



**LOS MINERALES ARCILLOSOS Y SU APLICACIÓN COMO PALEO-
TERMÓMETROS E INDICADORES DE AMBIENTES SEDIMENTARIOS Y
CONDICIONES DE DIAGÉNESIS EN LA CORDILLERA ORIENTAL,
TRANSECTAS LA CALERA-QUETAME Y SACAMA-SIRIRI**

ADRIANA ROCÍO HERRERA HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA**

2010



**LOS MINERALES ARCILLOSOS Y SU APLICACIÓN COMO PALEO-
TERMÓMETROS E INDICADORES DE AMBIENTES SEDIMENTARIOS Y
CONDICIONES DE DIAGÉNESIS EN LA CORDILLERA ORIENTAL,
TRANSECTAS LA CALERA-QUETAME Y SACAMA-SIRIRI**

ADRIANA ROCÍO HERRERA HERNÁNDEZ

Trabajo de grado para optar al título de geóloga

DIRECTOR

PhD. CARLOS ALBERTO GARCIA RAMIREZ

CODIRECTORES

Geólogo, NESTOR RAUL MORENO GOMEZ

Química, ANGELICA MARIA CARREÑO PARRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS**

ESCUELA DE GEOLOGIA

BUCARAMANGA

2010

DEDICATORIA

*Don Esteban, Doña Eva, Luis, Juanjo, Yesid, María... son ustedes las personas a las que principalmente dedico la culminación de este gran sueño, siempre han estado ahí para apoyarme... **GRACIAS***

Edith, Leidy Paola, Nubia, Fabiola, Yudy, Lizeth, Carlos, Paola Andrea, Nubia Barley... amigos muchas gracias por todos y cada uno de esos momentos que compartimos, se aprende y se goza con ustedes...

AGRADECIMIENTOS

MIL GRACIAS

A Dios por regalarme la oportunidad de cumplir con este gran sueño.

A la escuela de geología de la Universidad Industrial de Santander y todo su cuerpo docente por todo lo que allí aprendí y puse en práctica.

A los integrantes del Grupo de Investigación en Estratigrafía en especial a Nelson, Clarita, Profe Juan Diego por facilitar espacios de conocimiento de donde extraje el tema a desarrollar en este trabajo de grado.

Al Instituto Colombiano del Petróleo, ya que en sus instalaciones encontré no solo laboratorios y lugares donde desarrollar mi trabajo de grado sino también personas que de una u otra forma contribuyeron a que este fuera un éxito.

Al Doctor Carlos Alberto García, a los geólogos Nestor Raúl Moreno, Julián Naranjo, y a la química Angélica María Carreño por creer en mí y colaborarme de la forma como lo hicieron.

A los muchachos del laboratorio de petrología, drx y sem: Don Jaime, Fredy, Arley, Cesar, Alexa, Javier, Cristina, Doña Isabel, Bertica, Rosario... todos y cada uno de ustedes tiene parte en esta tesis.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. PROBLEMA	16
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2 OBJETIVOS	17
2. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	18
2.2 PALEO-TERMOMETRÍA EN ROCAS SEDIMENTARIAS.....	19
2.2.1 REFLECTANCIA DE VITRINITA	19
2.2.2 ÍNDICE DE CRISTALINIDAD DE LA ILLITA (IC):.....	20
2.2.3 INTERESTRATIFICADOS ILLITA/ESMECTITA (I/S)	21
2.2.4 DIAGÉNESIS DE LOS MINERALES ARCILLA.	22
3. METODOLOGÍA.....	23
3.1 FASE DE LABORATORIO	24
3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	28
4. GENERALIDADES.....	30
5. MARCO GEOLOGICO	31
5.1 REGIONAL	31
5.2 GEOLOGÍA AREA DE APLICACIÓN.....	32
5.2.1 FORMACIÓN LUTITAS DE MACANAL:	33

5.2.2	<i>FORMACIÓN UNE:</i>	33
5.2.3	<i>FORMACIÓN DURA</i>	33
5.2.4	<i>FORMACIÓN TIERNA O ARENISCA TIERNA:</i>	33
5.2.5	<i>FORMACIÓN GUADUAS:</i>	33
5.2.6	<i>FORMACIÓN BOGOTÁ:</i>	33
5.2.7	<i>FORMACIÓN ARENISCAS DE LAS JUNTAS:</i>	34
5.2.8	<i>FORMACIÓN CHIPAQUE:</i>	34
5.2.9	<i>FORMACIÓN RIO NEGRO:</i>	34
5.2.10	<i>FORMACIÓN AGUARDIENTE:</i>	34
5.2.11	<i>FORMACIÓN MITO-JUAN:</i>	34
5.2.12	<i>FORMACIÓN BARCO:</i>	35
5.2.13	<i>FORMACIÓN CARBONERA C1:</i>	35
6.	RESULTADOS OBTENIDOS	36
6.1	MINERALOGIA DE LAS ARCILLAS	37
6.1.1	TRANSECTA LA CALERA-QUETAME.....	37
6.1.2	TRANSECTA CHITA-HATO COROZAL:	39
6.1.3	TRANSECTA CUBARA-PAMPLONA	42
6.1.4	SERRANIA DE SAN LUCAS	40
6.2	ÍNDICE DE CRISTALINIDAD DE LA ILLITA.....	41
6.3	INTERESTRATIFICADOS ILLITA/ESMECTITA	44

6.4	REFLECTANCIA DE LA VITRINITA	46
7.	DISCUSION DE RESULTADOS.....	48
7.1	ARCILLAS PRE Y SIN-DIAGENÉTICAS.....	48
7.2	PALEO-TERMOMETRÍA	50
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
9.	BIBLIOGRAFIA	54
	ANEXOS.....	56

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Determinación del índice de cristalinidad de la illita.....	20
Figura 2. Metodología general de trabajo.	23
Figura 3. Metodología de preparación y análisis de muestras en la fase de difracción de rayos x.	25
Figura 4. Metodología de preparación y análisis de muestras en microscopia electrónica de barrido	27
Figura 5. Mapa de localización de muestras.....	30
Figura 6. Esquema de las formaciones muestreadas en cada transecta.....	32
Figura 7. Histograma de composición mineralógica en roca total y grafica de composición en fracciones separadas de cada una de las muestras analizadas, transecta La Calera-Quetame.....	37
Figura 8. Histogramas de composición mineralógica en roca total y grafico de fracciones separadas de cada una de las muestras analizadas transecta Chita-Hato Corozal.....	39
Figura 9. Histogramas de composición mineralógica en roca total y grafico de composición en fracciones de las muestras de la transecta Cubara-Pamplona ..	42
Figura 10. Histogramas de composición mineralógica en roca total y grafico de las fracciones separadas de la muestra de la Serranía de San Lucas.	40
Figura 11. Variación del índice de cristalinidad con respecto a la temperatura. ...	42
Figura 12. Ubicación de cada una de las muestras en las zonas de diagénesis de acuerdo a la temperatura determinada.....	43
Figura 13. Variación en posición estratigráfica del porcentaje de esmectita en los interestratificados.....	45
Figura 14. Variación de la temperatura según la reflectancia de la vitrinita y relación con el índice de cristalinidad de la illita.....	47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Zonas metapelíticas que muestran las relaciones entre los diferentes paleo-termómetros.....	21
Tabla 2. Condiciones de medición	25
Tabla 3. Ubicación del pico de interestratificados y porcentaje de capas expansivas.....	28
Tabla 4. Relación de muestras con los análisis realizados.....	36
Tabla 5. Índice de cristalinidad de la illita determinados en fracción menor a 2 micras, y temperatura determinada para cada Formación.....	41
Tabla 6. Porcentaje de esmectita en los interestratificados illita/esmectita.....	44
Tabla 7. Porcentaje de reflectancia de la vitrinita.....	46
Tabla 8. Temperatura determinada con el porcentaje de reflectancia de la vitrinita	46

ANEXOS

Anexo 1. RESULTADOS DE LOS ANALISIS DIFRACCIÓN DE RAYOS X Y MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO.....	57
---	----

RESUMEN

TITULO: “LOS MINERALES ARCILLOSOS Y SU APLICACIÓN COMO PALEO-TERMÓMETROS E INDICADORES DE AMBIENTES SEDIMENTARIOS Y CONDICIONES DE DIAGÉNESIS EN LA CORDILLERA ORIENTAL, TRANSECTAS LA CALERA-QUETAME Y SACAMA-SIRIRI”*

Autora: HERRERA HERNÁNDEZ Adriana Rocío **

Palabras Clave: Minerales arcilla, Índice de cristalinidad, interestratificados, paleo-temperaturas, minerales pre y sin-diagenéticos.

Se realizaron análisis a 18 muestras distribuidas en las Transecta La Calera-Quetame, Chita Hato Corozal y Cubara-Pamplona de la Cordillera Oriental, con el fin de aportar datos de paleo-termometría al conocimiento de la evolución de la Cordillera Oriental y además estos análisis sirvieron para probar la metodología propuesta que es una modificación a la metodología con la que se trabaja en el Instituto Colombiano del Petróleo. Los resultados de estos análisis permitieron determinar que el índice de cristalinidad de la illita en las diferentes transectas se pudo determinar en las formaciones donde fue posible realizar la concentración de este mineral en la fracción 2 y 0.5 micras, este índice varía de acuerdo al aumento de temperatura, en la Transecta La Calera-Quetame disminuye de tope a base del registro estratigráfico estudiado, en la Transecta Chita-Hato Corozal sucede lo contrario aumentando de tope a base al igual que en la Transecta Cubara-Pamplona. El porcentaje de esmectita en los interestratificados illita/esmectita se determina de una forma cualitativa según la posición del pico de este mineral, este porcentaje no se pudo determinar en todas las formaciones ya que no presentaban este mineral. En las formaciones donde se pudo determinar se observa que este porcentaje disminuye de tope a base, comportamiento que se mantiene en todas las transectas.

Teniendo en cuenta que los minerales arcilla presentan un tamaño menor a 0.5 micras, morfologías definida y alta cristalinidad (Wilson y Pittman en 1970) las formaciones Guaduas, Lutitas de Macanal de la Transecta La Calera-Quetame y Formación Rio Negro de la Transecta Cubara-Pamplona, son las únicas que presentan minerales arcilla de origen sin-diagenético, esto determinado por la concentración de minerales arcilla en la fracción menor a 0.5 micras y por las características morfológicas observadas por microscopia electrónica de barrido, en donde se observan minerales morfológicamente bien definidos.

*Trabajo de grado modalidad investigación. Convenio de cooperación tecnológica UIS-ICP. 005 de 2007

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: PhD. Carlos Alberto García Ramírez. (UIS).

Codirectores: Geólogo: Nestor Raúl Moreno Gómez, Química Angélica María Carreño

ABSTRACT

TITLE: “CLAY MINERALS AND THEIR APPLICATION AS PALEO-THERMOMETERS AND INDICATORS OF SEDIMENTARY ENVIRONMENTS AND DIAGENESIS CONDITIONS ON THE EASTERN CORDILLERA, LA CALERA-QUETAME AND SACAMA-SIRIRI TRANSECTS”

Author: HERRERA HERNANDEZ Adriana Rocio

Keywords: Clay minerals, Crystallinity index, interstratified, paleo-temperatures, pre and diagenetic-free minerals.

Approach, 18 samples from the Eastern Cordillera basin distributed among the La Calera-quetame, Chita Hato Corozal y Cubara-Pamplona transects were analyzed with the purpose of contributing with paleo-thermometry data to the understanding of the Eastern Cordillera evolution and also this analyses were useful to validate the proposed methodology which is a modification to the current methodology used in the Colombian Petroleum Institute. Results from these analyses indicated that the illite crystallinity index was able to be measured for formations where it was possible to concentrate this mineral in the 2 and 0.5 micron fractions. The index was found to be variable with temperature increase; for the La Calera-Quetame transect it diminishes from top to bottom of the stratigraphic register studied whereas for the Chita-Hato Corozal transect it occurs the opposite increasing from top to bottom as well as for the Cubara-pamplona transect. The smectite percentage in the illite/smectite interstratifies is determined in a qualitative manner according to the peak response of the mineral; this percentage could not be determined for all formations due to the absence of the mineral. For the formations where it could be determined it is observed that this percentage diminishes from top to bottom in all transects.

Noticing that clay minerals present a grain size lower than 0.5 microns, a definite morphology and high crystallinity (Wilson and Pittman, 1970), formation Guaduas, Macanal' shales from the La Calera-Quetame transect and Rio Negro Formation from the Cubara-Pamplona transect are the only ones that present clay mineral of diagenetic-free origin. This was determined by the clay minerals concentration in the fraction below 0.5 microns and by the morphologic features observed by scanning electron microscopy, where morphologic well-defined minerals were observed.

INTRODUCCIÓN

En la prospección de Hidrocarburos es importante identificar la temperatura alcanzada por la secuencia sedimentaria ya que este es un factor que controla la generación de hidrocarburos. Existen diferentes paleo-termómetros como la reflectancia de la vitrinita, el Índice de Cristalinidad de la Illita, la relación de interestratificados Illita/Esmectita, Índice de coloración de las esporas, conodontos y foraminíferos. La historia diagenética con base en el estudio de los minerales arcillosos o de arcilla y concretamente sus particularidades cristalográficas, constituye un aporte en la caracterización de la roca reservorio.

