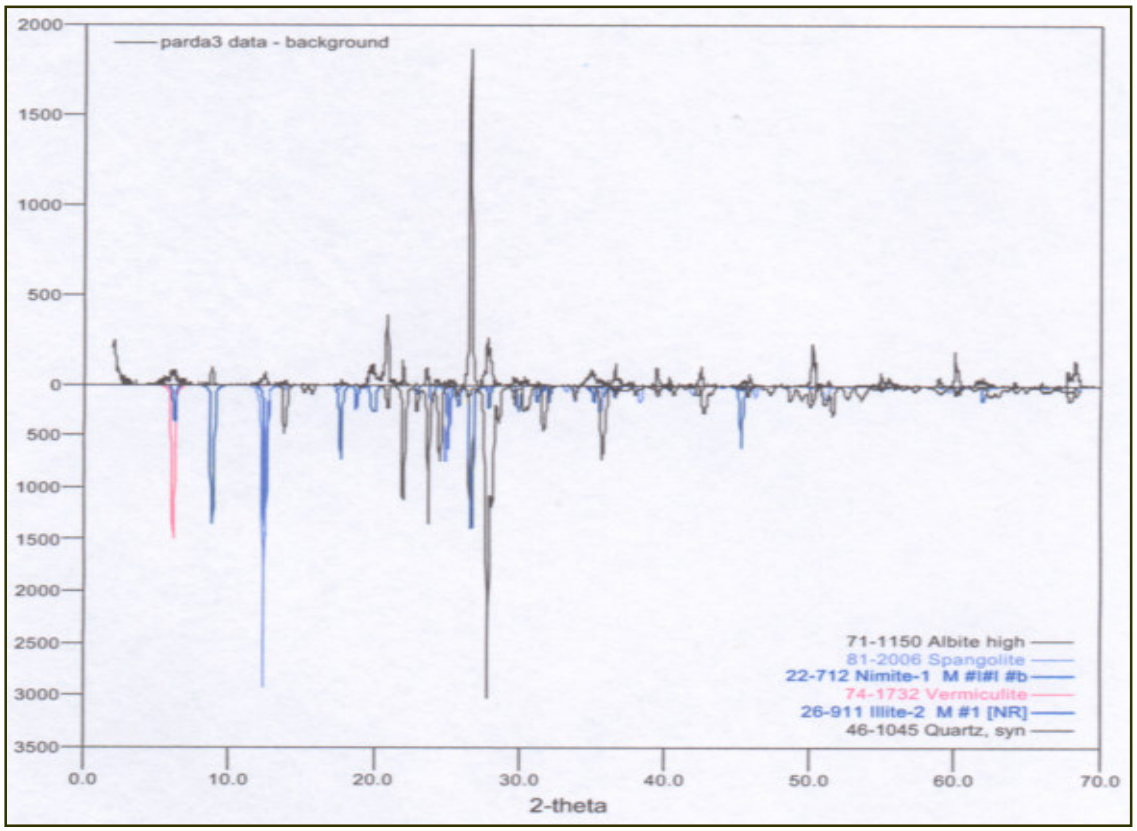


Figura 22. Difractograma de Muestra 3, Arcillolita Parda. Sub-unidad ARC-1C.

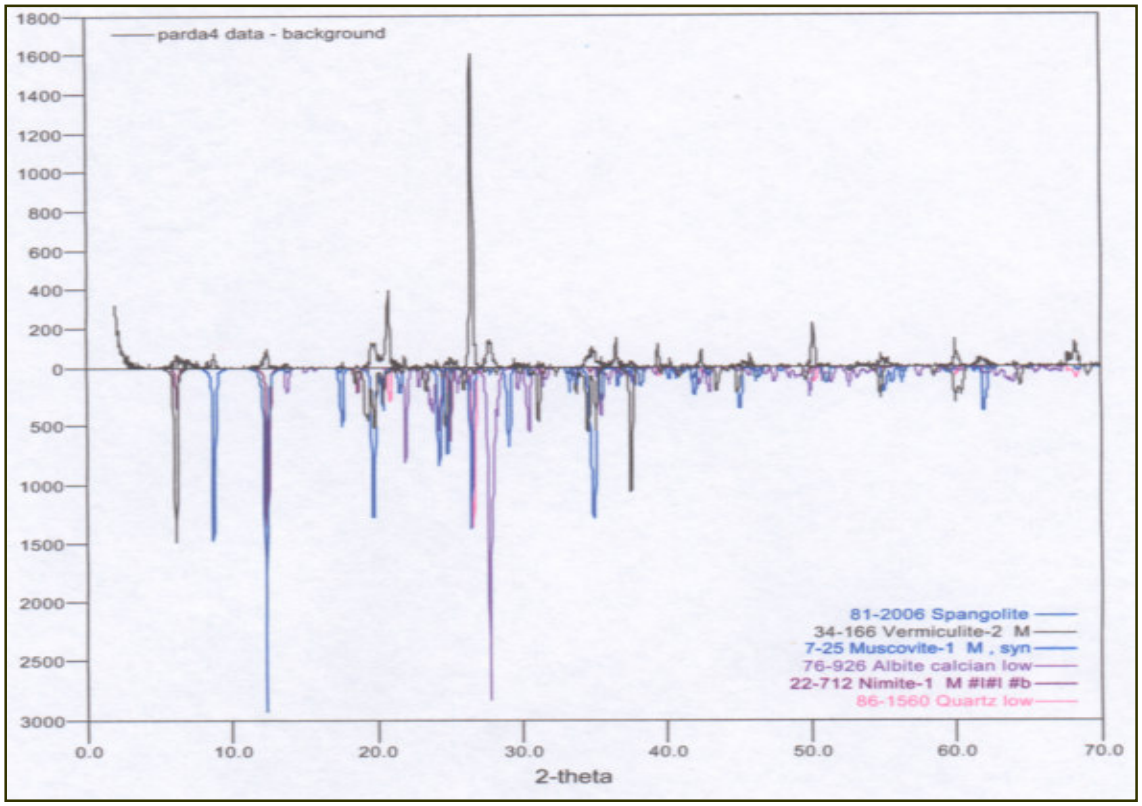


Figura 23. Difractograma de Muestra 4, Arcillolita Parda. Sub-unidad ARC-1A.

Los resultados del análisis de difracción de rayos-X muestran similitudes en politipos y composición de minerales de arcillas y otros (espangolita, nimita, etc.), lo cual puede implicar que tienen una misma fuente de origen, un terreno de rocas ígneas ácidas y/o rocas metamórficas con el grado probablemente de esquistos verdes expuestas en un clima cálido húmedo, como lo sugieren algunos autores (Szu-Bin B. Lin y Y.R. Wang, 2001) en sus análisis. Szu-Bin B. Lin y Y.R. Wang, 2001, sugieren, sobre depósitos similares de arcillas, que la cantidad y presencia de illita representa probablemente una facies menos profunda (somerización de la cuenca por movimientos tectónicos).

De acuerdo con Clavijo, Garnica y Royero, 2002, las rocas sedimentarias que afloran en el área de estudio son de edad Mioceno a Plioceno, de tal forma que si se sitúa en el marco tectónico propuesto por Duque-Caro (1978), para esta época, la cuenca se hallaba en una zona de sedimentación fluvial y lacustre, cuya fuente principal de sedimentos son las formaciones rocosas que afloran en el flanco occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, la cual se encontrada en ese entonces desplazada aproximadamente 100 kilómetros al sur de su ubicación actual. Así, formaciones geológicas importantes en este macizo aportaron sedimentos, entre las cuales se destacan rocas ígneas intrusivas ácidas (Batolito Central, Batolito Bolívar, etc.) y volcánicas (Ignimbrita de Los Tábanos, Riodacita de La Piña, Riolita del Golero, etc.), así como metamórficas (Neis de Buritaca, con yacimientos actualmente en explotación de talco, vermiculita y magnesita; Esquisto de Gaira, Esquistos no diferenciados, etc.) aflorantes en el flanco occidental del Macizo Sierra Nevada de Santa Marta. Según Gilg et al. (2002), el origen de la illita y la caolinita en algunos depósitos de arcillas en Alemania, a partir de rocas ígneas efusivas como riolitas, tobas e ignimbritas en un complejo volcánico.

8.2. LIMITES DE CONSISTENCIA O DE ATTERBERG

Los límites de consistencia, también llamados límites de Atterberg, son índices de trabajabilidad, los cuales están afectados por el contenido de agua presente en el suelo, de esta forma se han señalado tres parámetros que son ampliamente usados en la práctica por los ingenieros de suelos, estos son: el Límite Plástico Superior (Límite Líquido), el Límite Plástico Inferior (Límite Plástico) y el Índice de Plasticidad.

8.2.1. Límite Plástico Superior (Límite Líquido)

El Límite Plástico Superior se conoce como el contenido de humedad que presenta el suelo cuando se comporta como un semifluido. Su evaluación se llevo a cabo en la cazuela de Casagrande, cuando al hacer una ranura en forma trapezoidal, a los 25 golpes, las dos mitades de suelo se unen en una longitud de 1.2 cm. (Figura 24).

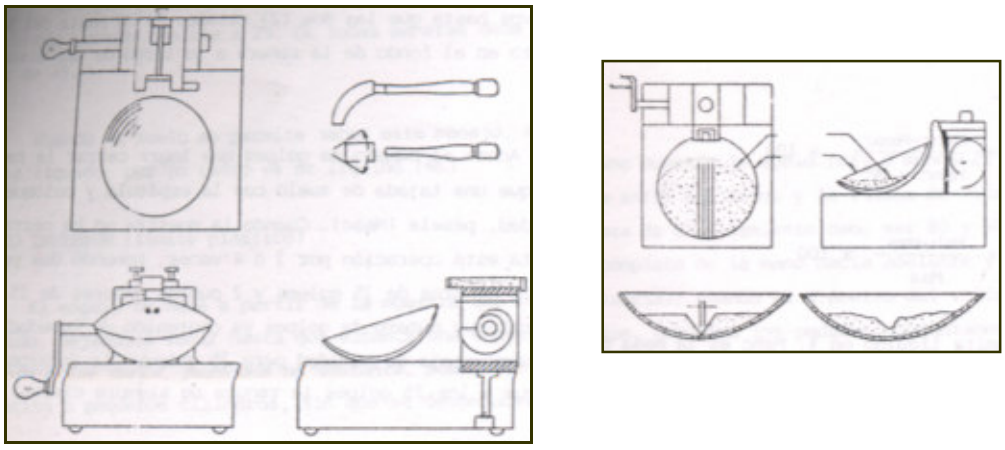


Figura 24. Cazuela de Casagrande para determinar Límites de Atterberg. (Adaptado de IGAC, 1990).

