

**CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y MINERALÓGICA PRELIMINAR DE
FACIES ARENOSAS Y LODOSAS DE LA FORMACIÓN MUGROSA
(POZOS: 11, 21, 26 y 27)
EN EL SECTOR DEL CAMPO ESCUELA COLORADO, CUENCA DEL VALLE
MEDIO DEL MAGDALENA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA**

WILMAN ROLANDO RAMÍREZ ROJAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA**

2010

**CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y MINERALÓGICA PRELIMINAR DE
FACIES ARENOSAS Y LODOSAS DE LA FORMACIÓN MUGROSA
(POZOS: 11, 21, 26 y 27)
EN EL SECTOR DEL CAMPO ESCUELA COLORADO, CUENCA DEL VALLE
MEDIO DEL MAGDALENA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA**

**Proyecto de Grado para optar al título de
GEOLOGO**

WILMAN ROLANDO RAMÍREZ ROJAS

DIRECTOR

**GEÓLOGO JAIRO CONDE GÓMEZ
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA UIS**

CODIRECTOR

**GEÓLOGO MSc. JORGE EDUARDO PINTO VALDERRAMA
DOCENTE PLANTA ESCUELA DE GEOLOGIA UIS**

CODIRECTOR

**GEÓLOGO RICARDO ANDRÉS GÓMEZ MONCADA
INSTITUTO COLOMBIANO DE PETRÓLEO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA**

2010

DEDICATORIA

Este trabajo está muy sentidamente dedicado a mi familia especialmente a mis padres Fanny y Ciro y mis hermanos Emerson y Nilson que me han apoyado constantemente en toda mi vida académica

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Jorge Pinto y a los geólogos Jairo Conde y Cesar Tarazona por llevar a flote este trabajo.

Al geólogo Francisco Melo y al equipo de trabajo de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander especialmente a José Luís Pinto por su orientación constante durante el desarrollo del proyecto.

Al geólogo Julián Naranjo por sus enseñanzas al inicio del proyecto.

Al grupo de Investigación de Campos Maduros y al ingeniero Rubén Castro por el apoyo otorgado a ésta tesis.

A Isaura Gónima por el apoyo brindado durante la ejecución del proyecto.

A mis amigos Andrés García, Oscar Vera, Crispín Fonseca, Paola Orejuela y Alejandro Velásquez por compartir y discutir continuamente sus conocimientos desde diferentes puntos de vista.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	20
2. OBJETIVOS	22
2.1 OBJETIVO GENERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3. UBICACIÓN Y GENERALIDADES	23
3.1 HISTORIA DE PRODUCCIÓN	24
4. MARCO GEOLÓGICO	25
4.1 EVOLUCIÓN TECTÓNICA Y ESTRATIGRAFÍA REGIONAL	25
4.3 ESTRATIGRAFÍA DE LA FORMACIÓN MUGROSA	32
5. ANTECEDENTES	34
6. JUSTIFICACIÓN	40
7. MARCO REFERENCIAL	41
7.1 PETROGRAFÍA	41
7.1.1. Clasificación Textural Y Composicional	41
7.1.2 Estructuras Sedimentarias	42
7.1.3 Diagénesis	46
7.1.3.1 Factores Que Influyen Sobre La Díagénesis.	47

7.1.3.2 Procesos Diagenéticos	49
7.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X	52
7.2.1 Minerales Arcilla.	54
7.2.1.1 Tipo De Minerales Arcilla	57
7.2.2 Minerales Arcilla Que Afectan Una Producción	60
7.2.2.1 Caolinita	60
7.2.2.2 Ilita	61
7.2.2.3 Esmectitas	62
7.2.2.4 Clorita	63
8. METODOLOGIA	65
8.1 ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN	65
8.2. SELECCIÓN DE MUESTRAS A ANALIZAR	66
8.3 FASE DE LABORATORIO	69
8.3.1 Petrografía	69
8.3.1.1 Metodología Empleada Para La Caracterización Petrográfica.	69
8.3.2 Difracción De Rayos X.	75
8.3.2.1 Preparación De Muestras Para Drx	75
8.3.2.2 Metodología Para Análisis De Difracción De Rayos X (Rutina Normal	82
9. RESULTADOS	86
9.1 CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA DE LA FORMACIÓN MUGROSA	86

9.1.1 CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA GRUPO PM1	86
9.1.1.1 Características Texturales	86
9.1.1.2 Características Composicionales	88
9.1.2 Caracterización Petrográfica Grupo Pm2.	96
9.1.2.1 Características Texturales	97
9.1.2.2 Características Composicionales	98
9.2 MICROESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS	103
9.3 DIAGÉNESIS Y SECUENCIA DIAGENÉTICA	109
9.4 CALCOGRAFÍA	122
9.5 DIFRACCION DE RAYOS X	124
10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	132
11. IMPACTO DE LOS RESULTADOS	135
12. CONCLUSIONES	136
13. RECOMENDACIONES	138
14. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	139
15. REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	143

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. localización del campo colorado (rectángulo rojo),	23
Figura 2. representación de la aparición del "paleoalto" de santander el cual separa la cuenca tablazo-magdalena y la cuenca del cocuy.	26
Figura 3. columna estratigráfica generalizada para el valle medio del magdalena	30
Figura 4. ubicación de las fallas y bloques (con números romanos) presentes en el campo colorado	31
Figura 5. registro tipo del pozo 31 del campo colorado donde se muestran las 4 subunidades operacionales de la formación mugrosa	33
Figura 6. recorte de columna de núcleo del pozo c21 del campo colorado.	35
Figura 7. se muestra una estructura en artesa en facies st. afloramiento de la formación mugrosa.	36
Figura 8. relación del código y características estructurales de las facies determinadas para el campo escuela colorado en el modelo estratigráfico y sedimentológico "formación mugrosa"	39
Figura 9. triángulo de clasificación textural de las rocas sedimentarias según folk	41
Figura 10. triángulo de clasificación composicional de las rocas sedimentarias según folk (42
Figura 11. forma de los planos de estratificación y tipos de contacto entre éstos.	43
Figura 12. distintos tipos de estructuras internas en estratos o capas.	45
Figura 13. forma y orientación de las laminaciones.	46
Figura 14. ubicación relativa entre las diferentes etapas de la diagénesis	47
Figura 15. condiciones de ph y concentración de sustancia en el entorno para la precipitación de sílice y carbonato cálcico.	51
Figura 16. ejemplo de disolución mineral y creación de porosidad secundaria.	52
Figura 16. ejemplo de disolución mineral y creación de porosidad secundaria.	52

Figura 17. relación geométrica de la ley de bragg	53
Figura 18. tamaños y estructura elemental de la caolinita, montmorillonita e illita	54
Figura 19. tetraedro de silicio, unidad básica de los minerales arcilla	55
Figura 20. lámina de tetraedros. modificado de domínguez y schifter	55
Figura 21. octaedros formando una lámina de octaedros.	56
Figura 22. situación trioctaédrica ó dioctaédrica para láminas octaédricas en las estructuras de los minerales arcilla.	57
Figura 23. estructura cristalina arcillosa formada uniendo láminas de tetraedros y octaedros.	57
Figura 24. lámina 2:1.	58
Figura 25. sepiolita	59
Figura 26. división de los filosilicatos	59
Figura 27 microfotografía de caolinita bajo microscopía electrónica de barrido	61
Figura 28. microfotografía de sem, mostrando illita	62
Figura 29. microfotografía de sem mostrando esmectita	63
Figura 30. estructura de la clorita	64
Figura 31. flujograma de la metodología empleada en el trabajo.	65
Figura 32. muestra con facies fr tenida en cuenta para análisis de drx	66
Figura 33. muestra con facies gci	67
Figura 34. muestra con facies st	67
Figura 35. patrones de esfericidad	70
Figura 36. patrón de cementación incipiente por minerales opacos	71
Figura 37. patrón de cementación avanzada por calcita	71
Figura 38. curva de frecuencia acumulada en papel de probabilidades	73
Figura 39. ficha donde se consigna toda la información petrográfica	74
Figura 40. utensilios usados para obtener partículas mas pequeñas de muestras consolidadas.	76
Figura 41. mortero de porcelana empleado para disminuir de tamaño	77
Figura 42. macerador electrónico	77

Figuras 43 y 44. tamiz y pan para obtener tamaños de 125 micras	78
Figura 45. balanza electrónica	78
Figura 46. diferentes tamaños de partículas de muestra para tratamientos	79
Figura 47. materia orgánica	80
Figura 48. tabla utilizada para la identificación de minerales arcilla	82
Figura 49. difractograma de rutina natural	83
Figura 50. difractograma de rutina glicolada	84
Figura 51. difractograma correspondiente a rutina calcinada	85
Figura 52. el cemento de calcita	88
Figura 53. se observa una arcillolita deformada por la compactación física	90
Figura 54. lítico sedimentario correspondiente a una limolita	90
Figura 55. lítico ígneo volcánico	91
Figura 56. biotitas alterando a cloritas	91
Figura 57. biotitas alterando a cloritas.	92
Figura 58. turmalina con morfología subhedral	92
Figura 59. turmalina con morfología subhedral	93
Figura 60. muestra cementada con calcita ferrosa	94
Figura 61. agregados de siderita	95
Figura 62. patrones de cementación de cada uno de los cementos encontrados para las muestras del grupo PM1	96
Figura 63. lítico metamórfico mostrando textura granolepidoblástica	99
Figura 64. muscovita mostrando bajos grados de deformación	100
Figura 65. grano de circón	100
Figura 66. patrón de cementación de cada uno de los cementos encontrados para las muestras del grupo PM2	102
Figura 67. agregados arcillosos	103
Figura 68. se observa la dirección de la laminación inclinada	104
Figura 69. se observa una zona de granos finos mal calibrada (zf) en contacto neto	105
Figura 70. la línea amarilla muestra la orientación preferencial de los granos.	105

Figura 71. la línea amarilla muestra la orientación de una laminación inclinada	106
Figura 72. agregado lodoso	107
Figura 73. tendencia de orientación	108
Figura 74. muscovita mostrando una deformación con grados bajos a medios por efecto de la compactación física.	110
Figura 75. alteración y disolución de plagioclasas	111
Figura 76. se observa una cementación silíceo	111
Figura 77. feldespato potásico (fk) y cuarzo (q) presentando fracturas intragranulares.	112
Figura 78. feldespato potásico (fk) y cuarzo (q)	113
Figura 79. alta cementación por calcita y calcita fe. (ca fe),	114
Figura 80. bordes de corrosión en cuarzos	114
Figura 81. sobrecrecimientos de granos de cuarzo	115
Figura 82. se observa una biotita alterada casi totalmente a clorita	117
Figura 83. se observa una biotita alterada casi totalmente a clorita	118
Figura 84. relación de contactos entre los minerales opacos y el cuarzo.	118
Figura 85. relación del mineral opaco sobre el cuarzo	119
Figura 86. el rectángulo rojo muestra la disolución que ha sufrido un feldespato potásico y su baja alteración	119
Figura 87. cemento de calcita (ca)	120
Figura 88. las flechas negras indican las fracturas intergranulares generadas	121
Figura 89. esquema de orden relativo de los principales eventos diagenéticos ocurridos en la formación mugrosa, sector campo colorado	121
Figura 90. fotografía de sección delgada vista bajo microscopio de luz reflejada.	122
Figura 91. fotografía de sección delgada vista bajo microscopio de luz reflejada	123
Figura 92. difractograma correspondiente a rutina de polvos desorientados (bulk)	125

Figura 93. cantidad relativa de las familias de los minerales arcillosos encontrados mediante rutina normal para la muestra c27 3856	126
Figura 94. relación del contenido de minerales arcilla y su cristalización para los grupos pm1 y pm2.	128
Figura 95. relación del contenido de interestratificados de minerales arcilla presentes en los grupos pm1 y pm2	129
Figura 96. distribución de arcillas encontradas y su cantidad relativa en el pozo C26.	130
Figura 97. distribución de arcillas encontradas y su cantidad relativa en el pozo c21.	131

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Relación de las muestras utilizadas en el presente trabajo y sus análisis practicados.	68
Tabla 2. Relación de las muestras a las que se les practicó análisis "bulk".	68
Tabla 3. Tabla de porcentaje acumulado de los tamaños de grano encontrados en la sección delgada de la muestra C24 3976.	72
Tabla 4. Relación de las microestructuras encontradas por petrografía con la información expuesta por García y Fonseca 2009. T.D.: Tipo de depósito.	108
Tabla 5. Minerales opacos identificados en las muestras a las que se les practicó calcografía.	123
Tabla 6. Minerales identificados de acuerdo al difractograma de rutina bulk de la muestra C27 3856.	125

LISTA DE ANEXOS

1. Anexo 1 Fichas petrográficas.
2. Anexo 2 Integración de información del modelo Estratigráfico y Sedimentológico del Campo Colorado (García y Fonseca 2009), con las muestras utilizadas en el presente trabajo.
3. Anexo 3 Porcentajes de tamaños de grano de los grupos PM1 y PM2.
4. Anexo 4 Fotos de algunas muestras escogidas para el trabajo.
5. Anexo 5 Relación de facies, porosidad y de arcillas encontradas para los grupos PM1 y PM2.
6. Anexo 6 Arcillas encontradas para todas las muestra utilizadas en el presente trabajo.
7. Anexo 7 Difractogramas correspondientes a Rutina Normal.
8. Anexo 8 Resultados de análisis de Rutina "Bulk".

ABREVIATURAS USADAS

Calcita Fe: Calcita Ferrosa.

DRX: Análisis por difracción de rayos X

mm: Milímetros.

NC: Nícoles cruzados.

SD: Sección delgada.

Si: Silicio.

PM1: Grupo petrográfico 1.

PM2: Grupo petrográfico 2.

RESUMEN

Título: CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y MINERALÓGICA PRELIMINAR DE FACIES ARENOSAS Y LODOSAS DE LA FORMACIÓN MUGROSA (POZOS: 11, 21, 26 y 27) EN EL SECTOR DEL CAMPO ESCUELA COLORADO, CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA¹

Autor WILMAN ROLANDO RAMIREZ ROJAS**

Palabras Claves: Petrográfica, Mineralógica, Facies, Diagénesis, Colorado, Magdalena

El Campo Colorado es un campo maduro con reservas de aceite original estimadas en 121 MMBIs y con un factor de recobro menor a 10%. Su historia de producción ha estado asociada a diversos problemas, uno de ellos debido a las bajas permeabilidades de sus rocas productoras. El presente trabajo se basó en un análisis petrográfico con el que se caracterizaron las diferentes facies arenosas y lodosas de la Formación Mugrosa determinadas en un modelo estratigráfico y sedimentológico preexistente para el Campo Colorado, este análisis petrográfico encontró similitud textural y composicional en las muestras seleccionadas las cuales fueron relacionadas en dos grupos de roca, grupos PM1 y PM2, correspondientes a areniscas de grano medio y fino respectivamente. El grupo PM1 ha sido afectado por procesos diagenéticos que han reducido notablemente su porosidad. Los dos grupos presentan granos muy angulares a subredondeados, un calibre pobre y composicionalmente corresponden a litarenitas y litarenitas feldespáticas. Se identificaron microestructuras masivas, con laminación inclinada, cruzada y con "intraclastos" arcillosos que sustentan la dirección de la laminación. Según análisis de Difracción de Rayos X en muestras de núcleos correspondientes a las mismas facies ya establecidas, se identificaron minerales arcilla que pueden generar migración de finos, precipitación de óxidos de hierro e hinchamiento que perjudicarían la permeabilidad de las rocas en la producción del campo si no se usan las estrategias adecuadas en posibles trabajos de recuperación secundaria ó terciaria.

¹ Proyecto De Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Geología. Director Jorge Eduardo Pinto V.

ABSTRACT

Title: PRELIMINARY PETROGRAPHIC AND MINERALOGICAL CHARACTERIZATION OF SANDY AND MUDDY FACIES OF THE MUGROSA FORMATION (WELLS: 11, 21, 26 Y 27) IN THE SECTOR OF COLORADO FIELD, MIDDLE, MAGDALENA VALLEY BASIN, SANTANDER DEPARTMENT, COLOMBIA.*

Author: WILMAN ROLANDO RAMIREZ ROJAS**

Key Words: Petrographic, Mineralogical, Facies, Diagenesis, Colorado, Magdalena

The Colorado Field is a mature field with estimated original oil reserves of 121MMBIs and a recovery factor lower than 10%. Its production history has been related to diverse problems, one of them due to the low permeability of its reservoir rocks. The present work was based on a petrographic analysis where the different sandy and muddy facies of the Mugrosa Formation were characterized, established from an existing stratigraphic and sedimentological model for the Colorado Field, this petrographic analysis found textural and compositional similarity in selected samples and were related within two groups of rock: PM1 and PM2, corresponding to sands of medium grain and sands of fine grain respectively. The group PM1 has been affected by diagenetic processes that have reduced porosity substantially. Both groups have very angular to subrounded grains, poor calibration and correspond compositionally to litharenites and feldspathic litharenites. Massive microstructures with inclined and crossed lamination and with clayey "intraclasts" that support the direction of lamination. According to X-ray diffraction analyses in samples of cores corresponding to the same established facies, clay minerals were identified. These clay minerals could be responsible of the fines migration, precipitation of iron oxides and swelling that would hinder the permeability of rocks in the production of the field if appropriate strategies are not implemented in future development of secondary and/or tertiary recovery.

* Grade Project

** Faculty of physical Chemical Engineering, School of Geology. Director Jorge Eduardo Pinto V.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios geológicos representan un requisito importante en la reactivación de campos petrolíferos maduros al identificar los principales factores geológicos que afectan una producción. Esta información es de gran importancia porque permite la selección del método de recobro óptimo para aumentar la producción de un campo. Las características petrológicas de las facies arenosas de una formación productora juegan un papel determinante al momento de extraer el crudo de un campo petrolífero, por consiguiente, la realización de estudios detallados como la caracterización petrográfica ayudan a evaluar la calidad de la roca como reservorio y a estimar los factores y procesos que influyeron sobre las actuales porosidades de estas rocas.

El presente trabajo se enfoca en el Campo Escuela Colorado, el cual es un campo maduro ubicado en la cuenca del Valle Medio del Magdalena con considerables reservas estimadas de aceite original y bajas cantidades extraídas; el campo ha presentado diversos problemas de producción y no cuenta con suficiente información geológica que permita caracterizar sus diferentes propiedades. Los problemas de producción son atribuidos a las bajas propiedades petrofísicas y a la precipitación de parafinas principalmente, pero el campo no posee estudios petrológicos que permitan explicar evidentemente las diferentes causas de estas propiedades petrofísicas y la sensibilidad que puedan tener las rocas de su formación productora a distintas estrategias de recuperación.

Teniendo en cuenta la ausencia de estos estudios, se decidió realizar un análisis de las características texturales, composicionales y diagenéticas que presentan a nivel general, las principales facies de la Formación Mugrosa en el sector del Campo Escuela Colorado mediante estudios por petrografía de sección delgada y Difracción de Rayos X para lograr determinar la influencia de éstas características

sobre la calidad de la roca como reservorio; rasgo importante en procesos de gran costo económico como inyección de fluidos en campos petrolíferos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar los rasgos texturales, composicionales y las microestructuras sedimentarias que presenta la Formación Mugrosa (pozos 11, 21, 26 y 27) en el Campo Escuela Colorado.

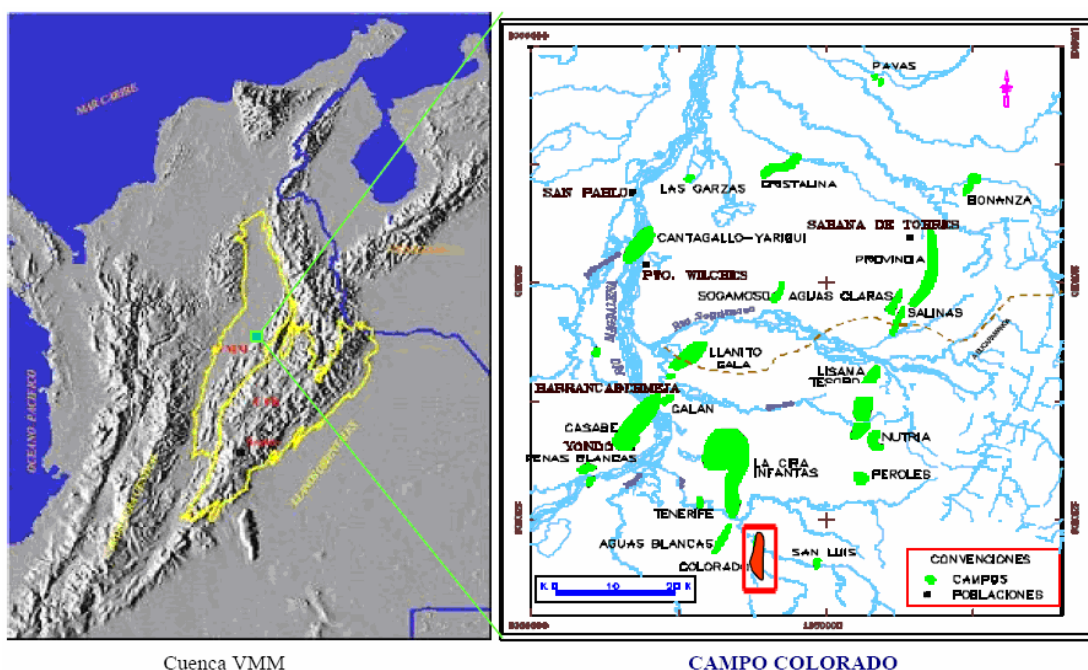
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el tipo de roca sedimentaria siliciclástica y sus características (armazón, matriz, cemento, tipo de porosidad, forma de las partículas, contactos, calibrado, composición y microestructuras sedimentarias) de 28 láminas delgadas tomadas de 2159 metros corazonados del Campo Colorado mediante análisis por microscopía de luz transmitida.
- Determinar los minerales arcillosos presentes en las litofacies arenosas y lodosas de la Formación Mugrosa del Campo Colorado mediante análisis por Difracción de Rayos X.
- Determinar procesos de diagénesis que hayan sucedido en la Formación Mugrosa.

3. UBICACIÓN Y GENERALIDADES

El Campo Colorado está localizado en la Cuenca Valle Medio del Magdalena hacia el occidente de la Cordillera Oriental, geográficamente se encuentra al sureste del municipio de Barrancabermeja en el departamento de Santander entre las coordenadas X= 1'036.000 - 1'040.500 y Y= 1'238.000 – 1'247.500 con origen Bogotá (**Figura 1**). El campo tiene estimadas cerca de 121 millones de barriles (MMBls) de aceite original, con reservas primarias producidas de 8.57 MMBls, las acumulaciones son de aceite liviano y gas con gravedades API de 36 a 42. Cuenta con 75 pozos perforados, en la actualidad tiene 5 pozos activos con una producción entre 20 y 30 barriles diarios (BOPD), la declinación actual de la producción es del 15% efectivo anual (Parra et al., 2003). En este campo la principal formación productora de hidrocarburos es la Formación Mugrosa.

Figura 1. Localización del Campo Colorado (rectángulo rojo), Cuenca Valle Medio del Magdalena.



Modificado de Parra et al. (2003).

3.1 HISTORIA DE PRODUCCIÓN

Entre los años 1923 y 1946 la compañía Tropical Oil Company perforó 15 pozos en el Campo Colorado que fueron abandonados en su mayoría por problemas mecánicos (Parra et al., 2003). Entre 1953 y 1964 Ecopetrol desarrolló completamente el campo con la perforación de 60 pozos adicionales. En el año 1961 el campo alcanzó su máxima producción con un caudal de 1771 BOPD, sin embargo esta producción declinó rápidamente hasta llegar a un valor de 467 BOPD en 1966. Este periodo se caracteriza por la pérdida de pozos productores debido a diferentes problemas mecánicos y al taponamiento de las tuberías de producción con parafinas (Parra et al., 2003). El máximo número de pozos activos se alcanzó en el año 1963 con un total de 44 pozos. A partir de 1966 y hasta el año 1976 se mantuvo una producción promedio de 670 BOPD. Desde 1976 se empezó a notar un descenso de la producción pasando de 692 BOPD en 1976 a 47 BOPD en 1989, quedando desde entonces catalogado este campo como poco productor. En los años setenta para mejorar la producción se implementó en algunos pozos bombeo mecánico junto con levantamiento artificial tipo "Plunger Lift", sin embargo la declinación de la energía del yacimiento comenzó a ser significativa y muchos de los pozos se convirtieron en productores intermitentes.

4. MARCO GEOLÓGICO

4.1 EVOLUCIÓN TECTÓNICA Y ESTRATIGRAFÍA REGIONAL

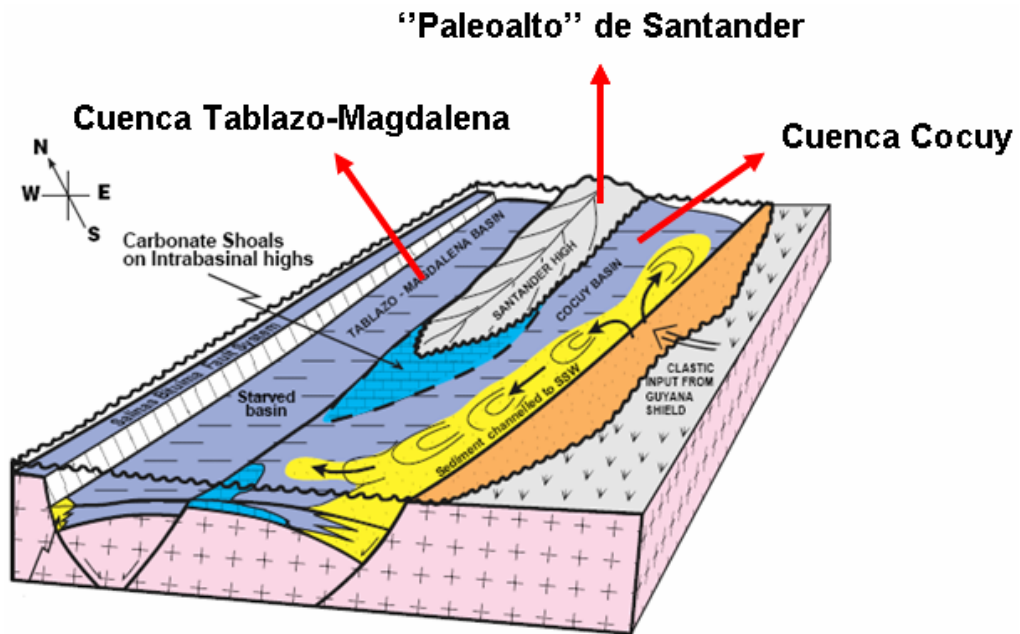
La historia tectónica del Valle Medio del Magdalena (VMM) ha sido compleja con diversos eventos tectónicos distensivos y compresivos (Cooper, et al., 1994). Los esfuerzos distensivos empiezan desde el Triásico tardío y prevalecen principalmente hasta el Cretácico tardío (Cooper et al., 1994). Del Triásico al Cretácico temprano, Norteamérica y Suramérica se separan de África, afectando las zonas periféricas de Colombia con un "rifting" que da lugar al océano atlántico (Jaillard et al., 1990, en Cooper et al., 1995).

Las condiciones del "rifting" Para el Jurásico superior en el Valle Medio del Magdalena deposita la Formación Girón en un ambiente continental, fluvial a lacustre-fluviátil (Royero y Clavijo 2001). La formación está conformada por areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomerático, de color rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, presenta estratificación cruzada en capas gruesas con interestratificaciones de limolitas y lodolitas de color rojo violeta y grisáceo (Royero y Clavijo 2001).

Comenzando el Cretácico (Berriasiano) se deposita la Formación Tambor, con areniscas conglomeráticas, lodolitas rojo-grisáceas y cuarzoareniscas gris-amarillentas, esta formación es relacionada con un ambiente de depositación fluvial de corrientes trenzadas (Royero y Clavijo 2001).

Durante el cretácico se presenta una transgresión inicial que alimenta la depositación de sedimentos relacionados con ambientes marinos, igualmente ocurre la aparición del "Paleoalto de Santander" (**Figura 2**) que separa en esta zona del graben formado, al este la cuenca del Valle Medio del Magdalena y al oeste la Cuenca del Cocuy la cual se encuentra limitada por el escudo de Guyana (Cooper et. al., 1994).

Figura 2. Representación de la aparición del "paleoalto" de Santander el cual separa la Cuenca Tablazo-Magdalena y la Cuenca del Cocuy.



Modificado de Cooper (1995).

Durante la transgresión Berriasiano-Valanginiano (Cretácico) se deposita la Formación Rosablanca constituida por carbonatos de plataforma somera hacia su base, luego presenta lodos calcáreos de mayor profundidad, y hacia su parte superior muestra signos de una cierta regresión (Clavijo et al., 2008), con areniscas y lodolitas calcáreas (Royero y Clavijo 2001). Seguidamente la Formación Paja se deposita en condiciones de profundización gradual del mar, por lo que está conformada principalmente por shales negros ligeramente fosilíferos (Morales, 1956). Para este tiempo Fabre (1986) basado en estudios de minerales arcillosos menciona anomalías térmicas.

Hacia la mitad del cretácico se deposita la Formación Tablazo caracterizada por calizas fosilíferas grises a negras, localmente glauconíticas y arcillosas de color negro, presenta niveles intercalados de arcillolitas calcáreas fosilíferas grises a gris azulado, con intercalaciones de areniscas grises de grano fino a medio

levemente calcáreas, la depositación pertenece a un ambiente nerítico poco profundo (Royero y Clavijo 2001). Posteriormente se deposita la Formación Simití en un ambiente nerítico bajo a medio, sus litologías predominantes son shales carbonatados (Morales, 1956), está constituida por shales grises a negros, carbonosos, levemente calcáreos, con concreciones calcáreas, estos shales se encuentran intercalados con areniscas y calizas grises, localmente arcillosas y fosilíferas (Royero y Clavijo 2001).

Según Cooper, et al., (1994), hacia la mitad del Cretácico se produjo una transgresión marina que acompañada de condiciones upwelling y de anoxicidad que favorecieron la depositación de lodolitas, cherts y fosfatos que originarían rocas fuente. Para el Turoniano-Coniaciano el mar alcanza su máxima superficie de inundación al presentarse una nueva subsidencia en la cuenca (Clavijo et al., 2008) que precisamente permite la depositación de calizas arcillosas gris oscuras, lutitas grises a negras calcáreas, concreciones de calizas con fósiles, que alcanzan más de dos metros de diámetro, capas delgadas de chert negro y hacia la parte superior capas fosfáticas; pertenecientes a la Formación La Luna (Royero y Clavijo 2001).

Seguidamente, hacia finales del Cretácico, la cuenca experimenta una definitiva somerización donde la Formación Umir representa el inicio de la sedimentación de posteriores depósitos continentales (Clavijo et al., 2008). La Formación Umir está conformada por shales carbonosos y micáceos grises a negros con concreciones ferruginosas, lutitas carbonosas grises a gris oscuras, con nódulos ferruginosos, intercalaciones de areniscas y limolitas carbonosas y micáceas, también es común la presencia de capas explotables de carbón (Royero y Clavijo 2001).

Gómez et al., (2003) menciona que la acreción de la Cordillera Occidental hacia el Cretáceo tardío, impulsó el levantamiento de la parte norte de la cordillera Central e indujo la inversión compresional de los grabens que se tenían del Mesozoico.

Para el Paleoceno se produce la emersión del macizo Floresta-Santander, lo cual se convierte en fuente importante de fragmentos líticos para las regiones aledañas (Fabre, 1986). Según Cooper et al., (1994), la depositación en el Valle Medio del Magdalena comprendería areniscas feldespáticas y líticas de ambiente fluvial derivadas de la deformación y levantamiento de la Cordillera Central. Se deposita entonces la Formación Lisama, esta formación sería una respuesta al inicio de la incipiente inversión tectónica de la cuenca (Ziegler et al., 1995, Sarmiento, 2002, en Clavijo et al., 2008) y al primer levantamiento de la cordillera Central (Clavijo et al., 2008). La formación representa la transición del ambiente marino de la Formación Umir a uno más continental como se indicó anteriormente. Sus litologías predominantes son shales varicoloreados (colores marrón, rojo y gris claro) intercalados con areniscas de grano fino a medio (Morales, 1956) con algunas capas delgadas de carbón (Royero y Clavijo 2001).

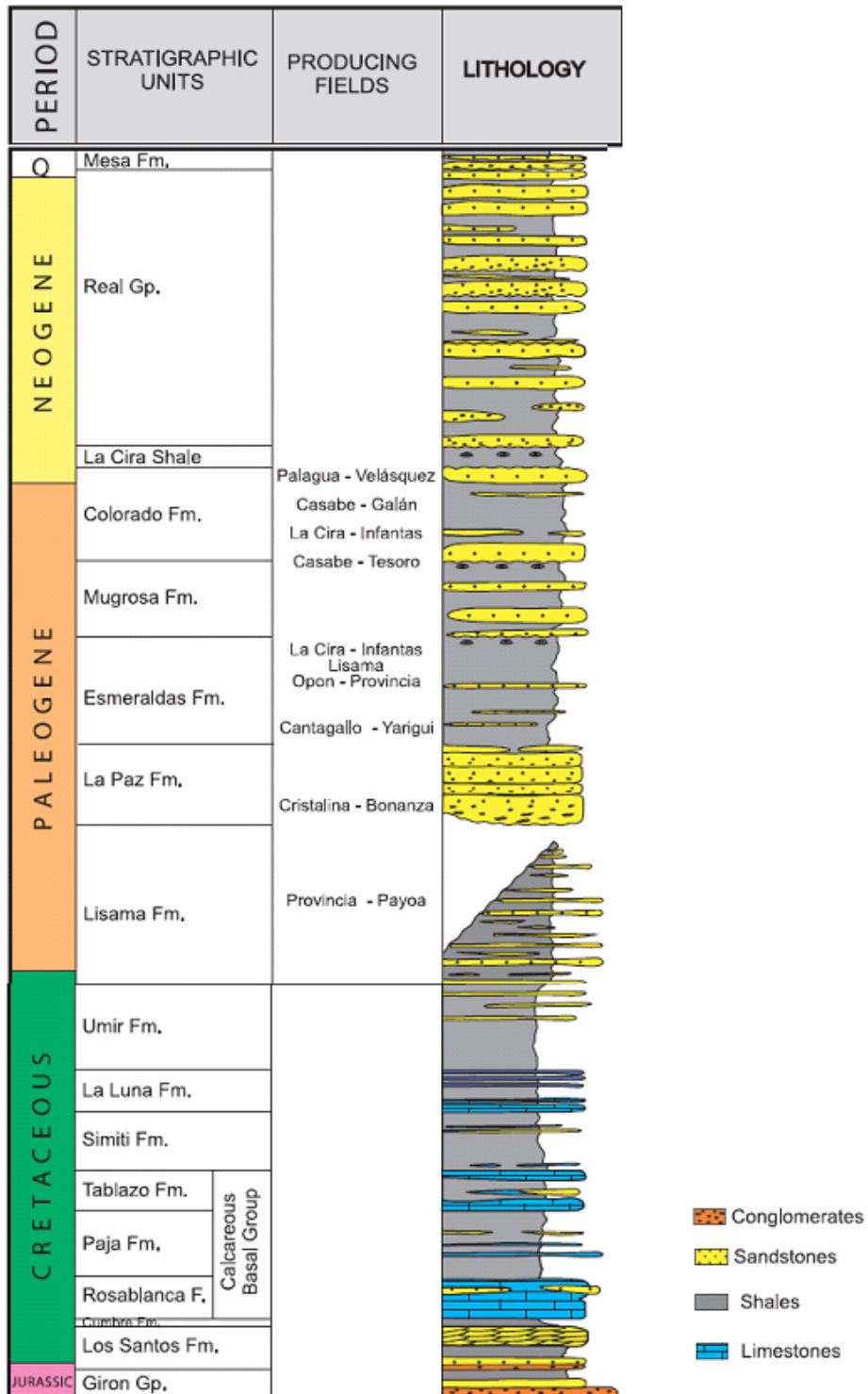
Cooper et al., (1994), menciona que hacia el Eoceno, con el levantamiento de la Cordillera Oriental, se crean nuevas estructuras producto de este nuevo ambiente de deformación donde las fallas normales cretácicas sufren inversión. Fabre (1986) indica que este levantamiento de la cordillera está evidenciado por las facies arenosas y algunos cherts depositados en regiones aledañas los cuales fueron derivados de estas nuevas zonas emergidas. Para el Eoceno se tiene la depositación de la Formación La Paz de origen continental caracterizándose por presentar areniscas conglomeráticas color gris claro; depositadas en un ambiente de corrientes trenzadas (Royero y Clavijo 2001). En este tiempo se deposita también la Formación Esmeraldas (**Figura 3**), compuesta por areniscas finas a limolitas color gris claro a verdosas, intercaladas con shales moteados de colores marrón, rojo y púrpura (Morales, 1956), y con algunas capas delgadas de carbón (Royero y Clavijo 2001). Para el Oligoceno se tiene la depositación de la Formación Mugrosa (**Figura 3**) caracterizada por contener shales moteados, lodolitas verdosas y areniscas de grano fino (Morales, 1956), con algunas capas conglomeráticas y hacia su parte superior se tienen lodolitas fosilíferas (Royero y

Clavijo 2001). Durante el Mioceno inferior, se tiene la depositación de la Formación Colorado con shales varicoloreados (gris claro, rojo y púrpura) intercalados con capas de diversos espesores de areniscas finas a gruesas conglomeráticas (Morales, 1956).