En el presente estudio, se caracterizan los minerales arcillosos mediante difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Para la determinación de paleo-temperaturas se utilizó el Índice de Cristalinidad de la Illita y los interestratificados Illita/Esmectita esto como un nuevo parámetro en la caracterización térmica de las cuencas sedimentarias, en el Instituto Colombiano del Petróleo y correlacionar los datos obtenidos con los análisis de reflectancia de vitrinita (Ro). El origen de los minerales arcillosos se usaron para aclarar algunos aspectos de la historia diagenética.

Las muestras a analizar provienen de afloramientos en las transectas La Calera-Quetame y Sacama-Siriri de la Cordillera Oriental, apoyando el proyecto de Cuencas Sub andinas.

1. PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proyecto de Cuencas Sub-andinas del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), ECOPETROL S.A, está encaminado a la adquisición de datos que aporten a la precisión de los modelos de evolución de las cuencas sedimentarias para disminuir la incertidumbre exploratoria. Una de las necesidades identificadas es la adquisición de datos analíticos de paleo-termometría.

La identificación de los cambios cristalográficos con la temperatura de filosilicatos, como la illita e interestratificados illita/esmectita, aportaría herramientas complementarias a las técnicas de Reflectancia de la vitrinita (Ro) e inclusiones fluidas (IF), actualmente implementadas. Así también es necesario desarrollar una metodología que permita la caracterización de las rocas de acuerdo al origen e historia diagenética de los minerales arcilla.

El ICP cuenta con herramientas analíticas, equipos e infraestructura que permiten caracterizar mineralógica y cristalográficamente las arcillas de interés, se necesita tener una metodología clara y precisa para realizar el cálculo de paleo-temperaturas con estos métodos así como caracterizar las rocas de acuerdo al origen e historia diagenéticas de los minerales arcilla.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo General

Aportar al conocimiento de la evolución geológica de la Cordillera Oriental mediante datos de paleo-termometría y la historia diagenética de las Unidades Cretácicas y Cenozoicas, determinados en muestras de afloramiento de las transectas La Calera-Quetame y Sacama-Siriri.

Objetivos Específicos

- Estudiar las illitas y su índice de cristalinidad como indicador de paleo temperaturas de las rocas de las formaciones Cretácicas y Cenozoicas.
- Analizar los interestratificados de illita/esmectita para definir condiciones de temperatura alcanzadas por las rocas Cretácicas y Cenozoicas.
- Establecer las características micro-estructurales de los minerales arcillosos mediante Microscopia Electrónica de Barrido.
- Determinar la historia diagenética de las unidades Cretácicas y Cenozoicas presentes en la Cordillera Oriental mediante el estudio de los minerales arcilla allí presentes.

2. MARCO TEÓRICO

Para realizar el presente trabajo se utilizaron diferentes técnicas analíticas que permitieron realizar la caracterización mineralógica, morfológica y química de las muestras analizadas. Además de esto los resultados obtenidos con la aplicación de estas técnicas también permitieron la determinación de paleo-temperaturas. Estas técnicas fueron la difracción de rayos x y la microscopia electrónica de barrido.

2.1 Difracción de rayos X

La difracción de rayos X es el fenómeno particular que se presenta cuando radiaciones dispersadas coherentemente, con diferencias de fases creadas al interactuar la onda con el objeto, se superponen en un punto dado del espacio. Se emplea frecuentemente en el estudio de redes cristalinas y en particular en la caracterización de arcillas, puesto que el rango de su longitud de onda permite la formación de espectros de difracción distintivos para cada sistema cristalino.

Dentro de las técnicas experimentales desarrolladas están la de monocristal móvil, el método de Laue, el método de polvo policristalino, este último es el más empleado, en este método, un haz de rayos X incide sobre una muestra de polvo muy fino, idealmente cada cristalito difracta los rayos cuando su orientación respecto a la dirección del haz es tal que se cumplen las ecuaciones de Laue o su equivalente la ley de Bragg ($2d\sin\theta=n\lambda$). Donde, n es un número entero, λ es la longitud de onda de los rayos X, d es la distancia entre los planos de la red cristalina y, θ es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión.

Los resultados de los análisis se reflejan en un difractograma que es la representación gráfica de un espectro de difracción producido por una muestra policristalina en polvo al ser radiada con rayos X. El eje horizontal representa la posición característica de los máximos de intensidad (picos), para cada compuesto con estructura cristalina, en valores de ángulo (2θ) directamente relacionados con el espaciado interplanar de acuerdo con la ley de Bragg. En el caso de las arcillas, predominan las reflexiones basales (001) y se presentan los picos periódicamente de manera tal que el espaciado interplanar (d) correspondiente a cada reflexión será un múltiplo entero del espaciado de la reflexión de primer orden (d_{001}).

Con los resultados de esta técnica es posible realizar la cuantificación de los minerales presentes en las muestras de arcilla así como la determinación de las características que me permiten establecer la temperatura máxima alcanzada por la roca que le contiene.

2.2 Paleo-termometría en rocas sedimentarias

La paleo-termometría es el conjunto de métodos que contribuyen a determinar la máxima temperatura a la que ha estado sometido las rocas durante el enterramiento, estos ayudan a comprender la forma y condiciones de formación de una cuenca sedimentaria, y en complemento con la caracterización cristalográfica de los minerales arcilla, aportan información acerca de la historia diagenética de las rocas allí presentes. Es así como existen diferentes métodos para calcular paleo-temperaturas en lo que se utilizan minerales arcilla como el índice de cristalinidad de la illita y porcentaje de capas de esmectita en interestratificados illita/esmectita los cuales pueden ser correlacionables con métodos calibrados como la reflectancia de la vitrinita.

2.2.1 Reflectancia de vitrinita

La vitrinita es una sustancia brillante formada mediante la alteración térmica de la lignina y la celulosa en las paredes de las células vegetales. Con el incremento de la temperatura, la vitrinita experimenta reacciones de aromatizaciones irreversibles y complejas, lo que se traduce en un incremento de la reflectancia. La reflectividad se mide y se calibra en función de los estándares de reflectancia del vidrio de los minerales, y estas mediciones representan el porcentaje de luz reflejada en el aceite (R_o).

Este análisis se realiza con luz reflejada de 546 nm de longitud de onda, en un microscopio con fotómetro, sobre un pulido de roca o de materia orgánica concentrada y se define como el porcentaje de la intensidad del rayo de luz incidente que es reflejado por la superficie pulida, en comparación a un estándar óptico de Reflectancia conocida.

A la materia orgánica presente en las rocas sedimentarias (shales), aplicándole los conceptos de la petrografía del carbón, también se le puede determinar el rango de madurez térmica, de acuerdo al porcentaje de la Reflectancia de las vitrinitas. Estos rangos son equiparables con las diferentes fases de generación de hidrocarburos y se les han establecido valores de Reflectancia aceptados de manera internacional.

El método se basa a partir del aumento de la temperatura que eleva a su vez la aromaticidad de la materia orgánica, incrementándose el valor de la Reflectancia de la vitrinita ($\%R_o$). El umbral de generación al empezar esta demarcado en el intervalo de 0.5- 0.7% R_o (rocas maduras) y al finalizar entre 1.2-1.5% R_o (rocas sobre-maduras), dependiendo del tipo de kerógeno presente.

Las limitaciones de esta técnica se presentan por la presencia de vitrinitas con inclusiones de materias minerales re-trabajados, oxidados o meteorizados que inflan el valor de la medida. Además está la desventaja en diferenciar vitrinitas de otros macérales intermedios o minerales con morfología, color y brillo similar.

Así como la no presencia del maceral vitrinita, y la subjetividad en la lectura ya que depende de los estándares utilizados por la persona que esté realizando la lectura, pueden llegar a ser otras limitaciones de esta técnica.

2.2.2 Índice de Cristalinidad de la Illita (IC):

El término 'illita' se utiliza de manera muy amplia para hacer alusión a un grupo de minerales que incluye una gran variedad de componentes de rocas y suelos de granulometría tamaño arcilla. La illita es considerada un mineral tanto del grupo de las micas, como del grupo de las arcillas. El contenido de K en la illita, su presencia en rocas sedimentarias, ígneas (feldespatos illitizados) y metamórficas y la gran cantidad de estudios relacionados con el ambiente físico-químico de su formación, han contribuido a que este mineral haya cobrado un enorme interés, debido a su utilidad para datar eventos tectonotermales relacionados con su formación, su cristalinidad se ve afectada solamente por altas temperaturas.

Durante la década de 1960 los estudios regionales de arcilla en relación con el metamorfismo de muy bajo grado condujeron al desarrollo de los análisis de los minerales de la arcilla por DRX basada en técnicas de "cristalinidad" para la identificación de la transición de la diagénesis al metamorfismo. El índice de cristalinidad de la illita fue propuesto por Kübler (1964) y elaborado por el propio Kübler (1967 a y b) y por Dunoyer de Segonzac et al. (1968). El índice de cristalinidad de illita se define como la anchura a mitad de la altura de la primera reflexión basal de la illita. Su valor numérico disminuye al aumentar la cristalinidad. Los valores disminuyen a medida que los picos se vuelven más estrechos

Otro índice de "cristalinidad" es el índice de Weber (Weber, 1972), que expresa el ancho de la reflexión de la illita a media altura 10 \AA (figura 1) y es comparado con respecto a la anchura del pico (100) de una norma de cuarzo. Esta proporción disminuye a medida que los picos se vuelven más estrechos, lo que hace que los valores de "cristalinidad" sean comparables cuando los diferentes laboratorios utilizan el mismo estándar de cuarzo. Este índice es expresado como pequeños cambios en el ángulo de Bragg ($\Delta \theta$).

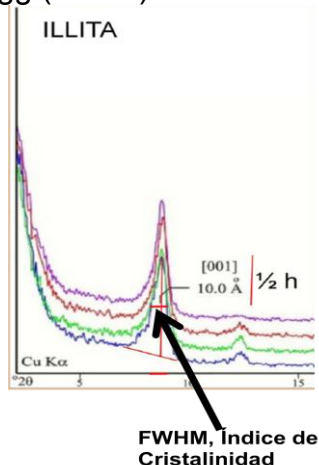


Figura 1. Determinación del índice de cristalinidad de la illita. Modificado Spalletti 2009.

2.2.3 Interestratificados Illita/Esmectita (I/S)

Uno de los cambios diagenéticos mas importantes en las arcillas es la transformación progresiva e irreversible de la Esmectita en Illita (Bruce, 1982; Curtis, 1985), se denomina interestratificados a la transformación mineral intermedia entre los dos.

Esta transformación de Esmectita a Interestratificados illita/esmectita o illita ha sido correlacionado con el incremento de la temperatura y/o madurez termal por numerosos autores (Heroux et al 1979), en Colombia se ha aplicado este análisis en la Cuenca del Valle Superior del Magdalena (Tobon, 1992) todos estos trabajos permiten que estos análisis se conviertan en una herramienta utilizada y aplicada en los estudios de análisis de evolución de cuencas.

Este cambio de Esmectita a Illita se ha tratado de explicar de acuerdo a varios mecanismos:

Formación de la Illita como un proceso en estado sólido a partir de la Esmectita, cuando esta colapsa al permitir la entrada de iones de potasio entre sus capas (Reynolds, 1980; Hower et al, 1976; Hower, 1982).

Neo-formación y formación de partículas fundamentales de Illita a partir de la disolución de la Esmectita y posterior re-cristalización de delgadas partículas de Illita (Nadeau and Bain, 1986; Srodon, 1988).

Al final de la década de los 80's Pollastro y otros proponen un mecanismo hibrido o mixto, concluyendo que las dos formas anteriormente descritas son validas (Inoue et al, 1989).

Estos métodos son correlacionables con otros métodos de medición de paleo-temperatura, esta correlación se muestra en la Tabla1.

Zona Metapelítica. Prof.	Temperatura	IC	%I en I/S	Reflectancia de la Vitrinita	Estados de maduración
Diagénesis superficial	100	1	60-80	0,5	Diagénesis
Diagénesis profunda	200	0,42	90	1,35 2,00	Catagénesis
Anquizona Baja	280	0,30	95	3	Metagénesis
Anquizona Alta	300	0,25	99	4	
Epizona					

Tabla 1. Zonas metapelíticas que muestran las relaciones entre los diferentes paleo-termómetros. Modificado de Collo et al. 2005

2.2.4 Diagénesis de los minerales arcilla.

Los minerales arcillosos pueden proceder de la alteración de la roca magmática o metamórfica, y después del transporte, dar arcillas detríticas (es el caso más frecuente). Pueden formarse en una cuenca de sedimentación en cuyo caso son minerales arcillosos autigénicos o neo-formados. En otros casos pueden proceder de una reorganización mineralógica durante la diagénesis (minerales arcillosos diagenéticos). Las arcillas detríticas son corrientemente denominadas arcillas primarias o heredadas, y las otras arcillas secundarias.

La diagénesis incluye también la formación de minerales arcilla cuando los minerales de feldespato están expuestos a ciertas condiciones de presión y temperatura del subsuelo. Debido a lo fibroso o su frágil naturaleza física de las arcillas diagenéticas, estas pueden reducir o incluso destruir los poros en el reservorio. Además, las arcillas del grupo montmorillonita absorben agua y pueden incrementar su volumen varias veces su tamaño original cuando el agua de diferente salinidad o pH fluye a través del reservorio. La diagénesis térmica de bajo grado también cambia naturaleza física de los granos minerales. En las profundidades subterráneas, las presiones y temperaturas elevadas deforman la estructura del cristal mineral haciendo que estos granos se fundan y se fluyan por los poros a saturar.