Materiales y equipo utilizado

Mortero para moler la muestra de suelo; cazuela de Casagrande con su correspondiente ranurador; cápsulas de humedad; balanza analítica; estufa para secar la muestra a 105-110°C; frasco lavador; agua destilada; espátula que tenga una hoja de 3" de longitud y ¾" de ancho aproximadamente; lámina de acero; muestra pasada por tamiz No. 40; formato para el registro de datos.

Procedimiento

Pese aproximadamente 100 g de suelo seco al aire, pase la muestra por tamiz de malla No. 40 (425 micras); colóquela sobre la lámina de acero y agréguele 15 a 20 ml de agua destilada, amásela y tájela con una espátula de forma alterna y repetida, agregue más agua en una proporción de 1 a 3 ml; mezcle nuevamente.

Coloque una porción de muestra de suelo en la cazuela de Casagrande teniendo cuidado de evitar la inclusión de burbujas dentro de la masa; nivele el suelo con una espátula hasta conseguir una profundidad de 1 cm (el exceso de suelo regréselo a la lámina); divida el suelo de la cazuela en dos mitades usando el ranurador, con el cual se podrán hacer dos pasadas hasta que quede limpio el fondo de la cazuela; golpee la cazuela a una rata de 2 rps hasta que las dos mitades de la pasta del suelo se pongan en contacto en el fondo de la ranura a lo largo de una distancia de 1.2 cm.

Anote el número de golpes que logra cerrar la ranura a esta longitud; saque una taja de suelo con la espátula; colóquela en una cápsula de humedad y pésela. Cuando la muestra no ha cerrado a los 25 golpes, repita esta operación por 3 ó 4 veces, tomando dos puntos por encima de 25, pero menores de 35 golpes y dos puntos menores de 25 y mayores de 15 golpes; grafique número de golpes Vs. Contenido de humedad; interpole y determine el contenido de humedad para 25

golpes (la interpolación se hace debido a que a los 25 golpes la ranura no siempre cierra) (IGAC, 1990).

Cuando la muestra de suelo cierra a los 25 golpes se toma una porción de suelo y se determina el porcentaje de humedad que corresponde al límite líquido.

Cálculos: El límite líquido se calcula a partir de la expresión dada a continuación.

LL = $\frac{\text{mh-Mss}}{\text{ms}}$ x 100, donde:

LL: Límite líquido; **Msh:** Masa del suelo húmedo, en gr; **Mss:** Masa del suelo seco, en gr.

Cuando el suelo no permite hacer este manejo, se dice que no tiene Límite Líquido, por lo tanto es No Líquido (NL).

8.2.2. Límite Plástico Inferior (Límite Plástico)

El ensayo se hace a partir de la muestra que se tomó para el Límite Líquido, dejándola secar hasta que alcance una consistencia tal que no se adhiera a las manos. No obstante, la muestra pueda ser enrollada en forma de bastoncitos o pequeños cilindros, sin que se desmenuce.

Materiales y equipo utilizado

Lámina de vidrio esmerilado; cápsulas de humedad; balanza analítica; suelo seco al aire pasado por tamiz No. 40; formato para registro de datos.

Procedimiento

Tome una muestra de suelo (más o menos 23 g); comprima y enrolle la masa de suelo entre los dedos y la lámina de vidrio o sobre una superficie lisa; la rata de enrollamiento debe ser 80 y 90 pasadas por minuto con un movimiento completo de la mano hacia adelante y hacia atrás y volviendo a la posición inicial; cuando el diámetro del rollo llegue a 3 mm, rómpalo en 6 y 8 pedazos; comprima los pedazos conjuntamente con los dedos hasta obtener una masa uniforme; continúe el enrollamiento hasta que se rompan; cuando los rollos tengan 5 a 6 cm de largo y 3 mm de diámetro, llévelos a una cápsula de humedad, péselos, luego llévelos a la estufa a 105°C durante 24 horas y péselos; repita tres veces este procedimiento. (IGAC, 1990).

***Cálculos*:** A partir de la expresión dada a continuación se calcula el Límite Plástico.

LP = $\frac{\text{mh-Mss}}{\text{ms}}$ x 100, donde:

LP: Límite Plástico; **Msh:** Masa del suelo húmedo, en gr; **Mss:** Masa del suelo seco, en gr.

8.2.3. Índice de Plasticidad

El Indice de Plasticidad se determina por diferencia entre el Límite Líquido y el Límite Plástico.

IP = LL –LP, donde:

IP: Indice de Plasticidad; **LL:** Límite Líquido; **LP:** Límite Plástico.

8.2.4. El diagrama de Casagrande

Casagrande complementa los conceptos de límites de Atterberg o de consistencia dando un enfoque de aplicación y utilidad de los resultados obtenidos. Así, el diagrama de Casagrande (Figura 25), cuenta con varios elementos de un significado preciso, la recta de 45° representa materias primas imaginarias, ya que la coincidencia de los límites plástico y líquido no se puede dar.

La recta de ecuación IP = 0.9 (LL – 8) es el límite superior experimental, y hasta ahora no se ha encontrado ni estudiado una materia prima cuya representación se encuentre por encima de esta línea. La recta de ecuación IP = 0.73 (LL – 20) posee una gran importancia empírica, ya que separa las arcillas inorgánicas típicas sobre ella, de las que contienen algún tipo de coloide inorgánico que están representados por puntos situados debajo.

La recta vertical que pasa por el punto LL = 50 es una línea convencional que separa las arcillas de alta plasticidad, a la derecha, de las de media y baja plasticidad, a la izquierda. La recta descrita anteriormente separa las arcillas con límites líquidos bajos de aquellas con límites líquidos altos, entonces se puede definir un rango para el cual el límite líquido es aceptable a ambos lados de la citada recta (comprendido entre 40 y 60). Si se considera el índice de plasticidad como medida auténtica de la plasticidad de la arcilla, cuanto mayor sea éste, mejores condiciones tendrá para el moldeo de ladrillos, pero la retracción de secado y otros aspectos de carácter negativo dependen de la plasticidad. En arcillas de IP mayor de 30, aparecen con mucha frecuencia defectos de secado, de manera que con solo conocer este dato se recomienda el uso de desengrasantes.

Las arcillas con IP menor de 10 son prácticamente inmoldeables, presentando problemas en la extrusión.

Con lo anterior, se define una zona de arcillas que desde el punto de moldeo y secado son aceptables. En la Figura 25 se representa esta zona, y se ha resaltado una zona más pequeña que podría llamarse de características óptimas.

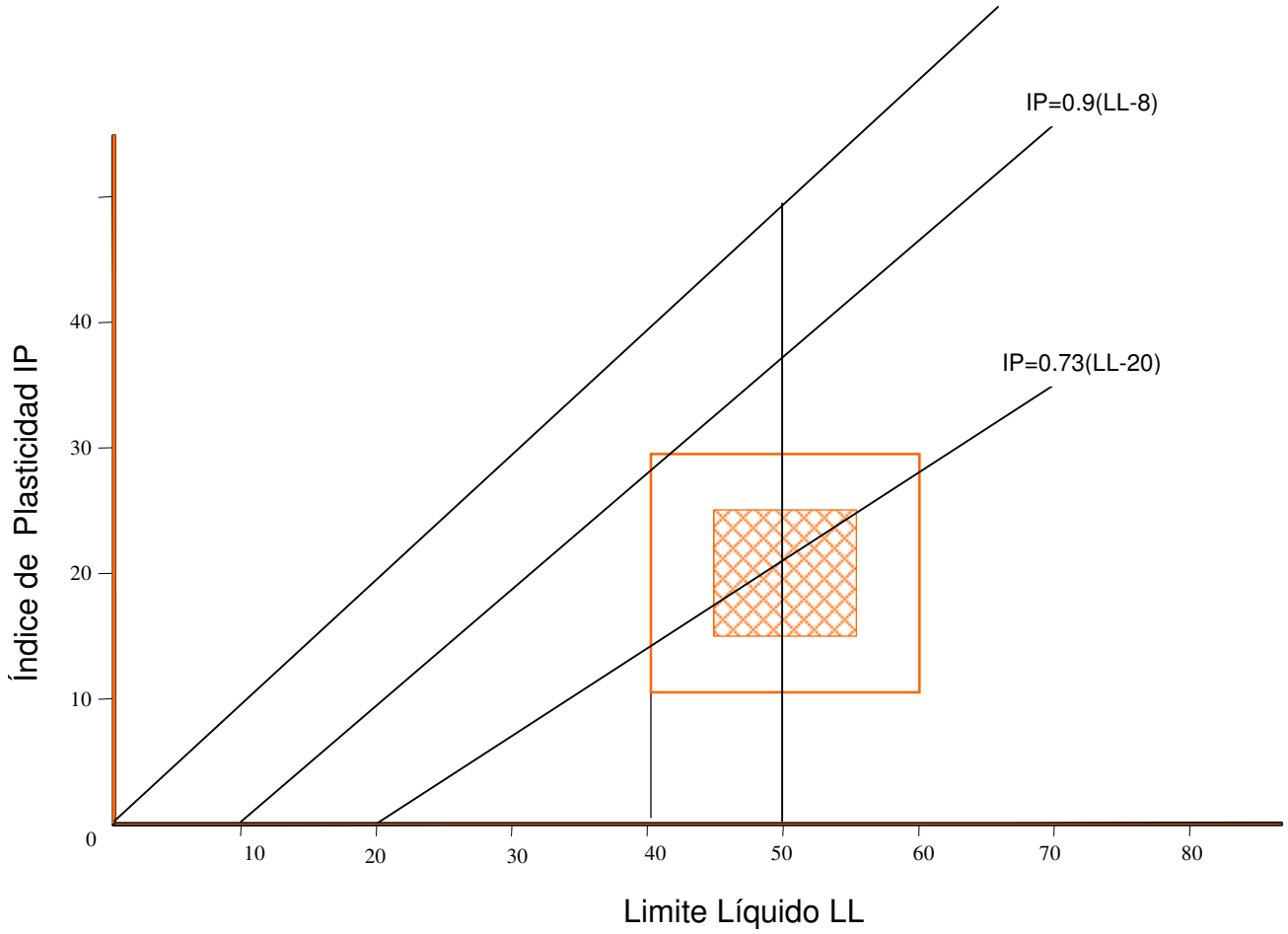


Figura 25. Diagrama de Casagrande (Adaptado de Camacho y Camargo ,1986).