El progresivo levantamiento de la Cordillera Oriental ocurre; junto con la deformación de la cuenca y la simultánea depositación de las formaciones La Paz, Esmeraldas, Mugrosa y Colorado (Clavijo et al., 2008). Hacia el Mioceno superior Fabre (1986) menciona una fase de volcanismo en la cordillera oriental representado por la presencia de andesitas, pórfidos dacíticos y riolíticos, ignimbritas riolíticas y por las numerosas fuentes termales ubicadas hacia el departamento de Boyacá y hacia la Sierra Nevada del Cocuy. La depositación del Grupo Real corresponde a esta edad, su material depositado es proporcionado por el levantamiento y erosión de la Serranía de San Lucas y el Macizo de Santander (Clavijo et al., 2008). Esta formación presenta hacia su base conglomerados con chert marrón a negro, shales moteados (colores azul, gris, verde y rojo) y fragmentos de carbón (Morales, 1956), hacia su parte superior presenta material volcánico re TRABAJADO y depositado en ambiente fluvial (Gómez et al., 2005). Para el Plioceno se deposita el Grupo Mesa caracterizado por conglomerados masivos, capas de areniscas líticas y capas de lodolitas (Gómez et al., 2005).

Regionalmente el sistema deformativo está representado por una estructura transpresiva dextral con dirección NE de tipo flor positiva (Clavijo et al., 2008).

Figura 3. Columna estratigráfica Generalizada para el Valle Medio del Magdalena.

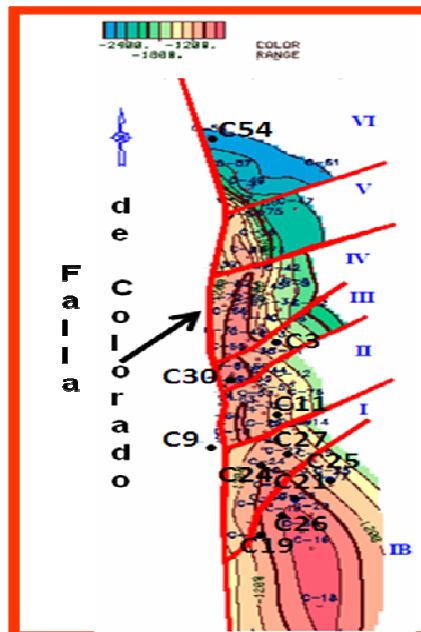


Modificado de Barrero et al. (2007).

4.2 ESTRUCTURA DEL CAMPO COLORADO

El Campo Colorado se encuentra sobre un anticlinal asimétrico con eje en dirección S-N, su flanco más extenso buza hacia el oriente y el más corto buza hacia el occidente; está afectado por una falla principal de tipo inversa con buzamiento hacia el oriente y con orientación S-N, conocida como la Falla de Colorado (Parra et al., 2003). El bloque colgante de la falla está fraccionado en siete bloques divididos (de sur a norte bloques IB, I, II, III, IV, V y VI) por 6 fallas satélite (**Figura 4**), las cuatro primeras de sur a norte son fallas inversas que buzan hacia el sur induciendo un sistema cabalgante en el que el bloque IB se encuentra más elevado y el IV más bajo (Parra et al., 2003). La quinta falla es una falla inversa que buza hacia el norte y la última falla satélite que se encuentra hacia el norte del campo es una falla normal la cual buza hacia el norte.

Figura 4. Ubicación de las fallas y bloques (con números romanos) presentes en el Campo Colorado. Se observa también la ubicación de los pozos usados en el presente trabajo.



Modificado de Parra et al. (2003).

4.3 ESTRATIGRAFÍA DE LA FORMACIÓN MUGROSA

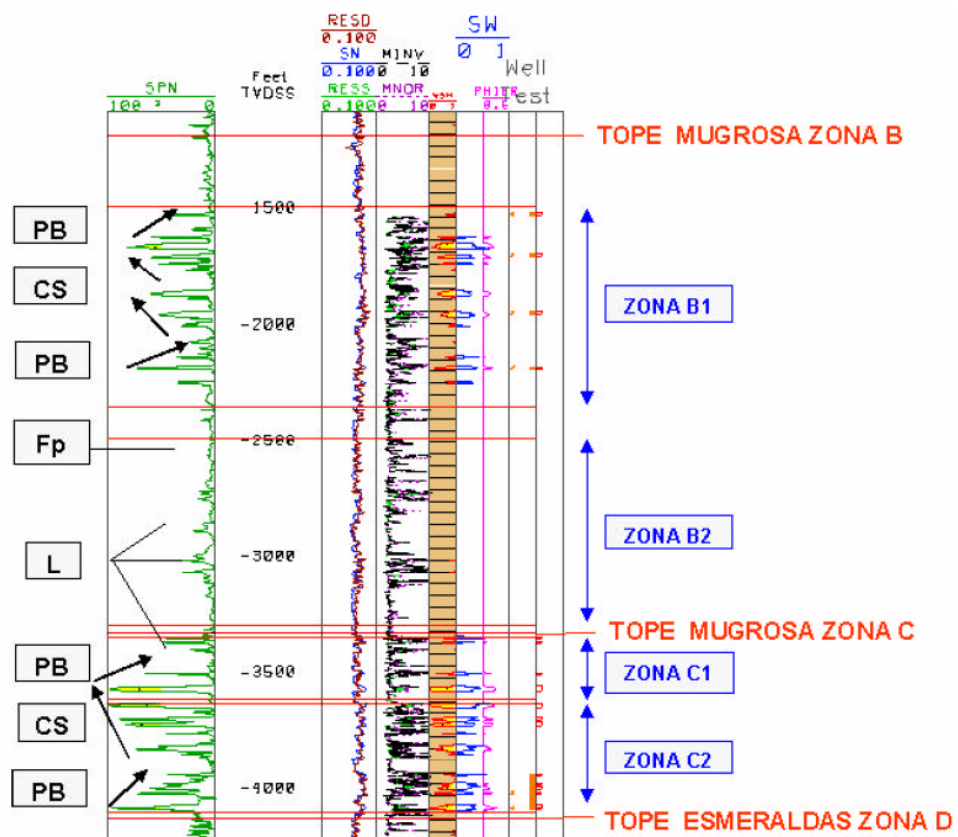
La Formación Mugrosa hace parte del grupo Chuspas establecido por geólogos de la compañía Atlantic Refining en el que unieron los sedimentos de las actuales formaciones Mugrosa y Colorado (Morales, 1956). Waring, en Morales (1956), delimitó la Formación Mugrosa de base a techo como los sedimentos comprendidos entre el horizonte fosilífero de los Corros (tope de la Formación Esmeraldas) y el horizonte fosilífero de Mugrosa (tope de la Formación Mugrosa).

Morales (1956) describe que hacia la parte inferior de la Formación Mugrosa se encuentran shales color café y azul pálido, moteados e intercalados con delgadas capas de areniscas finas y limolitas color verde claro, hacia la parte superior la formación esta caracterizada por areniscas finas a gruesas color gris, localmente se tienen areniscas guijarrosas intercaladas con shales moteados. Morales (1956) señala que es posible encontrar ocasionalmente glauconita en esta formación. Hacia la zona del campo La Cira-Infantas la formación tiene espesores de 800 metros y aumenta hasta 2000 metros hacia la parte oriental de la cuenca. Regionalmente la formación presenta una posible discordancia (parainconformidad) con la formación Esmeraldas en su límite inferior (Royero y Clavijo 2001). A la Formación Mugrosa le fue asignada la edad Oligoceno medio. El horizonte fosilífero el cual limita la parte superior de la formación está compuesto por restos de peces, reptiles y dientes de mamífero, la litología cercana a este horizonte varía entre colores verde aceituna, granate y negro (Morales 1956).

En un informe sobre el campo Colorado realizado por Parra et al., (2003) la Formación Mugrosa es dividida en cuatro Subunidades operacionales (zonas B1, B2, C1 y C2) (**Figura 5**) basados en la correlación de electrofacies de zonas permeables indicadas por los registros SPN (Potencial Espontáneo Normalizado) y microresistivos, otros parámetros tenidos en cuenta fueron el contenido de arcillas

calculado (V-shale) y la variación vertical de gravedades ρ_{API} en las pruebas de fluidos iniciales. El informe indica que estas subunidades presentan una porosidad promedio de 12.9 % para la Zona B1, 13.5% para B2, 15.7% para C1 y 19.6% para C2, con un espesor promedio de arena neta petrolífera de 21.8, 23.2, 24.9 y 42.3 pies respectivamente. Parra et al., (2003), menciona además que existe una variación lateral de las zonas permeables relacionadas a cuerpos de arenisca que no presentan buena continuidad lateral.

Figura 5. Registro tipo del pozo 31 del Campo Colorado donde se muestran las 4 subunidades operacionales de la formación Mugrosa, zonas B1 y B2, y zonas C1 y C2. El registro SPN indica presencia de depósitos de tipo llanura de inundación (Fp), cuerpos de diques naturales o 'Natural levée' (L), 'crevasse splay' (CS) y 'Point Bar' (PB).



Tomado de Parra et al. (2003).

5. ANTECEDENTES

Mesa A. (1995) realizó el trabajo titulado “Diagénesis y Calidad del reservorio del campo la Cira, formaciones Mugrosa y Colorado” donde se determina que los principales procesos diagenéticos que redujeron la porosidad fueron la compactación, la cementación con arcillas y la precipitación de carbonatos. La compactación es mayor en las areniscas de grano fino (Mugrosa zona B) por contener más líticas dúctiles y presentar además reprecipitaciones de arcillas. Esta formación presenta porosidad secundaria por la disolución incompleta de minerales inestables como la plagioclasa, micas, líticas y minerales arcillosos.

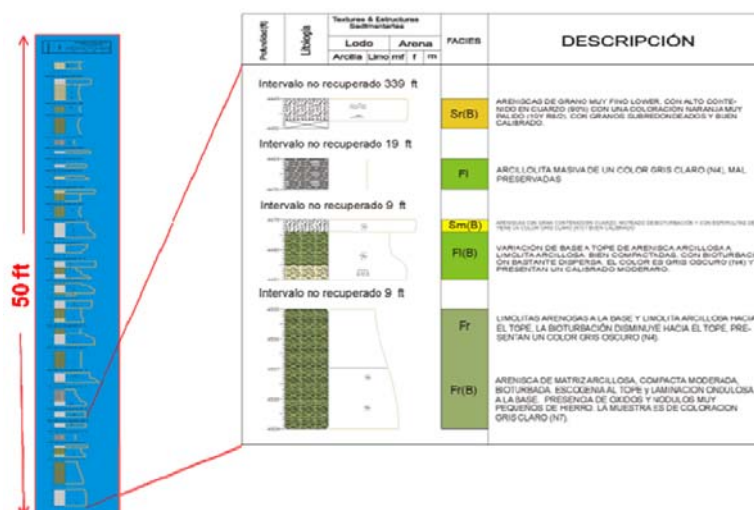
La tesis de pregrado titulada “Estudio Petrológico de las formaciones Mugrosa y Colorado del Campo la Cira, Valle Medio del Magdalena” realizada por Badillo (1996), indica que los principales procesos diagenéticos que afectaron las areniscas de la Formación Mugrosa fueron la compactación; la infiltración, hidratación y recristalización de las arcillas; las precipitaciones de siderita, caolinita y de calcita ferrosa. Otros eventos diagenéticos reportados fueron la disolución de siderita y de granos inestables.

En el trabajo realizado por Sánchez (2000) titulado “Análisis Petrológico y Evaluación como rocas almacenadoras de formaciones Cretáceas y Terciarias en el Bloque Llanito-Matacuyá, Valle Medio del Magdalena” se menciona que para dos muestras analizadas de la Formación Mugrosa, su clasificación corresponde a arcosas líticas. Donde el contenido de cuarzo varía entre 36% – 40%, el de feldespatos entre 18% - 23% y los fragmentos líticos entre 14% – 15% (omitiendo porcentajes de cemento, matriz, porosidad, minerales dúctiles y accesorios). Los eventos diagenéticos determinados son una moderada compactación del sedimento, fracturamiento de algunos granos, cementación local con calcita y disolución parcial de granos de feldespato potásico, plagioclasa, matriz e intraclastos arcillosos.

El trabajo titulado “ Modelo sedimentológico y estratigráfico de la Formación Mugrosa en el Campo escuela – Colorado” realizado por García y Fonseca (2009), menciona que de acuerdo a registros “dipmeter” la Formación Mugrosa va desde 1410 a 4500 pies de profundidad; durante la revisión de núcleos de la Formación Mugrosa para el campo Colorado en éste trabajo, se determinaron las facies y el tipo de depósito para cada sección de núcleo siendo CH para definir canal, DES para desborde de canal y FP para llanura de inundación dentro de un ambiente de depositación fluvial.

En el trabajo mencionado anteriormente también se subdividió la formación Mugrosa en 7 subunidades (B0, B1, B2, B3, C1, C2 y C3) de acuerdo con los espesores de depósitos tipo canal y su continuidad lateral. Las zonas con los amalgamamientos de canales más gruesos y con la mayor continuidad lateral se designaron como subzonas B2 y C2; las mas lodosas y continuas corresponden a B0 y B3; y las B1, C1 y C3, que presentan buen contenido arenoso pero su continuidad lateral no es tan buena como la de B2 y C2. La siguiente Figura muestra un recorte de la columna de núcleos del pozo C21.

Figura 6. Recorte de columna de núcleo del pozo C21 del campo Colorado.



Tomado de García y Fonseca (2009).

continuación se definen las características de las facies que se identificaron en núcleos del trabajo realizado por García y Fonseca (2009).

- **Litofacies Gci, Gmm, Gmg:** La constituyen gravas en gradación inversa, en gradación normal o masivas. grano-soportadas o matriz-soportadas.

Se pueden presentar ya sea en gradación normal, en gradación inversa o masiva; matriz-soportadas o granosoportadas, indicando un comportamiento del flujo que va de turbulento a laminar.

- **Litofacies St:** Indica areniscas con estratificación en artesas (**Figuras 7 y 8**).

Las artesas de la Formación Mugrosa se presentan en areniscas de grano fino a grano grueso, algunos guijarros pueden presentarse hacia la base de los estratos mostrando arenas pobremente calibradas y a veces con “intraclastos” de limolitas o arcillas (**Figura 52**) hacia la base de las artesas. La estratificación cruzada generalmente se curva hacia fuera en la base de la artesa, mostrando invariablemente una relación erosional con respecto a la estratificación suprayacente.

Figura 7. Se muestra una estructura en artesa en facies St. Afloramiento de la Formación Mugrosa.



- **Litofacies Sp:** Corresponde a areniscas con estratificación cruzada plana. La litofacies Sp se forma por el transporte de arenas que pasan por encima del flanco superior de las “bedform” que se pueden generar, puede ser por tracción o por suspensión que se llegan a depositar al final de la cresta del “bedform” en el punto de división del flujo. Las superficies superiores e inferiores de esta litofacies siempre son planas y tienen poca evidencia de erosión. Los granos de arena siempre presentan una muy buena selección.

- **Litofacies Sm:** Arenisca con estructura masiva. Miall (1996) en García y Fonseca (2009), indica que las areniscas masivas no existen en un río, sólo que siempre tienen una débil gradación o una muy débil laminación desigual que no es notable o que ha sido borrada. Los estratos con estas facies se depositan por flujos de sedimento gravitatorio (Eji, 1996, en García y Fonseca 2009).

- **Litofacies Sr:** Areniscas con “ripples” y ondulitas.

El desarrollo de “ripples” se da a bajas velocidades de flujo (< 1 m/s) y son muy sensibles a cambios en las condiciones del flujo (Miall, 1996 en García y Fonseca 2009). Los “ripples” son menores a 5 cm en altura y en su mayoría se acercan a los 2 cm (Eji, 2005 en García y Fonseca 2009). Los trenes de “ripples” aislados son comunes y pueden ser vistos sobre superficies de laminación plana y generalmente están acompañados por ondulitas

- **Litofacies FI:** Arenisca laminada, limo y lodo. Esta litofacies se presenta como interlaminaciones de lodo, limo y areniscas muy finas relacionando áreas de overbank cercanas a canales. Esta litofacies refleja la depositación de los sedimentos en suspensión y de las corrientes de tracción débiles

(Miall, 1996, en García y Fonseca, 2008). En la Formación Mugrosa la facies FI puede formar “ripples” u ondulitas, que pueden mostrarse como areniscas de

grano muy fino, limolitas, limolitas arcillosas o limolitas arenosas. Es frecuente también la presencia de bioturbación diseminada.

- **Litofacies Fsm:** Limolitas y arcillolitas. La característica de esta litofacies es la ausencia de granos de arena, en algunas zonas donde presenta bandeo y presencia de accesorios, puede coincidir con FI (Miall, 1996 en García y Fonseca 2009).

Muchas veces las litofacies FI y Fsm pueden ser difíciles de distinguir por tanto en el trabajo de García y Fonseca 2009 estas dos facies fueron unidas y trabajadas sin distinción.

Litofacies Fr: Lodolitas. Esta litofacies es el producto de la destrucción de otras facies donde la estratificación primaria tiende estar presente pero perturbada o destruida por la presencia de raíces y bioturbación por trazas fósiles que proporcionan a las capas una apariencia moteada o desordenada.

Figura 8. Relación del código y características estructurales de las facies determinadas para el Campo escuela Colorado en el modelo estratigráfico y sedimentológico “Formación Mugrosa” (2009).

CÓDIGO	FACIES	ESTRUCTURA SEDIMENTARIA
Gci	Grava clastosoportada	Gradación inversa
Gmm	Grava matriz soportada	Gradación normal
Gmg		Masiva
St	Arenisca fina a muy gruesa, puede ser guijarrosa	Estratos cruzados en artesa, individuales o agrupados
Sp		Estratos cruzados tabulares planares, individuales y agrupados
Sm	Arenisca fina a gruesa	Maciza o pobremente laminada
Sr	Limolitas hasta arenisca gruesa	Laminación cruzada ondulítica
Fl	Arenisca muy fina, limolita, arcillolita	Laminación fina, ondulitas muy pequeñas. Maciza.
Fsm		
Fr	Arcillolita, limolita	Maciza, raíces, bioturbación

Modificado de Mial (1996) en García y Fonseca (2009)

6. JUSTIFICACIÓN

Se encuentra la necesidad de realizar la caracterización composicional y textural de las diferentes litofacies de la Formación Mugrosa del campo Colorado, la cual puede determinar intensidades y condiciones de los eventos diagenéticos que hayan afectado la formación productora y por consiguiente obtener una evaluación de su calidad como roca reservorio en esta zona de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena. La caracterización de los minerales arcilla por medio de difracción de rayos X contribuirá a la caracterización composicional de las diferentes litofacies y suministrará información para establecer la sensibilidad de estas litologías a posibles trabajos de estimulación de producción.

Los resultados de este trabajo representados en: a. la caracterización textural y composicional de las litofacies de la Formación Mugrosa, b. la identificación de los minerales arcilla presentes en las litofacies y c. los procesos diagenéticos que afectaron la Formación Mugrosa, aportarán información que ayudará a mejorar el modelo estratigráfico y sedimentológico del campo Colorado y tendrá influencia en sus posibles estrategias de producción, igualmente representarán información de gran utilidad para el entendimiento de la geología de ésta área.

7. MARCO REFERENCIAL

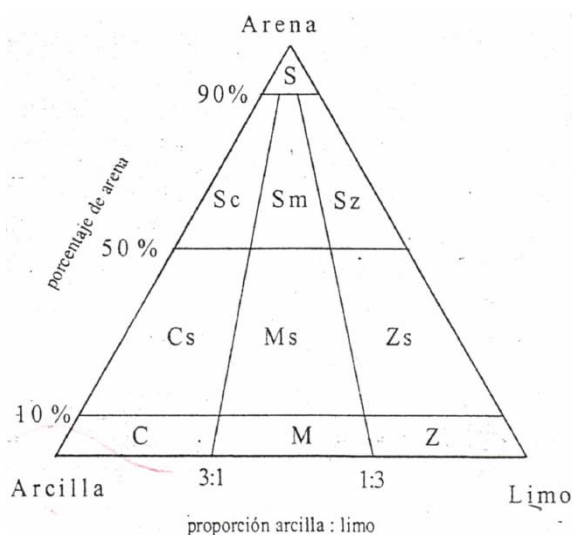
7.1 PETROGRAFÍA

7.1.1. Clasificación Textural y Composicional. De acuerdo con los porcentajes de partículas tamaño arena, limo y arcilla, las rocas son clasificables texturalmente en areniscas, limolitas ó arcillolitas, y se especifica seguidamente su segunda composición textural más importante, en la **Figura 9** se muestra la clasificación de la roca según su composición textural indicando con una S si es arenisca, C si es arcillolita o Z si es una limolita.

De igual manera sucede para una clasificación composicional de las mismas teniendo en cuenta sus contenidos en porcentaje de cuarzo, feldespatos y líticos.

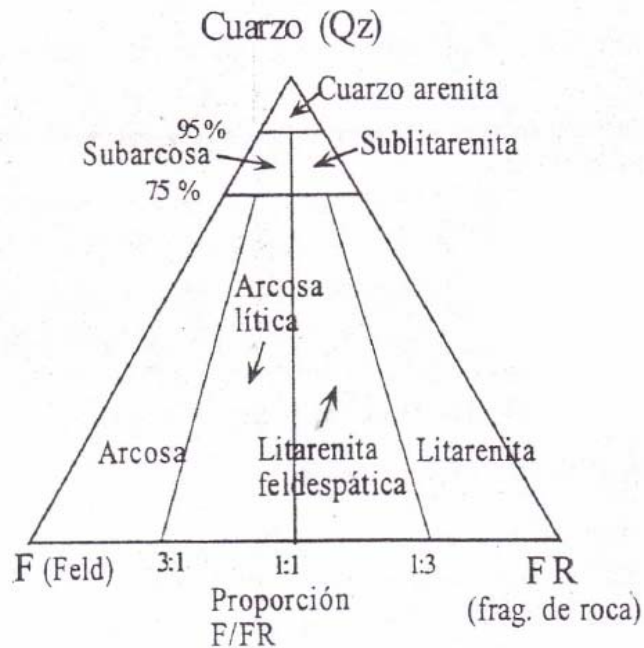
A continuación se indican los triángulos propuestos por Folk (1974) para la clasificación textural y composicional de las rocas sedimentarias.

Figura 9. Triángulo de clasificación textural de las rocas sedimentarias según Folk (1974); S: arena, C: arcilla, M: Lodo, Z: Limo.



Tomado de Cruz, et al., 2004.

Figura 10. Triángulo de clasificación composicional de las rocas sedimentarias según Folk (1974) donde se indica el nombre composicional de la roca según los porcentajes de cuarzo, feldespatos y líticos que presente.



Modificado de Cruz, et al., 2004.

7.1.2 Estructuras Sedimentarias. La deposición de los sedimentos está controlada por las condiciones y factores que dominan en un ambiente de deposición, esta deposición induce el arreglo o acomodo de las partículas estableciendo las características primarias de deposición. Las estructuras sedimentarias (inorgánicas) son características primarias que se forman desde que se deposita el material. La primera y más elemental estructura sedimentaria es la capa o estrato (Cruz, et al., 2004), que resulta de la distribución de los materiales sedimentados.

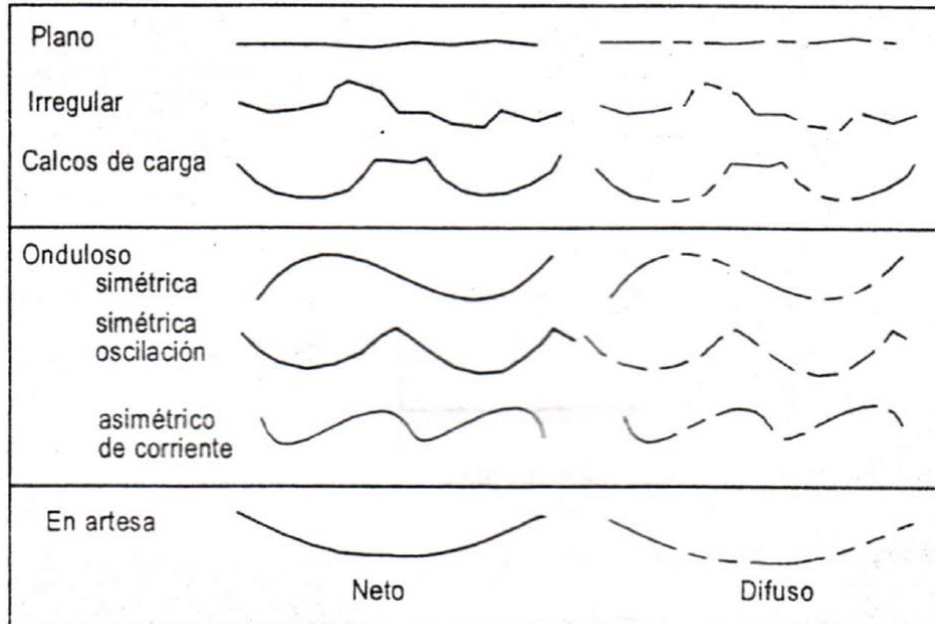
Los estratos contienen propiedades específicas en cuanto a las distribución interna de sus partículas y en cuanto a su composición, estas características pueden variar de un estrato a otro. El espesor de los estratos está referenciado por dos autores diferentes, según Mckee y Weir (1953) e Imgram (1954), se le

denomina lámina a las capas que presentan un espesor hasta de 1 centímetro, y según Campbell, se le llama lámina a capas que presentan espesor hasta de 24 centímetro aproximadamente (Cruz, et al., 2004).

Las capas o estratos y láminas est n separados por planos "imaginarios " que indican el cambio de características propias de un estrato a otro. Estas divisiones pueden observarse bien marcadas o difilmente distinguibles las cuales toman el nombre de plano neto o difuso respectivamente (Cruz, et al., 2004), estos dos términos pueden usarse como indicativos del tipo de contacto entre los estratos.

La siguiente Figura muestra la forma de los planos con las que se les puede encontrar, siendo plano, irregular, calcos de carga, ondulado   en artesa. Se indica también el tipo de contacto entre ellos:

Figura 11. Forma de los planos de estratificación y tipos de contacto entre éstos.



Tomado de Cruz, et al., 2004.

El arreglo y distribución del material que conforma un estrato, puede tener o no variaciones a nivel vertical y horizontal, dando lugar a las estructuras internas. Estas estructuras internas surgen como respuesta a cambios particulares en la intensidad de la corriente de sedimentación, la ocurrencia de procesos de erosión depositación de las partículas ó la presencia de procesos de retrabajamiento de partículas durante el tiempo de depositación (Cruz, et al., 2004). Cuando no se observa un arreglo característicos y la distribución de las partículas se encuentra homogénea, la estructura toma el nombre de estructura masiva. Las estructuras más importantes son gradación normal, gradación inversa, estratificación flaser, la laminación interna inclinada, laminación cruzada, laminación en artesa o curvada (Cruz, et al., 2004).

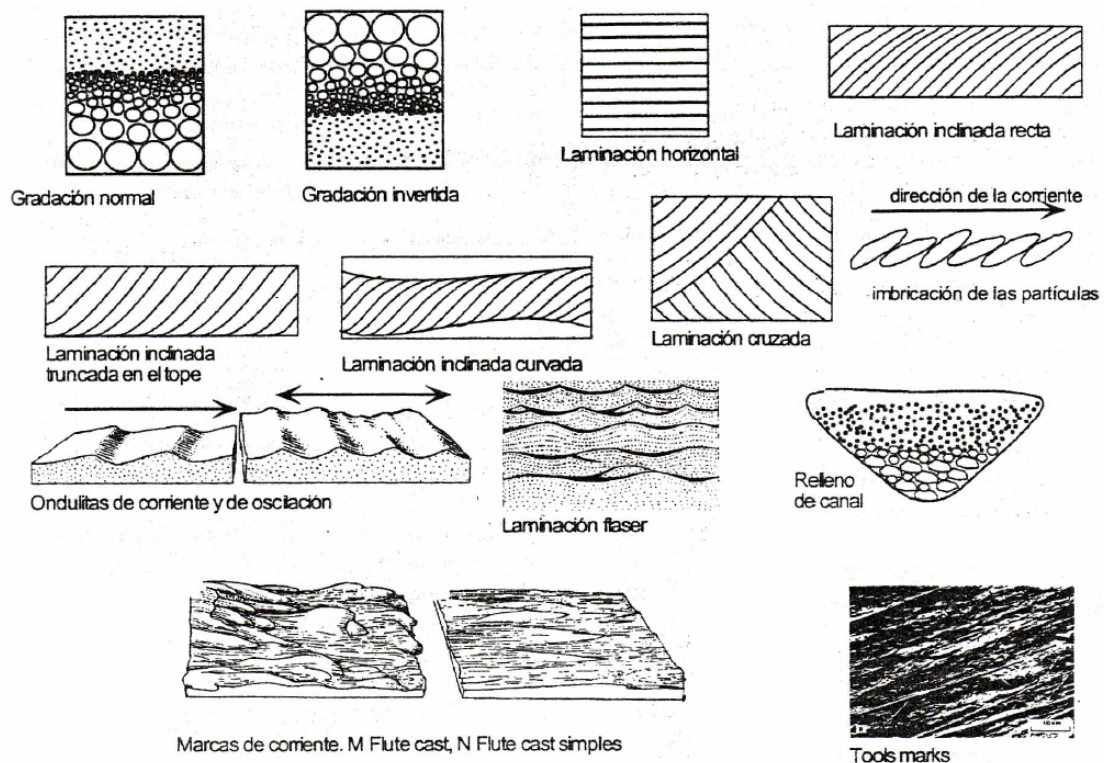
La estructura gradacional es identificada cuando se encuentra un cambio en el tamaño de grano en sentido vertical u horizontal, cuando se tienen partículas más grandes hacia la base de la capa la estructura es llamada gradación normal, si las partículas más finas se encuentran hacia la base entonces es una gradación inversa (Cruz, et al., 2004). Es posible encontrar laminaciones dentro de una capa principal que las albergue, las cuales están separadas por planos horizontales, distribuyendo horizontalmente estas láminas, a lo que se le llama laminación horizontal, cuando esta laminación no es horizontal pero sus planos se presentan en una sola dirección y son paralelos entre sí, se tiene una laminación inclinada, y cuando los planos que dividen estas láminas se encuentran inclinados y en varias direcciones, la laminación es llamada estratificación o laminación interna cruzada (Cruz, et al., 2004). La secuencia y posición de las partículas elongadas en una posición preferencial indicando una corriente arriba es llamada imbricación de clastos y no está involucrado el retrabajamiento del sedimento (Cruz, et al., 2004).

Las corrientes, la erosión y el retrabajamiento de los sedimentos pueden inducir conFiguraciones sobre las superficies de las capas (bedforms), donde las más comunes son las dunas que se caracterizan por tener tamaños en metros y

ondulitas con tamaños de centímetros (Cruz, et al., 2004). Se encuentran también estructuras internas tipo flaser (determinada relación entre la forma de las láminas y el tipo de sedimentos), tool marks (marcas en el sedimento por objetos) y las tipo flute cast.

La **Figura 12** muestra las diferentes configuraciones de arreglo de partículas que se puedan encontrar:

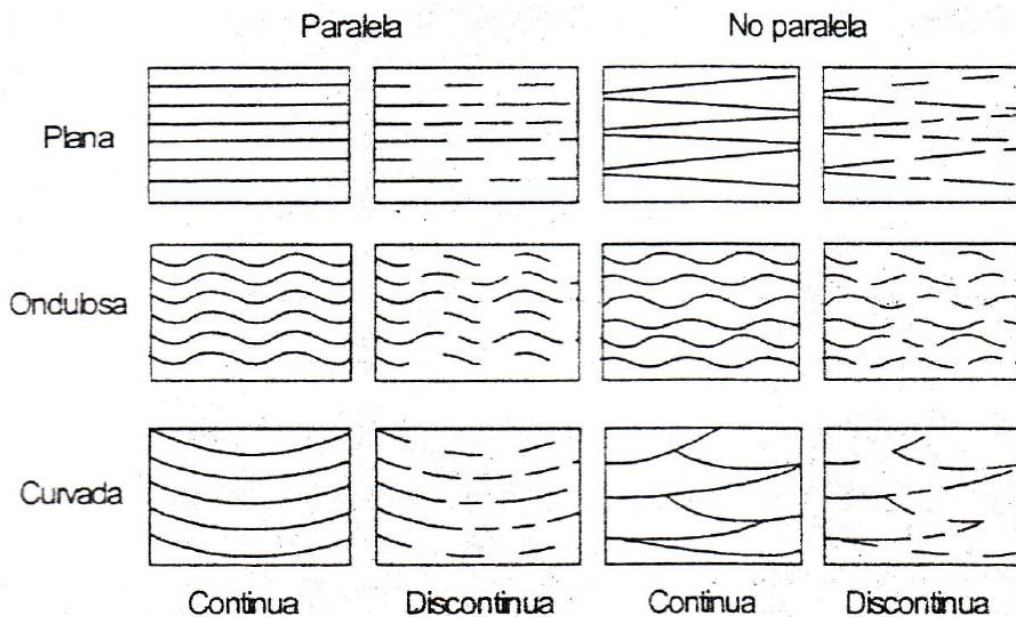
Figura 12. Distintos tipos de estructuras internas en estratos o capas.