Wilson y Pittman en 1977 establecieron características distintivas entre los minerales de arcillas de origen detrítico y los de origen diagenético utilizando técnicas como Difracción de Rayos X, petrografía de secciones delgadas. Estas características se enumeran a continuación:

Los minerales heredados se concentran en fracciones más gruesas, que en este estudio están representadas en las fracciones de 53-5, 5-2 y 2-0.5 micras.

La cristalinidad de los minerales heredados es menor que la de los minerales producto de la diagénesis.

Por lo anterior la morfología de los minerales arcilla de origen diagenético exhiben hábitos cristalinos y las arcillas sedimentarias tienen contornos irregulares.

Las arcillas de origen diagenético muestran terminaciones parecidas a finos listones o espinas, como es el caso de los interestratificados illita/esmectita.

3. METODOLOGÍA

En general este trabajo siguió la metodología que se observa en la figura 2, se trabajo en dos fases que siempre estuvieron acompañadas de una revisión bibliográfica constante, la primera fase es la de laboratorios a las muestras a trabajar y la segunda consistió en realizar los diferentes análisis de los resultados e interpretación.

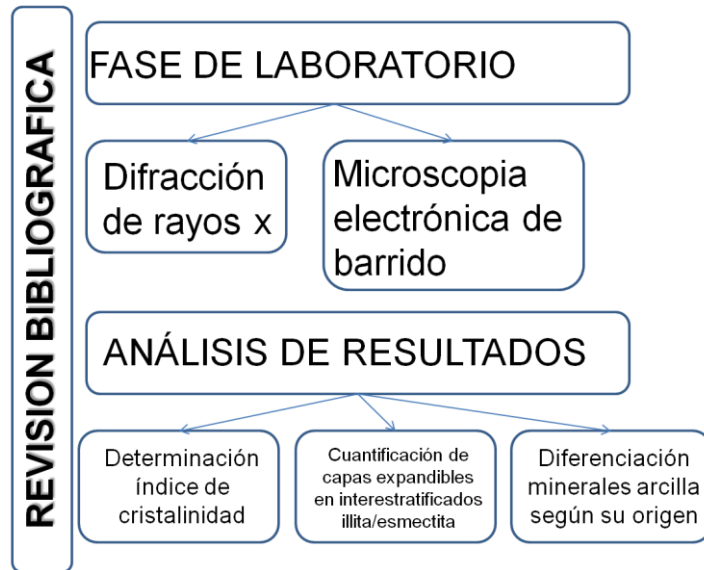


Figura 2. Metodología general de trabajo.

Las muestras a analizar son tomadas de las transectas La Calera-Quetame y Sacama-Siriri de la Cordillera Oriental, se escogieron estas muestras ya que actualmente se está trabajando en esta cuenca además de que se aprovecha que a una parte de estas muestras que fueron recolectadas por personal del Instituto Colombiano del Petróleo se les realizó también análisis de reflectancia de vitrinita y con estos resultados se calibraron los obtenidos con el índice de cristalinidad de la illita y la cuantificación de capas expandibles en los interestratificados illita/esmectita, de estas muestras se seleccionaron aquellas más arcillosas y frescas.

A continuación se resumen las metodologías que se llevaron a cabo en cada uno de los laboratorios:

3.1 Fase de Laboratorio

Laboratorio de Difracción de rayos X.

Se utilizan aproximadamente 20 gramos de roca fresca, sin oxidación o presencia de venillas o venas. Para la preparación de la muestra, se siguió la metodología del laboratorio de difracción de rayos x del ICP, modificada con datos tomados de la metodología propuesta por Mantilla 2003 y es resumida en la Figura 3.

La eliminación de carbonatos se debe realizar sin producir alteraciones en los minerales de la roca, se sugiere el método propuesto por Mantilla L, 2003, donde indican que se debe realizar con una mezcla de Acido Acético y Acetato de Sodio 1N después de disgregada la muestra agitando la mezcla a temperatura ambiente hasta que no se observe efervescencia alguna después tapando el vaso se procede a calentarla en una estufa a baja temperatura (sin llegar a ebullición, preferiblemente no mayor a 80°C). A continuación la muestra es lavada repetidamente con agua destilada, con el propósito de eliminar las sales formadas. Para la eliminación de la materia orgánica se coloca la muestra en un vaso con una solución de peróxido de Hidrogeno al 10% y se lleva el mismo procedimiento que se realizó para la eliminación de carbonatos.

La separación de las fracciones de interés 53-5 micras, 5-2 micras, 2-0.5 micras y menor de 0.5 micras se fundamenta en la Ley de Stokes. Inicialmente las muestras pasan por un proceso de disgregación y dispersión con ultrasonido, se eliminan cementantes y la materia orgánica lo cual permite obtener la arcilla más representativa del contenido total en la muestra.

La metodología se hace corriendo 3 veces la muestra para identificar los grupos principales de arcillas presentes:

N = Normal, la arcilla suspendida en agua se deja secar para permitir reforzar las reflexiones basales (001) de las arcillas y obtener un espectro de DRX orientado.

C = Etilen Glicolada, moléculas orgánicas ocupan las posiciones inter-laminares de las Esmectitas o arcillas expandibles para aumentar las distancias basales.

F = Calentamiento de la muestra a 550° C, Destruye la estructura cristalina de las Caolinitas. Permite la diferenciación del grupo Caolinitas-Cloritas y algunos interestratificados.

Antes y después de cada tratamiento se realiza un análisis de la muestra y finalmente se superponen todos los difractogramas para definir la composición real, haciendo énfasis en los compuestos mayoritarios, es decir los que conforman alrededor del 95 % de la muestra arcillosa.

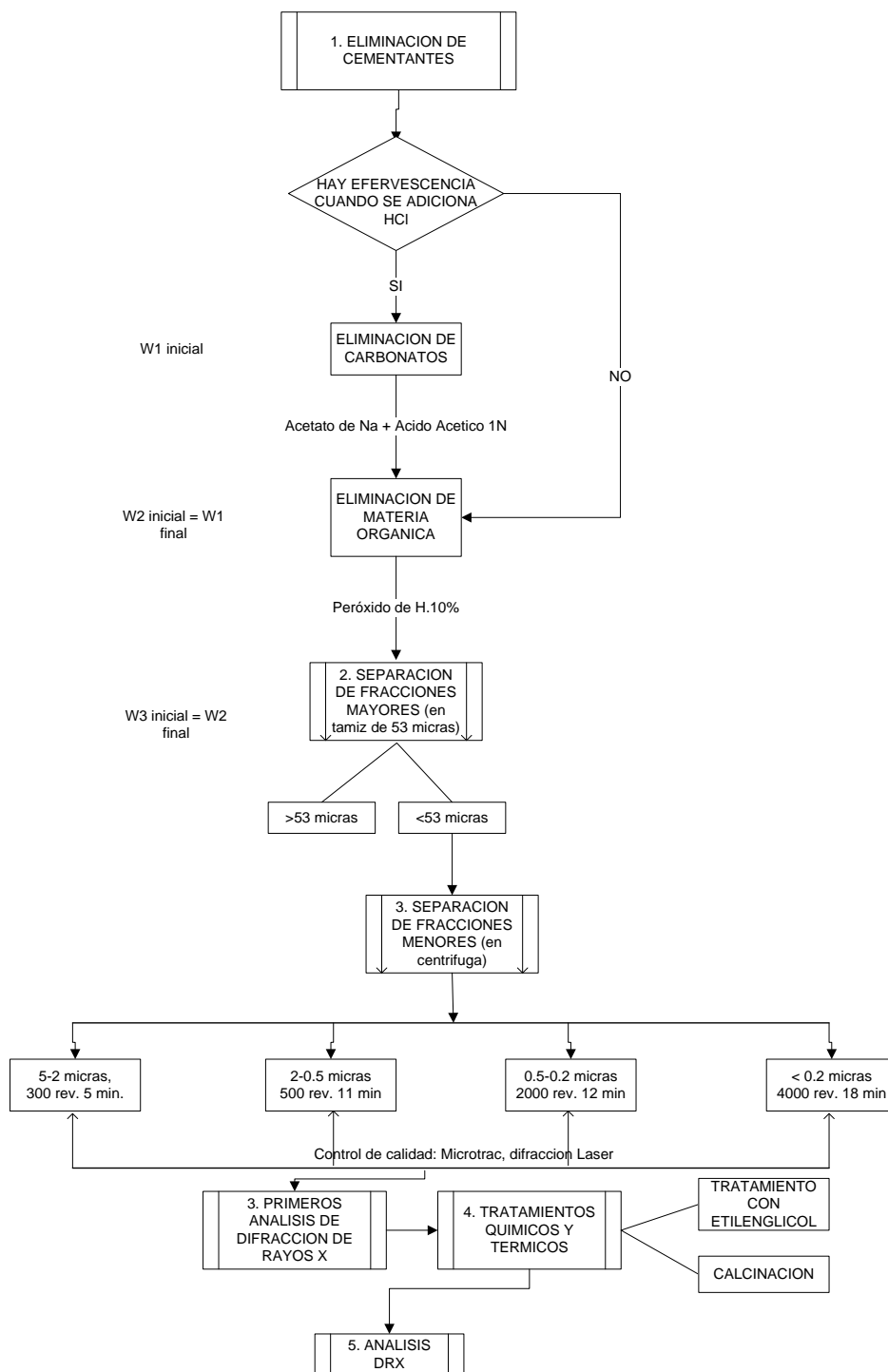


Figura 3. Metodología de preparación y análisis de muestras en la fase de difracción de rayos x. Modificado manual de procedimientos técnicos, laboratorio difracción de rayos x, ICP.

Para el análisis mineralógico, los difractogramas fueron obtenidos en un Difractometro de Rayos-X marca Siemens modelo D500, equipado con lámpara de Cu y monocromador de grafito, bajo las condiciones de medición observadas en la tabla 2, estas condiciones es para correr las muestras tanto de roca total como de las fracciones separadas.

VARIABLE	VALOR
Radiacion	Cu
Corriente	30mA
Voltaje	40kV
Tamaño de paso	0.05° 2θ
Tamaño por paso	2s
Rango de Medicion	2-65° 2θ (Roca total); 2-35°2θ(N,C); 2-20°2θ(F)

Tabla 2. Condiciones de medición. Modificado de Informe Técnico Laboratorio Difracción de Rayos X, ICP, 2010

El cálculo de la cantidad de cada mineral se hizo teniendo en cuenta que la intensidad del patrón de difracción de una fase en una mezcla guarda relación directa con su concentración, solo que esa relación no es totalmente lineal sino que guarda relación con su concentración, el efecto matricial. Por lo tanto se tuvo en cuenta la teoría de “*Matrix-Flushing*” cuya ecuación general es $I_i = AK_i CX_i$ en donde K_i : Factores inherentes a la fase i (cristalinidad, factor de estructura, densidad, coef de absorción, etc.), K : efectos matriciales del total de la muestra expuesta, X_i : fracción de peso de la fase i . la cual esta implementada en el laboratorio de difracción de rayos x del Instituto.

Microscopia Electrónica de Barrido (SEM):

Esta metodología se resume en la figura 4 que en esta fase se realizó con el microscopio electrónico Leo 1450VP, equipado con sistema de rayos X por energía dispersa OXFORD INCA alto vacío. Se trabajó sobre las muestras recubiertas con oro, ya que este permite el intercambio de carga eléctrica entre la muestra y el haz de electrones incidente. Las imágenes observadas se obtuvieron usando detector de electrones retro dispersos (BSE), los contrastes de intensidad se observaran en el modo SE que dependen principalmente de la morfología de la muestra, su interpretación es similar a la del objeto visto por encima con iluminación lateral. En el modo BSE los contrastes dependen principalmente del número atómico promedio, zonas más claras en BSE corresponden a número atómico promedio elevado, en tanto que las oscuras pertenecen a números atómicos bajos. Los rayos X característicos, por medio de los cuales se identifican los elementos presentes, son emitidos dentro de un rango de profundidades de la muestra que va desde su superficie hasta unas pocas micras. El tipo de detector EDX empleado permite detectar todos los elementos de $Z \geq 5$, que se encuentren en la zona analizada. Con el fin de minimizar los posibles errores asociados con el proceso de medición el análisis de composición elemental y con las características propias de la superficie de la muestra, se realiza con siete repeticiones sobre áreas representativas de toda la muestra, se reportan los datos promedio con la incertidumbre evaluada con base en la desviación estándar. Para cada muestra se presenta una imagen de baja ampliación con el fin de mostrar la morfología general, junto con el espectro de composición elemental, se presentan también imágenes más ampliadas de zonas de interés, junto con el análisis de composición elemental en la zona analizada. Los resultados de EDX de la muestra en general son comparados con los análisis cuantitativos de difracción de rayos x de la roca total para determinar la presencia o no de una u otra fase mineral,

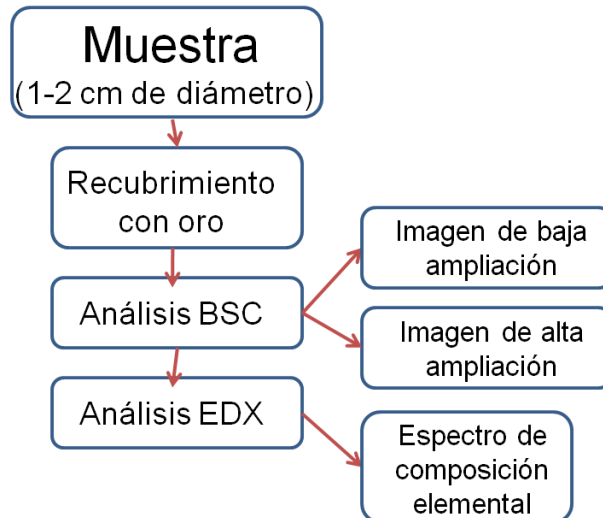


Figura 4. Metodología de preparación y análisis de muestras en microscopia electrónica de barrido.