En la Figura 26 se muestran las zonas que según Casagrande corresponden a los diferentes tipos mineralógicos. Estas zonas no son muy exactas, pero sí lo suficiente, como para que la determinación de la plasticidad pueda contribuir a la caracterización mineralógica de las arcillas (Camacho y Camargo, 1986).

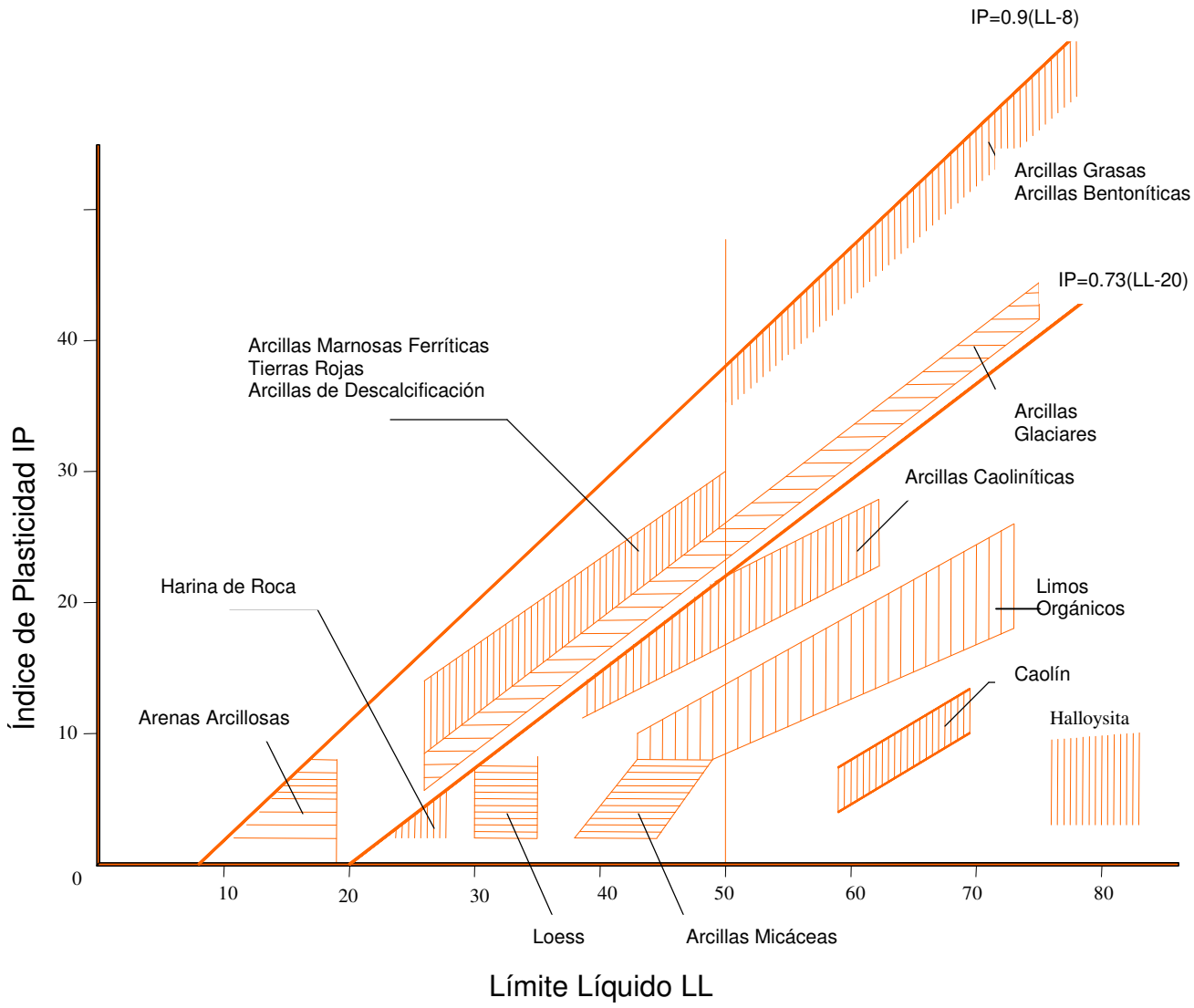


Figura 26. Clasificación de Arcillas según Casagrande en función de los Límites de Atterberg. (Adaptado de Camacho y Camargo ,1986).

8.2.5. Resultados

Los ensayos de consistencia o Límites de Atterberg realizados en el laboratorio de preparación de muestras de la Escuela de Geología (UIS) sobre tres muestras de arcillolitas del depósito de arcillas de la Ladrillera de La Costa Ltda., arrojaron los siguientes resultados (véase tabla 6):

Muestra 1. Arcillolita Gris. Unidad ARC-1B.

- LL a 25 golpes = 38% (Figura 27).
- LP = 22%
- IP = LL – LP = 38% - 22% = 16%

De acuerdo con el Diagrama de Casagrande, esta muestra se halla por fuera del rectángulo, pero muy cerca de la zona de arcillas que desde el punto de vista de moldeo y secado son aceptables (Figura 30). Según la Clasificación de Arcillas propuesta por Casagrande en función de los límites de Atterberg, ésta arcilla se localiza en la zona de arcillas caoliníticas. (Figura 31).

Muestra 2. Arcillolita Gris. Unidad ARC-1B.

- LL a 25 golpes = 42% (Figura 28).
- LP = 25%
- IP = LL – LP = 42% - 25% = 17%

De acuerdo con el diagrama de Casagrande, esta muestra se halla dentro de la zona de arcillas que desde el punto de vista de moldeo y secado son aceptables (Figura 30). De acuerdo con la clasificación de arcillas propuesta por Casagrande en función de los límites de Atterberg, ésta arcilla se localiza en la zona de arcillas caoliníticas (Figura 31).

Muestra 3. Mezcla de arcillolita gris (50%) y parda (50%).

LL a 25 golpes = 50% (Figura 29); LP = 20%; IP = LL – LP = 50% - 20% = 30%.

De acuerdo con el diagrama de Casagrande, esta muestra se halla en la zona de arcillas que desde el punto de vista de moldeo y secado son aceptables (Figura 30). Según la clasificación de arcillas propuesta por Casagrande en función de los límites de Atterberg, ésta mezcla se localiza en la zona de arcillas marnosas (Figura 31).

Las arcillas extraídas del depósito de Ladrillera de La Costa Ltda., según el diagrama de Casagrande, son de media plasticidad y se hallan en el límite entre arcillas inorgánicas típicas y arcillas que contienen algún tipo de coloide inorgánico. (Figura 31).

Con la mezcla de arcillas grises y pardas en porcentaje igual del 50%, la muestra resultante obtiene un Índice de Plasticidad de 30%, y un Límite Líquido óptimo de 50%. (Figura 30).

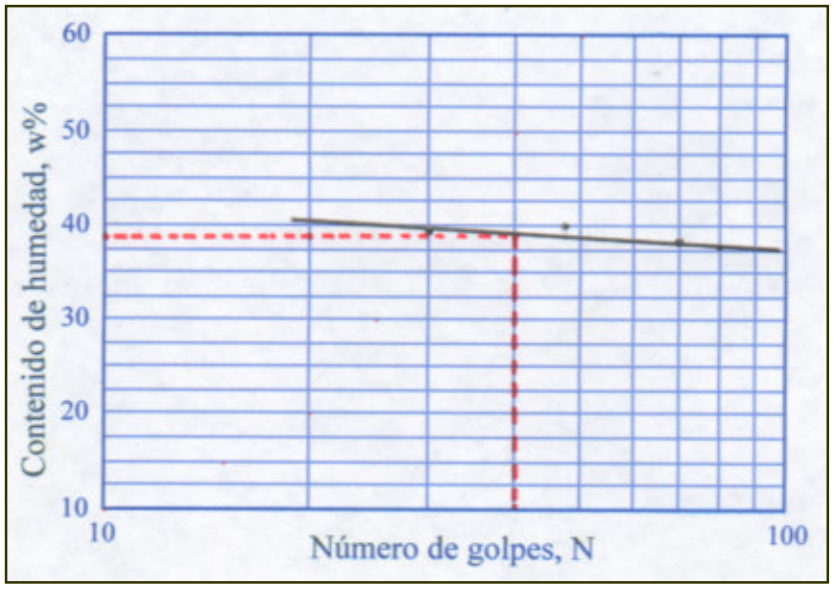


Figura 27. Gráfica de Límite Líquido de la Muestra 1(Ladrillera de la Costa Ltda..).