Modificado de Cruz, et al., 2004.

Para complementar la descripción de una laminación, se usan también conceptos que muestren la relación, forma y paralelismo de y entre los distintos planos como laminación plana, ondulosa y curvada (**Figura 13**).

Figura 13. Forma y orientación de las laminaciones.

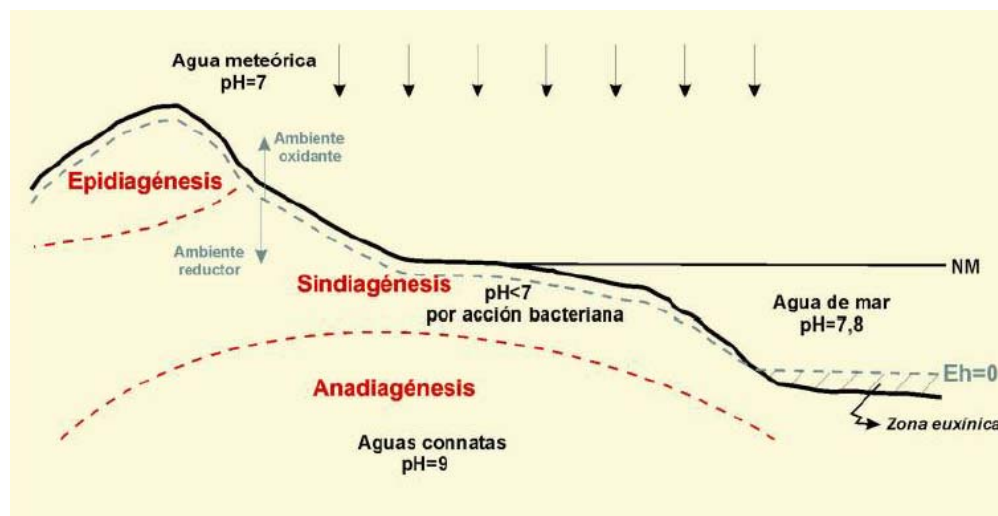


Tomado de Cruz, et al., 2004.

7.1.3 Diagénesis. La historia diagenética de una roca está influenciada principalmente por tres factores: El área fuente, el ambiente de depositación y la historia de enterramiento. La diagénesis se define como el conjunto de procesos químicos y físicos que modifican los sedimentos luego de su depositación. Estos cambios se producen desde condiciones superficiales en el ambiente de acumulación hasta profundidades en las que la temperatura y presión alcanzan los $\sim 200^{\circ}\text{C}$ y 1.5 kb. respectivamente, sin embargo los límites entre diagénesis y metamorfismo son muy difusos. Se han establecido tres etapas para la diagénesis: Eogénesis o Sindiagénesis, Mesogénesis o Anadiagénesis y Telogénesis o Epiadiagénesis (Spalletti y Poiré, 2007) (**Figura 14**). El estado eogenético puede llegar hasta los dos kilómetros de profundidad con temperaturas menores a los 70°C , en esta fase ocurren principalmente reacciones entre los minerales y fluidos intersticiales propios del ambiente de depositación (Spalletti y Poiré, 2007). La mesodiagénesis corresponde a las reacciones fisicoquímicas que ocurren a profundidades y temperaturas mayores a los 2 -3 km y $70 - 100^{\circ}\text{C}$

respectivamente, en estas condiciones ocurren procesos de compactación, cementación, transformación de minerales inestables y materia orgánica (Spalletti y Poiré, 2007), sin embargo la intensidad de estos procesos están fuertemente influenciados por los procesos eogenéticos, la composición de los fluidos intracuencales y el tiempo de residencia de los sedimentos bajo determinadas condiciones de presión y temperatura. La telogénesis hace referencia a los distintos cambios que ocurren en la roca durante la fase de ascenso tectónico y progresivo retorno de las masas sedimentarias a las condiciones superficiales. En este ambiente diagenético decrecen la presión y la temperatura, y se produce infiltración de aguas meteóricas ácidas y oxidantes que permiten la alteración de minerales inestables (Spalletti y Poiré, 2007).

Figura 14. Ubicación relativa entre las diferentes etapas de la diagénesis.



Tomado de Spalletti y Poiré (2007).

7.1.3.1 Factores que Influyen Sobre la Díagénesis.

- **Roca fuente:** La roca fuente es la responsable de la composición inicial de los sedimentos que van a ser expuestos a los diferentes procesos diagenéticos, en

una roca sedimentaria puede ocurrir aporte desde diferentes protolitos ocasionando mezcla de litologías.

- **Ambiente y clima:** El ambiente y el clima proporcionan el grado de meteorización al que puede estar sujeta la roca. Los climas más húmedos y más cálidos conducen a una descomposición mas completa de la roca fuente, mientras que los climas más fríos o más áridos, se caracterizan por generar productos de menor madurez (Pettijohn, 1980), esto por consiguiente, tendrá influencia en la cantidad de sustancias disueltas en los fluidos dentro del sedimento.

- **Ambiente de depositación:** Las condiciones propias de los ambientes de depositación son influyentes para las reacciones químicas que engloban las aguas meteóricas como fuentes de sustancias disueltas para procesos de precipitaciones. Las aguas que se desplazan hacia abajo disolverían a medida que aumenta la temperatura, por otra parte las aguas que se desplazan hacia arriba precipitarían a medida que fueran entrando en sectores mas fríos (Pettijohn, 1980). En el ambiente de depositación se tienen diferentes factores quimicos como la salinidad, el potencial de oxido-reducción y la acidez-alcalinidad, por lo tanto, los minerales precipitados y los elementos faunisticos presentes en los sedimentos se hallan relacionados intimamente con esos factores ambientales (Pettijohn, 1980). Por consiguiente, se pueden mencionar algunas sustancias que estarían relacionadas con las características del ambiente como se muestra a continuación: en zonas fuertemente reductoras se tendrá presencia de sulfuros, en zonas reductoras se tendrá carbonatos de hierro y sulfuros de hierro, en zonas débilmente reductoras se tendrán siderita y livianita, zonas neutrales se tendría presencia de cloruros de hierro con hierro férrico y ferroso, en zonas débilmente oxidantes se tendría presencia de glauconita y en zonas oxidantes hidróxido y oxido de hierro (Pettijohn, 1980).

- **Tipos de organismos:** Los organismos modifican física y químicamente los sedimentos creando espacios dentro de ellos alterándolos horizontal o verticalmente. De acuerdo con el tipo de organismos se tendrán diferentes formas y tamaños en las alteraciones del sedimento.

- **Tiempo:** El tiempo juega un papel importante en las intensidades de la diagénesis. A mayor tiempo de sometimiento de la roca a procesos o estados diagenéticos, mayor es la posibilidad de que ocurran cambios diagenéticos

- **Profundidad, temperatura y presión:** Estos tres factores son necesarios para los diferentes procesos físicos y químicos que pueden ocurrir en los sedimentos. A medida que aumenta la profundidad, la temperatura y la presión también lo hacen, incrementando la velocidad de las reacciones químicas para crear nuevos minerales, producirse reprecipitaciones químicas y generar compactación y disolución entre minerales a grandes profundidades.

- **Propiedades de las aguas:** Las propiedades químicas de las aguas como la salinidad y el pH, son necesarios para diferentes reacciones químicas de la diagénesis (Spalletti y Poiré, 2007), las aguas transportan sustancias que se necesitan para alterar los minerales y por consiguiente acondicionan el medio para distintas precipitaciones o disoluciones.

7.1.3.2 Procesos Diagenéticos. A continuación se mencionan los principales procesos diagenéticos y algunas de sus características y efectos que producen sobre los sedimentos después de su depositación:

- **Bioturbación y Bioerosión:** La alteración mecánica de los sedimentos no consolidados causada por la actividad orgánica es llamada bioturbación, como ejemplos se encuentran las excavaciones y pisadas producidas por los organismos (Spalletti y Poiré, 2007). La bioerosión se refiere a los procesos por

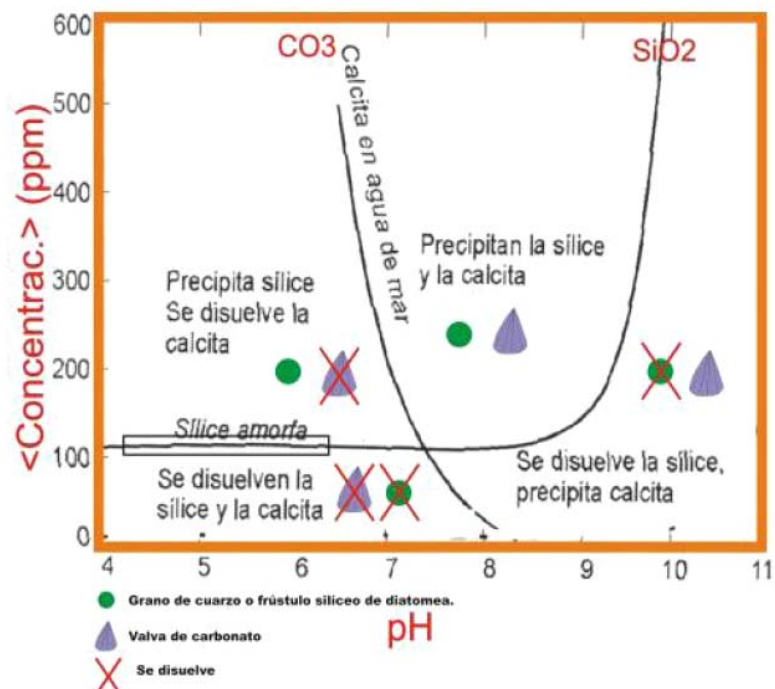
los cuales animales, plantas y microorganismos esculpen o penetran superficies de sustratos duros (Neumann 1966, en Lorenzo y Verde 2004). Estos dos procesos, mencionados como diagenéticos según Spalletti y Poiré (2007), generan estructuras orgánicas que pueden ser completamente reemplazadas o reemplazadas por componentes minerales secundarios de la roca (Pettijohn, 1980).

- **Compactación:** La compactación consiste en la reducción del espacio de los poros y la expulsión de fluidos intersticiales como consecuencia de la reorganización de los granos causada por el efecto de la carga, (Pettijohn, 1980). La compactación es un proceso mecánico que reordena los granos hacia un empaquetamiento más compacto ayudando así a la litificación de los sedimentos. Puede producir trituración y deformación de los granos y es mucho mas marcada en las litologías lodosas donde la porosidad puede tomarse como medida del grado de compactación, en general, las rocas mas antiguas y cubiertas por mayor espesor de sobrecarga, presentan porosidades mas bajas (Pettijohn, 1980).

- **Cementación:** La cementación es el proceso de precipitación de algunos minerales en los poros y espacios vacíos de un sedimento clástico, lo que conlleva al endurecimiento o consolidación de la roca, esta es la forma principal en las que las areniscas y los conglomerados se litifican (Pettijohn, 1980). La introducción del cemento en la roca afecta la porosidad y la permeabilidad de la misma, lo que se convierte en elemento importante para el desplazamiento de fluidos a través de la roca o para el volumen total de estos fluidos allí contenidos, así mismo, el proceso de cementación puede producir un desplazamiento de los fluidos contenidos en los poros y puede crear presiones en sistemas confinados (Pettijohn, 1980). Los cementos mas comunes son la sílice, los carbonatos y los minerales arcillosos. Cuando la composición mineral del cemento es la misma que la de los granos detríticos donde se va a precipitar, puede ocurrir que este cemento precipite en continuidad cristalográfica sobre tales granos y se tendrá entonces un agregado

cristalino entrelazado (Pettijohn, 1980). Se necesitan condiciones adecuadas para que se precipite un mineral determinado, entre ellas está el pH del entorno y la cantidad de la sustancia a precipitar (Spalletti y Poiré, 2007), la **Figura 15** muestra las condiciones en las que puede precipitar la sílice y la calcita según estos dos aspectos.

Figura 15. Condiciones de ph y concentración de sustancia en el entorno para la precipitación de sílice y carbonato cálcico.

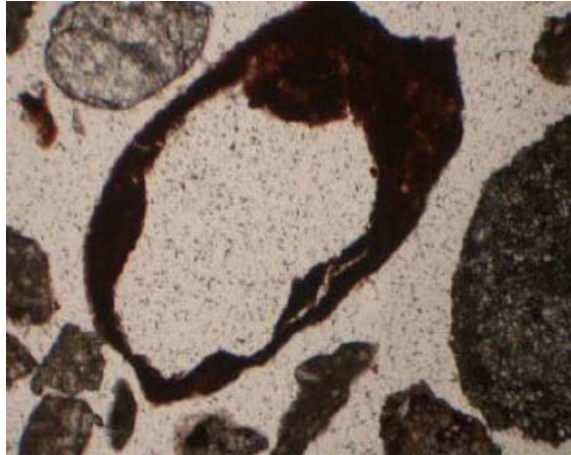


Tomado de Spalletti y Poiré (2007).

▪ **Disolución:** La disolución puede conducir a la pérdida sin reposición de materiales en un sedimento aumentando la porosidad, que es denominada 'porosidad secundaria' (**Figura 16**); si la disolución ocurre en conjunto con la precipitación de sustancias de los mismos materiales disueltos o de otros, puede llegar a producirse pérdida neta de la porosidad y por consiguiente expulsión de fluidos intergranulares (Pettijohn, 1980). La disolución y reprecipitación de una

sustancia disuelta puede producir la cementación completa de la roca (Pettijohn, 1980).

Figura 16. Ejemplo de disolución mineral y creación de porosidad secundaria.



Tomado de Spalletti y Poiré (2007).

- **Reemplazamiento:** Este proceso consiste en un cambio de mineralogía entre un nuevo material resultante y el reemplazado, pudiendo conservarse las texturas deposicionales y las microestructuras de los granos o cementos transformados (Melgarejo, 2003). Este proceso crea minerales autógenos generados por facies en equilibrio mediante la eliminación de las especies inestables y el crecimiento y creación de especies estables ante reacciones químicas del medio (Pettijohn, 1980).

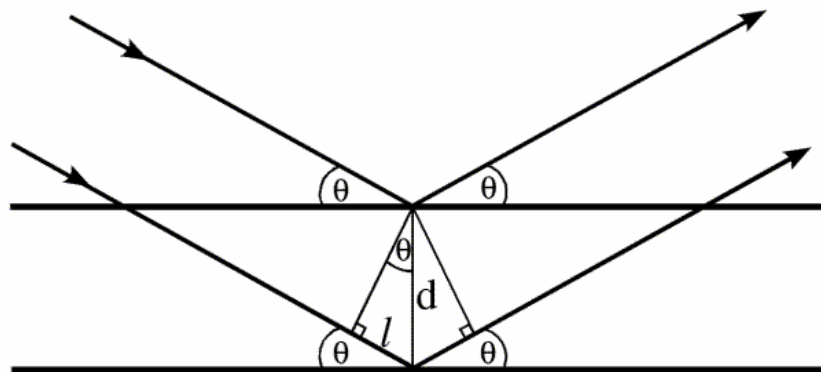
7.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

- **La Ley de Bragg.** La identificación de minerales arcilla por difracción de rayos x (DRX) se basa en la Ley de Bragg, (**Figura 17**), que permite medir el tamaño de las unidades estructurales de los filosilicatos con base en el ángulo de incidencia de los rayos X, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

donde n es un número entero, λ es la longitud de onda del rayo incidente (de los rayos x), θ es el ángulo de incidencia de los rayos X y d es la distancia entre planos o tamaño de la unidad cristalina básica (Melo, 2008). d es única para cada mineral arcilla lo que permite su identificación (Melo, 2008). La reflexión que se presenta cuando $n=1$ se le llama reflexión de primer orden y la distancia entre planos se expresa como $d(001)$, si $n=2$ la reflexión sería de segundo orden y la distancia se expresa como $d(002)$, etc., el valor de $d(002)$ es la mitad del valor de $d(001)$ y el de $d(003)$ la tercera parte, por ejemplo, si $d(001) = 10 \text{ \AA}$, entonces $d(002) = 5 \text{ \AA}$ y $d(003) = 3.33 \text{ \AA}$ (Mitchell, 1993, en Melo 2008).

Figura 17. Relación geométrica de la ley de Bragg.

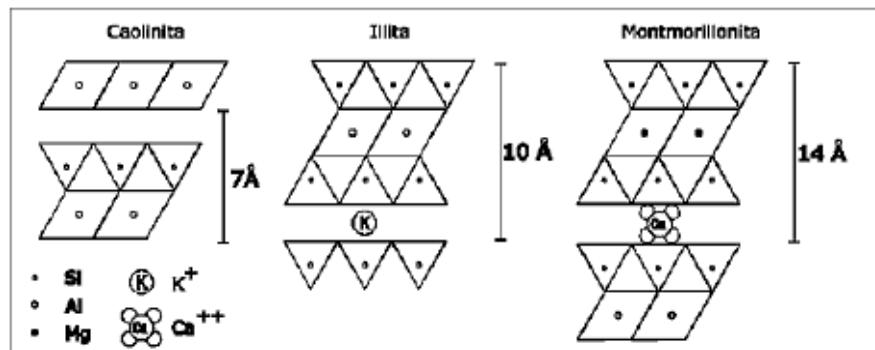


Tomado de Randy (2009).

Para obtener un difractograma es necesario realizar un barrido de un rayo incidente de longitud de onda conocida a diferentes ángulos θ , obteniéndose picos de reflexión cuya posición es característica de cada componente en una muestra (Melo, 2008). Los picos de las curvas obtenidos se comparan con patrones conocidos de distintos minerales y así es posible identificar cada componente presente en una muestra.

La siguiente Figura muestra la distancia entre planos o tamaño de la unidad cristalina de tres de los cuatro principales minerales arcilla.

Figura 18. Tamaños y estructura elemental de la caolinita, montmorillonita e illita.



Tomado de Castellanos y Gutiérrez (2006).

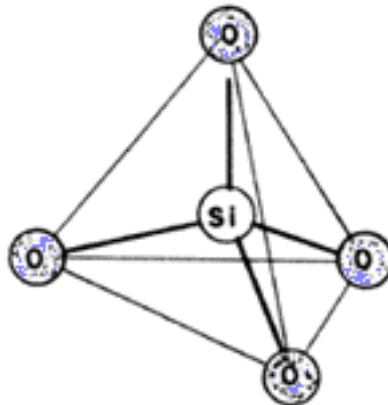
7.2.1 Minerales Arcilla. El término arcilla es usado para hacer referencia al material producto de la meteorización, la acción hidrotermal o a material depositado como sedimento (Grim, 1953). Diferentes autores hacen referencia a las arcillas como partículas con distintos tamaños finos pero siempre como a las partículas de tamaños más pequeños. Folk (1974) ubica la arcilla a tamaños aproximados de 3 micras. En general, el tamaño de partícula que se usa para referirse a los minerales arcilla es de 2 micras o menores.

La ocurrencia de los minerales arcilla está relacionada con dos naturalezas, las arcillas detríticas las cuales pueden proceder de otras rocas que las contengan ó pueden ser formadas en el mismo lugar donde se encuentran a las que se les da el nombre de neoformadas. Las arcillas pertenecen a una división de un amplio tipo de minerales llamados silicatos los cuales tienen como estructura esencial un tetraedro de silicio en donde el silicio se encuentra coordinado con cuatro oxígenos (**Figura 19**). Estos silicatos se dividen de acuerdo a la posición que obtengan los tetraedros y el número de tetraedros que estén unidos entre sí dentro de una red cristalina. Cuando los tetraedros están unidos formando láminas a lo

largo y ancho de la red cristalina, se clasifican como filosilicatos que son a los que pertenecen las arcillas (Domínguez y Schifter, 1992) (**Figura 20**)

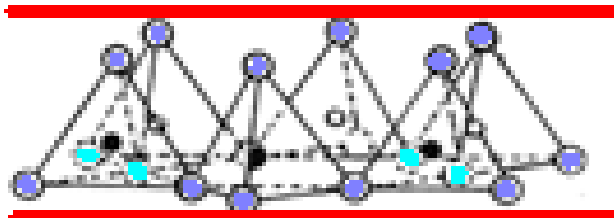
Los minerales arcilla se forman cuando una o dos láminas de tetraedros se unen con una lámina de octaedros (**Figura 21**). Estos octaedros están formados generalmente por un catión de magnesio o aluminio, los cuales están coordinados con seis oxígenos. Algunos de los vértices del plano inferior de los octaedros no tienen debajo ningún silicio (Si) tetraédrico dejando cargas desbalanceadas, para compensar su carga, el oxígeno (O) se une a un hidrógeno (H) formando un grupo OH, algunos de estos oxígenos pueden ser hidroxilos (HO) si quedan ubicados en zonas vacías de todo el arreglo cristalino del mineral (Dorrnsoro, 2009).

Figura 19. Tetraedro de silicio, unidad básica de los minerales arcilla.



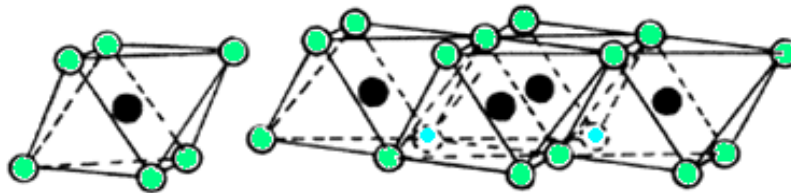
Modificado de Domínguez y Schifter (1992).

Figura 20. Lámina de Tetraedros.



Modificado de Domínguez y Schifter (1992).

Figura 21. Octaedros formando una lámina de octaedros.

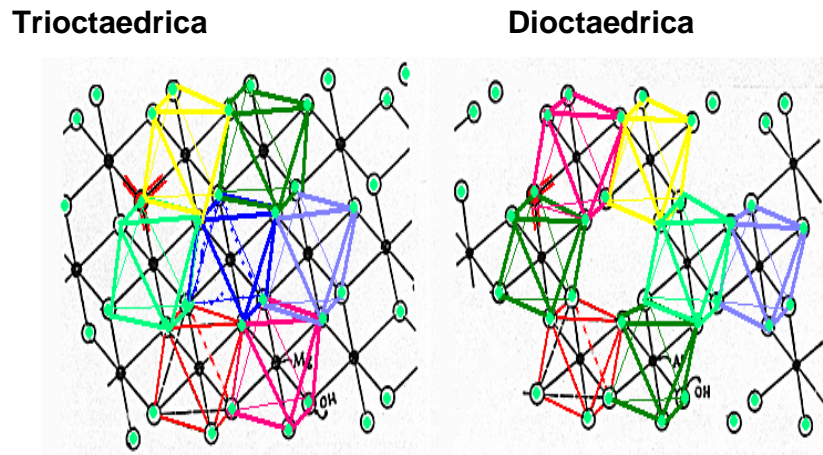


Modificado de Domínguez y Schifter (1992).

Los cationes de los minerales arcilla tienden a ser intercambiables con otros cationes, por ejemplo el silicio del tetraedro es frecuentemente intercambiable con el aluminio (Al) y muy pocas veces por otros cationes, el magnesio del octaedro puede ser intercambiado por el Aluminio, hierro u otros cationes (García y Suárez, 2002). Cuando estos intercambios ocurren se genera un desbalance de cargas eléctricas que van a ser reflejadas principalmente en las partes superficiales de las láminas de estas estructuras, las cuales darán las distintas propiedades químicas y físicas a las arcillas.

Las estructuras de los minerales arcilla pueden ser trioctaedras si todos los espacios de la lámina octaédrica del mineral están ocupados por cationes o pueden ser dioctaedricas si se encuentran espacios vacíos en la capa de octaedros (**Figura 22**). Esto es debido a los diferentes cationes que han sido intercambiados y generan diferencias eléctricas que no permiten dejar llenar los lugares con otros cationes.

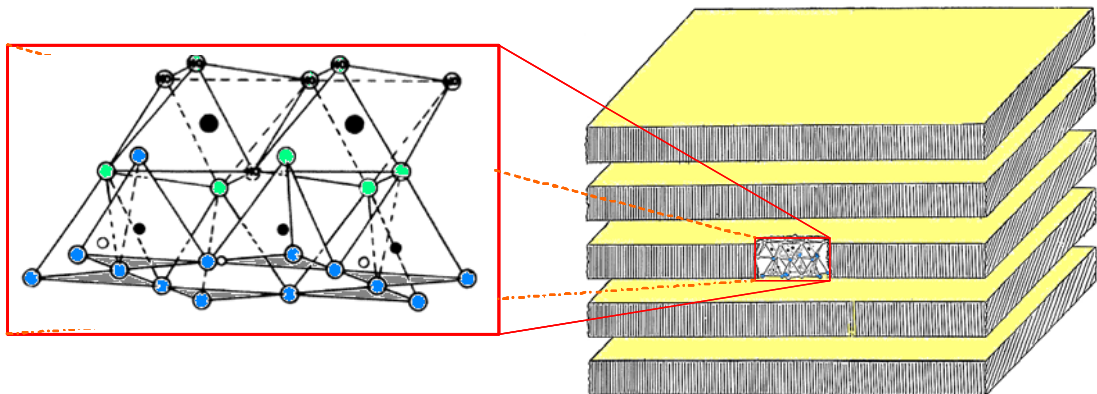
Figura 22. Situación trioctaédrica ó dioctaédrica para láminas octaédricas en las estructuras de los minerales arcilla.



Modificado de Dorronsoro (2009).

Las láminas ó hojas de tetraedros y octaedros se unen a otras láminas generando una estructura cristalina (Dorronsoro, 2009) (**Figura 23**).

Figura 23. Estructura cristalina arcillosa formada uniendo láminas de tetraedros y octaedros. Lámina tipo 1:1.



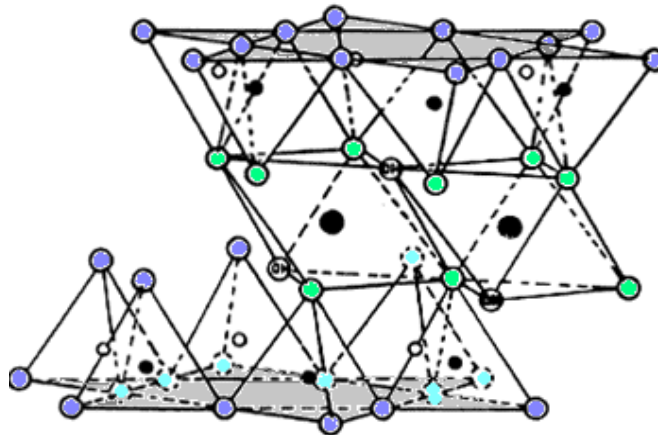
Modificado de Dorronsoro (2009) y de Domínguez y Schifter (1992).

7.2.1.1 Tipo de Minerales Arcilla. Los tipos de minerales arcilla se presentan por la determinada cantidad de láminas de tetraedros en la una unidad cristalina del mineral o cuando se presenta una rotación de estos tetraedros en conjunto.

▪ **Láminas tipo T-O o tipo 1:1.** Estas láminas están compuestas por una lámina de tetraedros unida a una lámina de octaedros (García y Suárez, 2002) (**Figura 23**) y tienden a ser estables eléctricamente. Los oxígenos de la parte superior de la lámina de tetraedros forman la base de la lámina de los octaedros, como se puede ver en la **Figura 23**, los oxígenos apicales de los tetraedros (verde claro) no alcanzan a ocupar todos los lugares de la base de la lámina de los octaedros y en esos lugares se pueden ubicar los hidroxilos, esto ocurre también para las láminas tipo 2:1.

▪ **Láminas tipo T-O-T o 2:1.** Son láminas compuestas por dos láminas de tetraedros y una de octaedros en el medio, como se observa en la **Figura 24**.

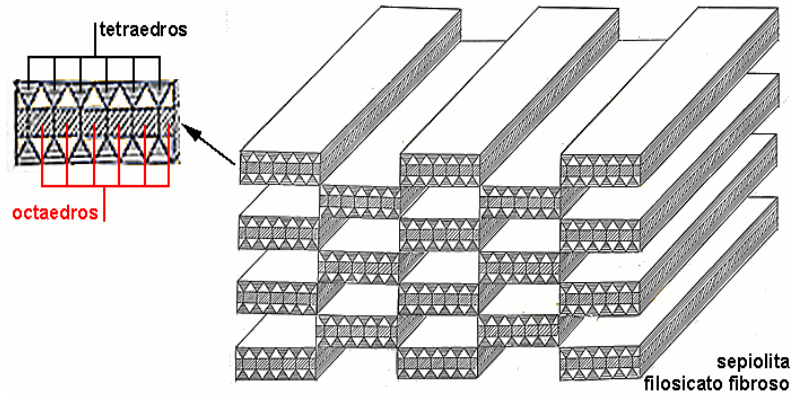
Figura 24. Lámina 2:1. Nótese la lámina de octaedros en medio de las hojas de tetraedros.



Modificado de Domínguez y Schifter (1992).

▪ **Láminas invertidas.** Este tipo de minerales son llamados arcillas fibrosas, son láminas tipo 2:1 pero se caracterizan por presentar una inversión completa de 180 grados cada cuatro (palygorskita) o seis (sepiolita) tetraedros como se muestra en la **Figura 25**.

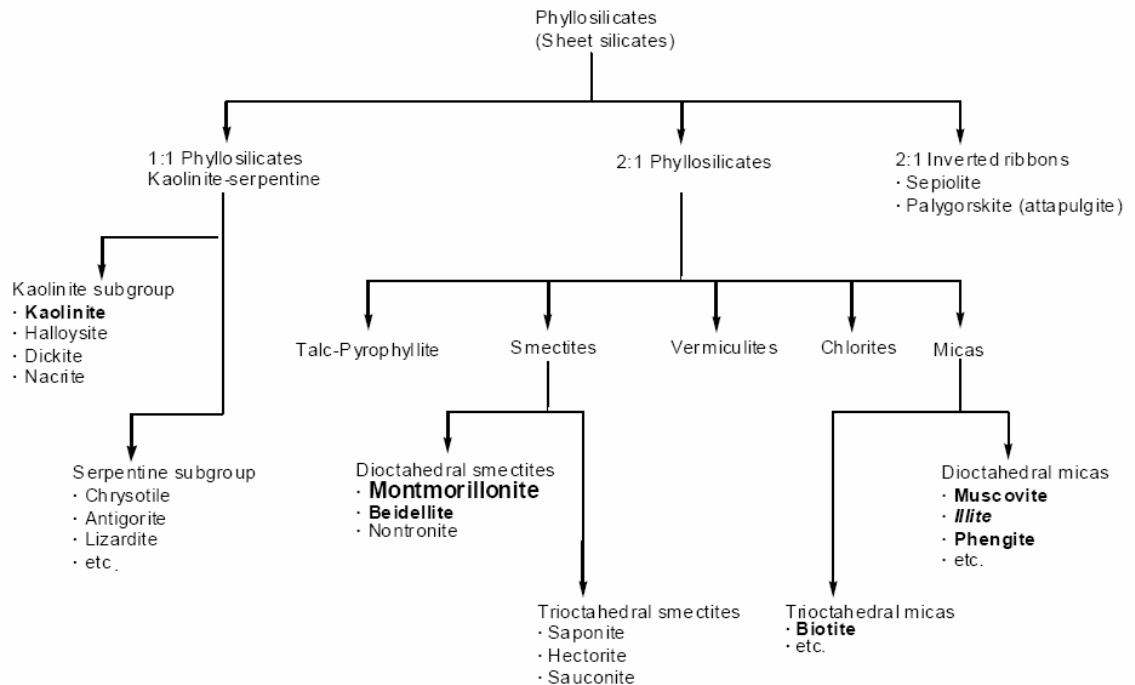
Figura 25. Sepiolita, estructura rotada 180° cada seis tetraedros.



Tomado de Dorronsoro (2009). ¡Error! Marcador no definido.

La **Figura 26** muestra la división de los filossilicatos donde las caolinitas, esmectitas, micas (ilitas) y cloritas, son los minerales arcilla conocidos en daños a formación por minerales arcilla.

Figura 26. División de los filossilicatos, mostrando sus principales minerales arcilla.



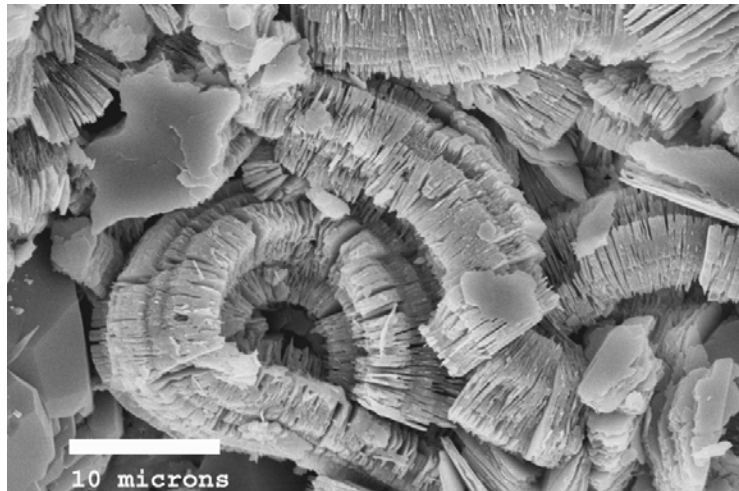
Tomado de World Health Organization (2005).

▪ **Minerales Interestratificados.** Los minerales interestratificados son minerales arcilla que están compuestos por estructuras en la que alternan 2 o más tipos de láminas diferentes (Melo, 2008). Si la secuencia de estas láminas presenta un patrón ordenado son “interestratificados regulares” y tienen nombres propios, ejemplo: la secuencia clorita-esmectita, constituida por una lámina de clorita, otra de esmectita y luego de clorita (Cl-Sm-Cl-Sm-Cl) y así continúa, si estos patrones se encuentran desordenados se hace referencia a ellos como interestratificados desordenados o “al azar”. Los dos tipos de láminas suelen ser dioctaédricas (Illita / Esmectita), trioctaédricas (Clorita/Talco) y mixta -(Illita / Clorita) (Melo, 2008).

7.2.2 Minerales Arcilla que Afectan una Producción. Los minerales arcilla pueden generar problemas de producción conocidos como daños a formación por minerales arcilla o “por finos”. A continuación se mencionarán los principales minerales arcilla que afectan o inducen estos inconvenientes y las diferentes opciones convencionales mencionadas en la industria del petróleo para tratar de evitar sus efectos.