3.2 Análisis de resultados

Para los análisis de resultados se realizaron 2 etapas que consistieron en la determinación de paleo-temperaturas y la diferenciación de los minerales arcilla según su origen.

Determinación del índice de cristalinidad de la illita: Utilizando el software Topas 4.2 desarrollado por Bruker, conociendo las condiciones de medición de las muestras que en este caso serian goniómetro de 435, ángulo soler de 2 y slit de 1.5, se ubica el pico de 10 Å y se determina el FWHM que equivale al ancho a media altura de este pico. Una vez determinada la relación de Kubler, este se relaciona con la temperatura máxima de la illita.

Cuantificación del porcentaje de capas expandibles en los interestratificados Illita-esmectita (I/S): La estimación de la cantidad de capas de esmectita en los interestratificados está basada en comparación sistemática de los resultados, fundamentos teóricos de forma, aparición, desaparición y corrimiento de los picos. La estimación de los porcentajes se lleva a cabo mediante la comparación de la posición de los picos de este mineral en las fracciones entre 2-0.5 micras analizada en condiciones normales y utilizando la tabla recopilada por Spalleti, 2009 (tabla 3). De este porcentaje se deducen la temperatura máxima a la que estuvo la roca que le contiene.

Posicion del Pico I/S (muestra natural)	Porcentaje de Capas Expansivas
10,25-10,45 Å	20-30
10,45-10,90 Å	30-40
10,90-11,10Å	40-50
11,10-11,40Å	50-60
11,40-11,80Å	60-70
11,80-12,26Å	70-80

Tabla 3. Ubicación del pico de interestratificados y porcentaje de capas expansivas.

Diferenciación de las arcillas pre y sin-diagenéticas Por medio de la cuantificación de los minerales arcilla presentes en cada una de las fracciones que se obtengan de las muestras analizadas y con el apoyo de los resultados obtenidos en Microscopia Electrónica de Barrido para definir la morfología general de los minerales arcilla presentes en la roca, se realiza la diferenciación de los minerales arcillosos según sea su origen pre y sin-diagenético, esto teniendo en cuenta las características presentadas por Wilson y Pittman en 1977, fueron adaptadas a rocas de grano fino ya que ellos trabajaron y propusieron estas características para minerales arcilla presentes en la matriz de areniscas, por lo tanto para este caso se tuvo en cuenta que los minerales arcilla de origen sin-diagenético están presentes en las fracciones menores a 0.5 micras, y que serán

minerales con morfología muy bien definidas que será observada en imágenes de alta ampliación y que además van a ser bastante cristalinos característica determinada en los difractogramas resultado del análisis por difracción de rayos x.

Calibración de resultados de paleo-termometría: Los resultados de paleo-termometría obtenidos son calibrados con datos de reflectancia de vitrinita, obtenidos en análisis realizado por personal del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), por medio de la metodología propuesta por Guthrie *et al.* 1986, quienes muestran la relación logarítmica que existe entre la reflectancia de la vitrinita y el índice de cristalinidad de la illita, por lo tanto se presenta una grafica donde se muestra la relación del índice de cristalinidad con la reflectancia de la vitrinita.

Presentación de resultados se presenta los difractogramas de roca total de cada una de las muestras, así como de las fracciones separadas con la determinación cuantitativa de cada uno de los minerales, junto con las imágenes obtenidas por microscopia electrónica de barrido y los espectros de composición elemental. Así también se presenta la determinación de la temperatura máxima alcanzada por la roca de cada formación en tablas y graficas que muestran la relación de esta temperatura en cada una de las zonas de la cuenca.

4. GENERALIDADES

Se trabajó con muestras distribuidas en cuatro zonas de la Cordillera Oriental (Figura 5), la Sabana de Bogotá, una zona intermedia entre los municipios de Chita (Boyacá) y Hato Corozal (Casanare), una zona cercana a la frontera con Venezuela entre los municipios de Cubará (Arauca) y Pamplona (Norte de Santander), y una muestra de la Serranía de San Lucas, las formaciones a las que pertenece cada muestra se nombran en la misma figura 5:

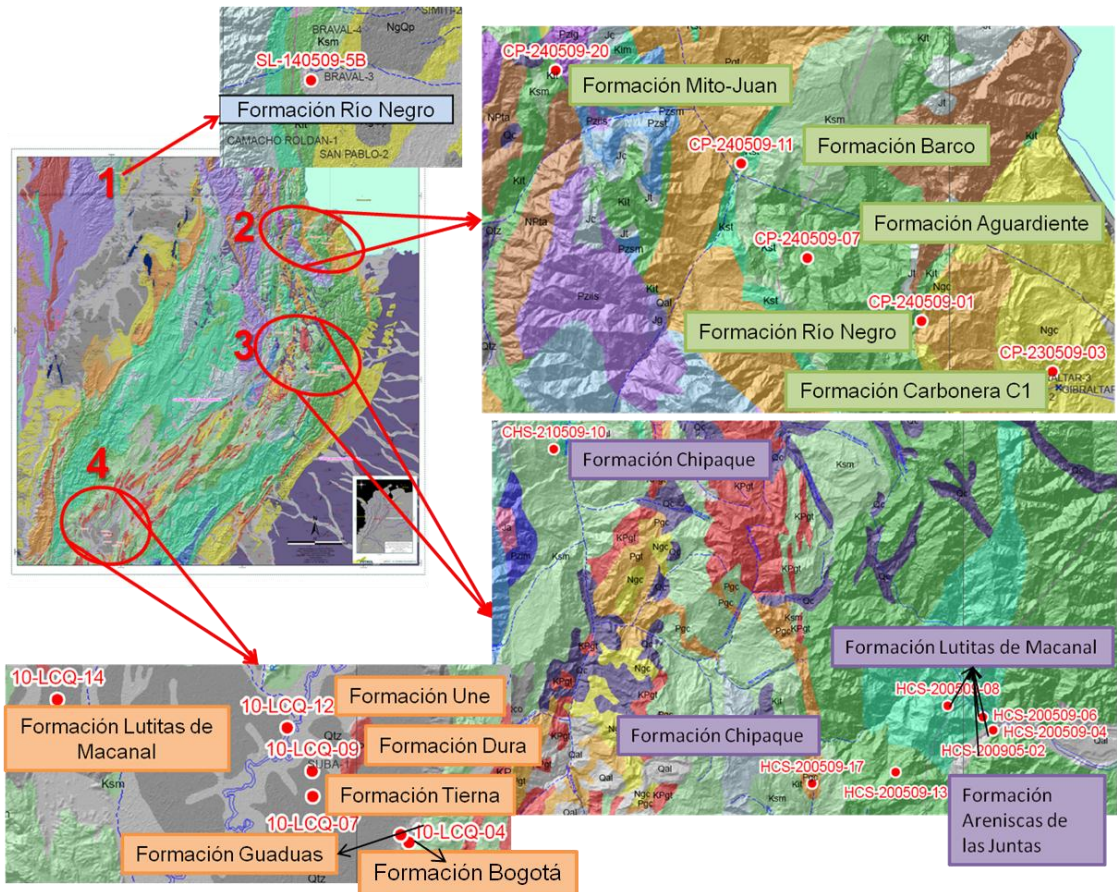


Figura 5. Mapa de localización de muestras, modificado del mapa elaborado por el grupo de información geográfica del ICP.

1. Serranía de San Lucas
2. Cubara-Pamplona
3. Chita-Hato Corozal
4. La Calera-Quetame

5. MARCO GEOLOGICO

Las muestras utilizadas en esta tesis fueron tomadas a lo largo de la Cordillera Oriental, ya que es el objetivo del proyecto de la deformación de Cuencas Subandinas, esto para observar el comportamiento de la temperatura máxima en toda la cordillera.

5.1 REGIONAL

La Cuenca Cordillera Oriental, cinturón plegado que tiene una extensión de 71.766 Km². Se encuentra localizada entre el valle del río Magdalena y la Cuenca de los Llanos Orientales. "Posee un basamento Precámbrico, cubierto discordantemente por meta-sedimentos del Paleozoico Inferior y sedimentos del Paleozoico Superior. Encima de las rocas paleozoicas fracturadas por tectónica distensiva se encuentra una espesa secuencia de rocas sedimentarias con edades que van desde el Jurásico hasta el Terciario Inferior, que rellenaron la cuenca de rift. Encima hay depósitos continentales del Terciario y Cuaternario, que se han conservado localmente. Entre el Berriasiano y Hauteriviano existía un delta al norte del graben. Durante el Albiano se presentó la progradación hacia el occidente de las areniscas de varios deltas, que constituyeron la Formación Une. Las mejores facies de roca generadora (lodolitas y calizas micríticas negras, con materia orgánica de origen planctónico) se depositaron durante la transgresión del Cretácico Superior (Formaciones La Luna y Simití). Del Santoniano al Maastrichtiano avanzó la secuencia del Delta del Guadalupe, rellenando progresivamente toda la cuenca hacia el norte y noroccidente. A finales del Maastrichtiano se presentó la orogénesis Calima, generando los depósitos continentales de la Formación Guaduas. Algunas fallas normales se reactivaron luego como fallas inversas. Las fallas con vergencia oriental formaron los thrusts principales, y las que tienen vergencia occidental se pueden clasificar como retro-cabalgamientos.

Las rocas del Grupo Villeta y las Formaciones Guadalupe, Guaduas, Cacho y Bogotá, se encuentran hoy fuertemente plegadas, falladas y diaclasadas por la orogenia del Eoceno Medio. Estas unidades fueron peneplanadas y recubiertas, en el borde oriental de la cuenca, por las Formaciones Regadera y Usme (Terciario Inferior). Durante las Orogenias Protoandina y Andina (Mioceno Inferior a Plioceno Medio; 16.5 a 3.0 millones de años), los pliegues y fallas del Cretáceo y del Terciario Inferior se acentuaron y la región, ya continental, con valles y montañas inicialmente en un clima tropical húmedo a escasa elevación sobre el nivel del mar, sufrió los rigores normales de la erosión subaérea mientras paulatinamente se elevaba 3.000 m para constituir la actual Cordillera Oriental. Esto obviamente trajo consigo una profunda modificación en el régimen climático, los patrones de erosión, y las cuencas hidrográficas. Las Formaciones Tilatá, Sabana y Tunjuelo son depósitos lagunares, fluviales y fluvio-glaciares depositados en el centro y en los bordes de la cuenca durante los últimos 3.5 millones de años". (Lobo-Guerrero A., 1990)

5.2 GEOLOGÍA AREA DE APLICACIÓN

Las secciones estratigráficas de las cuales se obtuvieron las muestras están distribuidas a lo largo de la cordillera oriental, de norte a sur se tiene la transecta Cubara-Pamplona en la cual se muestrearon 5 formaciones (Rio Negro, Aguardiente, Mito-Juan, Barco y Carbonera C1), de la transecta Chita-Hato Corozal parte media de la cordillera se obtuvieron 7 muestras (4 de la Formación Lutitas de Macanal, 2 de la Formación Chipaque y una de la Formación Areniscas de las Juntas), la ubicación estratigráfica de cada una de las formaciones se observa en la figura 6.