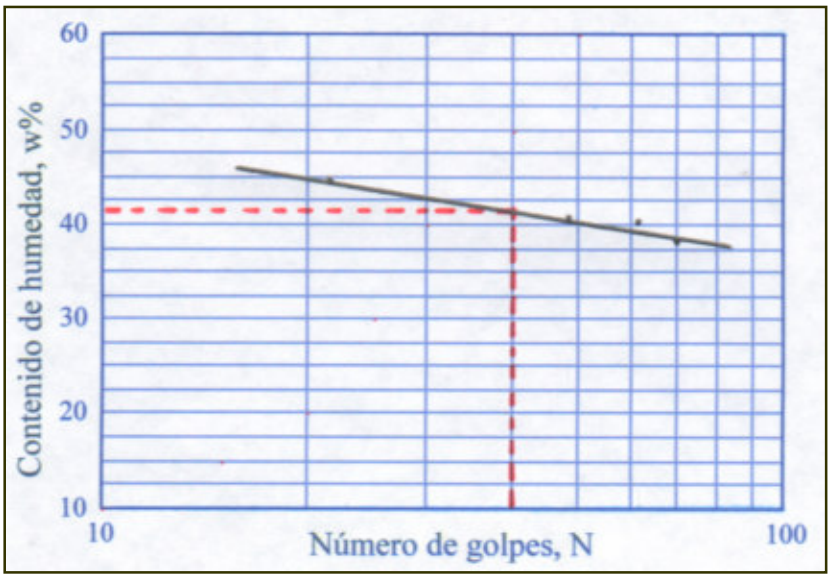


Figura 28. Gráfica de Límite Líquido de la Muestra 2 (Ladrillera de la Costa Ltda..).

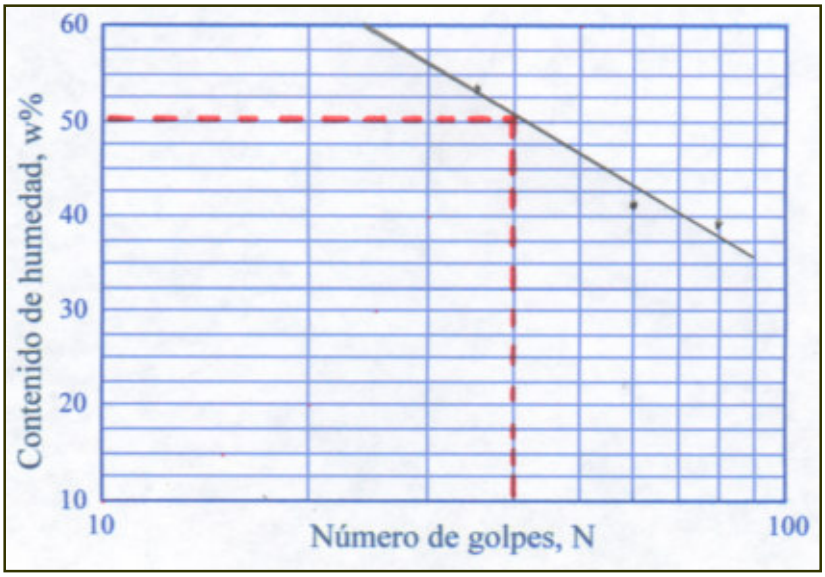


Figura 29. Gráfica de Límite Líquido de la Muestra 3 (Ladrillera de la Costa Ltda..).

ESCUELA DE GEOLOGÍA FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS **UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**	**Tesis: Geología y Economía del Depósito de Arcillas de Ladrillera de la Costa Ltda.. Mpio de Ariguaní, Departamento del Magdalena**	**Diciembre 2003**

LIMITES DE CONSISTENCIA

LIMITE LIQUIDO

No. de Muestra	1-Arcilla Gris				2-Arcilla Pardo-Amarilla				3-Mezcla de Arcilla Gris y Pardo-Amarilla (50%-50%)				
Número de Golpes	20	28	39	46	16	29	36	40	14	23	35	45	
Peso de cápsula (gr)	7.4	7.0	7.1	7.0	7,2	7,1	7,2	7,2	9.2	6.5	7.0	8.4	
Peso de cápsula (+) suelo húmedo (gr)	22.2	21.7	16,8	21.3	17,2	18,1	17,9	18,8	20.5	16.8	17.2	19.3	
Peso de cápsula (+) suelo seco (gr)	18,0	17,5	14,1	17,4	14,1	14,9	14,8	15,6	16.1	13.2	14.2	16.2	
Peso del suelo seco (gr)	10,6	10,5	7,0	10,4	6,9	7,8	7,6	8,4	6.9	6.7	7.2	7.8	
% de Humedad	39,62	40,00	38,57	37,50	44,93	41,03	40,79	38,10	63.77	53.73	41.67	39.74	

LIMITE PLASTICO				RESULTADOS				
No. de Muestra	1	2	3	**No. MUESTRA**	**LIMITE LIQUIDO %**	**LIMTE PLASTICO %**	**INDICE DE PLASTICIDAD**	
Peso de Cápsula	7.0	7.2	6.7	1	38	20	18	
Peso de suelo Húmedo (+) cápsula	7.6	7.7	7.3	2	42	25	17	
Peso de suelo seco (+) cápsula	7.5	7.6	7.2	3	50	20	30	
% Humedad	20	25	20					

Tabla 6. Resultados de los ensayos de Límites de Atterberg sobre muestras de arcillas de Ladrillera de la Costa Ltda.

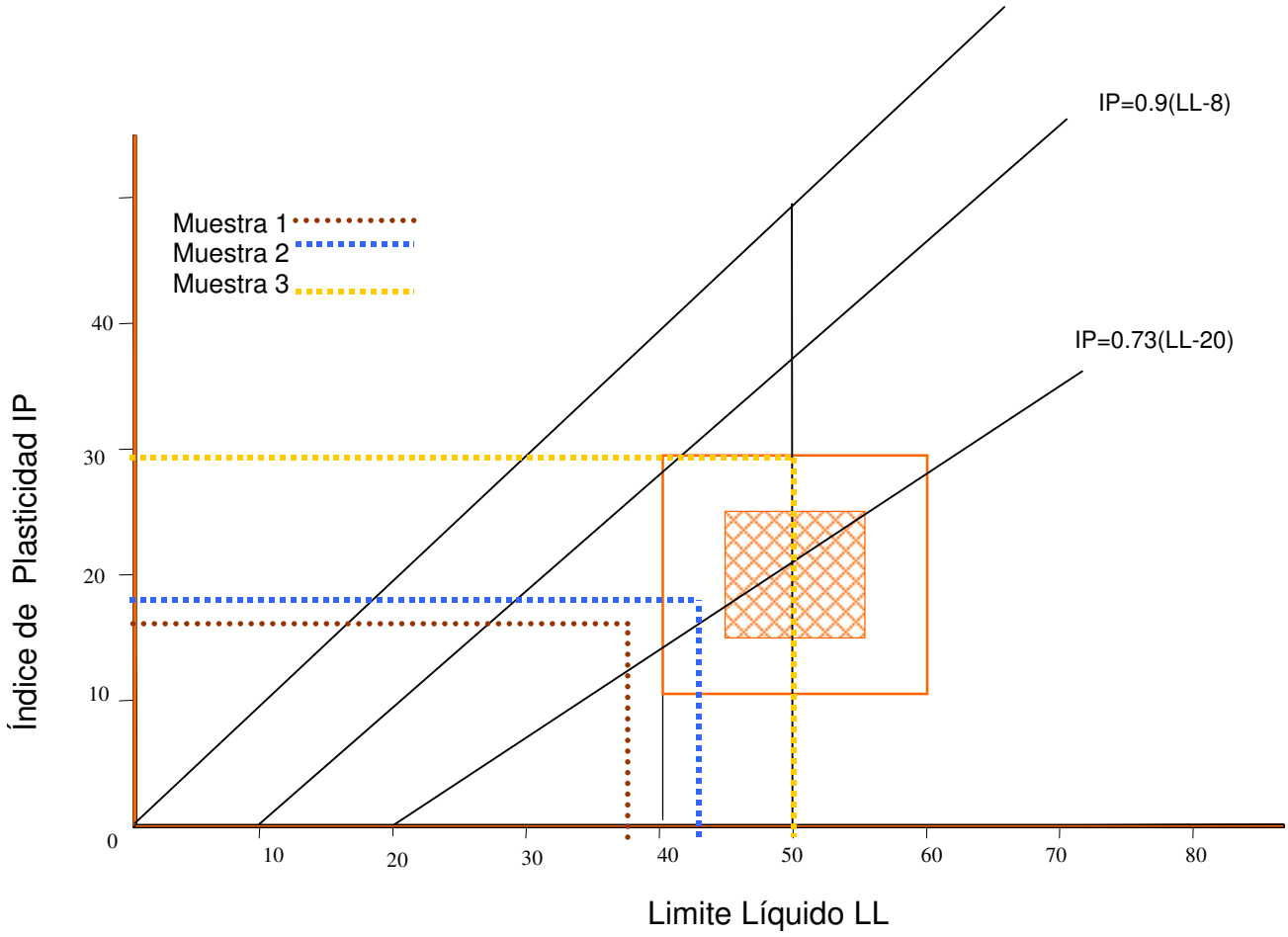


Figura 30. Diagrama de Casagrande. Resultados obtenidos de ensayos de Atterberg sobre muestras de arcillolitas de Ladrillera de la Costa Ltda.