7.2.2.1 Caolinita. Este mineral arcilla es de tipo 1:1; sus componentes principales son aluminio, silicio, hidrógeno y oxígeno y tiende a ser neutro eléctricamente (Almon et al., 1981), por consiguiente sus láminas se encontraran unidas solamente por fuerzas intermoleculares (**Figura 27**).

Figura 27. Mostrando su agregado individual en pequeñas laminas. Microfotografía de Caolinita bajo Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

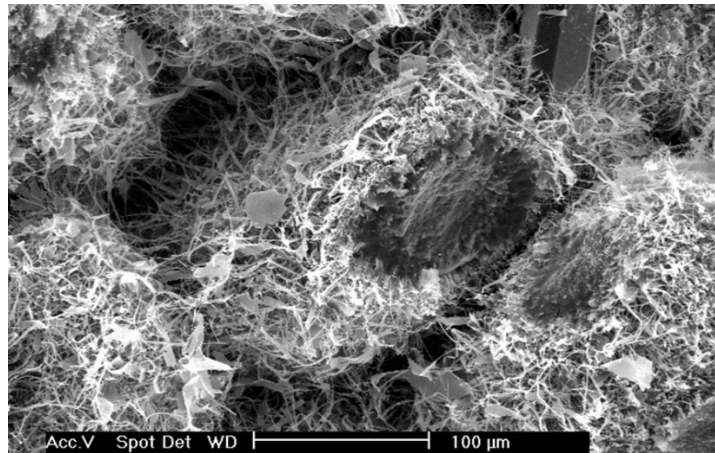


Tomado de Spalleti (2007).

El inconveniente con la caolinita en reservorio es que en presencia de fluidos con flujos fuertes, la caolinita migra con los fluidos llegando a obstaculizar los poros de la roca (Almon et al., 1981), este fenómeno es llamado migración de finos. Cuando se detecta la presencia de estos minerales arcilla, la formación puede tratarse con estabilizadores de minerales arcilla tales como componentes polihidroxi-aluminicos o sistemas de cationes poliméricos (Almon et al., 1981).

7.2.2.2 Illita. Este mineral es de tipo 2:1, sus principales componentes son el potasio, aluminio, silicio, hidrógeno y oxígeno ((Almon et al., 1981). Su aspecto puede ser fibroso o vermicular, en el caso de la **Figura 28**, se muestra una illita en aspecto fibroso o alargado rodeando los granos de una roca y obstaculizando los poros de la misma. La illita puede generar microporosidad que induce a saturaciones de agua irreducibles (Almon et al., 1981). En presencia de agua la illita tiende a juntarse y obstruir la permeabilidad, en producción ésta puede quebrarse y migrar con los fluidos llegando a depositarse en los espacios porosos (Almon et al., 1981).

Figura 28. Microfotografía de SEM, mostrando illita alrededor de granos y obstaculizando los poros de la roca.

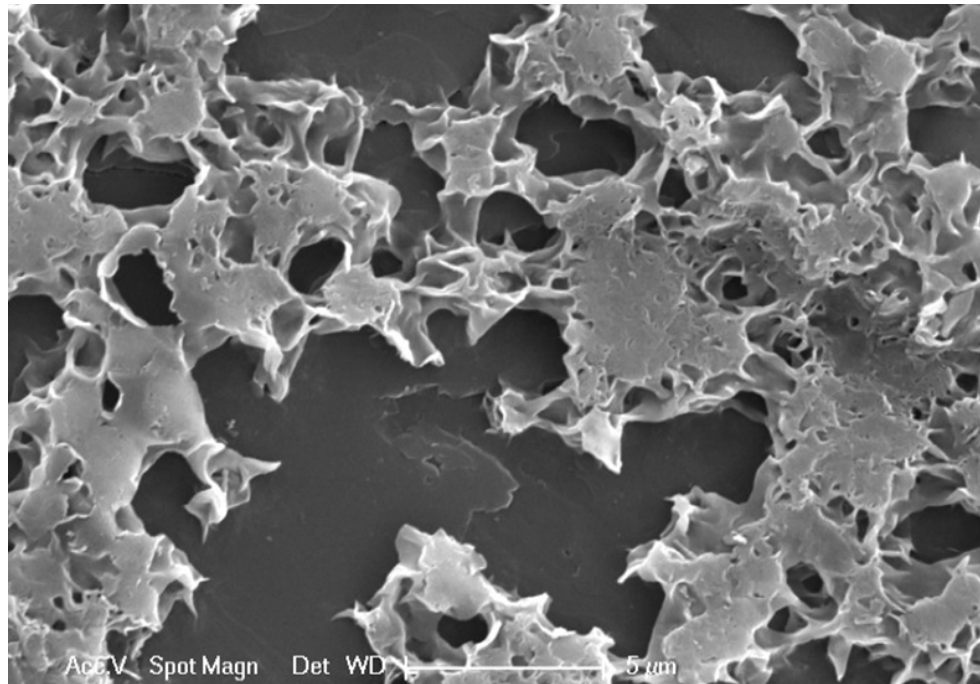


Tomado de Spalleti (2007).

Para evitar los problemas con la illita, la formación se debe tratar con mezclas consistentes de ácido clorhídrico y fluorhídrico para disolver el mineral (Almon et al., 1981).

7.2.2.3 Esmectitas. Mineral tipo 2:1; compuesto en general por sodio, magnesio, calcio, aluminio, silicio, oxígeno, hidrógeno y hierro (Almon et al., 1981). Las esmectitas (**Figura 29**) suelen presentar sustituciones catiónicas en sus estructuras que generan un desbalance de cargas en la superficie de sus láminas, estos desbalances atraen otros cationes los cuales a la vez atraen cargas negativas (como las moléculas de agua) hasta el punto en que la saturación de estas cargas negativas provoca la repulsión de las láminas adyacentes, induciendo el fenómeno de hinchamiento o expansión de arcillas, las arcillas por consiguiente aumentan de tamaño obstruyendo completamente los poros de la roca, si las arcillas se llegan a saturar completamente de esta carga negativa entre sus láminas, las láminas se diseminarán generando problemas en producción de migración de finos.

Figura 29. Microfotografía de SEM mostrando esmectita.

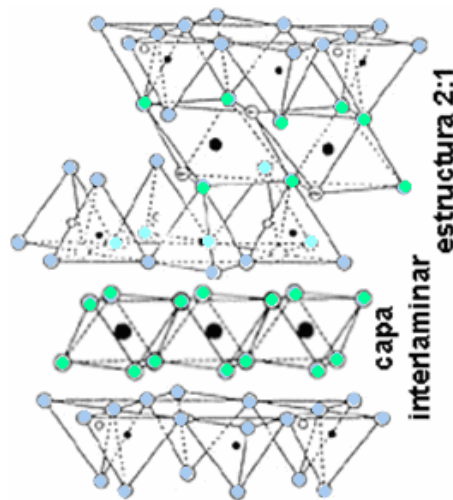


Tomado de Gann (2009).

El problema puede ser evitado usando fluidos de base aceite, potasio ó amonio durante la perforación. Si el problema ya ha sido ocasionado, éste puede ser corregido acidificando con mezclas débiles de ácidos clorhídrico y fluorhídrico (Almon et al., 1981).

7.2.2.4 Clorita. La clorita es un mineral arcilla tipo 2:1:1 (García y Suárez, 2002), porque contiene una lámina de octaedros entre (Figura 30) la estructura normal 2:1. Son muy sensibles a los ácidos y a las aguas oxigenadas (Almon et al., 1981).

Figura 30. Estructura de la clorita, se resalta la presencia de una lámina de octaedros interlamina.



Modificado de Dorronsoro (2009).

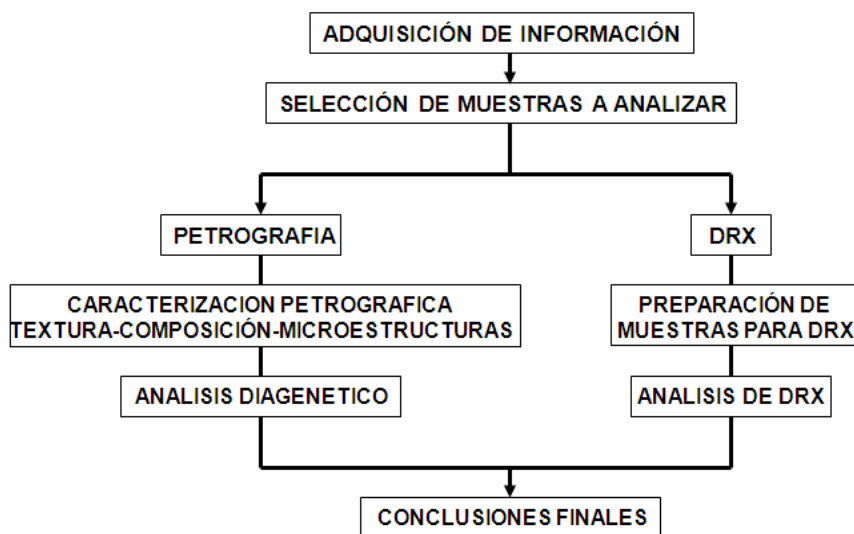
La clorita a menudo contiene altas cantidades de hierro y magnesio, son fácilmente disueltas en presencia de ácido clorhídrico, cuando entran en contacto con el ácido, el hierro se libera y precipita como hidróxido férrico gelatinoso conteniendo cristales generalmente más grandes que los tamaños porales (Almon et al., 1981).

El problema puede ser evitado usando agentes quelatantes de hierro y removedores de oxígeno, si el problema ya ha sido causado debido a trabajos de recobro sin buen diseño, éste puede tratar de corregirse retirando todo el ácido inyectado, y usando mezclas que contengan quelatantes de hierro, removedores de oxígeno y bajas concentraciones de ácido clorhídrico (5%) (Almon et al., 1981).

8. METODOLOGIA

La metodología para el desarrollo del presente trabajo incluyó las siguientes etapas.

Figura 31. Flujograma de la metodología empleada en el trabajo.



8.1 ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN

Esta etapa constituye el análisis de la síntesis de los resultados del acompañamiento a las diferentes etapas del trabajo titulado “ Modelo sedimentológico y estratigráfico de la Formación Mugrosa en el Campo escuela – Colorado”realizado por García y Fonseca (2009), el cual arrojó información base para comenzar la caracterización petrográfica y mineralógica del mismo campo.

El campo Colorado cuenta con 2159 metros de núcleos de pozo distribuidos en 17 pozos siendo los pozos C3, C11, C21, C22, C23, C24, C25, C26, C27 y C30, los más interesantes para analizar.

8.2. SELECCIÓN DE MUESTRAS A ANALIZAR

La selección de las muestras para el trabajo se llevó a cabo después de que ya estuviesen establecidas las facies para cada parte de los núcleos de la formación Mugrosa del campo Colorado por parte del trabajo realizado por García y Fonseca (2009). Esta selección se realizó escogiendo muestras de todas las facies desde la base hasta el tope de los núcleos de los pozos y tomando en cuenta el cambio de facies más representativo a lo largo de estos. Las muestras para el presente trabajo se escogieron entre 1875 y 4512 pies de profundidad. Durante todo el trabajo se refirió a cada una de las muestras indicando primero el pozo al cual pertenecen seguido de su profundidad en pies, por ejemplo para referir una muestra a profundidad de 3637 pies del pozo C21, se indica como muestra C21 3637.

Las **Figuras 32, 33 y 34**, muestran secciones de núcleos de donde se escogieron las muestras para su análisis, se tuvo en cuenta las facies arenosas para muestras a realizarles sección delgada y las facies más lodosas para difracción de rayos x (DRX).

Figura 32. Muestra con facies Fr tenida en cuenta para análisis de DRX. Muestra correspondiente al pozo C21 3637 subzona C2.

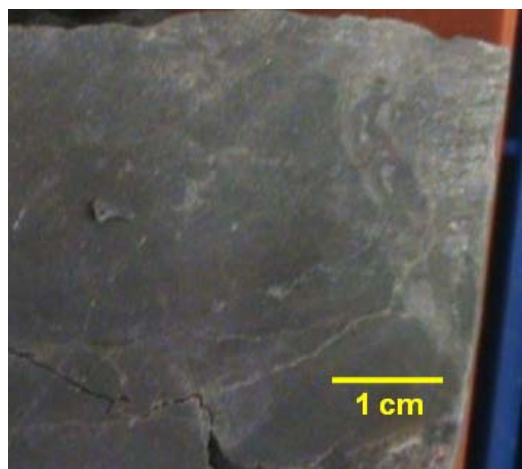


Figura 33. Muestra con facies Gci tenida en cuenta para análisis de sección delgada. Muestra correspondiente al pozo C26 3846 subzona C2.



Figura 34. Muestra con facies St tenida en cuenta para análisis de sección delgada. Muestra correspondiente al pozo C26 3864 subzona C2.



El **Anexo 4** relaciona las fotos de la sección de núcleo de donde fueron sacadas la mayoría de las muestras utilizadas en este trabajo.

En total se escogieron 54 muestras, 54 para difracción de rayos x (54 para rutina normal y 33 para análisis "bulk") y 28 para sección delgada de las cuales 17 se analizaron en microscopio de luz reflejada (**Tabla 1**).

Tabla 1. Relación de las muestras utilizadas en el presente trabajo y sus análisis practicados.

MUESTRA		ANÁLISIS REALIZADO			MUESTRA		ANÁLISIS REALIZADO		
		PETROGRAFÍA	DRX	CALCOGRAFÍA			PETROGRAFÍA	DRX	CALCOGRAFÍA
COL 24	2139'5		X		COL 26	4121'7	X	X	X
COL 24	2142'5	X	X		COL 26	4140	X	X	X
COL 24	2534		X		COL 26	4149		X	
COL 24	3976	X	X	X	COL 11	2284'5	X	X	
COL 24	3979'5	X	X	X	COL 11	2318		X	
COL 27	3602		X		COL 11	2332'9	X	X	X
COL 27	3832'6	X	X	X	COL 11	2574'5		X	
COL 27	3856		X		COL 11	2629	X	X	X
COL 27	3917	X	X	X	COL 11	3881		X	
COL 27	3957'5		X		COL 25	1875'9	X	X	
COL 27	4060'5		X		COL 25	1876'8		X	
COL 27	4109'4	X	X	X	COL 25	2078'5		X	
COL 27	4469		X		COL 25	2246'5		X	
COL 27	4506		X		COL 21	3439'4	X	X	
COL 27	4511'4	X	X	X	COL 21	3487		X	
COL 26	3538	X	X		COL 21	3526		X	
COL 26	3557'4	X	X	X	COL 21	3637		X	
COL 26	3648'9	X	X		COL 21	3639'5	X	X	
COL 26	3653		X		COL 21	3776'2		X	
COL 26	3754	X	X	X	COL 21	3780'9	X	X	X
COL 26	3816'5		X		COL 21	3857		X	
COL 26	3831	X	X	X	COL 21	4022		X	
COL 26	3846	X	X	X	COL 30	2100		X	
COL 26	3848	X	X		COL 30	4050		X	
COL 26	3864	X	X		COL 3	4062'6	X	X	X
COL 26	4039		X		COL 9	4357'5	X	X	X
COL 54	3893	X	X		COL 19	3272	X	X	

La tabla siguiente indica las muestras sometidas a análisis "bulk" .

Tabla 2. Relación de las muestras a las que se les practicó análisis "bulk".

MUESTRAS CON ANALISIS BULK			
Pozo	Profundidad	Pozo	Profundidad
COL 24	2139'5	COL 11	2332'9
COL 24	2534	COL 11	2574'5
COL 27	3602	COL 11	3881
COL 27	3856	COL 25	1876'8

MUESTRAS CON ANALISIS BULK			
Pozo	Profundidad	Pozo	Profundidad
COL 27	3957'5	COL 25	2078'5
COL 27	4060'5	COL 25	2246'5
COL 27	4109'4	COL 21	3487
COL 27	4469	COL 21	3526
COL 27	4506	COL 21	3637
COL 27	4511'4	COL 21	3639'5
COL 26	3557'4	COL 21	3776'2
COL 26	3653	COL 21	3780'9
COL 26	3816'5	COL 21	3857
COL 26	4039	COL 21	4022
COL 26	4121' 7	COL 30	2100
COL 26	4149	COL 30	4050
COL 11	2318		

8.3 FASE DE LABORATORIO

8.3.1 Petrografía. Las secciones delgadas se prepararon con tinción para carbonatos (rojo de alizarina) y feldespatos potásicos en el laboratorio de procesamiento de muestras geológicas del Instituto Colombiano del Petróleo. El análisis petrográfico se realizó en un microscopio de luz transmitida marca Nikon Eclipse E200, perteneciente al laboratorio de petrografía de la escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Se practicó la técnica de calcografía a 18 secciones delgadas en la sede Guatiguará de la misma universidad.

8.3.1.1 Metodología Empleada para la Caracterización Petrográfica. El análisis petrográfico se le realizó a 28 muestras (**Anexo 1**) por medio de la técnica de análisis por microscopía convencional estableciendo una malla visual de aproximadamente 150 puntos que cubra la totalidad de la sección delgada, en donde se describe la característica textural y composicional de los componentes donde corresponda cada uno de los puntos de la malla.

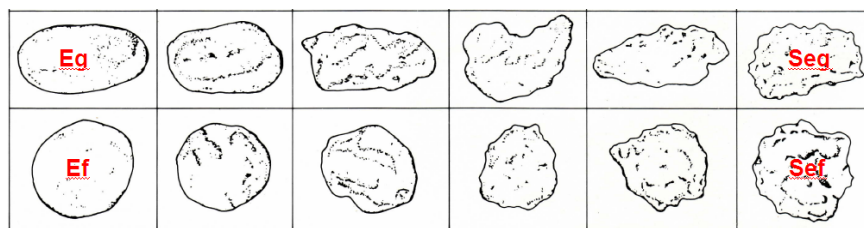
Durante el análisis petrográfico de las secciones delgadas, se caracteriza composicional y texturalmente cada facies descrita, se describen e identifican los principales minerales contenidos en la roca de acuerdo a sus propiedades ópticas y texturales, a su vez se identifican los diferentes procesos diagenéticos ocurridos.

- **Descripción textural.** Se realiza la descripción de la muestra donde se determinan los porcentajes de armazón, matriz, cemento, poros y se describen las características como el tamaño de grano, esfericidad, redondez, contacto entre partículas, calibrado, color, deformación de los granos, disolución etc., las cuales determinan las características texturales propias de cada una de las facies descrita y se clasifica texturalmente la sección delgada según Folk (1974).

Con respecto al armazón, se definió como armazón flotante cuando las partículas del mismo se encuentran sin ningún contacto entre sí causado por la alta presencia de minerales cementantes que no permitirían tal contacto, esta intensidad de cementación reemplaza la matriz de la roca.

Con relación a la esfericidad de los granos se tomaron los patrones de esfericidad alargado, esférico, subesférico y subelongado. (**Figura 35**).

Figura 35. Patrones de esfericidad utilizados. Esférico (Ef), subesférico (Sef), alargado (Eg) y subelongado (Seg)..



Modificado de Adams, et al. (1994)

- **Patrones de cementación.** Se establecieron patrones de cementación de la roca de acuerdo a las dimensiones que presentaba el cemento encontrado en toda la sección delgada (SD). Para cementos diferentes a la sílice, una cementación incipiente se

presentaba cuando el precipitado de cemento medía menos de 0,7 mm. (**Figura 36**), cementación a parches cuando el cemento abarcaba dimensiones de 0,7 mm a 3,5 mm, cementación en progreso cuando el cemento medía más de 3,5 mm, estas cementaciones podían encontrarse en varias partes de la SD. La cementación avanzada se presentaba cuando aparentemente (o la mayor parte) toda la sección se encontraba cementada por el mineral precipitado y en general reemplazaba la matriz reduciendo la porosidad a cero (**Figura 37**). Podría encontrarse una cementación avanzada pero con bajos porcentajes de porosidad creada posterior a la cementación por disolución o por fracturamiento.

Figura 36. Patrón de cementación incipiente por minerales opacos C21 3439'4.

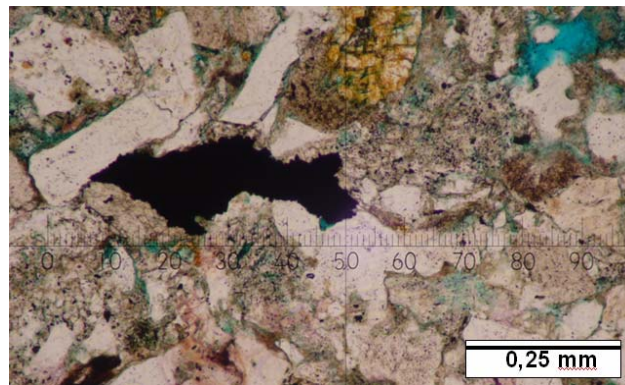
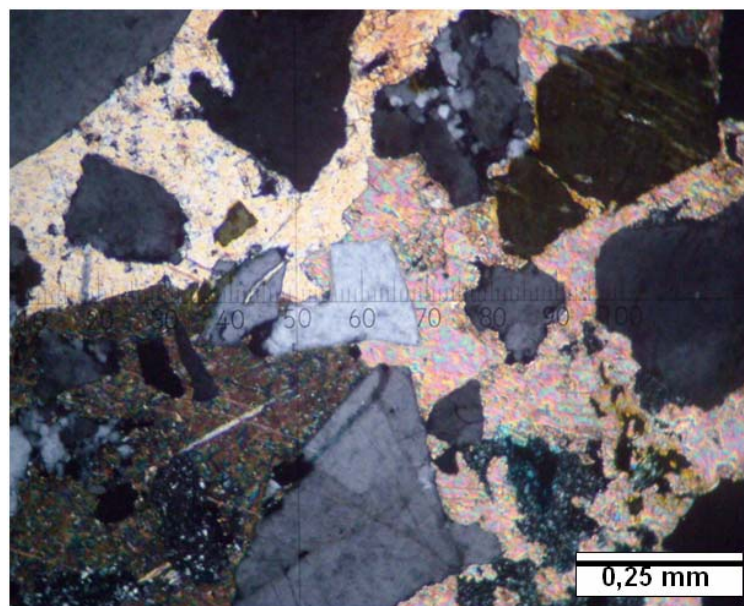


Figura 37. Patrón de cementación avanzada por calcita. C26 3538.



En cuanto a la cementación silícea, la cementación media se refiere cuando es común encontrar precipitación silícea entre varios cuarzos que se encuentran cercanos entre sí, baja cuando pocos granos se encuentran unidos con este tipo de precipitado y en trazas cuando esta cementación es muy poco común casi escasa.

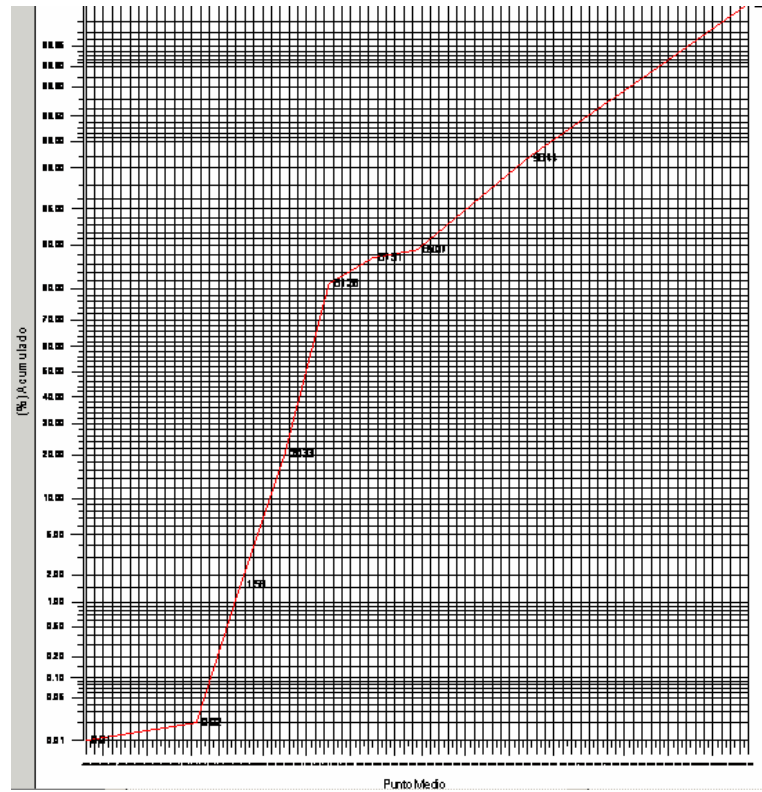
Para determinar el calibrado de la sección se usó la metodología expuesta por Folk (1974) donde se realizó la curva de frecuencia acumulada en papel de probabilidades (**Figura 38**) de la distribución de tamaños de grano, de donde se tomaron valores para hallar el tipo de calibrado según la ecuación de desviación estándar:

$$[(\text{Phi } 84 - \text{phi } 16) / 4] + [(\text{Phi } 95 - \text{phi } 5) / 6.6]$$

Tabla 3. Tabla de porcentaje acumulado de los tamaños de grano encontrados en la sección delgada de la muestra C24 3976.

C24 3976			
TAMANO DE GRANO	PUNTO MEDIO DEL INTERVALO	CANTIDAD (%)	ACUMULADO
CANTO	-7	0	0
GUIJOS	-4	0	0,01
GRANULO	-1,5	0	0,02
ARENA MUY GRUESA	-0,5	1,56	1,58
ARENA GRUESA	0,5	18,75	20,33
ARENA MEDIA	1,5	60,93	81,26
ARENA FINA	2,5	6,25	87,51
ARENA MUY FINA	3,5	1,56	89,07
LIMO	6	9,37	98,44
ARCILLA	11	1,56	99,99

Figura 38. Curva de frecuencia acumulada en papel de probabilidades para hallar el calibrado.



- **Descripción Composicional.** La caracterización composicional de la muestra se realiza determinando el tipo de mineral correspondiente a cada punto de la malla visual, esto se logra teniendo en cuenta las propiedades ópticas de los minerales. Para su clasificación composicional se usan los triángulos propuestos por Folk (1974) de acuerdo a las cantidades de cuarzos, feldespatos y líticos que contenga la muestra.

Finalmente se consigna toda la información obtenida en la siguiente ficha.

Figura 39. Ficha donde se consigna toda la información petrográfica obtenida de cada muestra.

CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA Y MINERALÓGICA PRELIMINAR DE FACIES ARENOSAS Y LODOSAS DE LA FORMACIÓN MUGROSA (POZOS: 11, 21, 26 Y 27) EN EL SECTOR DEL CAMPO ESCUELA COLORADO, CUENCA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, COLOMBIA			
POZO		PROFUNDIDAD (Ft)	
Características texturales			
ARMAZÓN	% :		
MATRIZ	% :		
CEMENTO	% :		
POROS	% :		
REDONDEZ		ESFERICIDAD	
CONTACTOS		CALIBRADO	
Características composicionales			
Nombre Textural de la Roca (Folk, 1974)			
Nombre Composicional de la Roca (Folk, 1974)			
MICROFOTOGRAFÍAS			

8.3.2 Difracción de Rayos X. Los análisis de difracción de rayos x se realizaron por el Grupo de Investigación en Química Estructural, Laboratorio de Difracción de Rayos X, de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, que cuenta con un difratómetro Rigaku modelo D – MAX – III/B, usando una radiación Cu K α y una velocidad de 1.2° por minuto, el cual arroja una respuesta para cada muestra. En total se obtuvieron cuatro difractogramas por cada muestra analizada, tres de los cuales corresponden a la rutina normal de láminas orientadas y la cuarta al análisis de polvos desorientados o bulk. El análisis en rutina normal tiene como objetivo determinar la mineralogía de la fracción arcillosa y el análisis bulk define las fases cristalinas principales que se encuentran en la muestra. Se practicaron análisis de rutina normal para 54 muestras de las cuales 24 son facies arenosas y 30 lodosas.

8.3.2.1 Preparación de Muestras para DRX. Para realizar análisis de DRX, las muestras se sometieron a dos procesos de preparación, uno mecánico y otro de “suspensión” o pipeteado realizados en el laboratorio de Arcillas de la escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Las muestras con análisis bulk solo tuvieron el proceso de preparación mecánica o también llamado tamizaje.

La metodología a seguir para la preparación e identificación de familias o grupos de minerales arcilla fue orientada por el geólogo Francisco Melo (Melo, 2008).

Los materiales utilizados en laboratorio fueron los siguientes:

Morteros de porcelana

Tamiz (malla 125 y malla 230)

60 Bolsas para testigos de 50 gr.

Pipetas de 50 ml y 25 ml

Amoniaco (NH₄)

Macerador electrónico

120 Bolsas sellables de 15 gr

Frasco lavador

Agua destilada (pH 7) (60 litros)

Tarros plásticos de 25 (120) y 50 ml (120)

Centrifuga

60 Portaobjetos

Desecador

Balanza de precisión

6 Vasos de 250 ml

Aspiradora

Etanol (1 litro)

60 frascos de vidrio de 10 ml

Horno

Etilenglicol

Difractometro de rayos x

Agitadores

Compresor de 150 psi

Acido clorhídrico

Mufla

▪ **Proceso de Tamizado.** Para cumplir con este proceso, las 33 muestras fueron tratadas por cada uno de las siguientes pasos:

▪ Las muestras pesando 50 gramos son golpeadas con una porra (**Figura 40**) hasta conseguir partículas de menor tamaño, la muestra es envuelta en plásticos mientras se golpea para evitar contaminación.

Figura 40. Utensilios usados para obtener partículas mas pequeñas de muestras consolidadas.



- Seguidamente las partículas de menor tamaño obtenidas (se conservan algunas de estas para posibles pruebas posteriores) se maceran en morteros de porcelana para seguir disminuyendo su tamaño (**Figura 41**).

Figura 41. Mortero de porcelana empleado para disminuir de tamaño la muestra a analizar.



- La muestra del mortero, se introduce en un macerador electrónico (**Figura 42**) que con cierto tiempo en funcionamiento, convierte la muestra en partículas finas.

Figura 42. Macerador electrónico. Usado para obtener cantidades finas de muestras a analizar.



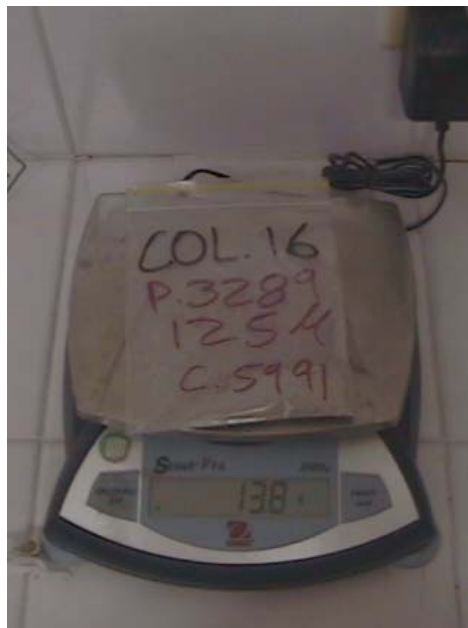
- La muestra se lleva a tamizaje para obtener partículas de 125 y 63 micras en tamices (**Figuras 43 y 44**) de mallas 125 y 230 respectivamente.

Figuras 43 y 44. Tamiz y pan para obtener tamaños de 125 micras de la muestra de interés.



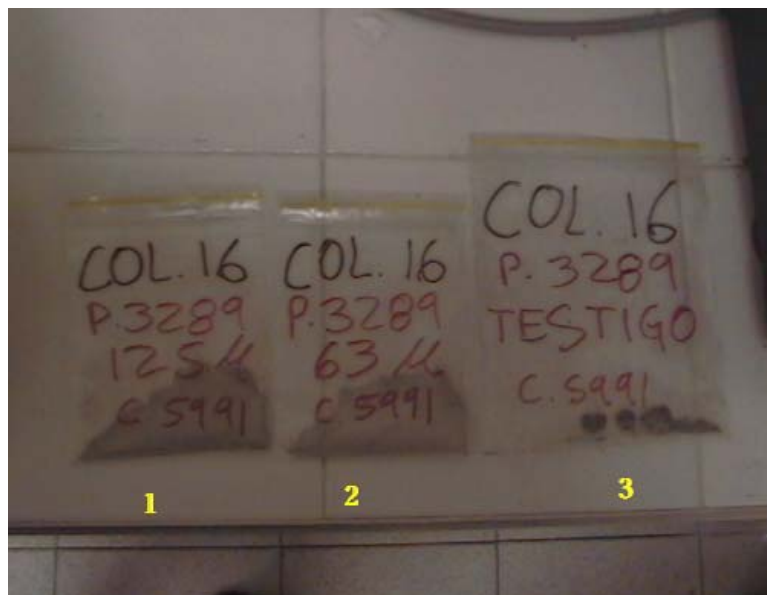
- De cada uno de los tamaños obtenidos se toman 12 gramos (**Figura 45**) y se separan en bolsas sellables.

Figura 45. Balanza electrónica para medir los doce gramos necesarios de muestra.



- Finalmente se obtienen tres bolsas sellables con tres tamaños de una misma muestra (**Figura 46**), la bolsa con tamaño de 125 micras es usada para rutina de polvos desorientados (bulk), la bolsa con tamaño 63 micras se lleva para análisis de rutina normal y una cantidad 'testigo' de partículas más grandes se conserva para posibles post-tratamientos.

Figura 46. Diferentes tamaños de partículas de muestra para tratamientos o análisis específicos. La bolsa 1 muestra partículas de 125 micras para análisis de polvos desorientados, la bolsa 2 muestra partículas de 63 micras para análisis de rutina normal y la bolsa 3 muestra partículas para post-tratamientos.

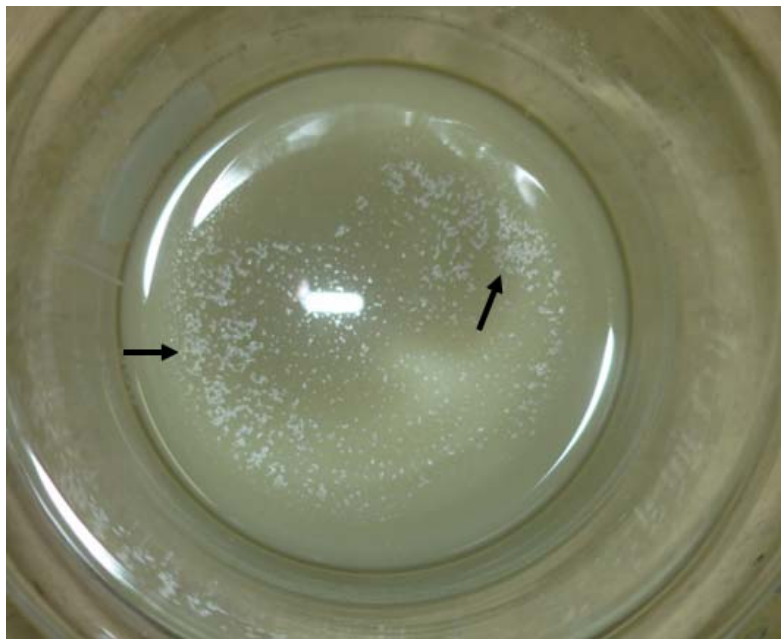


- **Proceso de Suspensión o Pipeteado.** A los 12gr de muestra con un tamaño de 63 μ m obtenidos en el proceso de tamizaje, se le adicionan 2 gotas de HCl para determinar la presencia de carbonatos, si la muestra reacciona con el ácido se procede a realizar el tratamiento de descarbonificación con ácido clorhídrico a una concentración de 0.2 Normal durante 24 horas. Con la muestra sin carbonatos se inicia su neutralización con agua destilada adicionando los 12 gr de muestra en un vaso de precipitado y se le adiciona agua destilada hasta completar 250 ml; el contenido del vaso de precipitado se agita constantemente con un agitador hasta

obtener una solución homogénea, en el caso en que la solución flocule, se le adicionan 3 o 4 gotas de NH_4 , el cual cambia la polaridad de las partículas para que logren mantenerse en suspensión. Esta solución se mantiene en reposo durante 20 minutos para permitir que se forme una columna de agua en donde las partículas de grano fino se concentran en la parte superior de la columna por simple sedimentación. (Ley de Stokes).