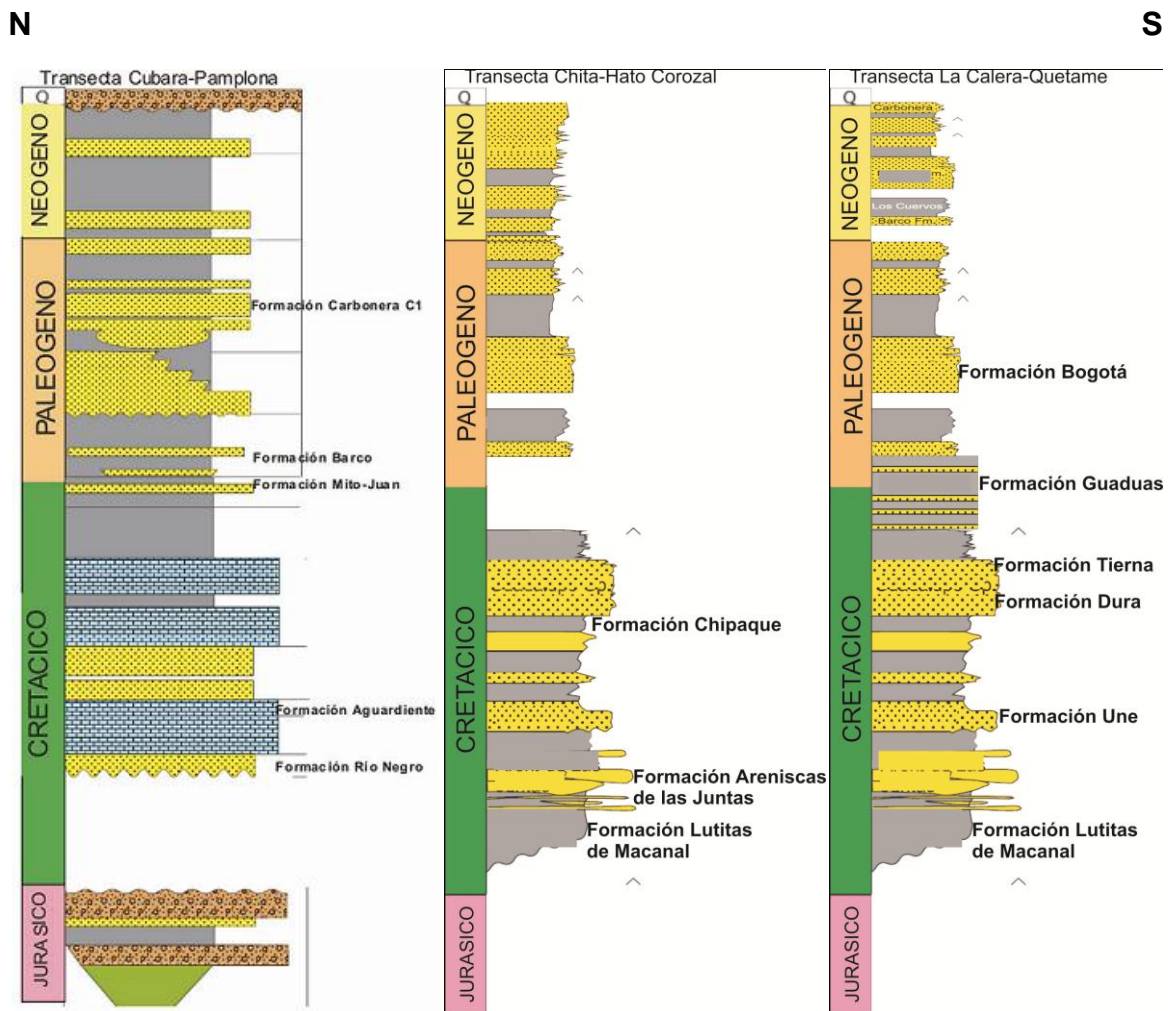


Figura 6. Esquema de las formaciones muestreadas en cada transecta. Modificado Barrero *et al*, 2007

TRANSECTA LA CALERA-QUETAME

5.2.1 Formación Lutitas de Macanal: Conjunto de lutitas negras (lodolitas y arcillolitas físciles) con esporádicas intercalaciones de calizas, de pocos metros de espesor, que afloran en el cañón del río Batá, donde se encuentra la localidad tipo, que constituye la parte media del Grupo Cáqueza. Forman la parte media del Grupo Cáqueza y bajo esta denominación se describe un conjunto monótono de lutitas negras, fosilíferas, con delgadas intercalaciones de arenitas de cuarzo y ocasionales lentejones de yeso. (ULLOA y RODRÍGUEZ, 1979).

5.2.2 Formación Une: arenitas de cuarzo de grano fino, estratificación plano-paralela, en capas delgadas, algunas capas presentan estratificación fláser. Supra-yacidas por arenitas de cuarzo, de grano fino a grueso; algunos estratos presentan lentes conglomeráticos con guijos de cuarzo. La estratificación varía de plano-paralela a ondulada no paralela. En esta formación también se presenta una alternancia de lodolitas y Cuarzoarenitas. Representa condiciones de depositación netamente marinas. (Tomado Ulloa et al, 2001).

5.2.3 Formación Dura: Corresponde a la parte inferior del Grupo Guadalupe Segmento A. Está representado por capas gruesas a muy gruesas de areniscas cuarzosas de color gris claro de grano muy fino, muy bien seleccionadas, clasto-soportadas y muy compactas; interestratificadas con capas gruesas tabulares de lodolitas arenosas de color gris oscuro con abundantes foraminíferos bentónicos y abundante moscovita. Segmento B. Constituido por arcillolitas arenosas color gris oscuro bastante bio-turbadas y abundante moscovita. Se encuentran intercalaciones de capas de arenita cuarzosa de color gris oscuro y en general las capas son tabulares a lenticulares. Segmento C. constituido por capas gruesas a muy gruesas de arenisca cuarzosa, de color gris claro de grano fino intercaladas con capas de arcillolitas. (Tomado De Fuquen J. y Osorno J.F. Geología De La Plancha 190-Chiquinquirá Bogotá D.C, Febrero De 2005)

5.2.4 Formación Tierna o Arenisca Tierna: Constituida de arenitas de cuarzo de grano fino a grueso, en estratos medios a gruesos, con delgadas intercalaciones de lodolitas gris oscuro; la estratificación es plano-paralela y plano no paralela a ondulada, estratos con láminas inclinadas. Algunos estratos están bioturbados. (Tomado De Fuquen J. y Osorno J.F. Geología De La Plancha 190-Chiquinquirá Bogotá D.C, Febrero De 2005)

5.2.5 Formación Guaduas: Litológicamente presenta dos segmentos el primero se trata de un segmento predominantemente lodolítico el segundo es un segmento predominantemente arenoso. (Tomado De Fuquen J. y Osorno J.F. Geología De La Plancha 190-Chiquinquirá Bogotá D.C, Febrero De 2005)

5.2.6 Formación Bogotá: Compuesta casi exclusivamente por arcillolitas abigarradas (grises, violáceas, moradas y rojas) bien estratificadas con algunos bancos de areniscas micáceas de grano fino hacia la parte superior de la unidad, depositada en un ambiente de llanura de inundación (Tomado de Lobo Guerrero, 1993).

TRANSECTA CHITA-HATO COROZAL

5.2.7 Formación Areniscas de las Juntas: Areniscas de cuarzo de color gris claro a gris oscuro, grano medio a fino, con cemento silíceo, en bancos gruesos, estratificación plano-paralela y algunos estratos con láminas inclinadas supra-yacidos por paquetes de arenisca de cuarzo separados por paquetes de lodolitas y arcillolitas las areniscas son de grano fino a medio, estratificación plano-paralela a plana ondulada lenticular, color gris claro a gris oscuro. Las lodolitas y arcillolitas son físciles, presentan niveles de restos de plantas, capas muy delgadas de carbón y pirita diseminada. La formación fue depositada en un ambiente marino deltaico (Tomado Ulloa *et al*, 2001).

5.2.8 Formación Chipaque: Esta constituida principalmente por lodolitas y areniscas finas muy bio-turbadas. El miembro medio se caracteriza por la presencia de varios niveles de caliza bio-detrítica arenosa, rica en lamelibranquios; la importancia de los niveles calcáreos varía mucho lateralmente; las lodolitas y areniscas finas intercaladas presentan una bio-turbación menos intensa que en el miembro inferior. (Tomado De Reseña Explicativa Del Mapa Geológico Preliminar Plancha 153 Chita Escala 1: 100.000 Por Antoine Fabre Mauricio Osorio Rodrigo Vargas Bioestratigrafía Por Fernando Etayo Bogotá D.C. 1983).

TRANSECTA LA CALERA-QUETAME

5.2.9 Formación Rio Negro: Está constituida por areniscas y conglomerados de granulometría y composición variada con esporádicas intercalaciones de arcillolitas y limolitas grises y pardas. (Tomado De Geología De La Plancha 48 La Jagua De Iberico Escala 1:100.000 Memoria Explicativa 2003).

5.2.10 Formación Aguardiente: Constituida por areniscas de cuarzo, blancas, gris verdosas y amarillentas, comúnmente glauconíticas, grano fino a grueso, con algunos niveles conglomeráticos; localmente feldespáticas, calcáreas, micáceas y piritosas, con materia orgánica asociada a los planos de estratificación, con delgadas intercalaciones de lodolitas grises y gris claras. En la parte inferior se presentan conglomerados gris claros a blanco amarillentos, constituidos por fragmentos de cuarzo lechoso, subredondeados, en una matriz arenosa, bien cementada. Hacia la parte superior se presentan intercalaciones de lodolitas grises a negras, carbonosas y micáceas. Según García *et al.* (1980), esta unidad se depositó en un ambiente litoral de playas y lagunas; para Fabre (1985) representa un frente deltaico. (Tomado De Plancha 111 Toledo Norte De Santander Escala 1:100.000 Memoria Explicativa 2001)

5.2.11 Formación Mito-Juan: Esta formación consta principalmente de arcillas pizarrosas gris verdoso, arcillas limolíticas y arcillas arenosas, notándose un aumento de las arenas hacia la parte superior. En la parte inferior hay arenas pizarrosas gris oscuras semejantes a las de la formación Colón; a diferencia de aquellas, las arcillas del Mito Juan no son calcáreas. Hacia la parte alta hay delgadas capas de calizas ferruginosas, fosilíferas, arenosas y glauconíticas. La formación Mito Juan reposa concordantemente sobre la formación Colón y su

contacto en los registros eléctricos es bien definido. Este contacto también se puede determinar a base de foraminíferas. El espesor de la formación tiene un promedio de 455 m. La edad es Maestrichtiano. (Tomado De Memoria Del Cuadrángulo G-13 Cúcuta)

5.2.12 Formación Barco: Areniscas de cuarzo, grises a gris amarillentas, bien calibradas, localmente micáceas y feldespáticas, grano medio, grueso a ligeramente conglomeráticas, en capas planas entre 0,5 y 5 m de espesor, con estratificación cruzada. Hacia el techo se presentan areniscas arcillosas, de grano fino a medio, en capas de 15 a 30 cm de espesor, con delgadas intercalaciones de lodolitas grises a negras, con laminación plana paralela y sub-paralela, con restos carbonosos, con laminación interna paralela, sub-paralela e inclinada; localmente se encuentra en capas con laminación flaser, con abundantes restos carbonosos. Hacia la base de la unidad, la estratificación se hace más delgada y el grano es más fino. En el tope también las capas son menos espesas y las intercalaciones de lodolitas y de areniscas de grano fino son más abundantes (Tomado De Plancha 111, Toledo Norte De Santander Escala 1:100.000 Memoria Explicativa 2001)

5.2.13 Formación Carbonera C1: Consta de una serie de arcillolitas intercaladas con areniscas y algunos mantos de carbón en la parte inferior y en el tope de la formación. Las arcillas son de color gris, comúnmente abigarradas y sideríticas; en la parte inferior y superior de la formación hay algunas arcillas Pizarrosas de color gris oscuro. Las areniscas son de color gris verdoso de grano fino a grueso y algo arcillosas; en las partes inferior y superior estas Areniscas son localmente glauconíticas; en estos mismos intervalos hay pequeñas capas de caliza. La edad de la formación va del Eoceno Superior al Oligoceno Inferior (Van der Hammen). (Tomado Memoria Del Cuadrángulo G-13 Cúcuta).

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados de los análisis realizados se muestran en el anexo 1, donde se presentan muestra por muestra los difractogramas de roca total, imágenes de microscopía electrónica de barrido estas imágenes fueron tomadas con el fin de conocer la morfología de los minerales presentes en cada una de las muestras analizadas y que junto con sus características de cristalinidad y de tamaño permiten hacer la caracterización de los minerales arcilla según su origen, los espectros de composición elemental general de cada una de ellas. Los análisis realizados a cada una de las muestras se listan en la tabla 4.

	Coordenadas		MUESTRA		ANÁLISIS REALIZADOS		
					DRX	SEM	VITRINITA
TRANSECTA LA CALERA-QUETAME	1004300	1007532	10-LCQ-02	Formación Bogotá	X	X	
	1003627	1008168	10-LCQ-04	Formación Guaduas	X	X	
	996409	1011250	10-LCQ-07	Formación Tierna	X	X	
	996367	1013302	10-LCQ-09	Formación Dura	X	X	
	994313	1016824	10-LCQ-12	Formación Une	X	X	
	975461	1019107	10-LCQ-14	Formación Macanal	X	X	
	865902	1276754	CP-240509-01	Formación Río Negro	X	X	X
TRANSECTA CUBARA-PAMPLONA	878313	1271936	CP-230509-03	Formación Carbonera C1	X	X	X
	855081	1282733	CP-240509-07	Formación Aguardiente	X	X	X
	848853	1291653	CP-240509-11	Formación Barco	X	X	X
	1162610	1300480	CP-240509-20	Formación Mito-Juan	X	X	X
TRANSECTA CHITAHATO COROZAL	871.085	1.166.234	HCS-200509-04	Formación Lutitas de Macanal	X	X	
	866.190	1.168.876	HCS-200509-08	Formación Lutitas de Macanal	X	X	
	860.532	1.161.828	HCS-200509-13	Formación Areniscas de las Juntas	X	X	
	851.479	1.160.661	HCS-200509-06	Formación Lutitas de Macanal	X	X	
	869.990	1.167.641	HCS-200905-02	Formación Lutitas de Macanal	X	X	
	871.085	1.166.234	HCS-210509-10	Formación Chipaque	X	X	
	1.155.715	1.196.436	SL-140509-5B	Formación Río Negro	X	X	
Serranía de San Lucas	1.007.999	1.340.889	HCS-200509-17	Formación Chipaque (Chert)	X		

Tabla 4. Relación de muestras con los análisis realizados.

Los resultados que a continuación se presentan se derivan de los análisis por difracción de rayos x, microscopía electrónica de barrido y reflectancia de vitrinita que se hicieron a cada una de las muestras.