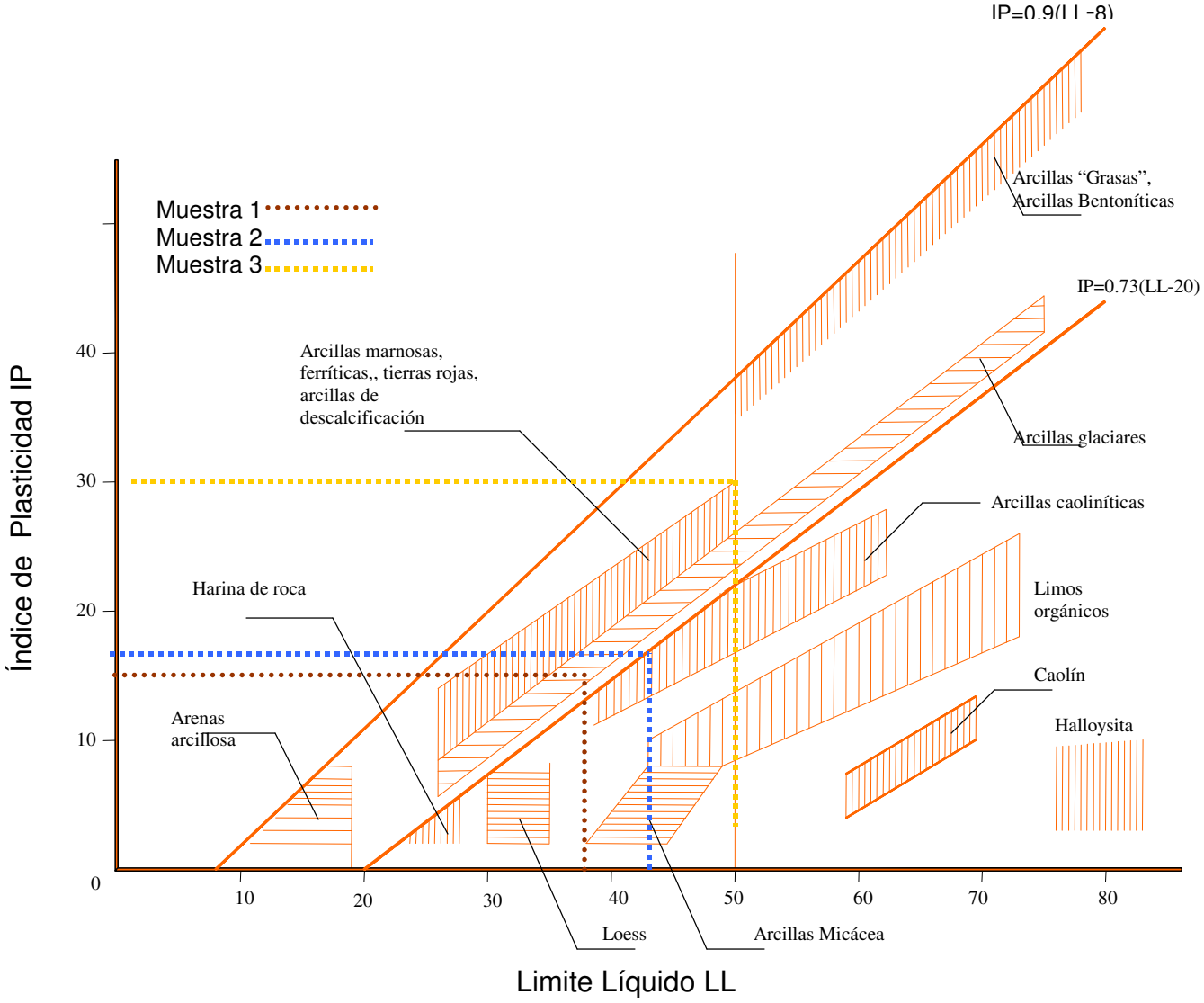


Figura 31. **Clasificación de Arcillas de Ladrillera de la Costa Ltda..**
Según Casagrande en función de los Límites de Atterberg

9. GEOLOGIA ECONOMICA

Actualmente, en el área de estudio se están explotando las sub-unidades **ARC-1A, ARC-1B** y **ARC-1C**, las cuales pertenecen a la unidad **ARC-1**. No obstante, las demás unidades de arcillolitas no se han explotado en parte por el desconocimiento de su calidad como materia prima para la manufactura de vitrificados.

9.1. RESERVAS DE ARCILLOLITAS

Mediante la cartografía geológica detallada, el estudio de las labores mineras existentes, las trincheras y el levantamiento de columnas litoestratigráficas detalladas se ha llegado a la certeza geológica de la existencia de dos (2) unidades de arcillolitas, una de las cuales está siendo explotada actualmente, mientras que la otra está a la espera de estudios tendientes a su caracterización como materia prima para los vitrificados. De acuerdo con los criterios geológicos se realizó la categorización de reservas en medidas, indicadas e inferidas, adaptando lo establecido en su momento por el Sistema de Clasificación de Recursos y Reservas de ECOCARBON LTDA. (1995), hoy MINERCOL LTDA.

9.1.1. Criterios y Parámetros de Evaluación

Para la evaluación geológica del depósito se definió con exactitud la línea de afloramiento de las unidades de arcillolitas, mostrando los controles en superficie, como frentes de explotación, caños, trincheras, etc. Se realizaron secciones transversales y áreas horizontales para el cálculo de recursos y reservas , en los que se muestran las áreas de influencia de cada punto de control, categorizando

en medidas, indicadas e inferidas dependiendo de la distancia a cada punto de control, así:

Medidas: Los puntos de control distan hasta 500 m el uno del otro; esto equivale a una influencia de hasta 250 m, contados a partir de un punto de control.

Indicadas: Los puntos de control distan entre 500 y 1500 m, el uno del otro; esto equivale a una influencia de hasta 500 m, comprendida entre los 250 m y los 750 m, contados a partir de un punto de control.

Inferidas: Losa puntos de control distan entre 1500 y 4500 m, el uno del otro; esto equivale a una influencia de hasta 1500 m, comprendida entre los 750 m y los 2250 m, contados a partir de un punto de control.

En la Tabla 7 se presentan los puntos de control tomados para el levantamiento de las columnas litoestratigráficas y el cálculo de recursos y reservas de las unidades de arcillolitas. Se limitó el cálculo hasta los 20 m sobre el nivel del mar, como profundidad máxima, hasta donde todavía es factible económicamente la explotación a cielo abierto de arcillolitas en el área según la Licencia de Explotación 20253 otorgada por el Ministerio de Minas y Energía.

PUNTO DE CONTROL	UBICACION	COORDENADA NORTE	COORDENADA ESTE	LITOLOGIA	ACTITUD ESTRUCTURAL
1	Frente de explotación activo	1’587.573	996.836	Areniscas	N30°E/6°W
2	Frente de explotación activo	1’587.572	996.918	Arcillolitas grises	N30°E/5°W
3	Trinchera-frente de explotación Activo	1’587.516	996.900	Arcillolitas pardas	_____
4	Trinchera-frente de explotación activo	1’587.462	996.854	Arcillolitas grises	_____
5	Frente de explotación inactivo	1’587.699	996.957	Areniscas	N31°E/4-6°W
6	Frente de explotación inactivo	1’587.728	996.936	Areniscas	N30°E/5°W
7	Caño frente inactivo	1’587.780	996.900	Areniscas	N30°E/5°W
8	Caño frente inactivo	1’587.759	996.844	Areniscas	N29°E/4°W
9	Caño NW	1’587.874	996.894	Areniscas	N29°E/4-5°W
10	Loma Norte	1’587.899	996.972	Areniscas	N28°E/5°W
11	Oriente de Arroyo Jericó	1’587.700	997.291	Areniscas Arcillolitas	N31°E/5-6°W
12	Caño frente inactivo	1’587.751	996.799	Areniscas	N30°E/5°W

Tabla 7. Puntos de control litoestratigráfico en la Ladrillera de La Costa Ltda.

Resumen del Cálculo

(a) Unidad ARC-1

Sub-unidad ARC-1A
Reservas Medidas
Área Medida (Cartografiada) = 124083.12 m²
Espesor Estratigráfico = 6.80 m
Volumen Medido = (Área medida / Cos 6°) x Espesor estratigráfico
Volumen Medido = (124083.12 m²/ Cos 6°) x 6.80 m = 848412.91 m³
Área de franja = 53152.11 m²
Volumen de franja = (53152.11 m² / Cos 6°) x 6.80 m / 2 = 182712.61 m³
Volumen Total = Volumen medido – Volumen de franja
Volumen Total = 666700.30 m³

Sub-unidad ARC-1B
Reservas Medidas
Área Medida (Cartografiada) = 75355.46 m²
Espesor Estratigráfico = 1.00 m
Volumen Medido = (Área medida / Cos 6°) x Espesor estratigráfico
Volumen Medido = (75355.46 m²/ Cos 6°) x 1.00 m =7577̃2.21 m³
Área de franja = 3464.66 m²
Volumen de franja = (3464.66 m² / Cos 6°) x 1.00 m / 2 = 1741.91 m³
Volumen Total = Volumen medido – Volumen de franja
Volumen Total = 74030.30 m³
Reservas Indicadas
Área Medida (Cartografiada) = 54164.04 m²
Espesor Estratigráfico = 1.00 m
Volumen Medido = (Área medida / Cos 6°) x Espesor estratigráfico
Volumen Medido = (54164.04 m²/ Cos 6°) x 1.00 m = 54463.59 m³
Área de franja = 1972.75 m²
Volumen de franja = (1972.75 m² / Cos 6°) x 1.00 m / 2 = 991.83 m³
Volumen Total = Volumen medido – Volumen de franja
Volumen Total = 53471.76 m³

Sub-unidad ARC-1C
Reservas Medidas
Área Medida (Cartografiada) = 69595.12 m²
Espesor Estratigráfico = 3.00 m
Volumen Medido = (Área medida / Cos 6°) x Espesor estratigráfi∞
Volumen Medido = (69595.12 m²/ Cos 6°) x 3.00 m = 209940.03 m³
Área de franja = 11380.28 m²

Volumen de franja = (11380.28 m² / Cos 6°) x 3.00 m / 2 = 17164.82 m³
Volumen Total = Volumen medido – Volumen de franja
Volumen Total = 192775.21 m³
Reservas Indicadas
Área Medida (Cartografiada) = 76241.63 m²
Espesor Estratigráfico = 3.00 m
Volumen Medido = (Área medida / Cos 6°) x Espesor estratigráfico
Volumen Medido = (76241.63 m²/ Cos 6°) x 3.00 m = 229989.83 m³
Área de franja = 4935.70 m²
Volumen de franja = (4935.70 m² / Cos 6°) x 3.00 m / 2 = 7444.50 m³
Volumen Total = Volumen medido – Volumen de franja
Volumen Total = 222545.33 m³

(b) Unidad ARC-2
Recursos Medidos
Área Medida (Cartografiada) = 53122.21 m²
Espesor Estratigráfico = 3.00 m
Volumen Medido = (Área medida / Cos 6°) x Espesor estratigráfico
Volumen Medido = (53122.21 m²/ Cos 6°) x 3.00 m = 160244.46 m³
Área de franja = 16403.75 m²
Volumen de franja = (16403.75 m² / Cos 6°) x 3.00 m / 2 = 24741.16 m³
Volumen Total = Volumen medido – Volumen de franja
Volumen Total = 135503.30 m³