Se adiciona un gramo de trifosfato de sodio para separar la materia orgánica de la muestra, se agita durante 20 minutos el cual ubica la materia orgánica en la zona "sobrenadante" de la solución (**Figura 47**), seguidamente se continúa con el proceso normal de suspensión de arcillas por sedimentación por 20 minutos (ley de Stokes).

Figura 47. Materia orgánica (indicada con flechas negras) la cual es separada de la solución de interés.



Transcurrido el tiempo de reposo prosigue a pipetear 25 ml superiores de la solución que se encuentren por debajo del "sobrenadante" y se envasan en dos

frascos plásticos con tapa de 25 ml cada uno. La solución restante (en vaso de precipitado) se envasa en un frasco con tapa de 50 ml y se guarda como testigo de la muestra.

Los dos frascos de 25 ml se llevan a un proceso de centrifugación a 4000 RPM durante 10 minutos, de donde se obtiene una película de sedimento en el fondo del frasco con partículas de tamaño de grano de 12 μm . La solución restante en los frascos de 25 ml se almacena para posibles tratamientos posteriores.

La película de sedimento obtenida de los dos frascos se mezcla con agua destilada y es vertida en un frasco de vidrio y se deja reposar por 50 minutos (ley de Stokes). Posteriormente, se extrae la película mas superficial de la solución con una pipeta de 25 ml, la cual contiene partículas con tamaños de 2 μm . y se esparce de homogéneamente sobre un portaobjeto liso para captar la muestra de manera uniforme. Finalmente se deja secar durante 7 horas a temperatura ambiente y como resultado se obtiene una lámina con agregados orientados de partículas tamaño arcilla.

La lámina seca es llevada a difracción de rayos x para obtener el difractograma normal o de rutina natural.

Posteriormente la lámina es sometida a calentamiento a 40°C dentro de un desecador con etilenglicol por 4 horas, con el fin de identificar los minerales expansivos. Posteriormente se lleva el desecador al laboratorio para lectura en el difractómetro.

Nuevamente se lleva la muestra a calentamiento "rutina calcinada" a 500° C por dos horas, rutina a la cual se destruye la estructura cristalina de las Caolinitas y permite la diferenciación de distintos grupos de interestratificados.

8.3.2.2 Metodología para Análisis de Difracción de Rayos x (rutina normal).

Según los difractogramas obtenidos de rutina natural (N), etilenglicolada (glicolada) (EG) y calcinada (500°C), se identificaron los diferentes tipos de minerales arcilla de acuerdo con la siguiente tabla.

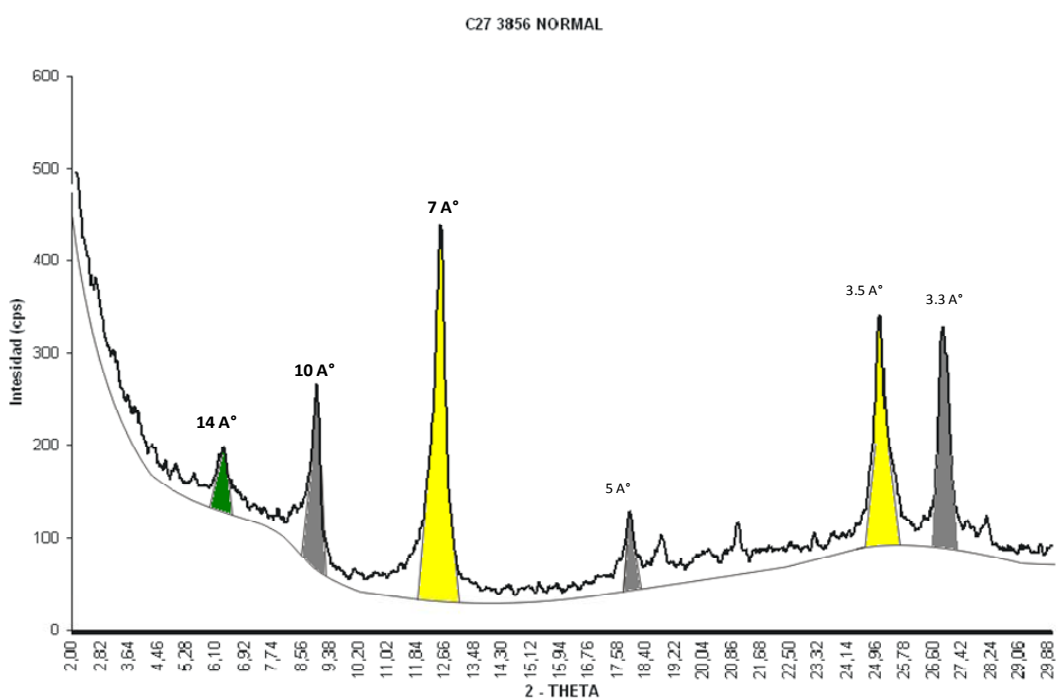
Figura 48. Tabla utilizada para la identificación de minerales arcilla según los tratamientos practicados.

REFLEXIONES (001) EN Å SEGUN TRATAMIENTO				
GRUPO MINERAL	MINERAL	N	EG	500°C
Caolinitas	Haloisita D.	7.2	7.2	-
	Haoloisita H.	10	10	-
	Caolinitas	7	7	-
Micas	Illita	10	10	10
Cloritas	Clorita	14	14	14
	Clorita exp.	14	16	14
Vermiculita	Vermiculita	14	14	10
Esmectitas	Esmectitas	12.0 - 15.0	17	9.3
Paligorsquita	Sepiolita	12	12	10
INTERESTRATIFICADOS		N	EG	500°C
I-C	(llita-clorita)	24	24	24
I-Cg	(llita-clorita expandible)	24	31	24
I-V	(llita Vermiculita)	24	24	20
I-M	(llita - esmectita)	24.-25	27	20
C-V	(Clorita-vermiculita)	28	28	24
C-M	(Clorita-esmectita)	28	31	24
Cg-M	(Clorita expandible-esmectita)	28.-29	35	24
C-Cg	(Clorita-clorita expandible)	24	31	28
V-M	(vermiculita-esmectita)	28	31	20
V-Cg	(vermiculita-Clorita)	28	30-31	24
10-14C	(llita-clorita)	12	12	12

Recopilado de Thorez (2003, 1976) y Carroll (1970).

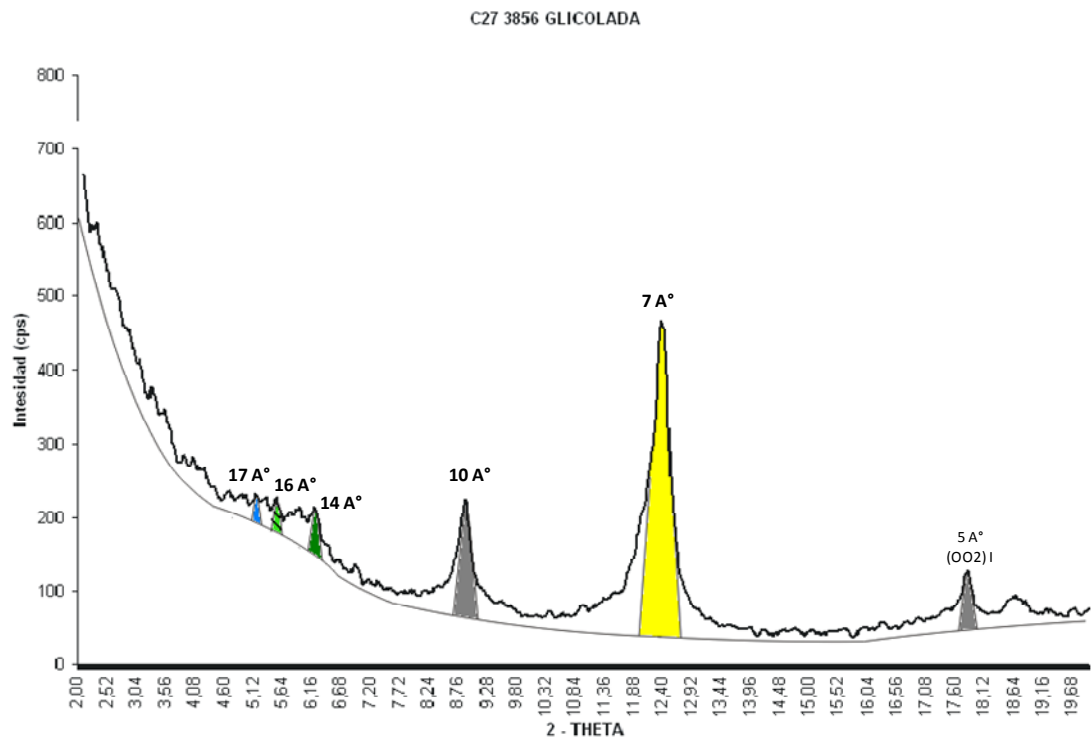
Los siguientes difractogramas corresponden a los análisis de rutina normal de la muestra C27 3856 correspondientes a rutina natural o normal, rutina glicolada y rutina calcinada (500°C) donde se profundizará en la caracterización del contenido arcilloso que haya identificado el análisis de polvos desorientados (bulk).

Figura 49. Difractograma de rutina natural correspondiente a la muestra C27 3856. Se observan los picos de las posibles familias de arcillas que se encuentran en la muestra.



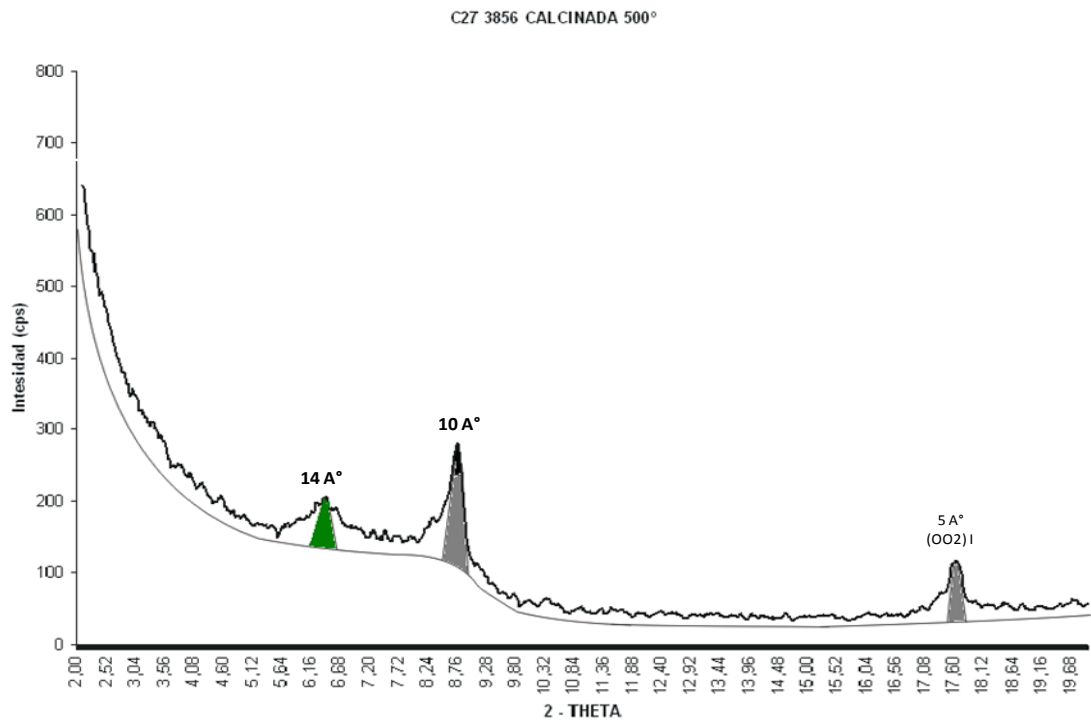
En el difractograma de rutina natural ó normal (**Figura 49**) se aprecian los picos que indican la distancia en amstrong a los que pueden estar asociados los posibles minerales arcilla que estén presentes en la muestra.

Figura 50. Difractograma de rutina glicolada correspondiente a la muestra C27 3856. Se identifican las diferentes familias de arcillas a sus respectivas distancias basales en amstrongs. Esmectitas (azul), clorita expansiva (verde claro), clorita (verde oscuro), micas (gris) y caolinitas (amarillo).



Con este difractograma (**Figura 50**) se identifican los grupos o familias de minerales arcilla que contiene la muestra y se determina su cantidad relativa dentro del total de la fracción arcillosa presente en la muestra, como se observa se tiene presencia de minerales expansivos (azul), cloritas (expansiva con verde claro y no expansiva con verde oscuro), micas (gris) y caolinitas (amarillo). La altura de cada pico desde el background en el difractograma de rutina glicolada, indica la cantidad relativa de cada una de las arcillas (familias) no expansivas, para las esmectitas (expansivos) la cantidad pura de ellas se halla midiendo la altura adicional (negro en **Figura 51**) que contenga la banda a 10Å en rutina calcinada (500°C) con respecto a la altura del pico de las micas (10Å) en rutina glicolada.

Figura 51. Difractograma correspondiente a rutina calcinada (500°C) de C27 3856. Se muestra el colapso de la estructura de las caolinitas a 12,6 (2 θ) y la cantidad adicional de esmectita pura (color negro) a 8,8 (2 θ).



9. RESULTADOS

9.1 CARACTERIZACIÓN PETROGRÁFICA DE LA FORMACIÓN MUGROSA

Se analizaron en total 28 secciones delgadas, en general son clasificadas como litarenitas y litarenitas feldespaticas. Para facilitar la síntesis petrográfica de las muestras analizadas, se dividieron las secciones delgadas en dos grupos PM1 y PM2, los cuales presentan en general características petrográficas similares en cuanto a su textura y los diferentes tipos de cemento encontrados (**Anexo 5**). Las muestras son consideradas inmaduras y submaduras texturalmente.

9.1.1 Caracterización Petrográfica Grupo PM1. A este grupo lo constituyen 11 muestras, las cuales pertenecen a litarenitas y litarenitas feldespaticas (**Anexos 1 y 3**) según clasificación composicional (Folk, 1974), texturalmente corresponden a areniscas de tamaño arena media a excepción de C26 3846 que fue clasificada como arenisca gruesa (**Figura 62**) según clasificación textural (Folk, 1974). La mayoría de estas muestras se caracterizan por presentar altas patrones de cementación por calcita, por contener granos muy angulares a subredondeados e indicar un calibrado “pobrementemente calibrado”.

9.1.1.1 Características Texturales. El volumen total de la roca está distribuido entre armazón, matriz, cemento y poros.

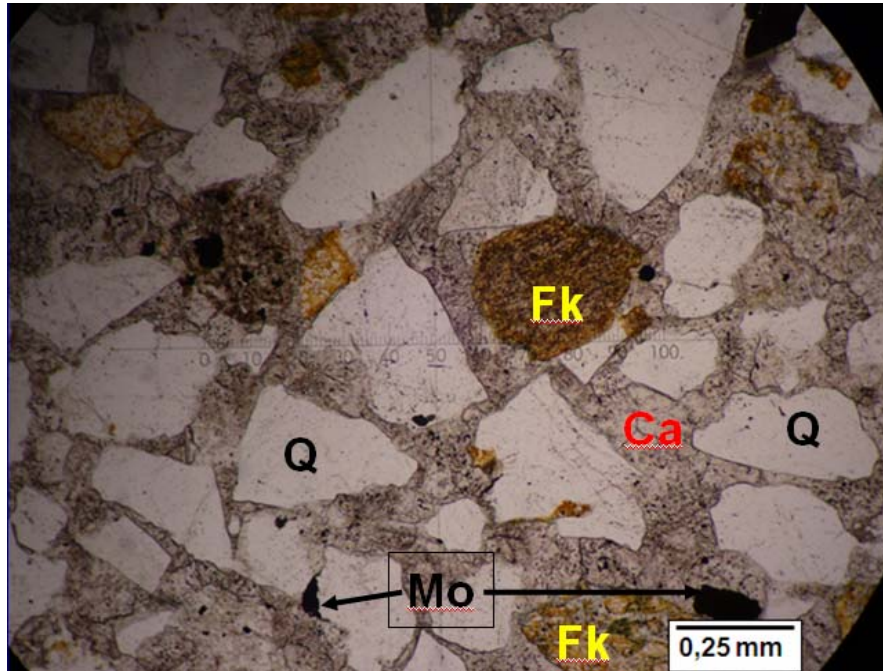
La redondez de los granos de este grupo varían entre muy angulares a subredondeadas, la esfericidad está representada en granos subesféricos, elongados y subelongados. Los contactos entre partículas varían entre flotantes, puntuales y longitudinales. Los contactos flotantes son debido a las altas cementaciones de la calcita y calcita ferrosa (Fe) como cemento (**Figuras 52 y 60**); el calibrado de las muestras oscila entre muy pobrementemente calibrada a moderadamente calibrada (2.58 – 0.72).

- **Armazón.** El promedio del porcentaje de armazón para estas muestras es de 65 %, de tipo gronosoportado a flotante, debido a la cantidad de cemento de calcita que presentan (**Figura 52**). El armazón está constituido por cuarzos muy angulares a subredondeados, feldespatos angulares a subredondeados y líticos muy angulares a subredondeados. El tamaño de grano predominante es arena media oscilando entre porcentajes de 24,5% a 64,7% (el promedio es de 45,3%).

- **Matriz.** El promedio del porcentaje de matriz para estas muestras es 7,8%, tipo lodosa. En algunas muestras no se tiene matriz (0%) debido al cemento de calcita que la ha reemplazado (C27 3917 y C26 4140). La matriz está constituida por partículas tamaño arcilla que oscilan en porcentajes de 0% y 26,5% (promedio de 6%) y algunas de las partículas tamaño limo (1,8%) de 0,0039 mm (limo muy fino) a 0,047 mm (limo grueso).

- **Cemento.** El porcentaje promedio de cemento para estas muestras es de 19,2%, el mayor porcentaje es de 44% correspondiente a la muestra C26 3538. La calcita (en algunas zonas calcita Fe.) es el principal tipo de cemento de estas muestras y se encuentra en distintos patrones de cementación desde incipiente hasta la avanzada, esta última la presentan 4 de las 11 muestras del grupo PM1 (**Figura 62**) minimizando los porcentajes de la matriz y anulando la porosidad como es el caso de las muestras C27 3917; C26 3538 y C26 4140 (**Figura 52**). Otros tipos de cemento con patrones menores lo constituyen los minerales opacos y la sílice.

Figura 52. El cemento de calcita (Ca) elimina los valores de porosidad a 0%. Se observan cuarzos (Q), minerales opacos (Mo) y feldespatos potásicos (Fk) teñidos de amarillo por la tinción para feldespatos aplicada a la muestra.



- **Porosidad.** El porcentaje promedio de la porosidad para estas muestras es del 8%, representado principalmente en porosidad secundaria (6,7%) por fracturamiento intragranular e intergranular incluyendo fracturamiento de borde de grano (**Figuras 58, 59, 82 y 88**) y disolución de cuarzos, feldespatos y líticos especialmente sedimentarios y cuarzos policristalinos. El promedio de la porosidad primaria para las muestras correspondientes a este grupo (PM1) es de 1,3%.

9.1.1.2 Características Composicionales

- **Cuarzo.** El porcentaje promedio de cuarzo en estas muestras es de 47%. Muchos de los cuarzos monocristalinos presentes muestran extinción ondulante, inclusiones fluidas y minerales (micas). Algunas muestras presentan cuarzos con fracturas intragranulares donde ha precipitado levemente la sílice ó la calcita. Se

evidencia una alta disolución en algunas ocasiones en los bordes de los cuarzos monocristalinos al paso de la precipitación por calcita como cemento cuando se tienen altos patrones de cementación.

- **Feldespatos.** El porcentaje promedio de feldespatos en estas muestras es de 10,3%. Algunas muestras presentan feldespatos con fracturas intragranulares en altos grados, la alteración es más común y avanzada en las plagioclasas que en los feldespatos potásicos, el material producto de la alteración alimenta la cantidad de matriz de la roca. Algunos feldespatos evidencian disolución parcial especialmente los potásicos, las plagioclasas muestran disoluciones más avanzadas. Son comunes los reemplazamientos totales y parciales en plagioclasas y feldespatos potásicos respectivamente donde ha avanzado el cemento por calcita (**Figuras 79 y 80**).

- **Líticos.** El porcentaje promedio de los líticos en estas muestras es de 42,7%. Los líticos están representados por cuarzos policristalinos los cuales son los más abundantes (25,7%), feldespatos policristalinos, fragmentos metamórficos, ígneos y sedimentarios (17%).

Los cuarzos policristalinos presentan distintos niveles de disolución desde su interior pero estos niveles son más altos en muestras donde los patrones de cementación por calcita son altos (**Figura 79**). La disolución de cuarzos policristalinos aporta material a la matriz.

Los líticos metamórficos están representados por cuarzitas y esquistos moscovíticos con texturas lepidoblásticas y granolepidoblásticas (**Figura 63**).

Los líticos sedimentarios están representados por limolitas (**Figura 54**) y arcillolitas, estas últimas con evidente deformación por su susceptibilidad a este mecanismo (**Figura 53**).

Los líticos ígneos est n contemplados en rocas volcánicas con texturas alotriomorficas inequigranulares (**Figura 55**).

Figura 53. Se observa una arcillolita deformada por la compactación física (rectángulo en rojo). Est n presentes en la Figura cuarzo (Q) y plagioclasa (Pg). Muestra C26 3846.

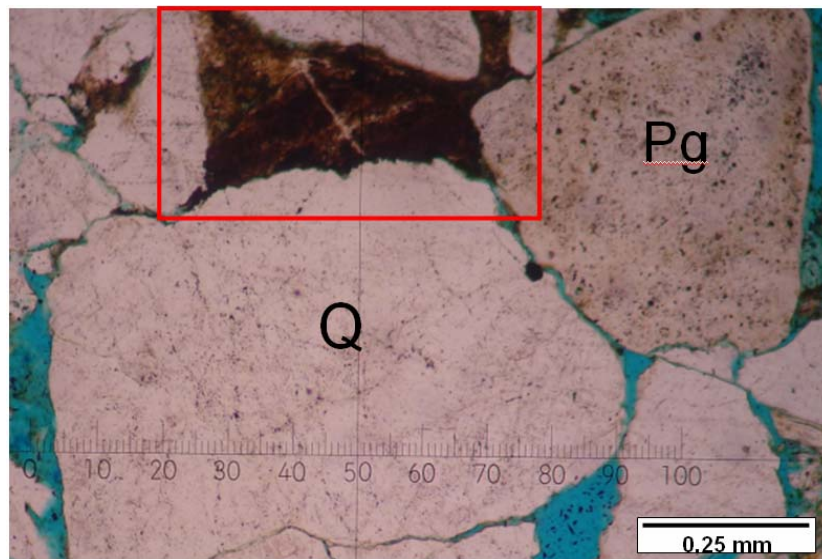


Figura 54. Lítico sedimentario correspondiente a una limolita. Muestra C26 3846.

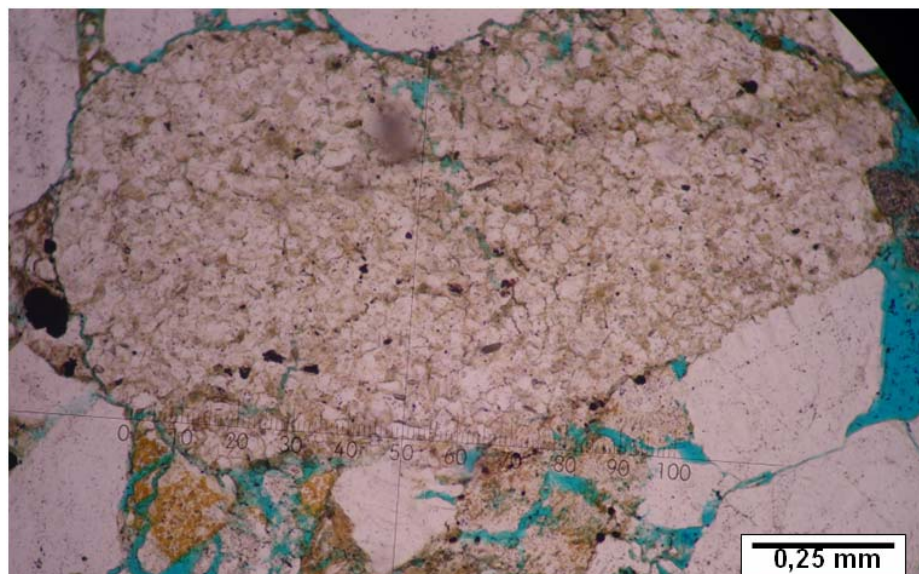
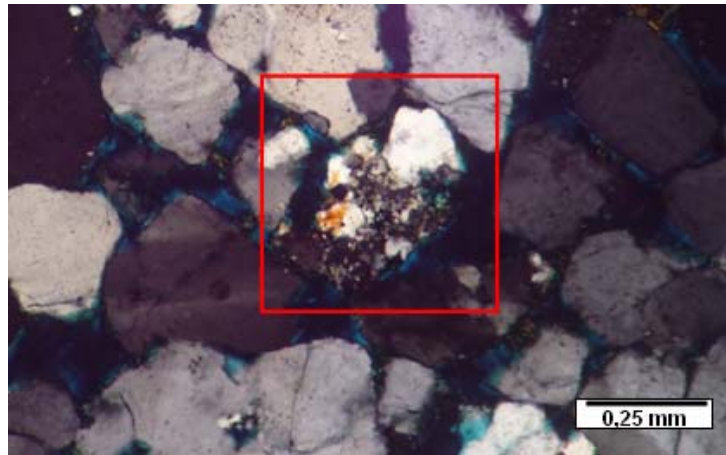


Figura 55. Lítico ígneo volcánico con textura interna alotriomorfa inequigranular (rectángulo en rojo). Muestra C11 2284'5.



- **Minerales Dúctiles (trazas):** El mineral micáceo principal identificado en este grupo de muestras es la biotita la cual está presentando alteración a clorita (Figuras 56, 57, 82 y 83). La deformación de la biotita indica esfuerzos mecánicos medios a bajos en la roca.

Figura 56. Biotitas alterando a cloritas (rectángulo en rojo). Se puede observar el grado bajo a medio de la deformación de estos minerales dúctiles por efecto de la compactación física en la roca. Muestra C11 2332.

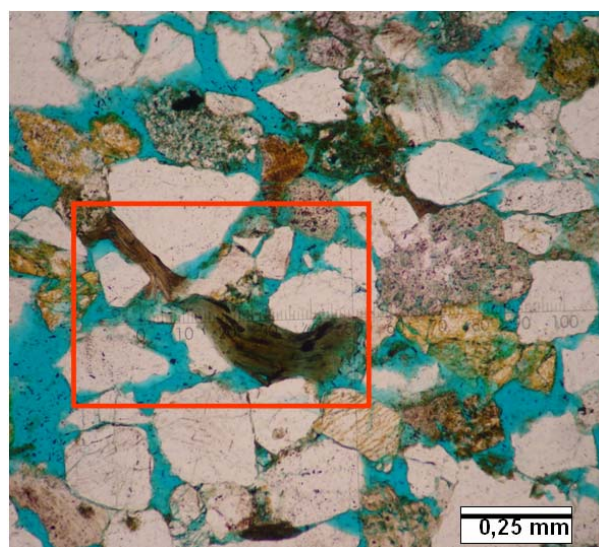
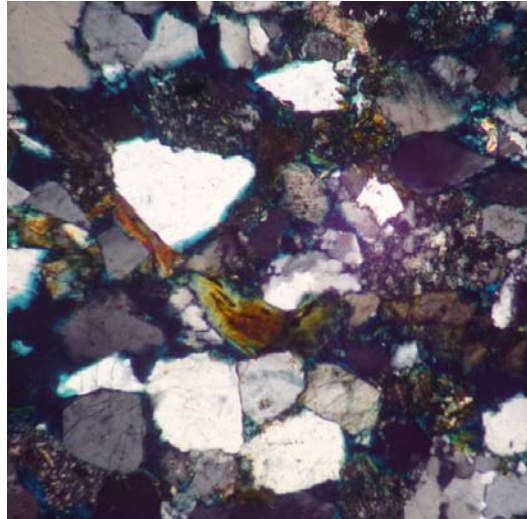


Figura 57. Biotitas alterando a cloritas. Fotografía en nicols cruzados de la Figura 56.



▪ **Minerales Pesados no Opacos (trazas):** Los minerales pesados encontrados son circón, turmalina (**Figuras 58 y 59**), granate y piroxeno. Estos minerales presentan fracturamiento y se muestran subhedrales a anhedrales, a excepción del granate y del piroxeno que se muestran anhedrales.

Figura 58. Turmalina con morfología subhedral (rectángulo rojo). Hacia la parte derecha se observa fracturamiento de borde de grano (flechas negras) alrededor del grano de cuarzo. Muestra C11 2629.

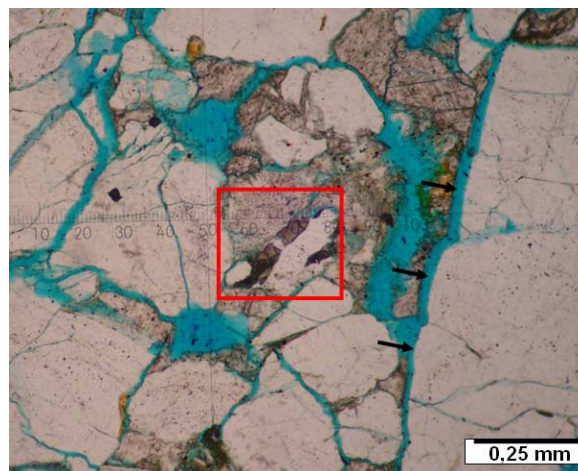
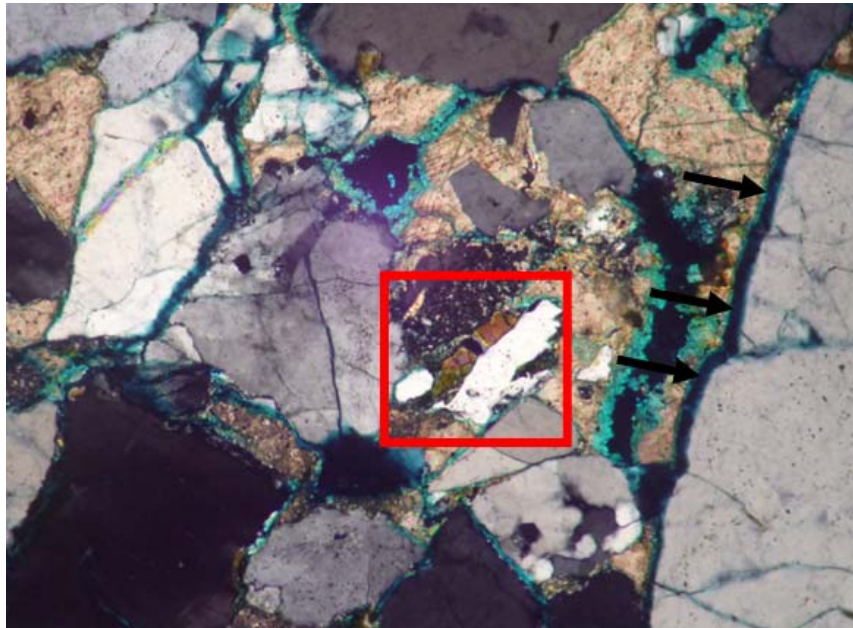


Figura 59. Turmalina con morfología subhedral (rectángulo rojo). Hacia la parte derecha se observa fracturamiento de borde de grano (flechas negras) alrededor del grano de cuarzo. Fotografía en nicoles cruzados de la Figura 58. Muestra C11 2629.



- **Minerales Arcilla:** Según análisis de difracción de rayos x (DRX), se tienen esmectitas interestratificadas, clorita, clorita expandible, caolinitas y micas. La muestra C11 2629 contiene esmectita pura (**Anexo 5**).
- **Calcita:** Se encuentra precipitando como cemento al igual que la calcita ferrosa (**Figura 60**), la **Figura 62** muestra la relación y patrón del proceso de cementación por calcita con las muestras del grupo PM1. La calcita está reemplazando parcial y totalmente los diferentes granos (feldespatos y líticos especialmente)(**Figura 79**) de las muestras.

Figura 60. Muestra cementada con calcita ferrosa (Ca Fe), la cual reduce la porosidad a 0% en la roca. Hacia el centro de la Figura se observa una cementación por sílice entre dos cuarzos rodeada por la cementación de calcita ferrosa, indicando que la calcita fe precipitó posteriormente a la sílice. Muestra C27 3917.