6.1 MINERALOGIA DE LAS ARCILLAS

La determinación de cuantitativa de los minerales arcilla presentes en cada una de las muestras se realizo en roca total y en cada una de las fracciones separadas, teniendo en cuenta los tratamientos químicos y térmicos realizados a las muestras de las fracciones separadas.

Se observa que todas las muestras a excepción de la muestra HCS-200509-17 de la Formación Chipaque, presentan alto contenido de minerales arcilla, solo se diferencian de este conjunto de muestras las muestras de la Formación Tibú-Mercedes tomada entre el municipio de Chita (Boyacá) y Hato Corozal (Casanare) y de Lutitas de Macanal de la misma zona en donde se observa contenido de pirofilita y las muestras de las formaciones Tierna, Guaduas de la Sabana de Bogotá y de la Formación Mito-Juan tomada entre Cubara (Boyacá) y Pamplona (Norte de Santander) las cuales presentan contenido de pirita.

6.1.1 TRANSECTA LA CALERA-QUETAME

En esta transecta se observa que la cantidad de minerales arcilla en cada una de las muestras y fracciones separadas, solo se observa que a tope de esta secuencia estratigráfica se observa la presencia de hematita la cual en el resto de las formaciones no se observa, así también se observa que a la base de la secuencia hay la presencia de rutilo y solo en esa formación.

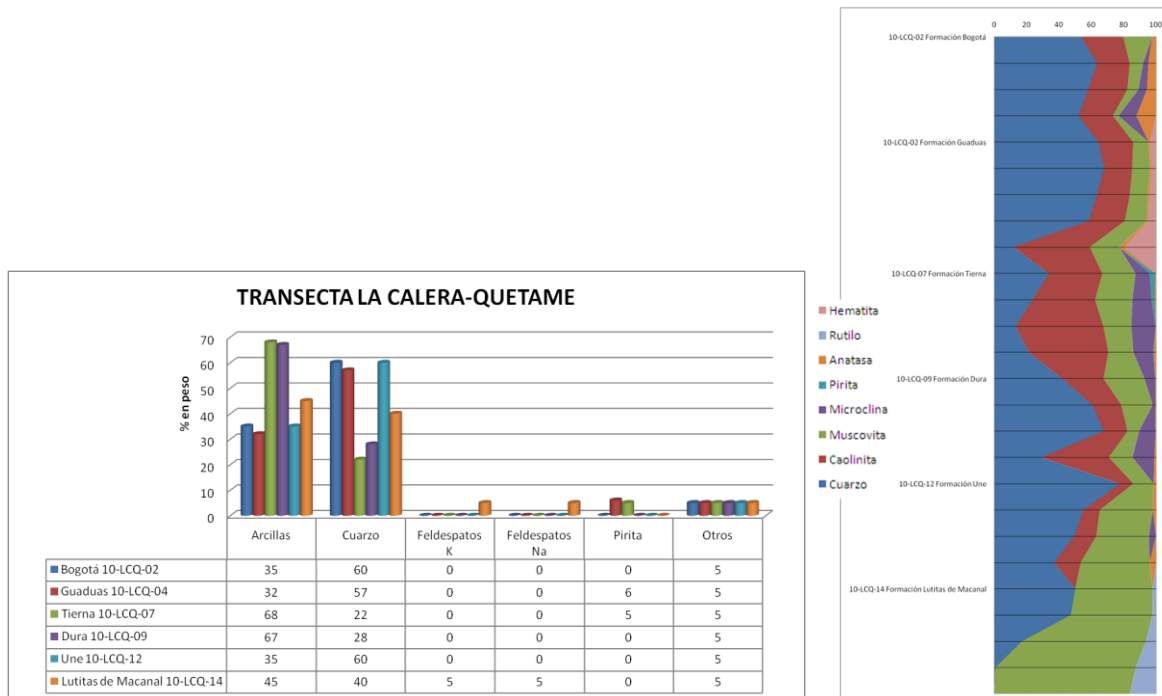


Figura 7. Histograma de composición mineralógica en roca total y grafica de composición en fracciones separadas de cada una de las muestras analizadas, transecta La Calera-Quetame.

A continuación se presentan los resultados de los análisis de morfología, cristalinidad y cantidad de minerales arcilla en cada una de las muestras en cada formación.

FORMACIÓN BOGOTÁ

Muestra 10-LCQ-02: En esta muestra el cuarzo se mantiene presente en todas las fracciones separadas siendo el mineral predominante. La caolinita está presente en todas las fracciones y no presenta cambios significativos en la concentración, así también la moscovita. La anatasa aumenta su concentración a medida que disminuye el tamaño de la fracción separada así como la microclina. Esta muestra contiene minerales arcilla de tamaño muy fino y con bordes regulares.

FORMACION GUADUAS

Muestra 10-LCQ-04: Esta muestra permitió la separación de todas las fracciones propuestas en la metodología, en ella el cuarzo permanece presente en todas las fracciones aunque disminuyendo su concentración a medida que disminuye el tamaño de la fracción separada. La caolinita mantiene una concentración constante en todas las fracciones separadas así como la moscovita. La anatasa está presente en todas las fracciones presentando su máximo en la fracción menor de 0.5 micras. En esta muestra se presenta hematita cuya concentración aumenta a medida que se disminuye el tamaño de la fracción separada. Los minerales arcilla de esta muestra son muy finas y además muestran bordes regulares.

FORMACIÓN TIERNA

Muestra 10-LCQ-07: En esta muestra hay presencia de cuarzo, caolinita, moscovita, pirita, microclina y anatasa. De estos minerales el que mayor concentración presenta y es más homogénea en todas las fracciones es la caolinita, el cuarzo disminuye con el aumento del tamaño de las fracciones separadas. La pirita está presente en mayor concentración en la roca total y en las fracciones mayores, solo se encuentran trazas en las fracciones menores. Y la microclina está presente en todas las fracciones. En esta muestra predominan los minerales arcilla con bordes irregulares y de tamaño mayor al observado en la muestra anterior, así también se observa la presencia de pirita como polvillo en ciertas zonas de la muestra.

FORMACION DURA

Muestra 10-LCQ-09: En esta muestra la concentración del cuarzo es mayor que la del resto de minerales en todas las fracciones, la caolinita está presente en todas las fracciones en concentraciones muy similares, a moscovita está también presente en todas las fracciones, la anatasa se presenta como traza en todos los tamaños de fracciones separados. Y por último la microclina está presente en los tamaños de fracciones de una forma constante. Esta muestra contiene minerales arcilla con bordes irregulares y presentan un buen ordenamiento.

FORMACION UNE

Muestra 10-LCQ-12: Los minerales que predominan en esta muestra es el cuarzo y la moscovita, la caolinita presenta una concentración constante en todos los tamaños de fracción separados. La anatasa está presente en el mayor y menor tamaño separado y la microclina solo se encuentra en fracciones de tamaño comprendido entre 5-2 micras. Los minerales presentan hábitos cristalinos mejor definidos, así también hay presencia de materia orgánica representada por las partes más oscuras que se observan en las imágenes, así mismo se observa que los cristales son muy finos.

FORMACION MACANAL

Muestra 10-LCQ-14: En esta muestra la moscovita es el mineral más predominante, el cuarzo está presente solo en la muestra total y en la fracción de mayor tamaño, la caolinita se presenta en pequeñas cantidades en todas las fracciones así como el rutilo. Los minerales arcilla presentan un menor tamaño a de los minerales observados en las otras muestras y que la morfología de estos está mejor definida ya que los bordes de los cristales está bien definidos.

6.1.2 TRANSECTA CHITA-HATO COROZAL:

En esta transecta los minerales arcilla se comportan de una forma más regular y todos los minerales están presentes en todas las fracciones

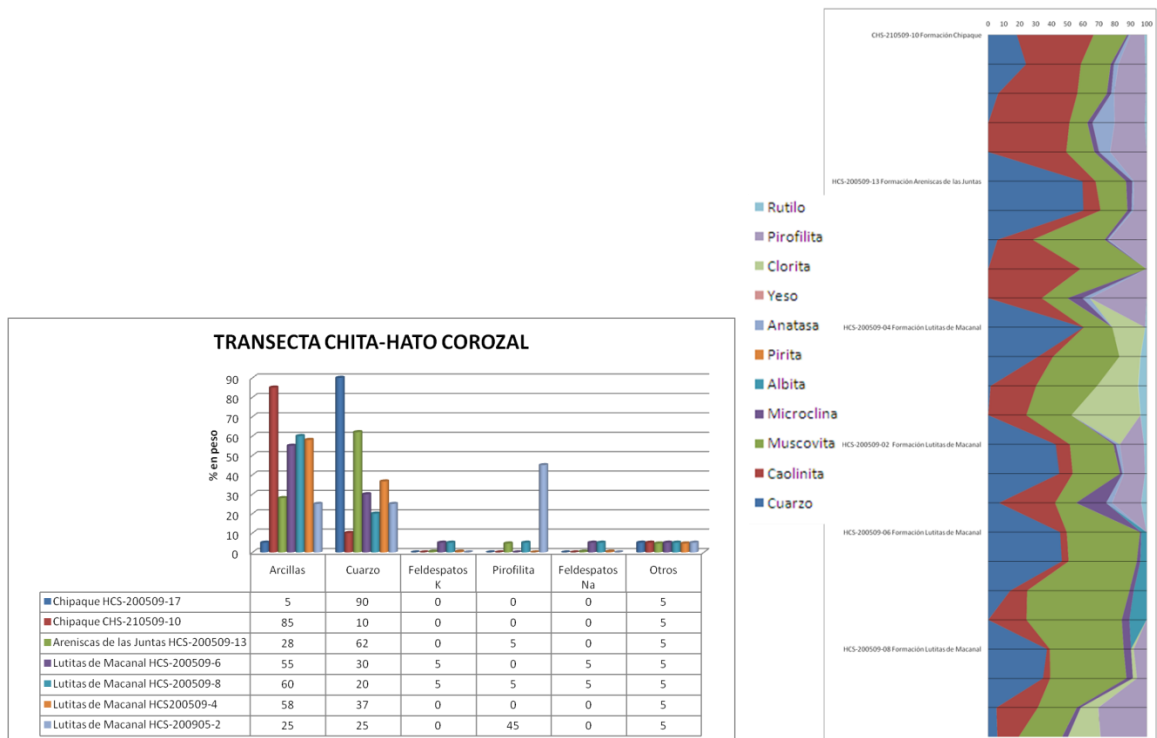


Figura 8. Histogramas de composición mineralógica en roca total y grafico de fracciones separadas de cada una de las muestras analizadas transecta Chita-Hato Corozal..

FORMACIÓN CHIPAQUE

Muestra CHS-210509-10: En esta muestra la presencia de caolinita es alta y aumenta a medida que disminuye el tamaño de la fracción separada. El cuarzo como en la mayoría de las muestras disminuye su concentración a medida que se disminuye en el tamaño de la fracción separada. La moscovita, la pirofilita mantienen una concentración constante en todas las fracciones separadas, la anatasa presenta su máximo de concentración en la fracción entre 2-05 micras, el rutilo está presente en una concentración muy mínima en todas las fracciones a excepción de la menor de 05 micras. La microclina es constante en todas las fracciones. Esta muestra es bastante homogénea en cuanto a la morfología de los minerales arcilla allí presentes y además no se observan morfologías bien definidas, al contrario se ven bordes irregulares.

Muestra HCS-210509-17: Esta es una muestra de chert.

FORMACIÓN ARENISCAS DE LAS JUNTAS

Muestra HCS-200509-13: De esta muestra se pudo hacer la separación de todas las fracciones propuestas en la metodología, el cuarzo disminuye su concentración a medida que disminuye la fracción separada, la caolinita aumenta su concentración a medida que disminuye la fracción, la Moscovita está presente en todas las fracciones alcanzando su máxima concentración en la fracción entre 5-2 micras, la microclina está presente en todas las fracciones, se ve su menor concentración en la fracción entre 5-2 micras. La Anatasa está presente en todas las fracciones a excepción de la fracción comprendida entre 2-0.5 micras, al igual que la pirofilita. En esta muestra los minerales arcilla tienen una morfología más definida y que los cristales son un poco más grandes. Se nota una monotonía en la morfología.

FORMACION LUTITAS DE MACANAL

Muestra HCS-200905-02: Esta muestra solo presenta fracciones hasta 5-2 micras, y los minerales están distribuidos así: el cuarzo disminuye con la disminución de las fracciones, la caolinita aumenta su concentración cada que disminuye el tamaño de la fracción separada. La moscovita está presente en todas las fracciones solo que en la fracción menor disminuye un poco esta concentración. El rutilo está presente en todas las fracciones separadas solo que en la fracción menor esta concentración aumenta. La Pirofilita presenta una concentración constante en todas las fracciones separadas. La microclina aumenta su concentración con la disminución del tamaño de las fracciones. No se observa morfologías bien definidas en los minerales arcilla, así también se ve que la muestra es muy homogénea.

Muestra HCS-200509-06: De esta muestra se separaron fracciones de 53-5, 5-2 y 2-0.5 micras, el mineral predominante tanto en el roca total como en la fracción mayor (53-5 micras) es el cuarzo, ya en la fracción menor no hay presencia de cuarzo allí predomina la moscovita así como en la fracción entre 5-2 micras. La caolinita aumenta su concentración a medida que disminuye el tamaño de la fracción separada así como la Microclina, la Albita tiene una concentración mayor

que la Microclina y esta aumenta a medida que disminuye el tamaño de la fracción. Los minerales arcilla de esta muestra tienen una morfología más definida que en las anteriores muestras.