9.2. SISTEMA DE EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO

Las unidades de arcillolitas en el depósito de la Ladrillera de La Costa Ltda., se extraen mediante el desarrollo de dos frentes de explotación, uno de los cuales se halla inactivo. Así, en el frente de explotación activo, la extracción se lleva a cabo mediante el Sistema de Banco Único, generando un talud de 8 m de altura. El proceso de explotación y beneficio actual consta de los siguientes pasos (Figuras 32 y 33):

Figura 32. Proceso de explotación y beneficio en la Ladrillera de La Costa Ltda. (a) Descapote, (b) Arranque y cargue, (c) Homogenización y Mezclado, (d) Molienda, (e) Moldeo, Amasado y Extrusión, (f) Secado, (g) Cocción, (h) Clasificación, Embalaje y Despacho.

a) Descapote

b-1) Arranque y cargue-sub-unidad ARC-1B

b-2) Arranque y cargue-sub-unidad ARC-1C

c) Homogenización

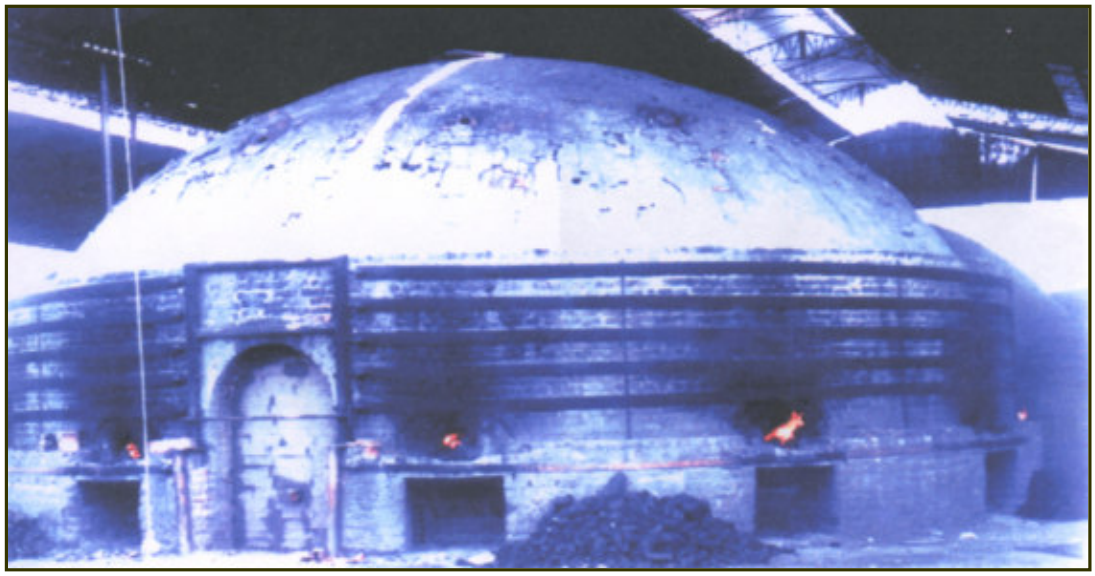
d-1) Molino

d-2) Mixturador

e-1) Extrusora

e-2) Cortadora

f) Patio de Secado



g) Hornos tipo Colmena

h) Vitrificados en patio de Clasificación.

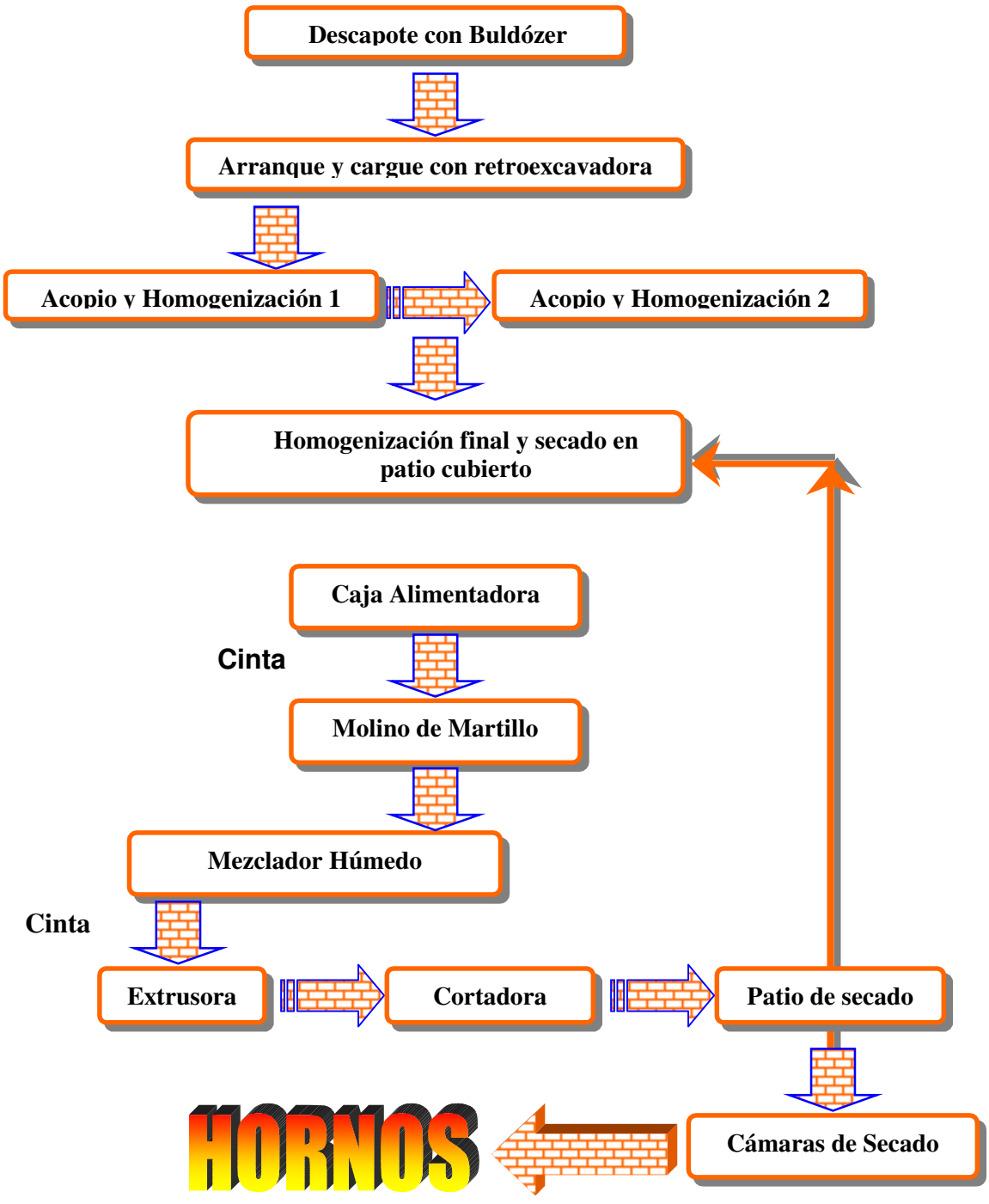


Figura 33. Diagrama de flujo del proceso de explotación y beneficio en la Ladrillera de La Costa Ltda.

9.2.1. Descapote

El retiro de la capa vegetal y horizonte orgánico del suelo que cubre el depósito de arcillolitas se lleva a cabo mediante un Buldózer D6D (Figura 32a). El estéril retirado de esta forma se acopia en pilas de poca altura para evitar su compactación, de manera que se pueda utilizar en la etapa posterior de reconformación y revegetalización de las áreas explotadas de acuerdo al Plan de Manejo Ambiental establecido por la Autoridad Ambiental correspondiente (CORPAMAG).

9.2.2. Arranque y cargue

El arranque y cargue de las arcillolitas lo realiza una retroexcavadora John Deere con una capacidad de balde de 0.5 m cúbicos (Figura 32b-1 y 32b-2). En el año 2001 se extrajeron 3684 Toneladas de arcillolitas, de acuerdo con el Informe Anual de Explotación presentado a MINERCOL LTDA. Las arcillas pardo-amarillentas y grises (plásticas) extraídas y acopiadas se mezclan en una proporción de 50:50 y se dejan madurar en el patio del frente de explotación. En este patio se entremezclan de dos a tres veces durante dos meses, para que el viento, la lluvia y el sol maduren la arcilla en un primer paso de homogenización. Posteriormente, el material arcilloso acopiado es cargado por medio de la retroexcavadora a tractocamiones con capacidad de 30 toneladas, que lo transportan hasta un patio ubicado al norte de la planta de vitrificados para su homogenización.

9.2.3. Homogenización

La mezcla de arcillas se homogeniza adicionando agua y dejando que el viento, el sol y la entremezcla con la retroexcavadora degraden las masas de arcillas (Figura

32c). Este proceso se lleva a cabo durante dos a tres meses. En este momento la arcilla se encuentra en condiciones óptimas para que sea procesada por las máquinas, pero debido a que el proceso de molturación es por vía seca, se requiere de un tercer paso, el secado, para que la materia prima contenga como máximo un 7% de humedad.

9.2.4. Secado, molturación, moldeo y quemado

Este proceso se realiza llevando la materia prima ya homogenizada a una bodega cubierta de 720 m². En este lugar se almacena durante quince días, y por último es llevada primero a la tolva del cajón alimentador y luego por cinta transportadora (Figura 32d-1 y 32d-2) al molino de martillo, de aquí el material cae en el mezclador húmedo (mixturador); este material húmedo pasa luego a la extrusora (Figura 32e-1) para su moldeo y posteriormente a la cortadora (Figura 32e-2). El producto moldeado y húmedo se lleva al patio de secado (Figura 32f), después a las cámaras de secado (con capacidad para 16000 adoquines y 6000 ladrillos grandes), las cuales utilizan el vapor emanado por los hornos. El paso siguiente consiste en transportar el producto ya seco hasta los hornos tipo colmena (Figura 32g), siete en total, con capacidad para 105 toneladas de productos secos, consumiendo cada uno 12 toneladas de carbón (de La Jagua de Ibirico, Cesar) durante 43 horas de quema.