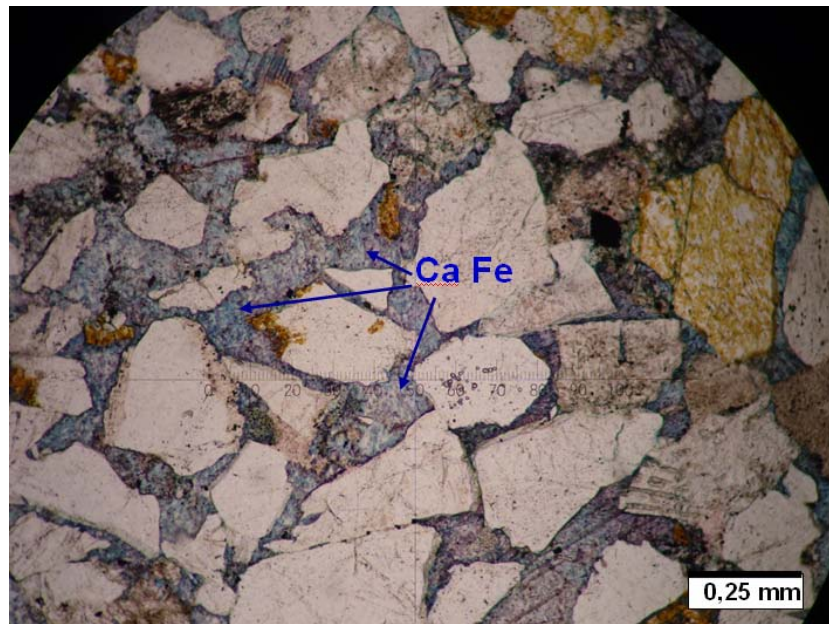
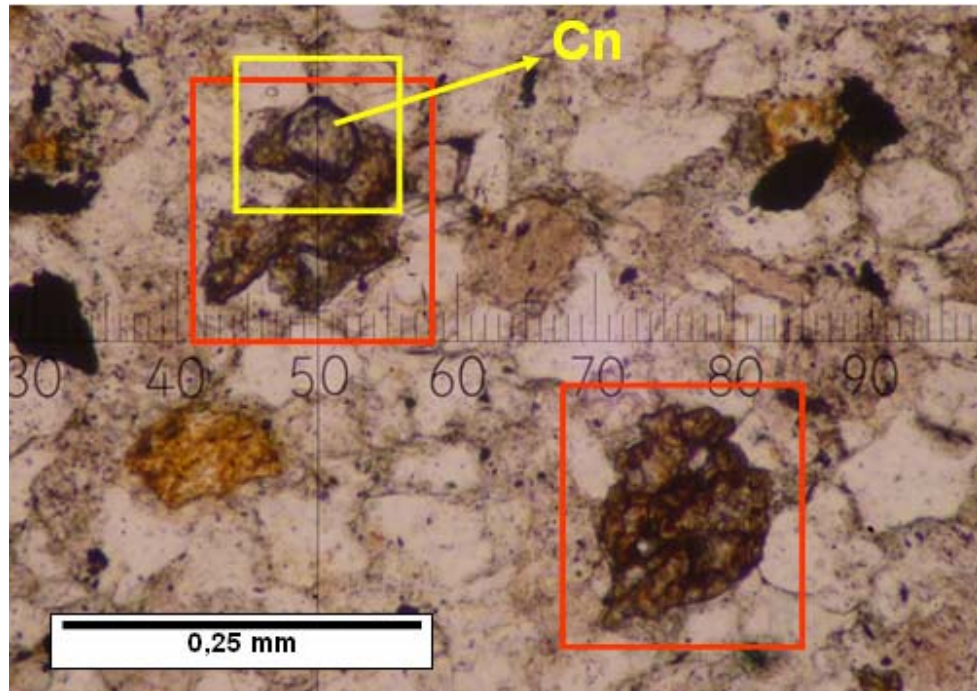


Figura 60. Muestra cementada con calcita ferrosa (Ca Fe), la cual reduce la porosidad a 0% en la roca. Hacia el centro de la Figura se observa una cementación por sílice entre dos cuarzos rodeada por la cementación de calcita ferrosa, indicando que la calcita fe precipitó posteriormente a la sílice. Muestra C27 3917.

- **Siderita (trazas):** Se presenta en agregados subhedrales (**Figura 61**) con tamaños promedios de 0,13 mm.

Figura 61. Agregados de siderita (rectángulo en rojo) con tamaños promedio de 0,13 mm. Se observa un grano de circón (Cn) con morfología anhedral. Muestra C27 4511'4.



- **Minerales Opacos:** Se encuentran minerales opacos euhedrales, subhedrales y anhedrales representados en pirita, hematita y limonita (**Figura 90**), leucóxeno (**Figura 91**). Estos minerales se encuentran desarrollando crecimiento y actúan como cemento. La **Figura 62** muestra el patrón de cementación de este tipo de cemento para el grupo PM1.
- **Características diagenéticas principales:** Altos patrones de cementación por calcita (**Figura 62**), trazas de cementación por sílice y fracturamiento intragranular.

Figura 62. Patrones de cementación de cada uno de los cementos encontrados para las muestras del grupo PM1, se relaciona también su clase textural y la porosidad en porcentaje.

GRUPO	ARENISCA	MUESTRA	TIPO Y PATRÓN DE CEMENTACIÓN						POROS (%)		
			CALCITA (C) - OPACOS (O)				SILICE				
			AITA	MEDIA		BAJA	MEDIA	BAJA		TRAZAS	
			AVANZADA	EN PROGRESO	PARC HES	INCIPIENTE					
PM1	GRUESA	C26 3846							X	23	
	MEDIA	C25 1875'9			C	O				X	4
		C11 2332'9				C - O				X	17
		C11 2629			C	O				X	8
		C26 3538	C				X	X			0
		C26 3754		C	O						6
		C21 3780'9								X	13
		C27 3832'6	C							X	8
		C27 3917	C				X				0
		C24 3976				C - O				X	9
		C26 4140	C				O			X	0

9.1.2 Caracterización Petrográfica Grupo PM2. A este grupo lo constituyen 17 muestras, las cuales pertenecen a litarenitas y litarenitas feldespáticas a excepción de C11 2284'5 que fue clasificada como arcosa lítica (**Anexos 1 y 3**) según clasificación composicional (Folk, 1974), texturalmente corresponden a areniscas finas, muy finas y lodolitas (**Figura 66 y Anexo 1**), las clasificaciones se determinaron según clasificación Folk (1974). La mayoría de estas muestras se caracterizan por presentar patrones bajos a medios de cementación por calcita y minerales opacos.

9.1.2.1 Características Texturales. El volumen total de la roca está distribuido entre armazón, matriz, cemento y poros.

La redondez de los granos de este grupo varían entre muy angulares a subredondeadas, la esfericidad está representada en granos esféricos, subesféricos, elongados y subelongados. Los contactos entre partículas varían entre flotantes, puntuales y longitudinales a cóncavo-convexos. Los contactos flotantes son debido a los contenidos de material lodoso y cementos con patrones medios de opacos y calcita, la muestra C26 3864 una cementación avanzada (**Figura 66**); el calibrado de las muestras oscila entre muy pobremente calibrada a moderadamente bien calibrada (2.24 – 0.68).

- **Armazón.** El promedio del porcentaje de armazón para estas muestras es de 67,1 %, de tipo gronosoportado e intermedio a excepción de la muestra C26 3864 que presenta un armazón granosoportado a flotante, por su cantidad de cemento de calcita. El armazón está constituido en general por cuarzos con redondez que varía desde muy angulares a redondeados y tienden a ser alongados donde se presenta este tipo de esfericidad, los feldespatos tienden a ser angulares a subredondeados y los líticos muy angulares a subredondeados, las micas especialmente biotitas también componen el armazón. El tamaño de grano predominante es arena fina oscilando entre porcentajes de 4,2% a 64% (el promedio es de 33,31%).

- **Matriz.** El promedio del porcentaje de matriz para estas muestras es 23,2%, tipo lodosa. El porcentaje de matriz mas alto la presenta la muestra C26 3557'4 con 51% y la mas baja corresponde a C11 2284'5 con 1% debido a su alto porcentaje de armazón (81%). La matriz está constituida por partículas tamaño arcilla que oscilan en porcentajes de 0% y 44,21% (promedio de 20,1%) y por algunas de las partículas tamaño limo (3,2%) de 0,0039 mm (limo muy fino) a 0,038 mm (limo grueso).

- **Cemento.** El porcentaje promedio de cemento para estas muestras es de 3,5%, el mayor porcentaje es de 23% correspondiente a la muestra C26 3864. La calcita, los minerales opacos y la sílice son los tipos de cemento encontrados, los patrones de cementación son de bajos a medios (**Figura 66**) a excepción de la muestra C26 3864 que presenta una cementación avanzada por calcita.

- **Porosidad.** El porcentaje promedio de la porosidad para estas muestras es del 6,2%, representado principalmente en porosidad secundaria (5,4%) por disolución de cuarzos, feldespatos y líticos especialmente sedimentarios y cuarzos policristalinos, fracturamiento intragranular e intergranular incluyendo fracturamiento de borde de grano. El promedio de la porosidad primaria para las muestras correspondientes a este grupo (PM2) es de 0,8%.

9.1.2.2 Características Composicionales

- **Cuarzo.** El porcentaje promedio de cuarzo en estas muestras es de 46%. Muchos de los cuarzos monocristalinos muestran extinción ondulante e inclusiones minerales como circón y micas. Algunos cuarzos presentan fracturas donde ha precipitado levemente la sílice. Se evidencia disolución en los bordes de los cuarzos y precipitación de la misma como cemento entre cuarzos.

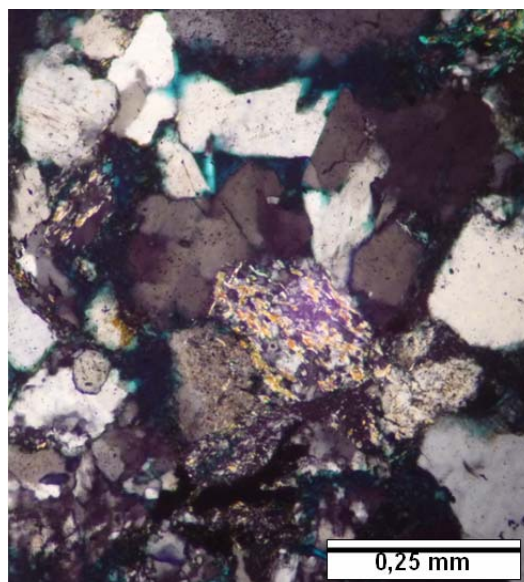
- - **Feldespatos.** El porcentaje promedio de feldespatos en estas muestras es de 15,5%. Algunos feldespatos presentan fracturas intragranulares en altos grados, en general las plagioclasas se encuentran más alteradas y con disoluciones parciales a totales que los feldespatos potásicos, el material producto de la alteración es adicionado a la cantidad de matriz de la roca. La precipitación de calcita ferrosa intergranular e intragranular está mas relacionada con los feldespatos cuando ésta cementación es incipiente.

- **Líticos.** El porcentaje promedio de los líticos en estas muestras es de 38,5%. Los líticos están representados por cuarzos policristalinos (24,8%) y por feldespatos policristalinos, fragmentos metamórficos, ígneos y sedimentarios (13,7%).

Los cuarzos policristalinos presentan distintos niveles de disolución al igual que los del PM1 la cual aporta material a la matriz, la precipitación silíceo crea cementación con patrones bajos a medios entre cuarzos y cuarzos policristalinos, precipita también en fracturas intragranulares.

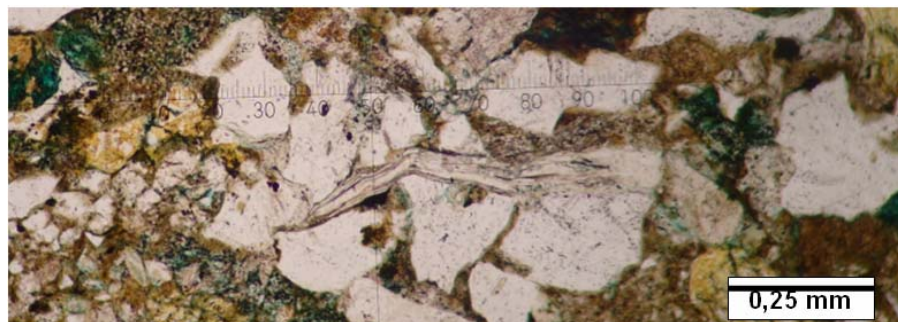
Los líticos metamórficos están representados por cuarzitas y esquistos moscovíticos (**Figura 63**) con texturas lepidoblásticas y granolepidoblásticas. Los líticos sedimentarios están representados por limolitas y arcillositas. Los líticos ígneos pertenecen a rocas volcánicas con texturas alotriomorfas inequigranulares.

Figura 63. Lítico metamórfico mostrando textura granolepidoblástica. Muestra C3 4062'6.



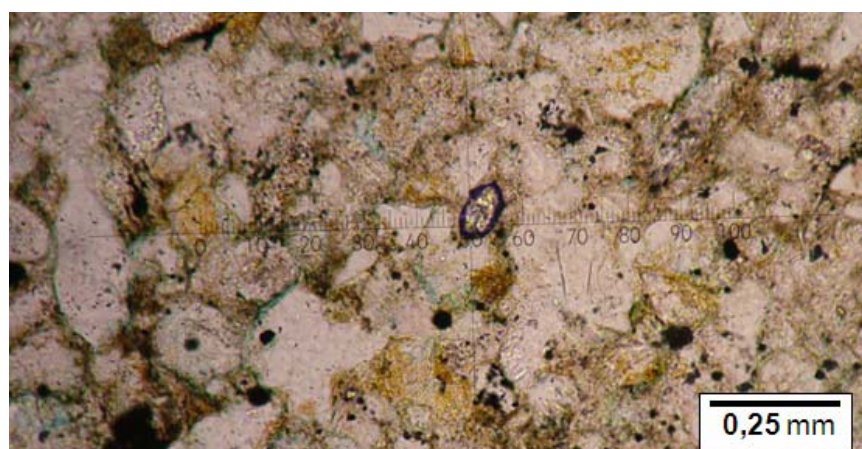
- **Minerales Dúctiles:** Los minerales micáceos encontrados son biotitas y muscovitas (trazas). Las biotitas muestran alteración a clorita en diversas etapas (**Figuras 56, 57 y 83**). La deformación de las micas indica esfuerzos mecánicos con intensidades medias y bajas (**Figura 64**).

Figura 64. Muscovita mostrando bajos grados de deformación. Muestra C21 3639'5.



- **Minerales Pesados no Opacos (trazas):** Se encuentran circón, turmalina, granate y piroxeno. En general estos minerales se presentan subhedrales a anhedrales. Los tamaños de los circones son aproximadamente de 0,09 mm (**Figura 65**).

Figura 65. Grano de circón con morfología subhedral y tamaño de 0,09 mm. Muestra C26 3557'4.



- **Minerales Arcilla:** Según análisis de DRX, se tienen esmectitas interestratificadas y esmectitas puras, clorita, clorita expandible, caolinitas, micas y sepiolita (**Anexo 5**).

- **Calcita:** Se encuentra precipitando como cemento, la **Figura 66** muestra la relación de las muestras del grupo PM2 con el patrón de los procesos de cementación por calcita. La muestra C24 3979'5 presenta algunas zonas donde la precipitación de calcita ferrosa está asociada con los feldespatos.

- **Siderita (trazas):** Se presenta subhedral y en agregados.

- **Minerales Opacos:** Minerales opacos euhedrales, subhedrales y anhedrales representados en pirita, hematita y limonita (**Figura 90**), leucóxeno (**Figura 91**). Estos minerales son autógenos y actúan como cemento. La **Figura 66** muestra el patrón de este tipo de cemento para el grupo PM2.

Figura 66. Patrón de cementación de cada uno de los cementos encontrados para las muestras del grupo PM2, se relaciona también su clase textural y la porosidad en porcentaje.

GRUPO	ARENISCA	MUESTRA	TIPO Y PATRÓN DE CEMENTACIÓN							POROS (%)
			CALCITA (C) - OPACOS (O)				SILICE			
			AITA	MEDIA		BAJA	MEDI A	BAJ A	TRAZ AS	
			AVANZADA	EN PROGRESO	PARCHE S	INCIPIENTE				
PM2	FINA	C24 2142'5							X	1
		C11 2284'5				C	X	X		15
		C19 3272				C			X	7
		C21 3439'4				O			X	2
		C26 3648'9				C - O	X			1
		C26 3831				C - O			X	18
		C26 3848				O	X	X		14
		C26 3864	C						X	3
		C54 3893							X	6
		C24 3979'5				O - C			X	1
		C3 4062'6				O - C			X	20
		MUY FINA	C27 4109'4				O			X
		C9 4357'5				O	C	X	X	4
	LODOLITA	C26 3557'4					O			
C21 3639'5								X		1
C26 4121'7						O				2
C27 4511'4								X		0

9.2 MICROESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS

Según el análisis petrográfico se identificaron distintas microestructuras sedimentarias que pueden ser comparadas con las características estructurales de las distintas facies arenosas y lodosas halladas por García y Fonseca 2009 para la Formación Mugrosa del Campo Colorado.

A continuación se describen las características microestructurales encontradas en las muestras con sección delgada que presentaban microestructuras diferentes a la masiva. El nombre de la muestra está relacionando la clasificación textural a la cual pertenece (determinada en petrografía) con la facies determinada por García y Fonseca 2009.

- **C21 3639'5 (Lodolita -Sr-)**. La muestra presenta un armazón granosoportado que manifiesta una laminación inclinada discontinua, la cual es evidenciada por la dirección de agregados arcillosos ("intraclastos") (**Figura 67**) con tendencias a ser lenticulares, el contacto de estos agregados ("intraclastos") con el resto de la muestra es neto irregular, esto puede ser observado en muestras corazonadas del pozo C21 (**Figura 68**).

Figura 67. Agregados arcillosos ("intraclastos") (A), evidenciando la dirección (flecha negra) de la laminación inclinada de la muestra C21 3639'5.

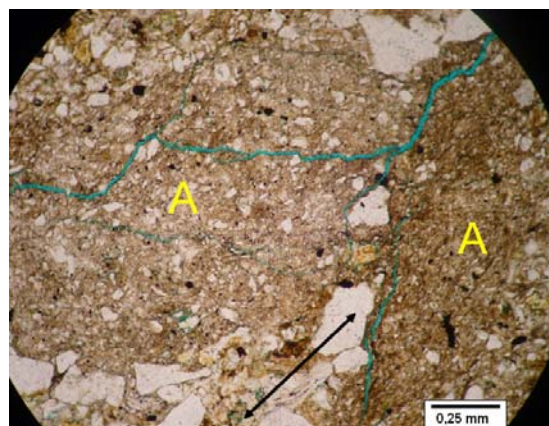


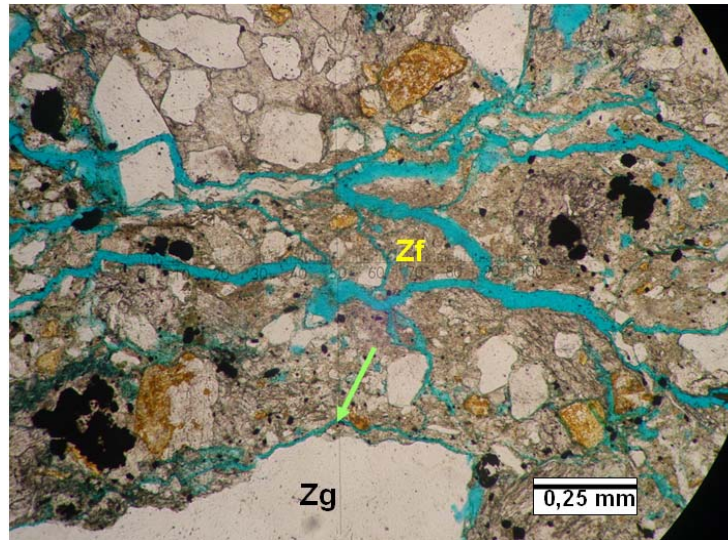
Figura 68. Se observa la dirección de la laminación inclinada (flecha negra) siendo evidenciada por la dirección de agregados arcillosos (“intraclastos”) dentro de una arenisca corazonada del pozo C21.



Modificado de García y Fonseca 2009.

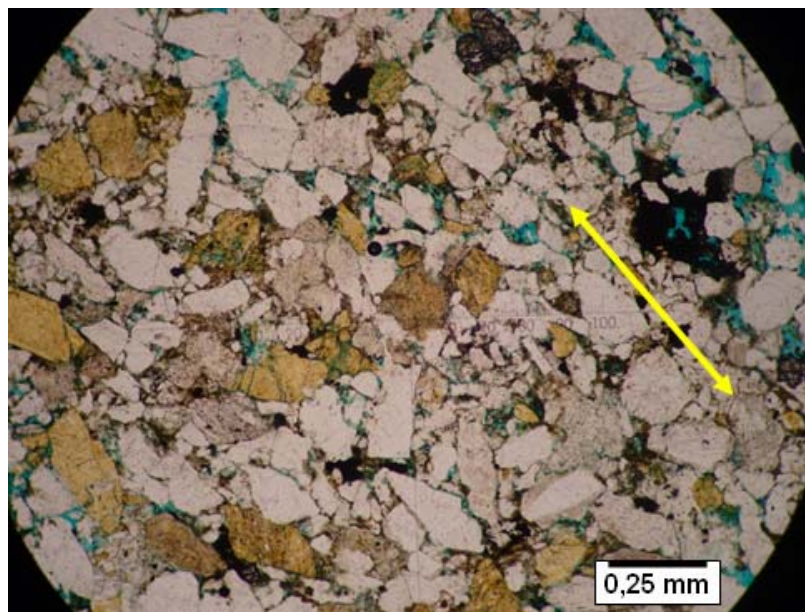
▪ **C26 3754 (Arenisca media –St-).** Esta muestra presenta dos zonas (la escala de sección delgada no puede distinguirse si estas zonas representan dos láminas o una laminación con posible “intraclasto”) con distinto predominio de tamaño de grano, la base (zona inferior) presenta tamaños arena finos a gruesos y está mejor calibrada que la zona superior la cual presenta principalmente partículas tamaño arcilla pero también contiene algunos granos de tamaños arena gruesa, estas dos zonas se encuentran en contacto neto, manifestando una laminación inclinada curvada y continua.

Figura 69. Se observa una zona de granos finos mal calibrada (Zf) en contacto neto (flecha verde) con el comienzo de una zona mejor calibrada y con granos de mayor tamaño (Zg).



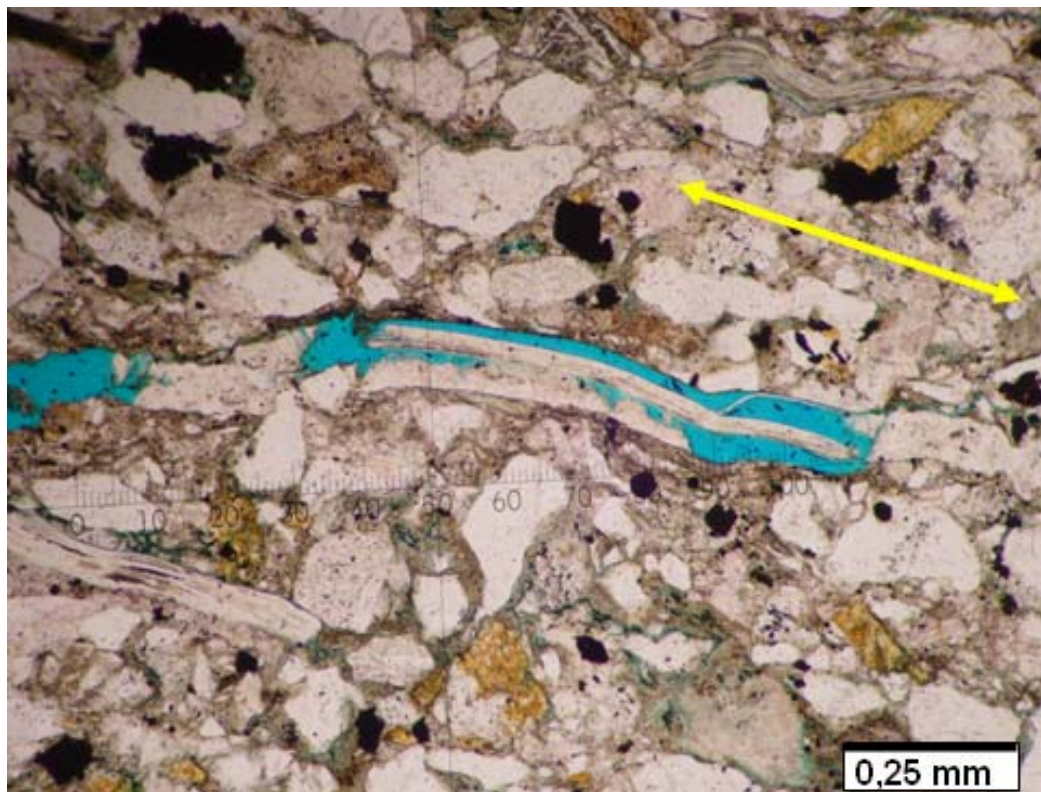
▪ **C26 3848 (Arenisca Fina -St-).** Esta muestra presenta una laminación inclinada plana evidenciada por la orientación preferencial de los granos alargados especialmente como se muestra en la **Figura 70**.

Figura 70. La línea amarilla muestra la orientación preferencial de los granos.



- **C26 4121 (Lodolita –Sr-).** La orientación de los granos elongados, micas (**Figura 71**) y la orientación de las fracturas muestran una laminación inclinada truncada hacia el tope donde la orientación cambia a presentarse “semihorizontal”, con una ligera inclinación, sugiriendo que la muestra hace parte de una estructura de mayor dimensión (mayor escala de la analizada en sección delgada), probablemente una laminación en artesa.

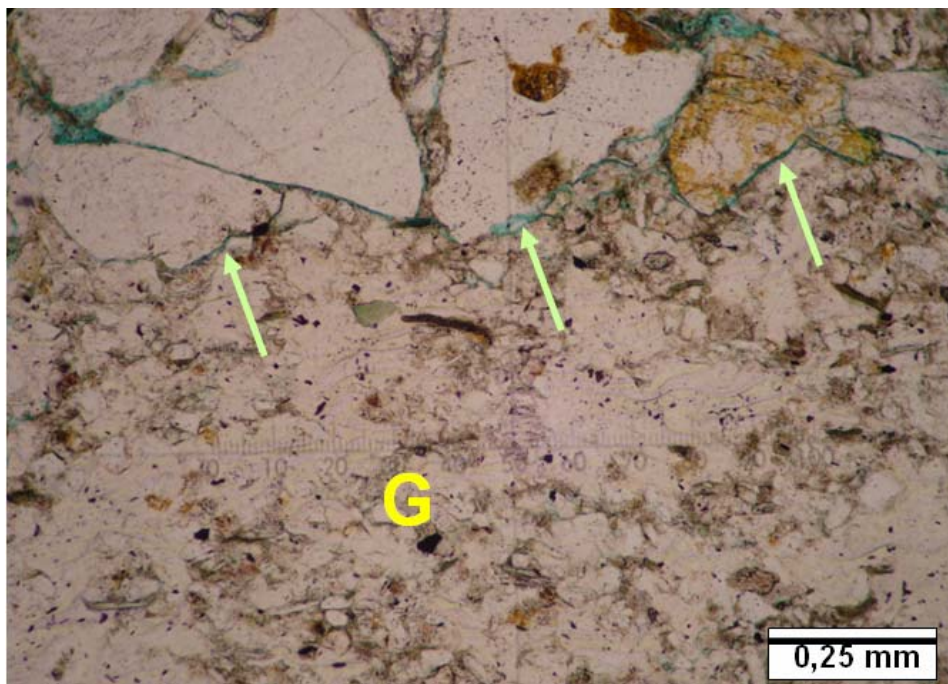
Figura 71. La línea amarilla muestra la orientación de una laminación inclinada, evidenciada especialmente por la posición de las micas



- **C27 3917 (Arenisca media –St-).** Se encuentra laminación inclinada plana discontinua con zonas (agregados) con tamaño de arena muy fina y fina con aspecto lenticular donde las partículas más finas son especialmente los líticos, estas zonas se encuentran en contacto curvado discontinuo con el resto de la muestra y muestran una orientación preferencial a la dirección de la laminación.

- **C27 4109'4 (Arenisca muy fina -Sr-)**. La muestra tiende a presentar una laminación cruzada discontinua reflejada en la distribución, acomodación y posición de los granos.
- **C25 1875 (Arenisca media -St-)**. La muestra presenta una laminación plana discontinua, conteniendo zonas lodosas "intraclastos" (arcillosos esencialmente) con tamaños de 4mm (tamaño guijo) los cuales se encuentran en contacto neto irregular (Figura 72) con el resto de las muestra.

Figura 72. Agregado lodoso ("intraclasto") tamaño guijo (G) contenido en una muestra con laminación plana discontinua. Las flechas verdes indican su contacto neto irregular con el resto de la muestra.



- **C9 4357 (Arenisca muy fina -St, en artesa)**. La muestra presente una laminación plana discontinua con una leve inclinación (12°) evidenciada por las micas y algunos de sus granos alargados (Figura 73).

Figura 73. Tendencia de orientación (flecha negra) de algunos granos especialmente micas dentro de una muestra con laminación plana discontinua levemente inclinada.

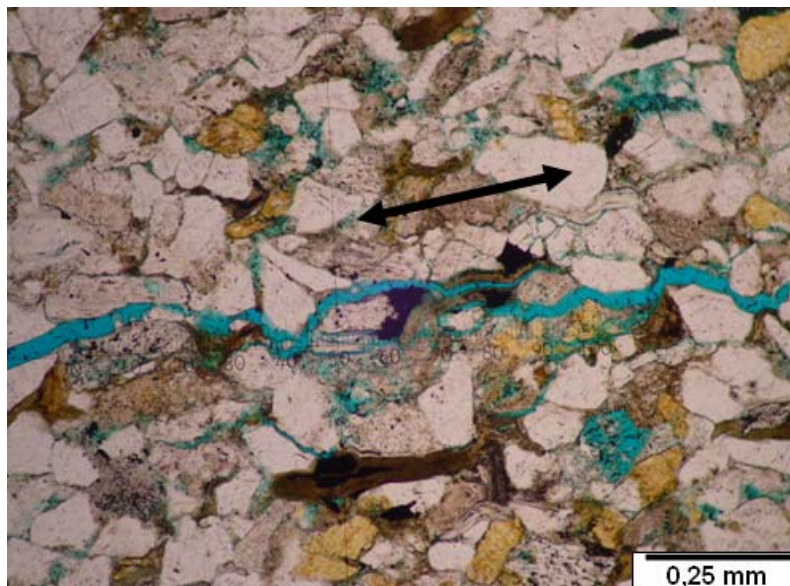


Tabla 4. Relación de las microestructuras encontradas por petrografía con la información expuesta por García y Fonseca 2009. T.D.: Tipo de depósito.

MUESTRA	GARCÍA Y FONSECA 2009			DATOS OBTENIDOS CON PETROGRAFÍA	
	FACIES	ESTRUCTURA SEDIMENTARIA	T.D.	CARACTERÍSTICAS MICROESTRUCTURALES	CLASIFICACIÓN TEXTURAL
C26 3754	St	Estratos cruzados en artesa, individuales o agrupados	CH	Contacto neto continuo entre una zona con matriz arcillosa y otra limosa	Arenisca media
C26 3848	St		CH	Laminación inclinada plana	Arenisca fina
C27 3917	St		CH	Laminación inclinada plana y discontinua, con agregados con tamaños de partícula muy fino y fino con aspecto lenticular.	Arenisca media
C25 1875	St		FP	Laminación inclinada plana con agregados lodosos	Arenisca media
C9 4357'5	St, en		CH	Laminación plana	Arenisca muy

MUESTRA	GARCÍA Y FONSECA 2009			DATOS OBTENIDOS CON PETROGRAFÍA		
	FACIES	ESTRUCTURA SEDIMENTARIA	T.D .	CARACTERÍSTICAS MICROESTRUCTURALES		CLASIFICACIÓN TEXTURAL
	artesa			discontinua inclinada	levemente	fina
C21 3639'5	Sr	Laminación cruzada ondulítica	DE S	Laminación discontinua por agregados	inclinada obstruida arcillosos	Lodolita
C26 4121	Sr		CH	Laminación truncada hacia el tope	inclinada	Lodolita
C27 4109'4	Sr		CH	Laminación discontinua	cruzada	Arenisca muy fina

La **Tabla 4** muestra la integración de la información obtenida por García y Fonseca 2009 y los datos obtenidos con la petrografía en cuanto a las características microestructurales encontradas de 8 muestras que mostraban una microestructura interna diferente a la masiva. La tabla muestra también el tipo de depósito determinado por García y Fonseca 2009 de las muestras dentro del ambiente fluvial de la Formación Mugrosa, esta misma información puede verse en el **Anexo 2** para cada una de las muestras usadas en el presente trabajo.

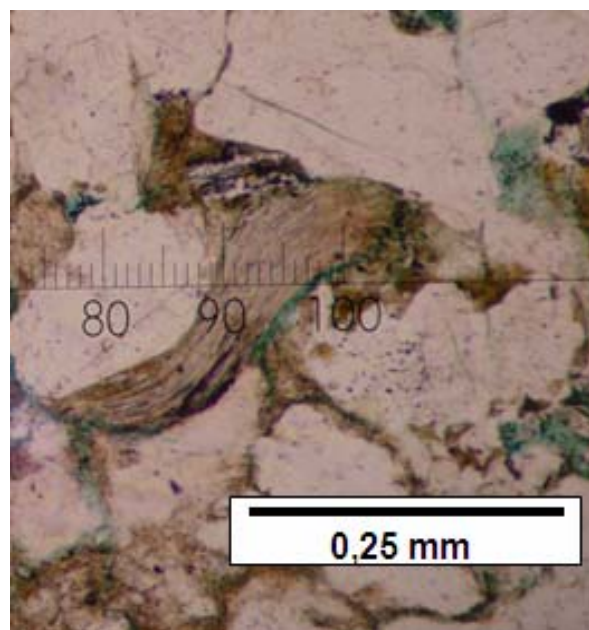
9.3 DIAGÉNESIS Y SECUENCIA DIAGENÉTICA

La diagénesis de la Formación Mugrosa está marcada por efectos físicos y químicos, que son reflejados por la compactación física que produce deformación de componentes dúctiles, disolución de granos inestables y de cuarzos, autigénesis de carbonatos de hierro, minerales opacos y por cementación de carbonatos, minerales opacos y sílice. A continuación se describen las características de cada uno de estos procesos diagenéticos encontrados y su posible orden cronológico entre sí (**Figura 89**).

- **Compactación Física:** Los esfuerzos mecánicos no alcanzaron grados altos en la Formación Mugrosa, esto se evidencia por la poca deformación de minerales

dúctiles y líticos sensibles a estos esfuerzos. Las **Figuras 56, 57, 64, 74, 81, 82 y 83**, muestran una deformación con grados medios en dos tipos de micas, las **Figuras 54 y 53** indican una deformación baja en una limolita y alta en una arcillolita (respectivamente) la cual es más susceptible a los esfuerzos físicos; la compactación física se ubicaría como el primer proceso en comenzar.

Figura 74. Muscovita mostrando una deformación con grados bajos a medios por efecto de la compactación física. Muestra C26 3648'9.



▪ **Alteración y Disolución de Granos Inestables (feldespatos):** La disolución y alteración de feldespatos especialmente plagioclasas (**Figuras 75 y 86**), constituye una fuente de material para la matriz y proporciona parte de las arcillas que forman halos de arcilla que envuelven los granos de cuarzo inhibiendo la cementación silícea como se puede ver en la **Figura 76**, esto indicaría que la alteración de feldespatos comienza antes que la precipitación silícea como cemento. Esta alteración y disolución temprana en feldespatos puede ser la razón por la que los granos de feldespato potásicos sean los que muestren un

fracturamiento intragranular más evidente que las plagioclasas al estar menos alterados al momento de sufrir esfuerzos.

Figura 75. Alteración y disolución de plagioclasas (rectángulos en rojo). Muestra C11 2332.