Muestra HCS-200509-08: En esta muestra se pudo realizar la separación de fracciones hasta 2-0.5 micras, en estas fracciones el cuarzo disminuye su concentración a medida que disminuye la fracción sin desaparecer. La caolinita aumenta su concentración a medida que disminuye el tamaño de la fracción separada. La Muscovita está presente en todas las fracciones, solo que en la fracción entre 53-5 micras es mucho mayor su concentración. La microclina, en menor cantidad que los anteriores minerales, pero también está presente en forma constante en las fracciones separadas.

Se observa que esta muestra se caracteriza por presentar zonas en donde los cristales de minerales arcilla son más grandes y zonas en donde estos son más pequeños y no presentan una organización especial lo que si sucede con las otras zonas. En esas zonas donde son más grandes los minerales estos presentan una morfología caracterizada por bordes irregulares, mientras que las de menor tamaño son un poco más regulares sin llegar a presentar sus hábitos cristalinos definidos.

Muestra HCS-200509-04: En esta muestra se evidencia la presencia del Rutilo que anteriormente en ninguna muestra se había determinado, el cuarzo como en todas las muestras disminuye su concentración a medida que disminuye la fracción, con la caolinita pasa lo contrario ya que aumenta el contenido a medida que se disminuye en la fracción separada así como la clorita. El rutilo está presente en concentración constante en todas las fracciones separadas. Se evidencia una morfología más definida de algunos de los cristales de los minerales arcilla allí presentes. Aunque hay zonas en donde se sigue evidenciando la presencia de minerales ordenados pero cuyos bordes son irregulares.

6.1.3 TRANSECTA CUBARA-PAMPLONA

En esta transecta los minerales arcilla presentan un comportamiento menos uniforme y se observan formaciones en donde no hay presencia de minerales que en el resto de las formaciones si están, este es el caso de la pirita, rutilo y clorita.

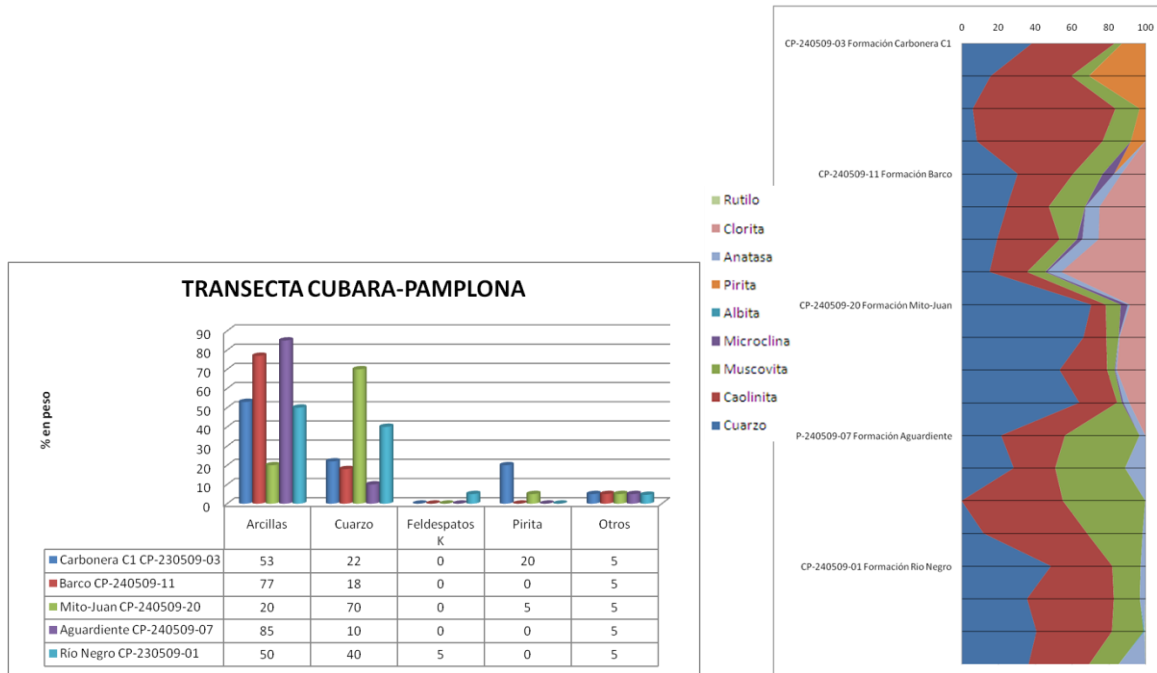


Figura 9. Histogramas de composición mineralógica en roca total y grafico de composición en fracciones de las muestras de la transecta Cubara-Pamplona.

FORMACION CARBONERA C1

Muestra CP-230509-03: Por lo análisis de difracción de rayos x se determina la alta concentración de la caolinita y la disminución de la concentración de la moscovita así como también la alta concentración de la pirita con respecto a las demás muestras analizadas. En esta muestra hay una considerable concentración de pirita y de cuarzo, así también se evidencia que los minerales arcilla son muy finos y presentan bordes regulares.

FORMACION BARCO

Muestra CP-240509-11: Esta muestra presenta más variedad de minerales, siendo la clorita la más abundante y con menor variabilidad en los diferentes tamaños de fracción separados. La caolinita presenta una distribución homogénea en todas las fracciones, así como la moscovita y el cuarzo. La microclina está presente en todas las fracciones solo que en menor cantidad que los minerales antes mencionados. Los minerales arcilla presentes en esta muestra no presentan

morfología específica sino que se ven apilados y sus bordes son muy irregulares. Tienen un mayor tamaño al observado en las anteriores muestras

FORMACION MITO-JUAN

Muestra CP-240509-20: En esta muestra predomina la presencia de cuarzo, y la caolinita se presenta en concentraciones muy homogéneas en todas las fracciones al igual que la moscovita y la clorita, la anatasa está presente en menor cantidad que el resto de los minerales y su mayor concentración se presenta en la fracción menor de dos micras al igual que la microclina. Así también en esta muestra los minerales arcilla presentan bordes más regulares, también son de menor tamaño esto concluido porque se hace necesario un mayor aumento para poder observar los cristales.

FORMACION AGUARDIENTE

Muestra CP-240509-07: En esta muestra se presenta alto contenido de caolinita y de moscovita, así también se tiene la presencia de anatasa en las fracciones de mayor tamaño. El cuarzo presenta el mismo comportamiento de muestras antes descritas ya que disminuye su concentración a medida que disminuye el tamaño de la fracción. Hay una mayor cantidad de minerales arcilla de menor tamaño que presentan bordes mejor definidos aunque hay cristales de mayor tamaño que exhiben bordes mejor definidos.

FORMACION RÍO NEGRO

Muestra CP-240509-01: Esta muestra tiene presencia de la caolinita en todas las fracciones separadas de una forma igual, así como la moscovita, el cuarzo está presente en todos los tamaños de fracción separada, la anatasa se concentra en todas las fracciones de una forma equitativa. Así también en esta muestra los minerales arcilla son de menor tamaño a los vistos en otras muestras estos minerales están recubriendo cristales de cuarzo de mayor tamaño y así también se observa que los bordes de los cristales pequeños son más regulares.

6.1.4 SERRANIA DE SAN LUCAS

En esta Formación se observa un comportamiento similar al de esta misma formación en la transecta Cubara-Pamplona, solo que el rutilo esta en un menor porcentaje.

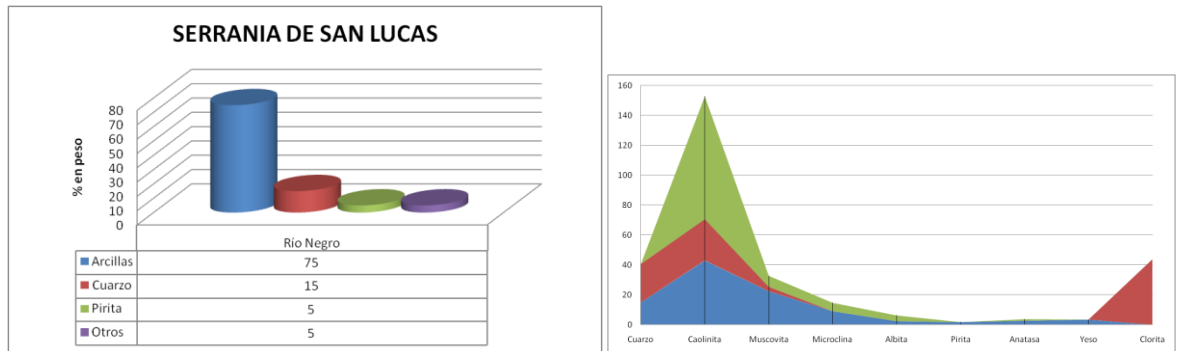


Figura 10. Histogramas de composición mineralógica en roca total y grafico de las fracciones separadas de la muestra de la Serranía de San Lucas.

FORMACIÓN RIO NEGRO

Muestra SL-140509-5B: Para esta muestra no se obtuvo fracción menor de 2 micras, el cuarzo está presente en las fracciones mayores, la caolinita presenta su máxima concentración en la fracción entre 5-2 micras, la Microclina solo está presente en fracciones entre y 5-2 micras al igual que la Albita, la Moscovita tiene una concentración uniforme en las fracciones separadas, la pirita solo se encuentra en la fracción total de la muestra no se presenta en las fracciones separadas, la clorita solo se presenta en la fracción entre 53-5 micras al igual sucede con el yeso solo que este está presente solo en la fracción total de la muestra como se observa en la figuras. Se observa la pirita diseminada con morfología bien definida en hexágonos, y los minerales arcilla sin una morfología definida ya que sus bordes son irregulares.

6.2 ÍNDICE DE CRISTALINIDAD DE LA ILLITA

La determinación del índice de cristalinidad de la illita se realizó con el software Topas 4.2 desarrollado por BRUKER con el que cuenta el Instituto Colombiano del Petróleo, en la tabla 5 se muestran los valores del FWHM o ancho a media altura del pico de 10 Å que según Kubler, 1968 está relacionado al índice de cristalinidad de la illita.

	FWHM (Índice de Cristalinidad)	Temperatura °C	Transecta
Formación Bogotá	2,01472	11,74	La Calera-Quetame
Formación Guaduas	0,90435	101	
Formación Tierna	0,25333	300	
Formación Dura	0,43201	198	
Formación Une	0,65648	160	
Formación Lutitas de Macanal	0,31047	274	
Formación Chipaque	0,5713	174	Chita-Hato Corozal
Formación Areniscas de las Juntas	1,044	96	
Formación Lutitas de Macanal			
Formación Lutitas de Macanal	0,4053	213	
Formación Lutitas de Macanal	0,369	233	
Formación Lutitas de Macanal	0,18323	mas de 300	
Formación Carbonera C1			Cubara-Pamplona
Formación Barco	0,27462	292	
Formación Mito-Juan	0,58154	172	
Formación Aguardiente	0,53574	181	
Formación Río Negro	0,73867	145	
Formación Río Negro			San Lucas

Tabla 5. Índice de cristalinidad de la illita determinados en fracción menor a 2 micras, y temperatura determinada para cada Formación.

Hubo 4 muestras (una muestra de la Formación Lutitas de Macanal de la transecta Chita-Hato Corozal, otra de esta misma transecta que corresponde a un nivel de chert de la Formación Chipaque, la muestra de la Formación Carbonera C1 tomada en la transecta Cubara-Pamplona y la única muestra de la Serranía de San Lucas) a las que no se les pudo determinar este índice ya que no presentaba illita en su composición o porque de ellas no se obtuvo recuperación de la fracción entre 2-0.5 micras o menor de 2 micras.