9.2.5. Clasificación, embalaje y despacho

Una vez cocido el material, mediante un sistema de servicio de camiones-plataformas-grúas (Figura 32h), se sirve el material directamente, sobre las placas, evitando así roturas y una gran mano de obra.

9.3. IMPACTO AMBIENTAL

A continuación, se describen las medidas ambientales que se han implementado ante los principales impactos generados tanto en el sitio de extracción del material de arrastre, como en la planta de acopio y beneficio.

9.3.1. Área de explotación.

- **Impacto sobre el ambiente:** Pérdida y/o alteración del suelo natural o vegetal. Disminución de la cobertura vegetal, tanto de árboles como de arbustos frondosos.
- **Medida de mitigación:** Se ha implementado un programa de siembra de arbustos de Matarratón a lo largo de la cerca perimetral que colinda con los predios vecinos.

- **Impacto sobre el ambiente:** Emisión de gases contaminantes (SO_2, CO_2,NO_2, etc.). Generación de altos niveles de ruido por operación de maquinaria pesada.
- **Medidas de mitigación:** Mantenimiento periódico de la maquinaria pesada, tanto de volquetas como de cargador frontal y excavadora en el taller de la planta de beneficio.

- **Impacto sobre el ambiente:** Emisión de material particulado (polvo). Incremento del riesgo de accidentalidad.
- **Medidas de mitigación y prevención:** Humedecimiento de las vías más frecuentadas. Reducción de la velocidad de circulación a 30 km/hora de la maquinaria pesada y vehículos en general. de explotación. También, se ha establecido una señalización vial móvil preventiva.

9.3.2. Patio de acopio y beneficio

- **Impacto sobre el ambiente:** Disminución de la cobertura vegetal, tanto de árboles como de arbustos frondosos. Impacto visual del área de acopio y cargue de material beneficiado y en bruto.
- **Medida de mitigación y corrección:** Se ha limitado la tala de árboles y arbustos a las zonas de acopio, clasificación del material y tránsito de volquetas.

- **Impacto sobre el ambiente:** Emisión de gases contaminantes, generación de ruido, contaminación del suelo por derrames de lubricantes, combustibles, etc..
- **Medida de prevención:** Mantenimiento periódico del motor de la trituradora, de las volquetas y del cargador. Para cumplir con esta medida, se ha construido un taller cubierto, en el que además se almacenan los lubricantes y combustibles en canecas de 50 galones.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Hasta el momento, es muy poco el trabajo que se ha realizado con relación a la caracterización de depósitos de arcillas para la mitigación de problemas ambientales, por las siguientes razones: primero, la falta de recursos económicos de entidades oficiales o privadas para ayudar con el desarrollo de proyectos de investigación en este campo y segundo y, como consecuencia del punto mencionado anteriormente, por la falta de recursos técnicos para el diseño e implementación de laboratorios y modernas técnicas analíticas. Por lo tanto, es fundamental que el gobierno nacional así como las empresas del sector fomenten el desarrollo de estudios petrológicos, mineralógicos, y geoquímicos con el fin de comprender mejor la geología de estos depósitos, los ambientes superficiales, y cómo se forman los depósitos de arcillas de interés económicos. los procesos por los cuales estos depósitos se forman.

Las conclusiones obtenidas en el presente estudio son las siguientes:

El depósito de arcillas de Ladrillera de La Costa Ltda. se localiza tectónicamente en la Sub-Cuenca de Plato, específicamente en el Alto de El Difícil, el cual se caracteriza por ser una región de plataforma estable y que según estudios geofísicos posee flancos con pendientes pronunciadas, aunque su cima es prácticamente horizontal. Lo anterior se evidencia en el área de estudio, cuya secuencia estratigráfica buza suavemente (5°-7°) hacia el occidente.

La formación geológica aflorante en el área de estudio, de acuerdo con la cartografía geológica realizada por Clavijo, et al. (2002), debería corresponder a la Formación Zambrano (NgZ), cuya descripción, según dichos autores, es: *"Capas medias a gruesas de arenitas bioclásticas a bioesparíticas, cuarzosas, arcillosas y*

areniscas calcáreas, con abundantes clastos de moluscos, interestratificadas con lodolitas calcáreas bioclásticas. Edad Plioceno".

Sin embargo, las características litoestratigráficas de las rocas que afloran en el área de estudio, se correlacionan mucho más con aquellas que presenta la Formación Jesús del Monte (Ngjm), la cual infrayace a la Formación Zambrano (NgZ) y que ha sido definida igualmente por Clavijo et al. (2002), quienes la describen así: *"Consiste de capas gruesas a muy gruesas de lodolitas de color gris a verde oliva, interestratificadas con capas medianas a finas de areniscas líticas. Edad Mioceno."*

De acuerdo con la cartografía geológica a escala 1:1.000 levantada en el área de estudio, se pudieron diferenciar principalmente dos unidades de arcillolitas (una en explotación) interestratificada con tres unidades de areniscas líticas, descritas de base a techo, así:

Unidad AREN-1

Corresponde a la unidad litológica cartografiada al este del arroyo Jericó, en la loma del "corral". Consiste de una secuencia de arcillolitas laminares, fisibles, de color pardo amarillento, con espesores de 1.5-1.8 m, con capas de areniscas de grano fino, con matriz arcillosa, líticas y de color pardo amarillento que poseen espesores entre 0.8 y 1.5 m y que aparecen hacia la base y la parte media de la secuencia, respectivamente. El espesor total de esta sección litológica es de 5.60 m.

Unidad ARC-1

Esta unidad consiste de una gruesa secuencia de arcillolitas con un espesor total de 12.50 m que afloran en las lomas del sector occidental del predio de Ladrillera de La Costa Ltda. Sobre esta unidad es precisamente donde se ubican los dos frentes de explotación. Esta secuencia de arcillolitas se halla compuesta por las siguientes sub-unidades:

ARC-1C: Arcillolita laminar, fisible, pardo-amarillenta, con lentecillos de yeso y alta presencia de oxidación. Espesor medido: 3.0 m.

ARC-1B: Arcillolitas laminares, compactas, color gris oscuro, plásticas. Esta sub-unidad se ha venido explotando como materia prima para la fabricación de ladrillos y adoquines, principalmente. Espesor medido: 1.0 m.

ARC-1A: Arcillolitas laminares, fisibles, de color pardo-amarillento, con lentecillos de yesos hasta de 1.0 cm de espesor diseminados en toda la sección. Espesor medido: 6.8 m. Estas arcillolitas igualmente se explotan para la fabricación de ladrillos y adoquines.

Unidad AREN-2

Esta unidad aflora en las lomas del sector occidental del predio de la Ladrillera de La Costa Ltda., suprayaciendo a la Unidad ARC-1. Consiste de una secuencia de areniscas y arcillolitas con un espesor total de 4.5 m, descritas a continuación de base a techo.

Arenisca de grano fino, bien calibrada, lítica, de color pardo-amarillento, matriz arcillosa, estratificación plano-paralela. Espesor medido: 0.4 m.

Arcillolita pardo-amarillenta, laminar, fisible, con lentecillos de yeso diseminados. Espesor 0.9 m.

Arenisca de grano fino, pardo-amarillenta, lítica, matriz arcillosa. Espesor medido: 0.3 m.

Arenisca de grano fino, lítica, friable, de color blanco-amarillento, con laminación plano-paralela. Espesor medido: 0.9 m.

Arcillolita laminar, fisible, pardo-amarillenta, con lentecillos de yeso diseminados. Espesor medido: 1.5 m.

Arenisca de grano fino, lítica, pardo-amarillenta, matriz arcillosa. Espesor medido: 0.5 m.

Unidad ARC-2

Esta unidad se halla presente en las lomas del sector occidental del predio de la Ladrillera de La Costa Ltda. Se trata de una capa de arcillolita laminar, fisible, de color gris, con un espesor total de 3.0 m. No se halló evidencia de lentecillos de yeso en esta unidad.

Unidad AREN-3

Esta unidad se constituye en la última unidad cartografiada en el depósito de arcillas de la Ladrillera de La Costa Ltda., aflorando en las lomas del sector occidental del área de estudio, suprayaciendo a las unidades descritas anteriormente. Consiste de dos estratos de 1.0 y 0.5 m, respectivamente, de areniscas de grano fino, líticas, color pardo-amarillento y matriz arcillosa, interestratificados con una capa de 0.48 m de espesor de arcillolitas pardo-amarillenta, laminar y fisible.

La secuencia estratigráfica en el área de estudio se dispone formando un monoclinal, con actitud de capas que varía en rumbo de N27°E a N30°E y buzamiento de 4° a 7° W. Este monoclinal parece corresponder al flanco occidental del anticlinal El Brillante, el cual, según Clavijo et al. (2002), se extiende 2 kilómetros al sur-este del área de estudio, y cuyo eje posee una orientación NW. En términos generales, la tectónica del área es simple, no encontrándose evidencia alguna de fallamientos o replegamientos que de una u otra forma afectaran la disposición espacial de las capas en la secuencia estratigráfica.

A partir de los resultados del análisis de difracción de rayos-X se concluye lo siguiente:

La nimita aparece en las cuatro muestras de arcilla analizadas, tanto en las arcillas grises (Sub-unidad ARC-1B) como en las pardas (Sub-unidades ARC-1C y ARC-1A). La espangolita aparece en las muestras M1(arcilla gris de la Sub-unidad ARC-1B), M3 (arcilla parda de la Sub-unidad ARC-1C) y M4 (arcilla parda de la

Sub-unidad ARC-1A). La dickita aparece en las muestras M1 (arcilla gris de la Sub-unidad ARC-1B) y M2 (arcilla gris de la Sub-unidad ARC-1B).