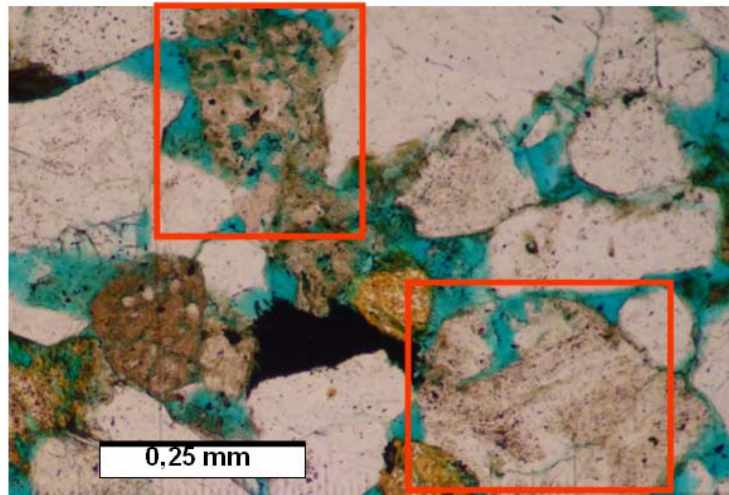
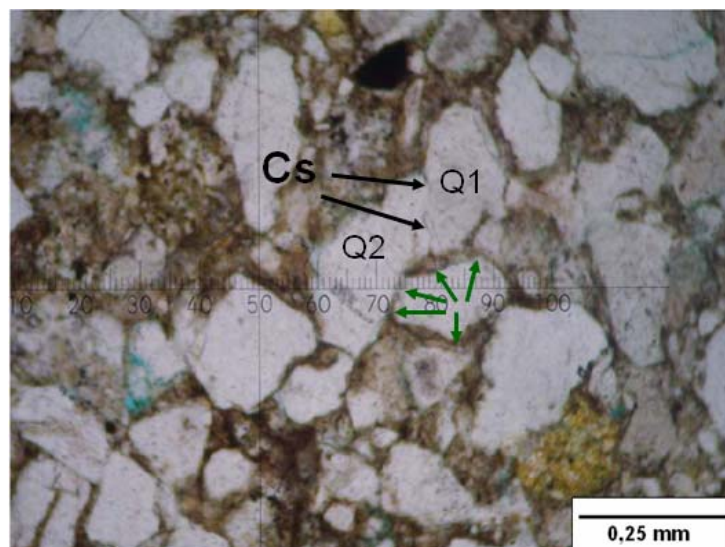


Figura 76. Se observa una cementación sílicea (Cs) entre dos granos de cuarzo (Q1 y Q2), las flechas verdes indican “halos” de arcilla que inhiben la cementación por sílice entre granos de cuarzo. Muestra C24 2142'5.



- **Alteración de Biotitas a Cloritas:** Se presenta una alteración de biotitas a cloritas (**Figura 81**) a lo largo de toda la formación, esta alteración se presenta en diversas etapas desde que la biotita comienza a alterarse hasta su total transformación (en pseudomorfismo) como lo indican las **Figuras 56, 57, 64, 74, 81, 82 y 83**. Esta alteración está asociada con minerales opacos.
- **Fracturamiento de Granos:** El fracturamiento intragranular se presenta con diferentes intensidades y es más evidente en feldespatos potásicos y en cuarzos monocristalinos y policristalinos (**Figura 77 y 58**). Este fracturamiento deja espacios vacíos donde posteriormente precipitan otras sustancias (**Figura 78**).

Figura 77. Feldespato potásico (Fk) y cuarzo (Q) presentando fracturas intragranulares. Se puede observar una precipitación de minerales opacos al interior de la fractura del feldespato potásico y una de calcita en las del cuarzo. Muestra C24 3976.

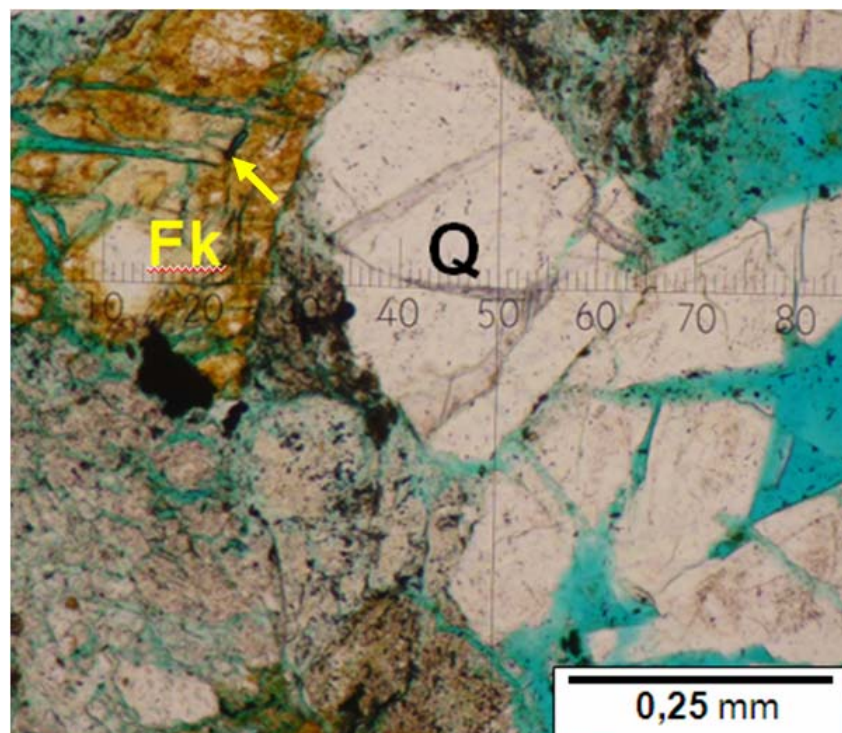
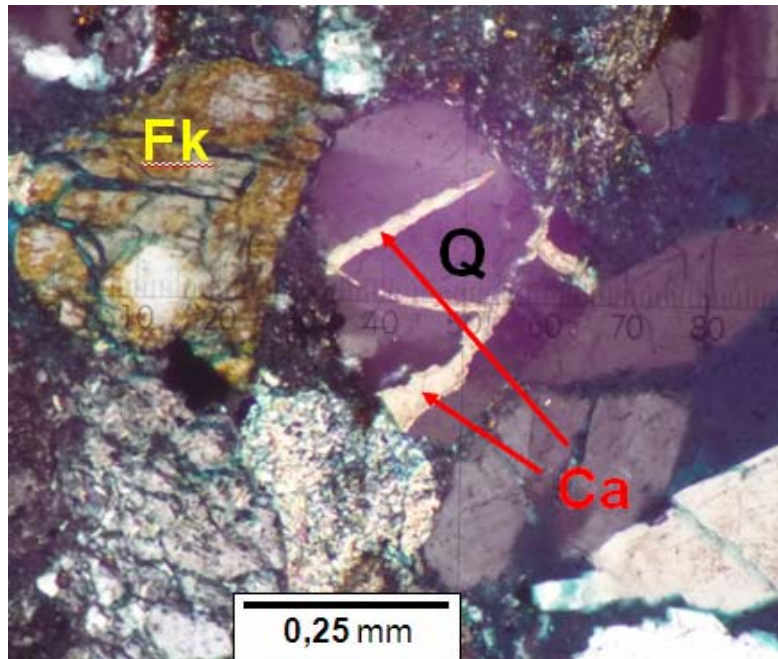


Figura 78. Feldespato potásico (Fk) y cuarzo (Q) presentando fracturas intragranulares. Se observa calcita (Ca) rellenando los espacios vacíos dejados por el fracturamiento intragranular del grano de cuarzo.



▪ **Precipitación de Sílice:** Se da como sobrecrecimiento de cuarzos (**Figura 81**), al interior de los cuarzos fracturados (**Figuras 58 y 78**) y como cemento entre granos de cuarzo (**Figura 76**). Las **Figuras 62 y 66** indican (relativamente) que la precipitación de sílice se dió antes que la precipitación de calcita al presentarse en distintos patrones de cementación cuando la cementación por calcita es incipiente, las **Figuras 60 y la 79** evidencian también este orden de precipitación al notarse que la calcita rodea la cementación por sílice.

Figura 79. Alta cementación por calcita y calcita Fe. (Ca Fe), las cuales ejercen reemplazamiento parcial y total en feldespatos (Fd). Las condiciones de alta precipitación de calcita genera corrosión en los cuarzos dejando sus bordes "dentados" (flechas negras), esta disolución de cuarzos se puede ver en los rectángulos rojos en los que se presenta disolución interna en cuarzo policristalino. Muestra C26 4140.

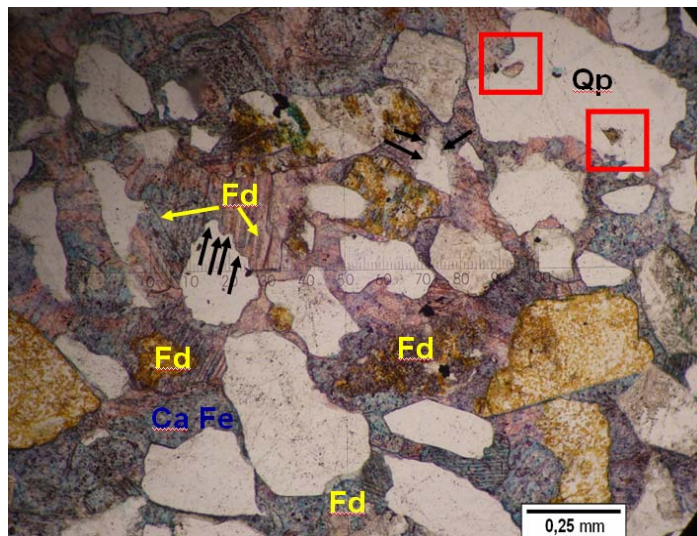


Figura 80. Bordes de corrosión en cuarzos (rectángulo amarillo) y disolución interna en cuarzo policristalino (rectangulos rojos). Figura en nicoles cruzados de la Figura 79.

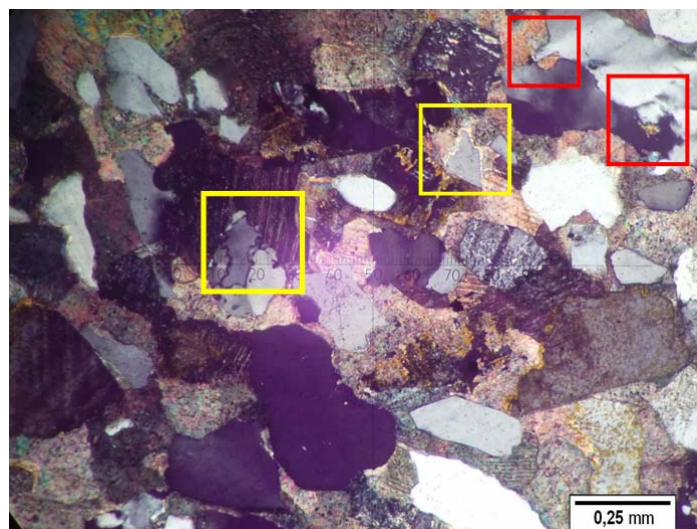
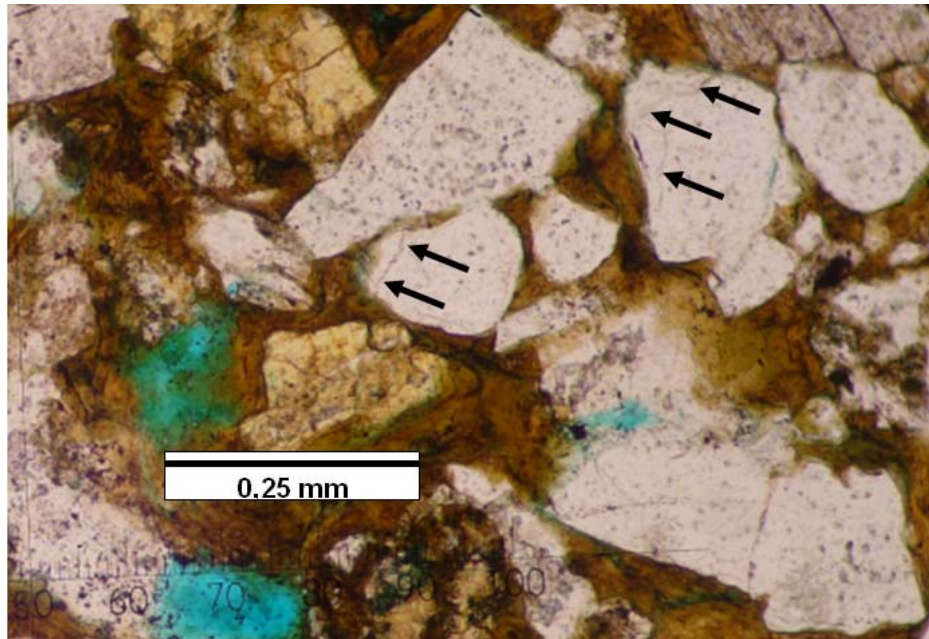


Figura 81. Sobrecrecimientos de granos de cuarzo (flechas negras). Muestra C24 2142'5.



- **Cementación por Calcita:** La calcita y la calcita Fe comienzan a precipitar hasta alcanzar altos porcentajes de cemento en las muestras reemplazando la matriz de la roca y anulando su porosidad, igualmente reemplaza parcial a totalmente diferentes granos especialmente los de feldespatos (**Figuras 79 y 80**). Las **Figuras 62 y 66** relacionan los distintos patrones con los que se presenta la precipitación de calcita en las muestras en sección delgada.

- **Disolución de Sílice:** Es observada en las **Figuras 79 y 80** donde un cuarzo monocristalino está sufriendo disolución en sus bordes dejándolos “dentados” e inmediatamente precipita la calcita, igualmente se observa un cuarzo policristalino que ha iniciado un proceso de disolución intenso en las uniones de sus cristales internos. Es posible que se haya tenido precipitación de sílice en bajas cantidades en el prolongado tiempo de la historia de enterramiento y antes de la alta precipitación de calcita, como lo demuestra la generalizada disolución de cuarzos policristalinos en todas las muestras (**Anexo 1**) que generan un ciclo de disolución

y precipitación de sílice, se puede observar además la presencia de cemento silíceo antes y después de la precipitación de minerales opacos (**Figura 84**), esto indicaría posiblemente una contemporaneidad en el comienzo de precipitación de las dos sustancias. La **Figura 15** indica que la disolución de sílice se da en condiciones que involucran un cambio de ph de 7 a 8 donde por el contrario ocurre la precipitación de calcita.

▪ **Cementación por Minerales Opacos:** Se presentan como precipitados aislados o como cemento en formas euhedrales, subhedrales y anhedrales, reemplazan granos especialmente de feldspatos, los minerales opacos identificados en microscopio de luz reflejada fueron pirita, hematita, limonita y leucoxeno (**Figuras 90 y 91**). La precipitación de minerales opacos tiende a "corroer" los granos de cuarzo y feldspatos dejando sus bordes "dentados" (**Figura 85**). La precipitación de minerales opacos muestra una asociación con la cloritización de biotitas. Se ubica posterior al fracturamiento de granos (**Figura 77**) y continúa prolongándose hasta después de ocurrido el fracturamiento intergranular de borde de grano e incluso en la **Figura 82** se observa como el mineral opaco aborda el cemento de calcita. Es posible que la precipitación de minerales opacos haya comenzado cerca de la precipitación de sílice (**Figura 84**), posteriormente la velocidad de precipitación de calcita fue mucho más rápida para bordear el cemento de minerales opacos que ya había comenzado como lo muestra la **Figura 87**. La siguiente Figura muestra que posteriormente al fracturamiento de borde de grano, se ha disminuido la velocidad de precipitación de calcita y por el contrario ha continuado la de minerales opacos.

Figura 82. Se observa una biotita alterada casi totalmente a clorita (rectángulo verde), la calcita fracturada y separada del cuarzo (Q) (rectángulos azules) debido a condiciones que produjeron el fracturamiento de borde de grano señalado alrededor del cuarzo con las flechas rojas, la precipitación de minerales opacos en los espacios vacíos dejados por el fracturamiento de grano (rectángulo negro derecha) y el “abordamiento” de estos minerales opacos al cemento de calcita (rectángulo negro izquierda). Muestra C11 2629.

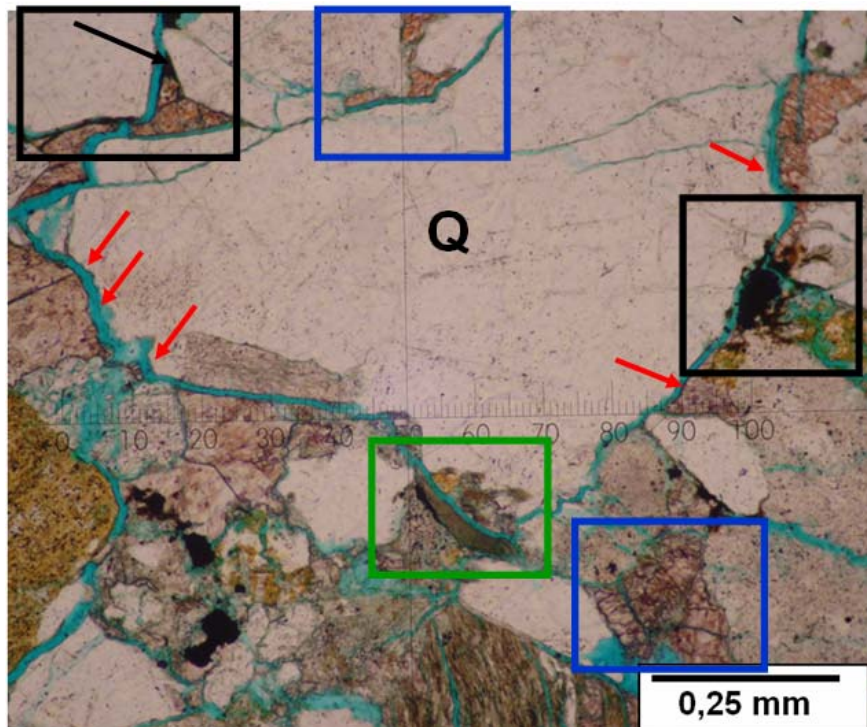


Figura 83. Se observa una biotita alterada casi totalmente a clorita (rectángulo verde). Nicales cruzados de la Figura 82. Muestra C11 2629.

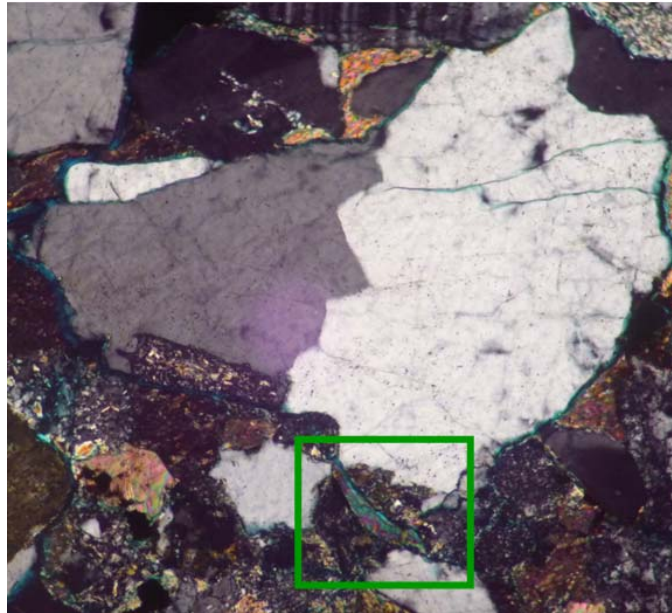


Figura 84. Relación de contactos entre los minerales opacos y el cuarzo. En el rectángulo negro se observa que el cemento de cuarzo no está “corroído” por el mineral opaco como es común, sugiriendo una precipitación de sílice posterior a la del mineral opaco. Muestra C9 4357'5.

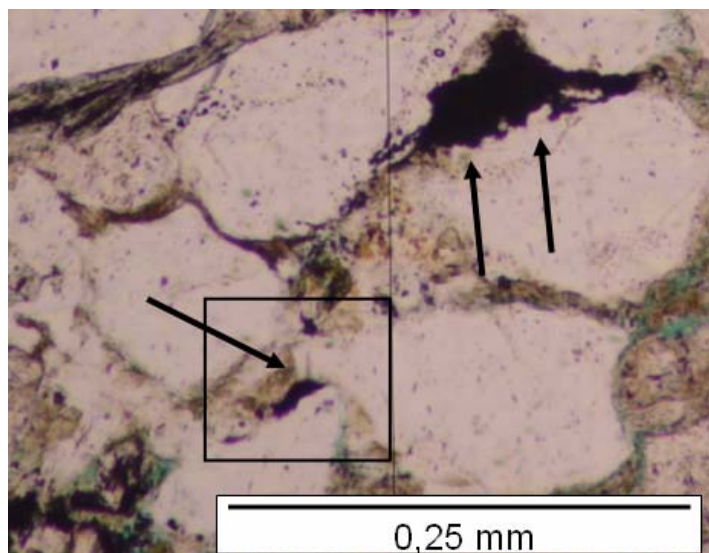


Figura 85. Relación del mineral opaco sobre el cuarzo (“corrosión”). Muestra C26 4140.

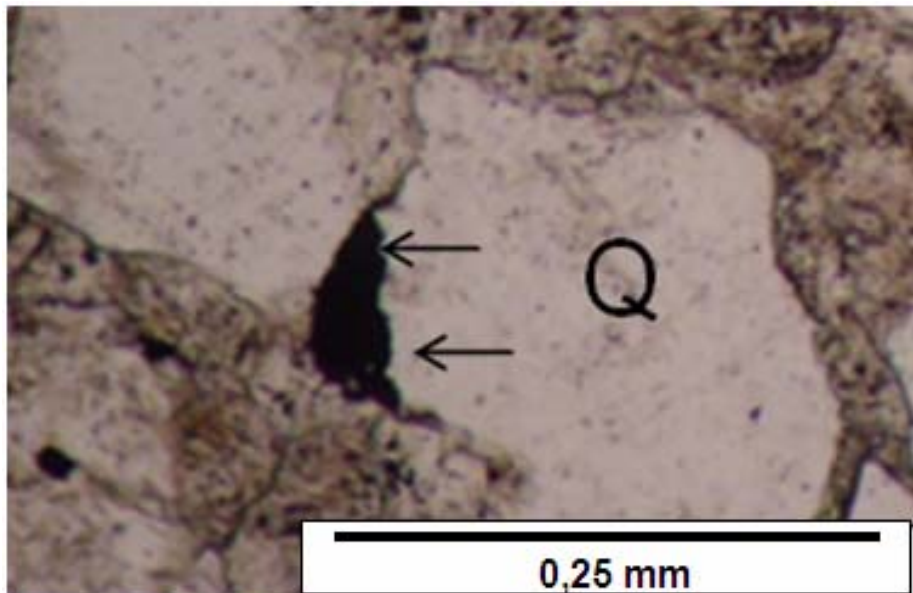


Figura 86. El rectángulo rojo muestra la disolución que ha sufrido un feldespato potásico y su baja alteración, la flecha negra indica la precipitación de minerales opacos posterior a la disolución del feldespato. Muestra C11 2332.

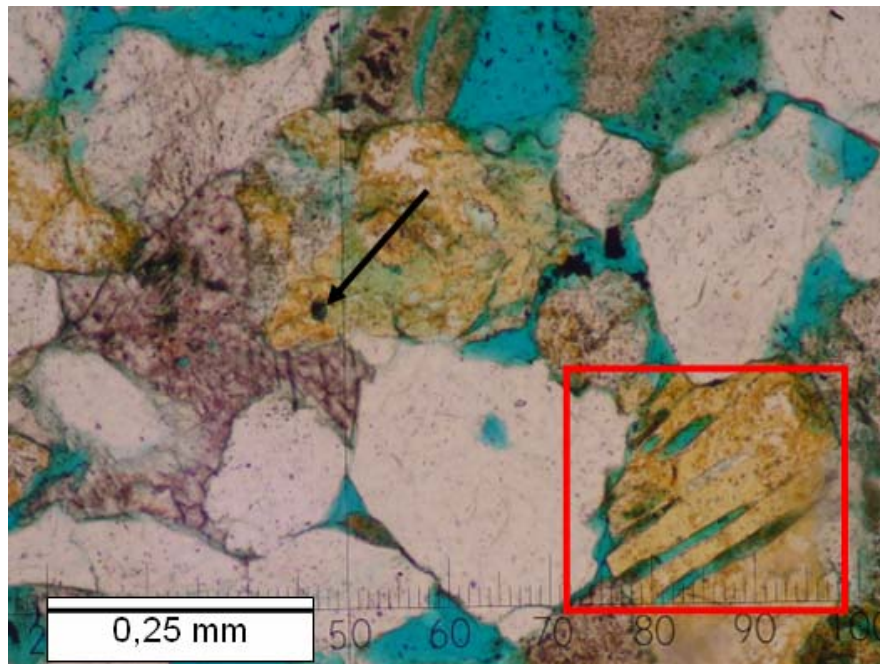
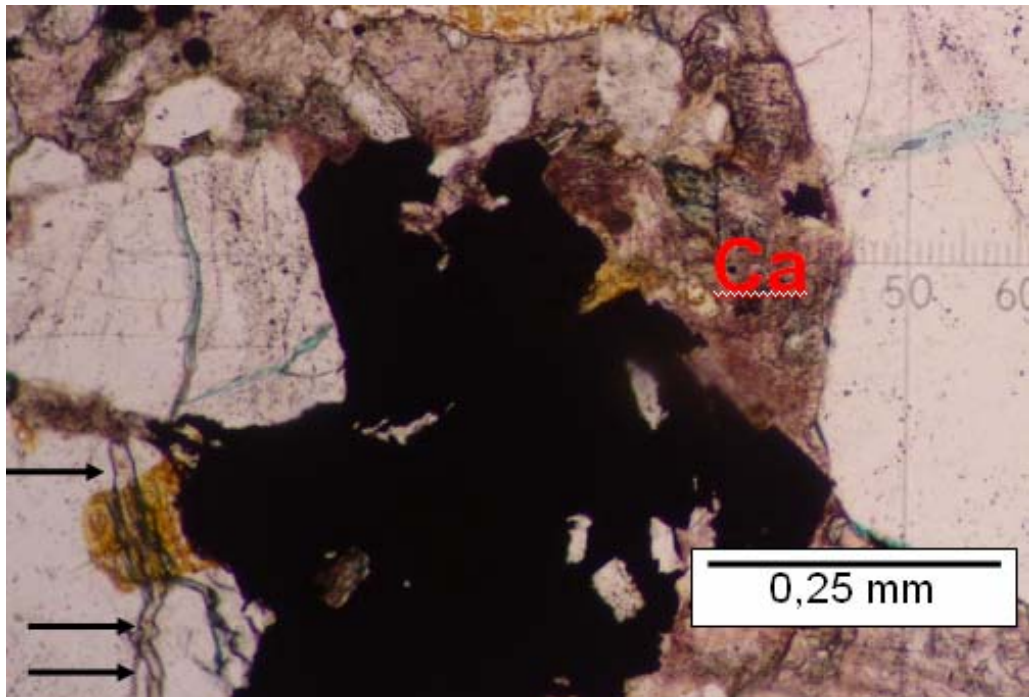


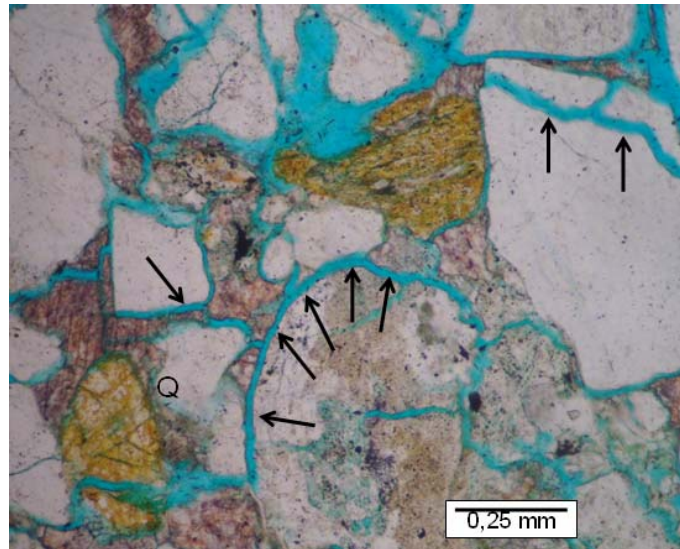
Figura 87. Cemento de calcita (Ca) bordeando el cemento de minerales opacos, las flechas negras indican la precipitación de calcita en las fracturas intragranulares ocurridas anteriormente.



- **Precipitación de Siderita:** Se presenta generalmente como pequeños agregados aislados (0,13 mm). Badillo (1995) menciona que se presentan cantidades considerables de siderita como cemento en un promedio de 35,5% del total de volumen de cementos encontrados para la Formación Mugrosa en el sector del Campo La Cira (Cuenca Valle Medio del Magdalena).

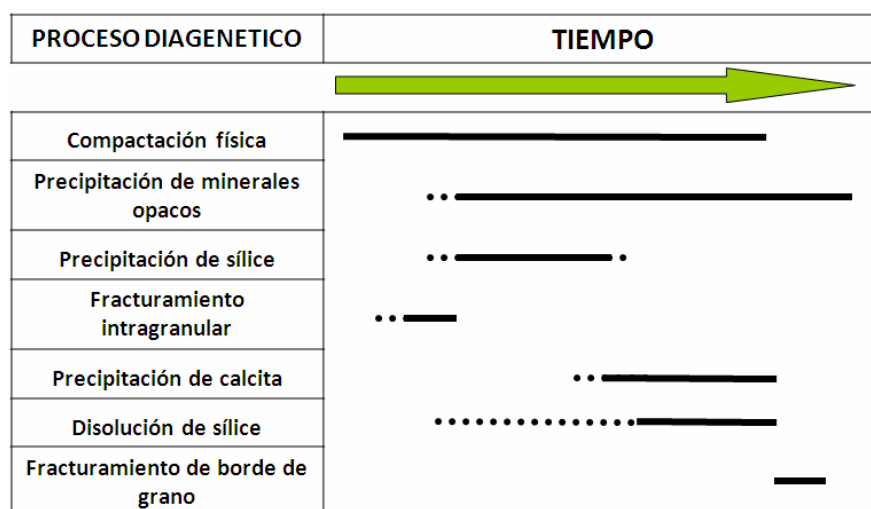
- **Fracturamiento Intergranular:** Se observan fracturas intergranulares de borde de grano que separa los diferentes granos del material aglutinante (matriz y cemento). La **Figura 88** muestra cómo algunos granos son desprendidos del cemento de calcita creando una porosidad secundaria. La **Figura 82** muestra la precipitación de minerales opacos posterior al fracturamiento de borde de grano.

Figura 88. Las flechas negras indican las fracturas intergranulares generadas por el fracturamiento de borde de grano. Muestra C11 2629.



A continuación se representará el orden cronológico relativo de los principales procesos diagenéticos descritos anteriormente, de acuerdo con las características diagenéticas identificadas en el análisis petrográfico.

Figura 89. Esquema de orden relativo de los principales eventos diagenéticos ocurridos en la Formación Mugrosa, sector Campo Colorado.



9.4 CALCOGRAFÍA

Por medio del análisis de minerales opacos en microscopio de luz reflejada, se identificó pirita, leucóxeno, hematita y limonita (**Figuras 90 y 91**).

Figura 90. Fotografía de sección delgada vista bajo microscopio de luz reflejada. Se observan tres de los cuatro tipos de minerales opacos encontrados en las muestras de sección delgada del Campo Colorado. Pirita (Py), hematita (Ht) y limonita (Lm).

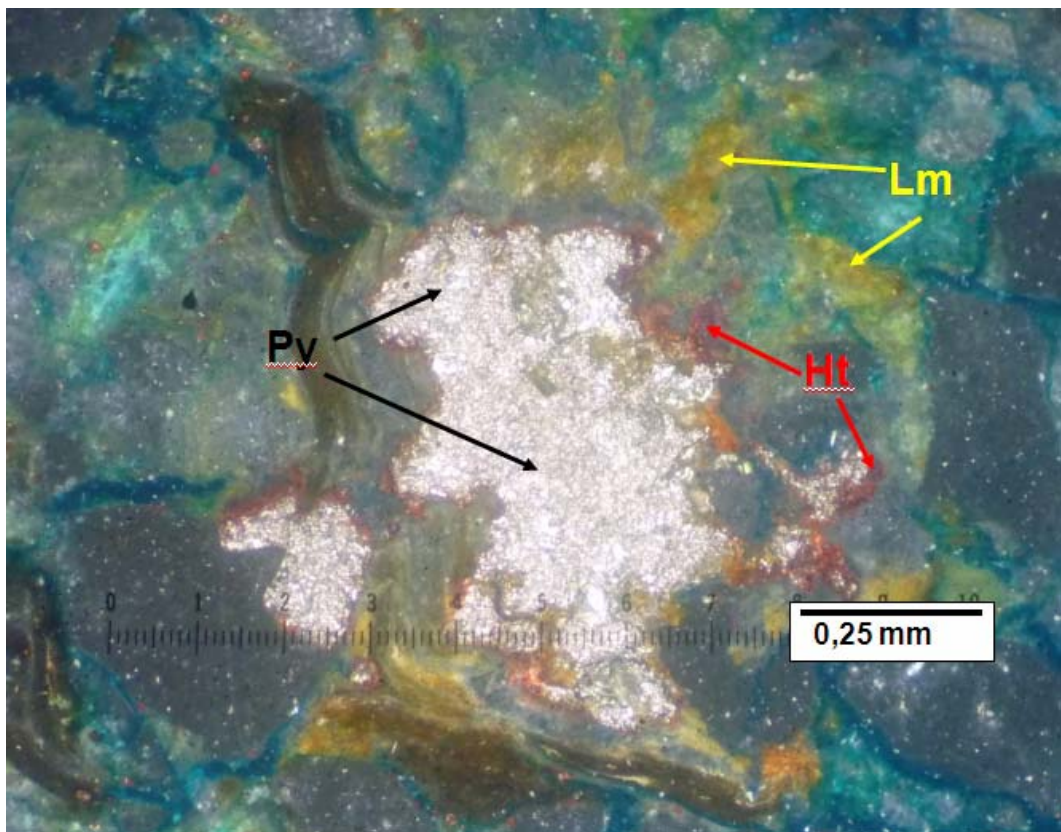
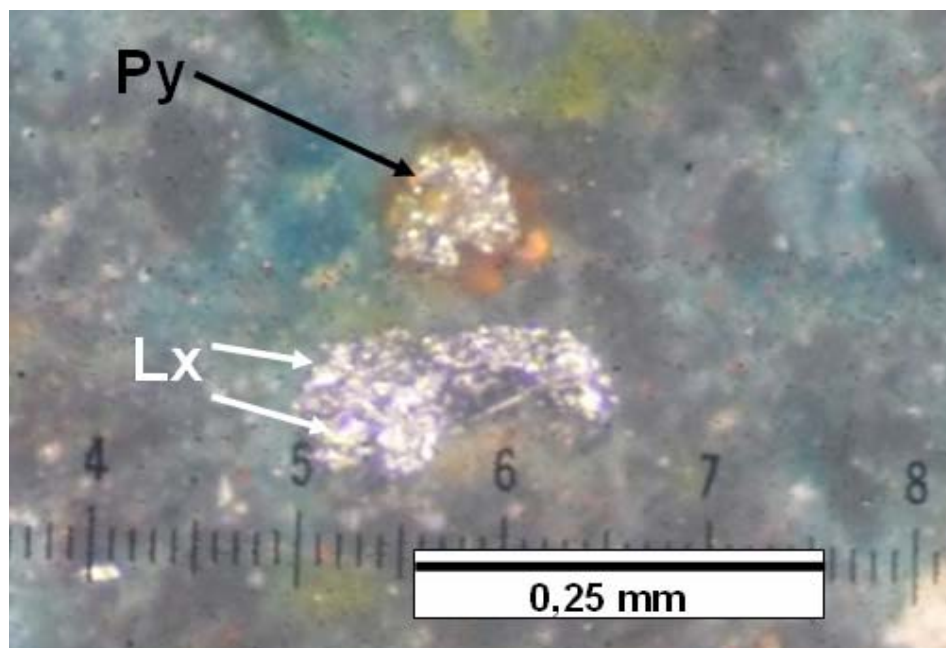


Figura 91. Fotografía de sección delgada vista bajo microscopio de luz reflejada. Se observa dos de los cuatro tipos de minerales opacos encontrados en las muestras de sección delgada del Campo Colorado. Pirita (Py) y leucoxeno (Lx).