Los resultados de difracción de rayos-X de las muestras M1 (arcilla gris de la Sub-unidad ARC-1B) y M2 (arcilla gris de la Sub-unidad ARC-1B) confirman lo hallado en los ensayos para la determinación de los límites de Atterberg sobre las mismas muestras analizadas, en los cuales, de acuerdo a la clasificación de Casagrande, en función del LL, estas se sitúan en la zona de arcillas caoliníticas.

El análisis de difracción de rayos-X en la muestra M1 (arcillolita gris de la Sub-unidad ARC-1B) señala la presencia de pirita (FeS_2), lo cual es un hecho a destacar si se considera que al almacenarse al aire libre la arcilla, la pirita se oxida transformándose en sulfato (Salmang, 1954). Si lo anterior se suma a la presencia de yeso ($CaSO_4.2H_2O$), en las arcillolitas pardas de las Sub-unidades ARC-1C y ARC-1A, se puede tener un problema importante de eflorescencias, las cuales desarrollan fuerzas de cristalización de tal magnitud, que la parte exterior de los muros de mampostería pueden desmoronarse totalmente y derrumbarse.

Los resultados del análisis de difracción de rayos-X muestra similitudes de politipos y composición de minerales de arcillas y otros (espangolita, nimita, dickita, etc.), lo cual puede implicar que tienen una misma fuente de origen, un terreno de rocas ígneas ácidas y/o rocas metamórficas con el grado probablemente de esquistos verdes expuestas en un clima cálido húmedo.

Los resultados del análisis de difracción de rayos-X sugieren que las arcillolitas grises (sub-unidad ARC-1B) son arcilolitas caoliníticas, y que las arcillolitas pardas (sub-unidad ARC-1A y ARC-1C) son arcillolitas illíticas o micáceas.

Las rocas sedimentarias que afloran en el área de estudio son de edad Mioceno a Plioceno (Clavijo et al., 2002), de tal forma que si se sitúa en el marco tectónico propuesto por Duque-Caro (1978), para esta época, la cuenca se hallaba en una

zona de sedimentación fluvial y lacustre, cuya fuente principal de sedimentos son las formaciones rocosas que afloran en el flanco occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, la cual se encontrada en ese entonces desplazada aproximadamente 100 kilómetros al sur de su ubicación actual. Así, formaciones geológicas importantes en este macizo aportaron sedimentos, entre las cuales se destacan rocas ígneas intrusivas ácidas (Batolito Central, Batolito Bolívar, etc.) y volcánicas (Ignimbrita de Los Tábanos, Riodacita de La Piña, Riolita del Golero, etc.), así como metamórficas (Neis de Buritaca, con yacimientos en explotación de talco, vermiculita y magnesita, Esquisto de Gaira, Esquistos no diferenciados, etc.) aflorantes en el flanco occidental del Macizo Sierra Nevada de Santa Marta.

Los ensayos de consistencia o limites de Atterberg mostraron los siguientes resultados:

Muestra 1. Arcillolita gris de la Unidad ARC-1B. Resultados: LL a 25 golpes = 38%; LP = 22%; IP = LL – LP = 38% - 22% = 16%. De a cuerdo con el diagrama de Casagrande, esta muestra se halla por fuera del rectángulo, pero muy cerca de la zona de las arcillas, específicamente corresponde a arcillas caoliníticas, lo cual desde el punto de vista de moldeo y secado son aceptables.
Muestra 2. Arcillolita gris de la Unidad ARC-1B. Resultados: LL a 25 golpes = 42%; LP = 25%; IP = LL – LP = 42% - 25% = 17%. De a cuerdo con el diagrama de Casagrande, esta muestra se halla dentro de la zona de arcillas, específicamente corresponde a arcillas caoliníticas, lo cual desde el punto de vista de moldeo y secado son aceptables.
Muestra 3. Mezcla de arcillolita gris (50%) y parda (50%). Resultados: LL a 25 golpes = 50%; LP = 20%; IP = LL – LP = 50% - 20% = 30%. De a cuerdo con el Diagrama de Casagrande, esta muestra se halla en la zona de arcillas margosas, que desde el punto de vista de moldeo y secado son aceptables.

Las arcillas extraídas del depósito de Ladrillera de La Costa Ltda., según el diagrama de Casagrande, son de media plasticidad y se hallan en el límite entre

arcillas inorgánicas típicas y arcillas que contienen algún tipo de coloide inorgánico. Con la mezcla de arcillas grises y pardas en porcentaje igual del 50%, la muestra resultante obtiene un Indice de Plasticidad de 30%, y un Límite Líquido óptimo de 50%.

Las reservas de arcillolitas del depósito de arcillas de Ladrillera de La Costa Ltda., se estiman así:

Unidad ARC-1

Sub-unidad ARC-1A. Reservas Medidas = 666700.30 m^3

Sub-unidad ARC-1B. Reservas Medidas = 74030.30 m^3. Reservas Indicadas = 53471.76 m^3

Sub-unidad ARC-1C. Reservas Medidas = 192775.21 m^3. Reservas Indicadas = 222545.33 m^3

Unidad ARC-2

Recursos Medidos = 135503.30 m^3

BIBLIOGRAFIA

BENAVIDES, C.A. (1992). Los Minerales de Arcilla y la Difracción de Rayos X. Seminario “Técnicas y Rutinas para la Clasificación de las Arcillas”. Medellín, Colombia.

BLATT, H., MIDDLETON, G., and MURRAY, R. (1980). Origin of sedimentary rocks (2d ed.): Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 766p.

CALDERON ARTEAGA, H., (2003). Notas Técnicas: “Producción y Comercialización de Ladrillos en Colombia”. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

CAMACHO M., y CAMARGO A. (1986). Estudios de Mezclas de Arcillas de Norte de Santander para fabricar Materiales de Construcción. Tesis UIS. Escuela de Ingeniería Química. Univ. Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

CLAVIJO, J., GARNICA, M., y ROYERO, J. (2002). Geología del Departamento del Magdalena. Escala 1:300.000. INGEOMINAS, Bucaramanga. Colombia.

DUQUE-CARO, H. (1972). Ciclos tectónicos y sedimentarios en el norte de Colombia y sus relaciones con la paleoecología: Bol.Geol. INGEOMINAS, Bogotá. 19 (3): 1-23.

_____ (1978). Geotectónica y evolución de la región nor-occidental colombiana. INGEOMINAS, Informe No. 1750. Bogotá, Colombia.

ECOCARBON (1995). Sistema de clasificación de recursos y reservas de carbón. Bogotá, Colombia.

FUNDACIÓN PRO-SIERRA NEVADA DE SANTA MARTA (1997). Plan de desarrollo sostenible de la Sierra Nevada de Santa Marta. Colombia.

GARCIA-ROMERO, E., y SUAREZ-BARRIOS, M. (2002). Arcillas. Univ. Complutense de Madrid y Univ. de Salamanca. España.

GONZÁLEZ GARZA, C. (1990). Caracterización de arcillas del Oyamel. Estado de México.

GILG, H., WEBER, B., KASBOHM, J., and FREI, R. (2002). Isotope Geochemistry and Origin of Illite-Smectite and Kaolinite from the Seilitz and Kemmlitz Kaolin Deposits, Saxony, Germany. Clay Minerals (The Mineralogical Society), pp. 95-112.

HUERTA DIAZ, M. (2002). Geoquímica de Sedimentos: Arcillas. Inst. de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de la Baja California. (E.U.A.).

INSTITUTO GEOGRAFICO “Agustín Codazzi”-IGAC (1978). Monografía del Departamento del Magdalena. Colombia.

INSTITUTO GEOGRAFICO “Agustín Codazzi”-IGAC, (1990). Métodos Analíticos del Laboratorio de Suelos. (5ta Edición). Subdirección Agrológica. Bogotá, Colombia.

HILLIER, S. (1995). Erosion, sedimentation and sedimentary origin of clays, in Velde, B., ed., Origin and mineralogy of clays: New York, Springer-Verlag, pp. 162-219.

JIMÉNEZ SALAS, J., y DE JUSTO ALPAÑEZ, J.L. (1975). “Geotecnia y cimientos”. Vol. I. “Propiedades de los suelos y de las rocas”. 2 Edic. Edit. Rueda, 466p.

LEET, L., (1982). Physical Geology. 6th Edition. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

MANTILLA FIGUEROA, L.C. (2003). TERMOCRONOLOGÍA K-Ar EN ILLITAS: ASPECTOS METODOLÓGICOS. Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander, Vol. 25 (40), pp. 11-22.

MUNICIPIO DE ARIGUANI (2000-2008). Plan Básico de Ordenamiento Territorial. Departamento del Magdalena, Colombia.

SALMANG, H, (1954). Los Fundamentos Fisicoquímicos de la Cerámica. 3ra Edición. Springer-Verlag. Bilbao, España.

SZU-BIN LIN and Y.R WANG. (2001). Clay Minerals in the Rocks Formations on the Hengchun Penninsula, China. Western Pacific Earth Sciences, Vol. 1. No. 2.

TSHANZ, Ch., JIMENO, A. y CRUZ, J. (1969). Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta Area (Colombia). INGEOMINAS – U.S. GEOLOGICAL SURVEY.

VELDE, B. (1995). Composition and mineralogy of clay minerals, in Velde, B., ed., Origin and mineralogy of clays: New York, Springer-Verlag, pp. 8-42.

http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/Arcillas.htm
LAS ARCILLAS: PROPIEDADES Y USOS. Emilia García Romero, Universidad Complutense (Madrid), y Mercedes Suárez Barrios, Universidad de Salamanca.

http://www.ucm.es/info/crismine/preparcion_muestras_Rayos_X.htm
TECNICA DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS ARCILLOSAS PARA SU ESTUDIO MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X. Emilia García Romero & Javier Luque del Villar, Universidad Complutense (Madrid).

http://www.ucm.es/info/crismine/Rocas_Minerales_Industriales.pdf
INTRODUCCIÓN A LA GEOLOGÍA Y ECONOMÍA DE LAS ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES. Manuel Regueiro, Instituto Geológico y Minero de España / Dpto de Cristalografía y Mineralogía. UCM.