La siguiente tabla muestra la relación de los minerales opacos identificados en las muestras de sección delgada a las que se les practicó calcografía:

Tabla 5. Minerales opacos identificados en las muestras a las que se les practicó calcografía.

MUESTRA	MINERALES OPACOS			
	PIRITA	HEMATITA	LIMONITA	LEUCOXENO
C26 3557'4	X	X	X	X
C26 3831	X	X	X	X
C26 3754	X	X	X	X
C26 3846	X		X	X
C26 4121'7	X	X	X	X
C26 4140	X	X		
C27 3832'6	X	X		X
C27 3917	X			X

MUESTRA	MINERALES OPACOS			
	PIRITA	HEMATITA	LIMONITA	LEUCOXENO
C27 4109'4	X			X
C27 4511'4				X
C21 3780'9	X	X		
C24 3976	X	X	X	X
C24 3979'5	X		X	X
C9 4357'5	X	X		X
C3 4062'6	X			X
C11 2332'9	X	X		
C11 2629	X	X		

9.5 DIFRACCION DE RAYOS X

Se identificaron cinco grupos principales de arcillas (Esmectitas, cloritas, micas, caolinitas y palygorsquita) según su comportamiento con los tratamientos de rutinas natural, etilenglicol y calentamiento a 500°C (calcinado) para cada grupo de arcillas. El **Anexo 6** relaciona las familias de arcillas encontradas (y algunas arcillas en particular) y su cantidad relativa dentro de la fracción arcillosa de las 54 muestras analizadas mediante análisis de rutina normal.

A continuación se muestra un ejemplo de los minerales encontrados por análisis difracción de rayos x para la muestra C27 3856 correspondiente a una facie lodosa.

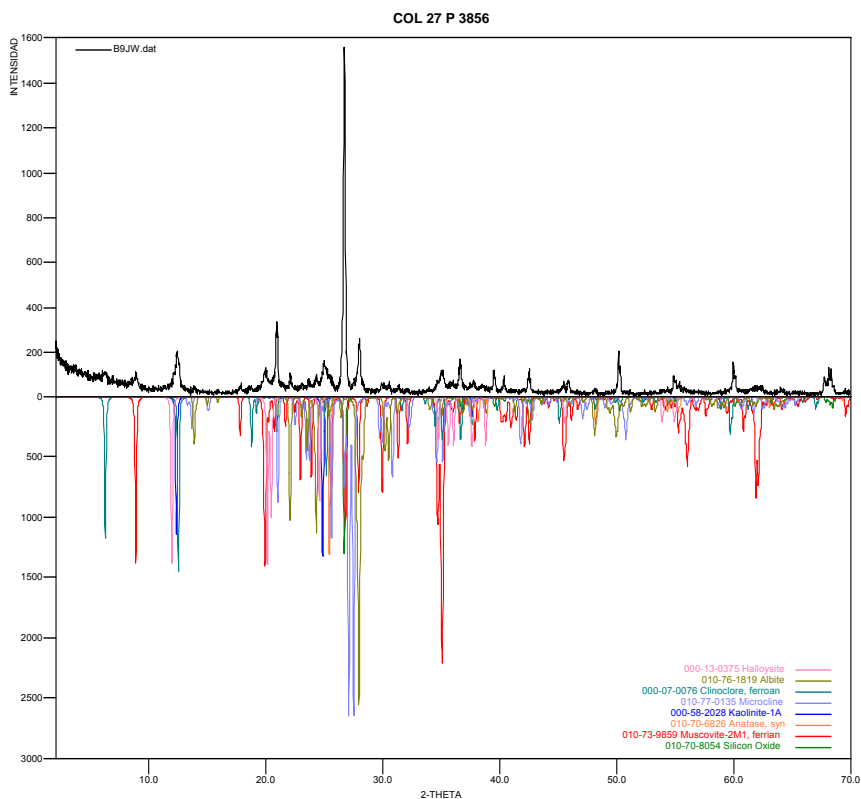
La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos del difractograma de polvos desorientados o bulk (**Figura 92**) de la muestra C27 3856 (facie lodosa) entregados por el laboratorio de difracción de rayos x (escuela de química) de la Universidad Industrial de Santander, los cuales indican la presencia de los diferentes minerales contenidos en la muestra.

Tabla 6. Minerales identificados de acuerdo al difractograma de rutina bulk de la muestra C27 3856.

COL 27 P 3856

	FASE	NOMBRE
Cristalinos	Si O_2	Cuarzo
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$	Caolinita
	$(\text{Mg}_{2.8} \text{Fe}_{1.7} \text{Al}_{1.2}) (\text{Si}_{2.8} \text{Al}_{1.2}) \text{O}_{10} (\text{OH})_8$	Clinocloro férrico
	$\text{Na} (\text{Al Si}_3 \text{O}_8)$	Albita
	Ti O_2	Anatasa
	$\text{K} (\text{Si}_{0.75} \text{Al}_{0.25})_4 \text{O}_8$	Microclina
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$	Haloisita
	$\text{K}_{0.92} \text{Na}_{0.08} \text{Al}_{1.88} \text{Fe}_{0.12} \text{Mg}_{0.04} (\text{Al}_{1.08} \text{Si}_{2.92} \text{O}_{10}) (\text{OH})_{1.89} \text{F}_{0.11}$	Moscovita

Figura 92. Difractograma correspondiente a rutina de polvos desorientados (bulk) para la muestra C27 3856.

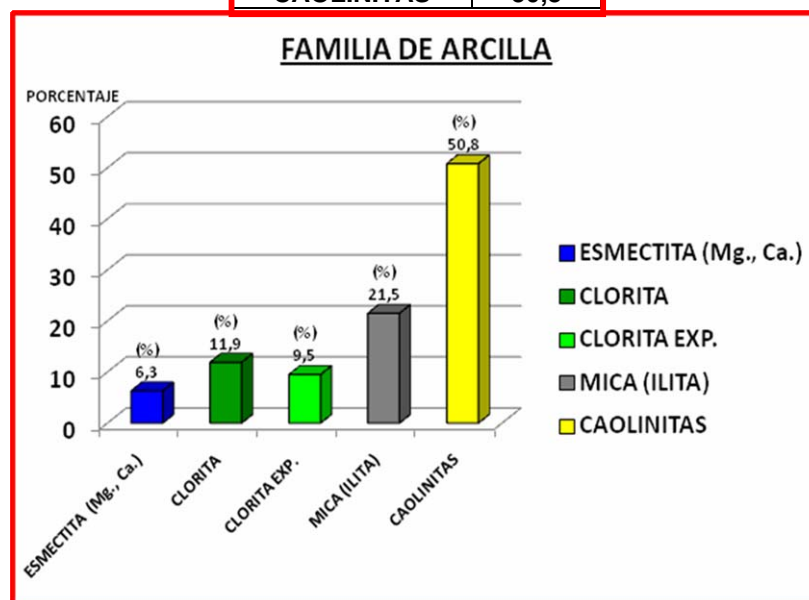


Este análisis bulk muestra que se tienen minerales arcilla representados en clorita, mica y caolinita. El **Anexo 8** relaciona los resultados de los minerales identificados por la rutina de polvos desorientados o bulk para todas las facies lodosas excepto para las muestras C27 4511'4 y C21 3639'5.

El resultado de los difractogramas de rutina normal explicados en el apartado 8.3.2.2 Muestran que para la Muestra C27 3856 se encontraron los siguientes porcentajes de minerales arcilla (familias) que fueron identificados:

Figura 93. Cantidad relativa de las familias de los minerales arcillosos encontrados mediante rutina normal para la muestra C27 3856.

CANTIDAD RELATIVA DE ARCILLAS	
FAMILIA	(%)
ESMECTITA (Mg., Ca.)	6,3
CLORITA	11,9
CLORITA EXP.	9,5
MICA (ILITA)	21,5
CAOLINITAS	50,8



Según metodología de Thorez (1976), para ésta muestra se identificaron interestratificados de Clorita-Esmectita (C-M).

A continuación se describen algunas de las características encontradas como resultado de la identificación de minerales arcilla por medio de análisis de rutina Normal para los grupos PM1 y PM2.

Según el **Anexo 5**, el grupo PM1 sólo tiene una muestra con esmectita pura (**Figura 94**), pero si la contiene en forma de estratificados (**Figura 95**), contiene más haloisita deshidratada que PM2. En el grupo PM2, se tiene presencia de esmectita pura, más caolinitas y menos interestratificados que en PM1. Para los dos grupos se tienen contenidos casi constantes de cloritas, illitas y de buenas cristalizaciones de caolinitas.

El **Anexo 6** muestra todas las familias de arcillas identificadas en todas las muestras utilizadas en el presente trabajo.

Figura 94. Relación del contenido de minerales arcilla y su cristalización para los grupos PM1 y PM2. HD: Halosita Deshidratada, HH: Halosita hidratada, Moder.: Moderada, C.Exp.: Clorita expandible, K: Caolinita

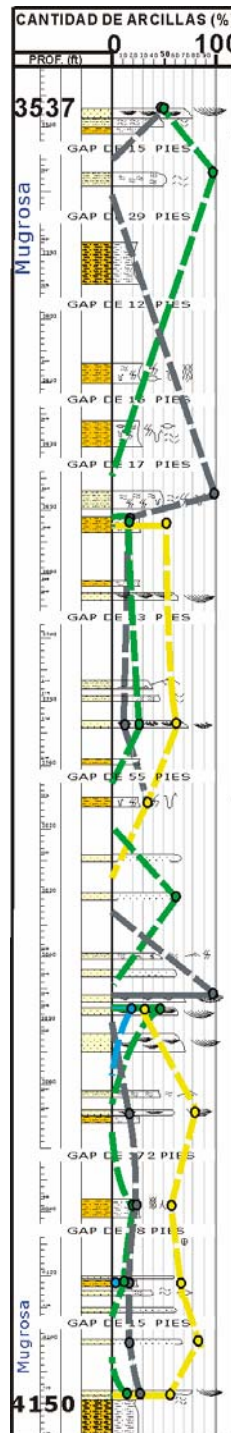
GRUPO	ARENISCA	MUESTRA	PRINCIPALES GRUPOS DE MINERALES ARCILLA										
			ESMECTITAS (%)		CLORITAS (%)		MICA (%)	CAOLINITAS (%)			CRISTALIZACION		
			Mg, Ca	Na	Clorita	C. Exp.	Illita	Caols.	H.D.	H.H	ALTA	MODER.	
PM1	GRUESA	C26 3846					100						
	MEDIA	C25 1875'9			15.5	17.7	17.7		49.1				
		C11 2332'9			23.5	20.6	26.5	29.4					
		C11 2629	3		26	29	16		26				
		C26 3538				47.1	52.9						
		C26 3754			10.4	16.7	10.4		62.5			Hal. D.	
		C21 3780'9						100				K	
		C27 3832'6			16	16	12.5		55.5			Hal. D.	
		C27 3917							100				
C24 3976			34.6	38.5	27								
		C26 4140				17		83				Hal. D.	
PM2	FINA	C24 2142'5			18.9	30.2	13.2	37.7					
		C11 2284'5			32	32	36						
		C19 3272			15.1	13.6	12.5	15.1	31.2				
		C21 3439'4		4.3	25	33.3	16.6	20.8					
		C26 3648'9					100						
		C26 3831				61.5							
		C26 3848	21.1		19.3	30.6		29					
		C26 3864					17.5	22.5	60				Hal. D.
		C54 3893	4.5				36.5	59					
		C24 3979'5			10.4	18.8		70.8				K	
	C3 4062'6			46.7	53.3								
	MUY FINA	C27 4109'4			14.8	14.8		55.6		14.8		K	
		C9 4357'5			10.2				84	5.8		Hal. D.	
	LODOLITA	C26 3557'4			52.9	47.1							
		C21 3639'5			13.6		18.2	36.4	18.2				
C26 4121'7		2		10		18.3		67				Hal. D.	
C27 4511'4			1.6	9.4	9.4	14	65.6				K		

Figura 95. Relación del contenido de interestratificados de minerales arcilla presentes en los grupos PM1 y PM2. I: Illita, M y Sm: Esmectita, C: Clorita, Cg: Clorita expandible, V: vermiculita.

GRUPO	ARENISCA	MUESTRA	INTERESTRATIFICADOS													
			I-M	I-C	I-Cg	I-V	C-M	C-Cg	Cg-M	C-V	V-Cg	V-M	I-Sm(Mg, Ca)	I-Sm(Na)	I-Cl	
PM1	GRUESA	C26 3846												X		
	MEDIA	C25 1875'9					X	X	X					X		
		C11 2332'9		X	X									X	X	
		C11 2629					X	X	X							
		C26 3538														
		C26 3754												X	X	
		C21 3780'9														
		C27 3832'6	X		X		X							X	X	
		C27 3917														
		C24 3976			X		X	X						X		
C26 4140													X	X		
PM2	FINA	C24 2142'5			X		X	X	X				X	X		
		C11 2284'5					X		X				X	X		
		C19 3272											X	X	X	
		C21 3439'4												X		
		C26 3648'9														
		C26 3831														
		C26 3848					X									
		C26 3864														
		C54 3893	X													
		C24 3979'5							X							
	C3 4062'6							X								
	MUY FINA	C27 4109'4														
	C9 4357'5															
	LODOLITA	C26 3557'4														
		C21 3639'5		X									X	X		
C26 4121'7																
C27 4511'4		X														

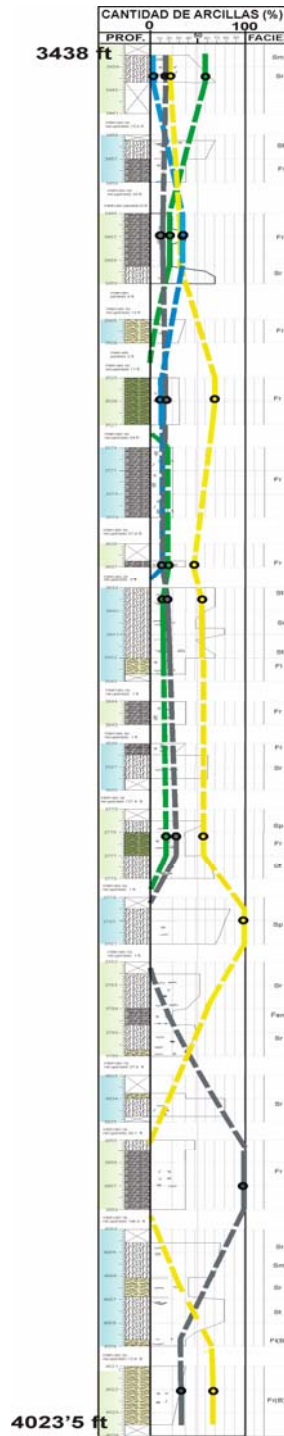
Las **Figuras 96 y 97** muestran la distribución y proporción relativa a profundidad de las arcillas encontradas para las columnas de los pozos corazonados C26 y C21.

Figura 96. Distribución de arcillas encontradas y su cantidad relativa en el pozo C26.



Modificado de Herrera (2006).

Figura 97. Distribución de arcillas encontradas y su cantidad relativa en el pozo C21.



Modificado de García y Fonseca (2009).

10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Fueron determinados dos grupos petrográficos (PM1 y PM2) de las muestras de secciones delgadas representados en areniscas de tamaños grueso, medio, fino, muy fino y lodolitas. El grupo PM1 corresponde a diez areniscas de tamaño medio y una con tamaño grueso, las cuales presentan granos muy angulares a subredondeados, con esfericidad subesférica, elongados y subelongados, sus contactos son flotantes, puntuales y longitudinales, su calibrado oscila entre pobremente calibrado a moderadamente calibrado, sus porcentajes promedio de armazón, matriz, cemento y porosidad son de 45.3%, 7.8%, 19.2% y 8% respectivamente, la característica que las diferencia es que presentan altos porcentajes de cemento de calcita. En cuanto a su clasificación composicional, corresponden a siete litarenitas y cuatro litarenitas feldespáticas. El grupo PM2 está representado por once arenisca de tamaño fino, dos de tamaño muy fino y cuatro lodolitas, la redondez de sus granos varía de muy angulares a subredondeados, su esfericidad oscila entre granos esféricos, subesféricos, elongados y subelongados, los contactos entre sus partículas está entre flotantes, puntuales, longitudinales y cóncavo-convexos, su calibrado varía de muy pobremente calibrada a moderadamente bien calibrada, sus porcentajes promedio de armazón, matriz, cemento y poros son 67.1%, 23.2%, 3.5% y 6.2% respectivamente. En cuanto a su clasificación composicional corresponden a nueve litarenitas feldespáticas, siete litarenitas y una arcosa lítica (clasificación Folk, 1974).

Según el análisis petrográfico, la distribución de las areniscas de grano medio en la Formación Mugrosa es heterogénea con respecto a la profundidad, ésta característica refleja la distribución de los distintos geocuerpos del ambiente de depositación fluvial al cual pertenece la Formación Mugrosa. La posible permeabilidad inicial de estas areniscas favoreció la entrada de fluidos que facilitó la precipitación de calcita hasta eliminar completamente su matriz en algunos de

los depósitos de canal, esto por consiguiente afectó la porosidad en las mismas hasta anularla.

Se observó una coherencia en cuanto a los tamaños de grano y microestructuras identificadas en la petrografía con las características de las facies que ya se tenían establecidas para el Campo Colorado. La muestra C26 3557'4 la cual correspondía a una facie St (arenisca), fue clasificada en petrografía como una lodolita arenosa muy fina (clasificación Folk, 1974).

A escala de sección delgada se detectaron sólo ocho de las veintiocho muestras de sección delgada, con características microestructurales internas diferentes a la masiva. Se tenían determinadas sólo seis muestras con este tipo de estructura masiva (Sm) en el modelo estratigráfico y sedimentológico de la Formación Mugrosa para el Campo Colorado (2009), esta diferencia puede ser debida a la escala a la cual se analizaron tanto las secciones delgadas como el análisis en corazones por García y Fonseca (2009).

Los resultados de difracción de rayos x (DRX) muestran que se debe tener cuidado al momento de elegir los fluidos de inyección para posibles trabajos de recobro teniendo en cuenta que la presencia de caolinitas, illitas (micas), cloritas y esmectitas (pura y en estratificados) pueden generar los principales daños a formación por minerales arcilla como migración de finos, expansión de arcillas y precipitación de hidróxidos de hierro. Es posible un trabajo de acidificación con ácido clorhídrico para aumentar la porosidad eliminando el material aglutinante, específicamente el cemento de calcita, pero es necesario determinar muy bien las concentraciones adecuadas del ácido, igualmente serían favorables los bajos flujos de los fluidos posiblemente inyectados, las soluciones base aceite y los estabilizantes de arcillas. De la misma manera deben tenerse presente los minerales de hierro indicados en la petrografía y en los resultados de difracción de rayos x (DRX).

La secuencia diagenética de la Formación Mugrosa para el campo escuela Colorado está marcada principalmente por los siguientes eventos diagenéticos que se mencionan a continuación en secuencia u orden relativo: compactación física, fracturamiento intragranular, precipitación de minerales opacos, precipitación de sílice, precipitación de calcita, disolución importante de sílice, fracturamiento de bordes de grano. Según estos eventos diagenéticos evidenciados, el fracturamiento intragranular genera considerable porosidad secundaria, ésta porosidad es disminuida posteriormente por las distintas cementaciones de calcita, minerales opacos y sílice, finalmente se genera nuevamente porosidad secundaria en las rocas por un evento de fracturamiento intergranular de borde de grano.

Verticalmente en toda la formación, se registró por medio de petrografía una alteración de biotitas a cloritas, ésta presencia de cloritas también fue registrada por el análisis de difracción de rayos x (DRX) que muestra porcentajes constantes de clorita en todas las muestras analizadas de la Formación Mugrosa del campo Colorado.

11. IMPACTO DE LOS RESULTADOS

La caracterización composicional y textural de las diferentes litofacies de la Formación Mugrosa del campo Colorado da una visión mucho más concreta de la litología que presenta la formación productora del Campo Colorado y sus implicaciones al momento de su producción. Los diferentes eventos diagenéticos encontrados son evidencia para la explicación de las bajas permeabilidades que se tienen en el Campo Colorado y permiten además establecer los parámetros más adecuados para futuros trabajos que busquen aumentar la permeabilidad en estas rocas.

La caracterización de los minerales arcilla por medio de difracción de rayos X contribuye a la caracterización composicional detallada de las diferentes litofacies de la Formación Mugrosa y suministra información determinante para establecer la sensibilidad de estas rocas a fluidos usados en posibles trabajos de estimulación de producción, evitando así, altos riesgos de daños a formación por minerales arcilla.

Los resultados de este trabajo también aportan información que ayuda a mejorar el modelo estratigráfico y sedimentológico del campo Colorado e igualmente representa información de gran utilidad para el entendimiento de la geología de ésta área de la cuenca.

12. CONCLUSIONES

La Formación Mugrosa en el Campo Colorado presenta en general dos clases de roca las cuales pueden ser relacionadas en dos grupos. El primer grupo esta representado por areniscas de tamaños grueso y medio, los contactos entre sus partículas varía entre flotantes, puntuales y longitudinales, con esfericidad subesférica, elongada y subelongada, su calibrado oscila entre pobremente calibrado a moderadamente calibrado, sus porcentajes promedio de armazón, matriz, cemento y porosidad son de 45.3%, 7.8%, 19.2% y 8% respectivamente. El segundo grupo corresponde a areniscas de tamaño fino, muy fino y a lodolitas, los contactos entre sus partículas está entre flotantes, puntuales, longitudinales y cóncavo-convexos, con esfericidad esférica, subesférica, elongada y subelongada, su calibrado varía de muy pobremente calibrado a moderadamente bien calibrada, sus porcentajes promedio de armazón, matriz, cemento y poros son 67.1%, 23.2%, 3.5% y 6.2% respectivamente. Los dos grupos presentan granos muy angulares a subredondeados y en cuanto a su clasificación composicional corresponden a litarenitas y litarenitas feldespaticas principalmente.

A escala petrográfica se encontró en general, una coherencia con las características faciales y microestructurales determinadas por el modelo Estratigráfico y Sedimentológico de la Formación Mugrosa del Campo escuela Colorado (2009). Las microestructuras encontradas fueron masiva, laminaciones planas continuas y discontinuas, laminaciones inclinadas, laminación inclinada truncada hacia el tope, laminación cruzada discontinua y algunas con la presencia de agregados arcillosos que evidencian la dirección de las laminaciones.

Según los resultados de difracción de rayos x (DRX), las areniscas de la Formación Mugrosa contienen arcillas representadas en caolinitas, esmectitas, cloritas e ilitas (micas), que pueden generar problemas de permeabilidades en producción si no se aplican las estrategias adecuadas en el campo al momento de

realizar posibles trabajos de recobro de producción, estos problemas estarían representados en migración de finos, hinchamiento de minerales expandibles y la precipitación de cristales de hierro de gran tamaño.

Los principales eventos diagenéticos encontrados en la Formación Mugrosa para el Campo Colorado en orden relativo son: la compactación física, el fracturamiento intragranular, la precipitación de minerales opacos, la precipitación de sílice, la precipitación de calcita, la disolución de sílice y el fracturamiento de borde de grano.

De acuerdo con el análisis de petrografía y análisis de difracción de rayos x (DRX), se tiene una alteración de biotitas a cloritas en toda la Formación Mugrosa del campo Colorado.

El estudio petrográfico permite refinar un modelo estratigráfico y sedimentológico al corroborar a escala de detalle las diferentes granulometrías determinadas en dicho modelo.

La Formación Mugrosa contiene rocas con distintos porcentajes de porosidad que oscilan entre 0 y 23% distribuidas a diferentes profundidades. Los procesos que han causado la principal disminución y aumento de la porosidad de las rocas son la precipitación de calcita y el fracturamiento intergranular respectivamente.

13. RECOMENDACIONES

Es recomendable verificar el contenido de minerales arcilla por difracción de rayos x con al menos dos análisis de difracción de rayos x por clase textural de arenisca con cantidades de muestra suficientes.

Para efectos de posibles trabajos de optimización de producción se recomienda una buena planificación de estrategia a ejecutar teniendo en cuenta los problemas que se pueden presentar en la formación por los minerales arcilla, es importante también tener en cuenta la cantidad de calcita que se encuentra disminuyendo la porosidad de las rocas.

Se recomienda analizar la sensibilidad y respuesta a nivel de laboratorio de los diferentes minerales arcilla encontrados ante la presencia de diferentes fluidos utilizados en trabajos de recuperación secundaria o terciaria que se empleen en el campo Colorado.

14. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Adams, A., Mackenzie, W., Guilford, C. 1994. Atlas of Sedimentary Rocks under the microscope. Longman group limited. New York.

Almon, W., Boles, J., Brindley, G., Davies, D., Hower, J., Hutcheon, I., Thomas, J., 1981. Clays and the Resource Geologist. Short course handbook, volume 7, may 1981. Mineralogical association of Canada. Editado por Longstaffe. Co-op press, Edmonton.

Badillo, R. 1996. Estudio Petrológico de las formaciones Mugrosa y Colorado del Campo la Cira, Valle Medio del Magdalena. Facultad de Ciencias Fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Barrero D., Pardo A., Vargas C., Martínez J. 2007. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos. Bogotá, Colombia.

Carroll D. 1970. Clay Minerals: Aguide to their X-Ray Identification. Special paper 126. The Geological Society of America. Boulder, Colorado 80302. US.

Castellanos, J., Gutiérrez, D. 2006. Cartografía Geologica y caracterización Estratigráfica, de la zona comprendida entre San Gil, Villanueva y Aratoca (Departamento de Santander), con fines hidrogeológicos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Clavijo J., Mantilla L., Pinto J., Bernal L., Pérez A. 2008. Evolución Geológica de la Serranía de San Lucas, Norte del Valle Medio del Magdalena y Noroeste de la Cordillera Oriental. Boletín de Geología, Enero/Junio, vol. 30 no. 1.

Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A B, Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J. and Taborda, A. 1994. Basin Development And Tectonic History Of The Eastern Cordillera And Llanos Basin, Colombia. Sub. AAPG.

Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A B, Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J. and Taborda, A. 1995. Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern cordillera and Middle Magdalena Valley, Colombia. AAPG Bulletin 1995, BP Exploration (Colombia).

Cruz, L., Alvarez, M., Caballero, V., 2004. Petrología Sedimentaria, Guías de laboratorios. Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Fabre, A. 1986. Geologia de la Sierra Nevada del Cocuy (Cordillère Orientale de Colombia), Tomo I. Département de Géologie et Paléontologie. Universite de Genève.

Fabre, A. 1986. Geologia de la Sierra Nevada del Cocuy (Cordillère Orientale de Colombia), Tomo II. Département de Géologie et Paléontologie. Universite de Genève.

Folk R. 1974. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill publishing Company. Austin, Texas.

García J., Fonseca C. 2009. Modelo Sedimentológico y Estratigráfico de la Formación Mugrosa en el Campo Escuela Colorado. Facultad de Ciencias Fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Gómez E., Jordan T., Allmendinger R., Hegarty K., Kelley S., Heizler M., 2003. Controls on Architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic Southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. GSA Bulletin, February, v. 115, no. 2.

Gómez E., Jordan T., Allmendinger R., Hegarty K., Kelley S. 2005. Syntectonic Cenozoic sedimentation in the Northern middle Magdalena Valley Basin of Colombia and implications for exhumation of the Northern Andes. GSA Bulletin, May/June, v. 117, no. 5/6.

Grim, R. 1953. Clay Mineralogy. McGraw-Hill series in Geology. New York.

Mesa, A. 1995. Diagénesis y Calidad del reservorio del campo la Cira, formaciones Mugrosa y Colorado. Informe Final. ECOPETROL – ICP.

Melo F. 2008. Mineralogía de Arcillas y estudio Microestructural de la Formación Los Santos en la Mesa de los Santos y Sector Nordeste de Curití. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Morales L. G. and Colombian Petroleum Industry, 1956. General Geology and Oil Occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia.

Morales M. 2006. Structural Analysis of the Provincia Field, Middle Magdalena Valley, Colombia. Oklahoma University. Master of Science. Norman, Oklahoma.

Parra, J. (Ecopetrol – GCO), Garzón, F. (Ecopetrol – GCO), Ordoñez, A. (Ecopetrol – ICP), Guarín, F. (Ecopetrol – ICP), Amaya, C. (Ecopetrol – ICP), Cabrera, H. (E.O.S. Ltda), Guerrero, J. (Unión Temporal A.I.P. – ANSALL Ltda), Duque, C. (Unión Temporal A.I.P. – ANSALL Ltda), 2003. Diagnostico y Estrategias de Recobro del Campo Colorado, Informe Final. Ecopetrol (Gerencia del Magdalena Medio), Instituto Colombiano del Petroleo.

Pettijohn, F. 1980. Rocas Sedimentarias. Sociedad de economía mixta. Traducción de la segunda edición por Turner. Editorial Universitaria de Buenos Aires. Argentina.

Royero J., Clavijo J. 2001. Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander. Memoria Explicativa. Ingeominas.

Sanchez, C. 2000. Análisis Petrológico y Evaluación como rocas Almacenadoras de formaciones Cretáceas y Terciarias en el Bloque Llanito-Matacuyá, Valle Medio del Magdalena. Instituto Colombiano del Petróleo.

Thorez, J. 2003. Practical XRD Analysis of clay Minerals. Seminario-Taller. Mayo 6 a 21 de 2003. Grupo interinstitucional de arcillas y procesos de meteorización. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.

Thorez, J. 1976. Practical identification of Clay Minerals. A handbook for teachers and students in clay mineralogy. Institute of Mineralogy. Universite de Liege, Belgique. Ediciones G Lelotte. Belgica.

15. REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Domínguez, J., Schifter, I. Las arcillas: El barro noble. La ciencia para todos. Director general: David de la Garza Leal. Instituto latinoamericano de la comunicación educativa

Fondo de cultura económica, s. a. de CV.

[Recursos Electrónicos en Línea]

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec_2.html

Consultado el 9 de Febrero de 2009.

Dorronsoró, C. 2009. Estructura de los Filosilicatos de la arcilla. Unidad docente e investigadora de la Facultad de Ciencias. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada. España. 2009.

[Recursos Electrónicos en Línea]

<http://edafologia.ugr.es/index.htm>

Consultado el 10 de Febrero de 2009.

Gann, A. Fotografías de microscopio electrónico de barrido (SEM) de minerales de arcilla. La mayoría de estos especímenes no provienen de suelos. 3 Marzo de 2009. Presentación.

[Recursos Electrónicos en Línea].

Fotograf%EDas%20de%20microscopio%20electr%F3nico%20de%20barrido%20(SSEM). Archivo power point. Enlace perdido.

Consultado el 29 de Mayo de 2009.

García E., Suárez M. Las arcillas: Propiedades y Usos. Universidad Complutense (Madrid) y Universidad de Salamanca. 2002.

[Recursos Electrónicos en Línea]

www.uclm.es/users/higueras/yymm/Arcillas.html

Consultado el 7 de Febrero de 2009.

Herrera, E. Registro de descripción sedimentológica y estratigráfica; Pozo Colorado 26; Formación Mugrosa, Cuenca Valle Medio del Magdalena. 2006.
Archivo Corel Draw. [.cdr]. Archivo suelto.
Consultado el 15 de Enero de 2010.

Lorenzo, N. & Verde, M. [nlorenzo@fcien.edu.uy]. Estructuras de Bioerosión en Moluscos Marinos de la Formación Villa Soriano (pleistoceno tardío-holoceno) de Uruguay. Departamento de Evolución de Cuencas, Facultad de Ciencias, Iguá 4225, CP 11400, Montevideo. Sociedad Brasileira de Paleontología. Revista Brasileira de Paleontología. Septiembre/Diciembre 2004.
[Recursos Electrónicos en Línea].
http://www.sbpbrasil.org/revista/edicoes/7_3/lorenzo.pdf
Consultado el 9 de Febrero de 2009.

Melgarejo, J. Atlas de Asociaciones Minerales en Lámina Delgada. Publicado por Ediciones Universidad Barcelona. 2003.
[Recursos Electrónicos en Línea].
http://books.google.com.co/books?id=T19yQ8_cQAgC&pg=PA178&lpg=PA178&dq=reemplazamiento+mineral+en+la+diagenesis&source=web&ots=GshHb_ttqd&sig=nFRmcCVQIBuGua4UYe1kgP5GFaE&hl=es&ei=0t6RSc-eKNCCtwehIjXCw&sa=X&oi=book_result&resnum=10&ct=result#PPA10,M
Consultado el 3 de Febrero de 2009.

Randy J Read. Basic diffraction: waves, interference and reciprocal space. Protein Crystallography Course. University of Cambridge. 1999-2009.
[Recursos Electrónicos en Línea]
http://www-structmed.cimr.cam.ac.uk/Course/Basic_diffraction/Diffraction.html
Consultado el 15 de Enero de 2010.

Spalletti, L. Composición de las pefitas, psamitas y pelitas epiclásticas. Cátedra de Sedimentología. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. 2007.

[Recursos Electrónicos en Línea]
<http://cig.museo.unlp.edu.ar/docencia/sed/composicion.pdf>
Consultado el 30 de Julio de 2008.

Spalletti, L. & Poiré, D. Diagénesis de las Rocas Clásticas. Cátedra de Sedimentología. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. 2007.

[Recursos Electrónicos en Línea]
http://cig.museo.unlp.edu.ar/docencia/sed/diagenesis_silicoclasticas.pdf
Consultado el 2 de Junio de 2008.

World Health Organization. Bentonite, Kaolin, and Selected Clay Minerals. Environmental Health Criteria 231. 2005.

[Recursos Electrónicos en Línea]
http://www.baroididp.com/baroid_idp_prod/baroid_idp_prod_datasheets.asp
whqlibdoc.who.int/ehc/WHO_EHC_231.pdf
Consultado el 10 de Febrero de 2009.