Se determinó la temperatura máxima a la que estuvo la roca que contenía este mineral, la figura 11 muestra el índice de cristalinidad con respecto a la temperatura, esta gráfica sirvió para determinar la temperatura exacta a la que estuvo la roca que contiene este mineral, esto con base a Collo et al, 2005

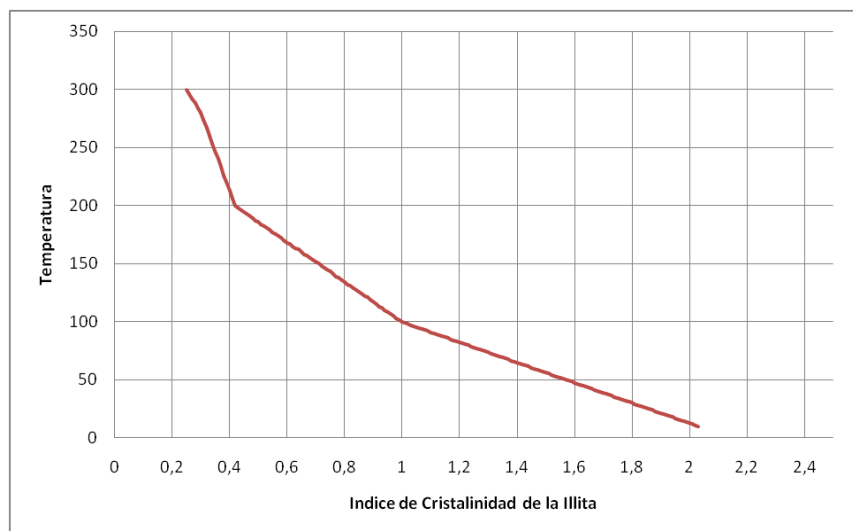
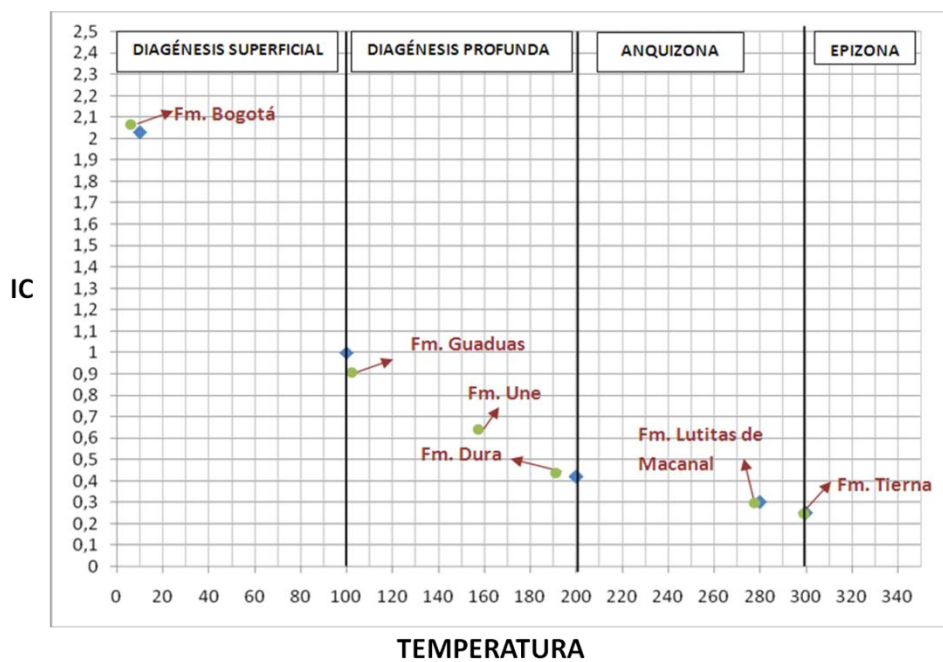


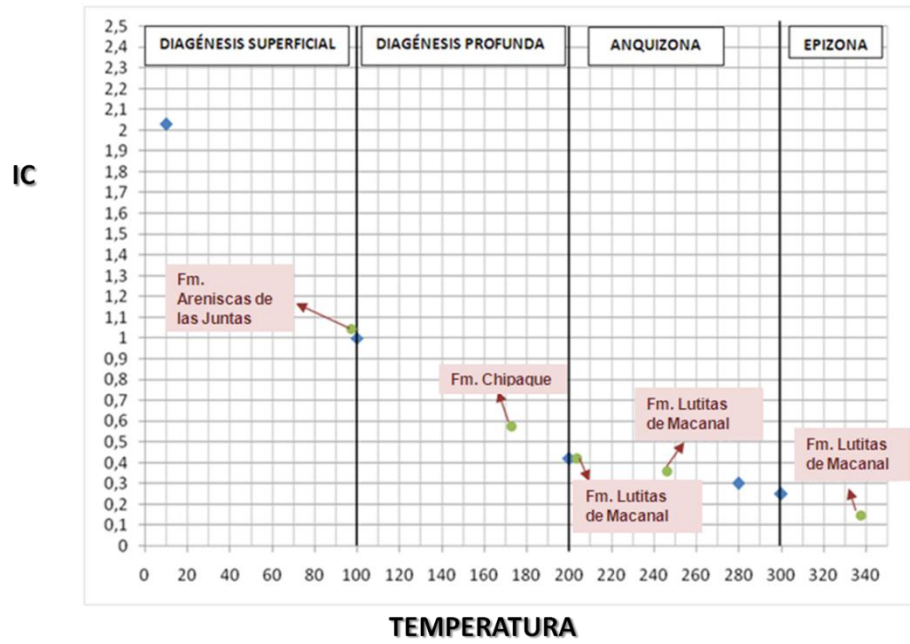
Figura 11. Variación del índice de cristalinidad con respecto a la temperatura. Basada en los límites propuestos por Collo et al, 2005.

Con estos valores de temperatura las muestras se ubican en la zona de diagenesis a la que corresponda, esto se muestra a continuación en la figura 12. Los datos mostrados en esta figura son discutidos en el capítulo donde se explora la discusión de todos los resultados.

TRANSECTA LA CALERA-QUETAME



TRANSECTA CHITA-HATO COROZAL



TRANSECTA CUBARA-PAMPLONA

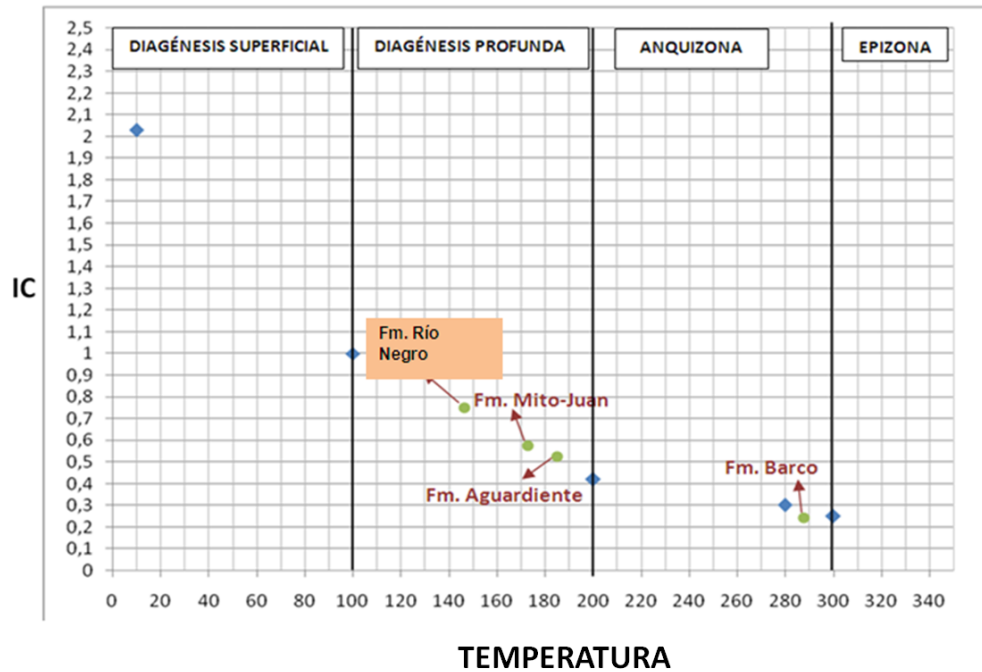


Figura 12. Ubicación de cada una de las muestras en las zonas de diagénesis de acuerdo a la temperatura determinada.

6.3 INTERESTRATIFICADOS ILLITA/ESMECTITA

Para la cuantificación del porcentaje de capas expandibles en los interestratificados I/S se realizó mediante la metodología propuesta por Spalleti en 2009 basado en un trabajo de Powell *et al.*, 1977, que se muestra en la tabla 3. Se presenta el porcentaje de capas expansivas en los interestratificados I/S.

	%S en I/S	Temperatura °C	Transecta
Formación Bogotá	50-60	menos 100	La Calera-Quetame
Formación Guaduas	60-70	menos 100	
Formación Tierna	40-50	100	
Formación Dura	60-70	menos 100	
Formación Une	30-40	menos 100	
Formación Lutitas de Macanal			
Formación Chipaque	70-80	menos 100	Chita-Hato Corozal
Formación Areniscas de las Juntas	60-70	menos 100	
Formación Lutitas de Macanal			
Formación Lutitas de Macanal	40-50	100	
Formación Lutitas de Macanal			
Formación Lutitas de Macanal	menos 10	entre 200 y 280	
Formación Carbonera C1			Cubara-Pamplona
Formación Barco	50-60	menos 100	
Formación Mito-Juan	60-70	menos 100	
Formación Aguardiente	50-60	menos 100	
Formación Río Negro	70-80	menos 100	
Formación Río Negro			San Lucas

Tabla 6. Porcentaje de esmectita en los interestratificados illita/esmectita.

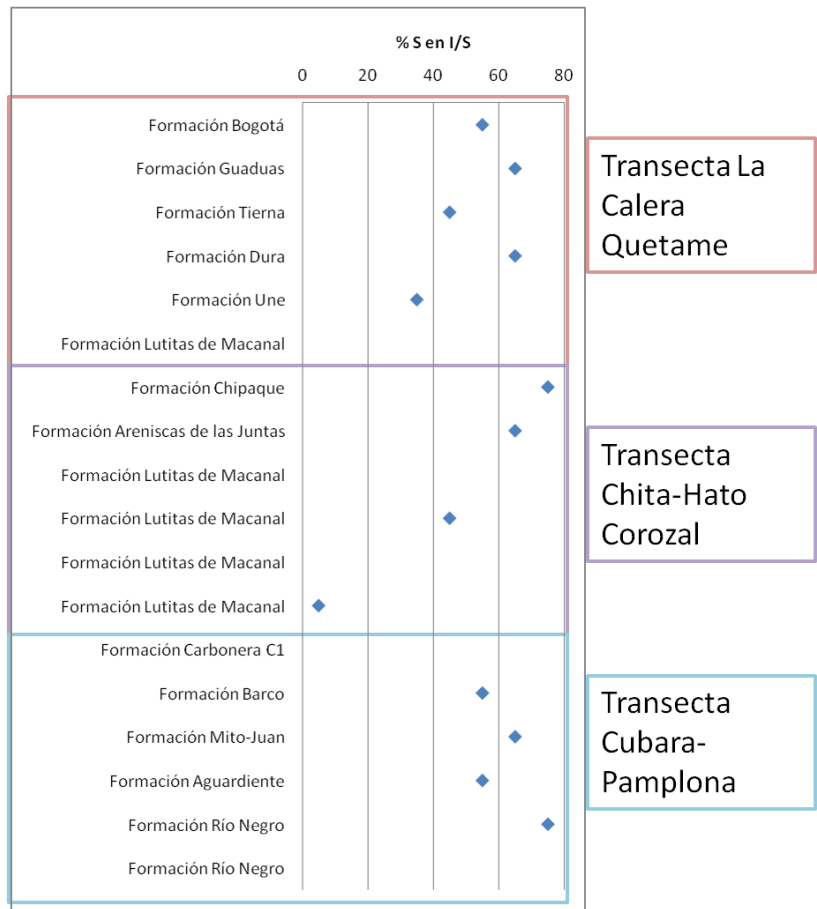


Figura 13. Variación en posición estratigráfica del porcentaje de esmectita en los interestratificados.

Como se observa en la figura 13, se concluye que la mayoría de las muestras se encuentran en zona de diagénesis superficial a profunda por la temperatura aproximada que se estima para cada formación y que se presenta en la tabla 7, ya que a mayor profundidad se esperaría que el porcentaje de capas expandibles sea menor porque estas van cambiando a illita.

Estos resultados son diferentes a los resultados que se obtuvieron con el índice de cristalinidad de la illita, esto se puede deber a que estos fueron determinados de una forma cualitativa, por lo tanto el margen de error es mayor a que si se realiza esta cuantificación por medio de un software en donde si se tiene en cuenta el tipo de interestratificado y las condiciones de medición, también se puede deber a que los interestratificados además de estar influenciados por la temperatura también presenta influencia del ambiente y la presión que estén actuando en el momento en que se presenta esta interestratificación.

6.4 REFLECTANCIA DE LA VITRINITA

La determinación de la reflectancia de la vitrinita se realizó para calibrar los datos de paleo-termometría obtenidos con el índice de cristalinidad de la illita y por los interestratificados este análisis se hizo en las muestras que tuvieron recobro de materia orgánica para poder medir el % de reflectancia del maceral vitrinita, las mediciones se realizaron en un microscopio petrográfico Leitz-DMRXP, por personal del laboratorio de Geoquímica del Instituto Colombiano del Petróleo. No se realizó en las muestras de todas las transectas ya que no se contó con el tiempo necesario. Estos porcentajes se listan en la tabla 7.

Muestra	Formación	Ro
CP-240509-1	Carbonera	0,4
CP-240509-11	Barco	0,88
CP-240509-20	Mito-Juan	0,87
CP-240509-7	Aguardiente	1,28
CP-240509-1	Rio Negro	1,25

Tabla 7. Porcentaje de reflectancia de la vitrinita.

Calculando con la fórmula que relaciona reflectancia de la vitrinita con temperatura se tienen los resultados de la tabla 8 y figura 11 en la cual se observa el gráfico de la relación del índice de cristalinidad de la illita con la reflectancia de la vitrinita, este fue elaborado siguiendo la metodología expuesta por Guthrie *et al.* 1986, quienes proponen realizar una gráfica donde que en el eje “x” este el porcentaje de reflectancia de la vitrinita y en las “y” los valores del índice de cristalinidad de la illita, a los datos del índice de cristalinidad se calcula el logaritmo en base 10 y después se hace regresión lineal y la fórmula que salga de esto es la fórmula que relaciona estos dos datos en la zona donde se determinen.

En este caso el grado de correlación es muy bajo, puede darse esto ya que la materia orgánica encontrada en esta zona es básicamente marina, y porque solo se trabajaron 4 muestras lo que también da mucha dispersión para los datos.

	Temperatura
Formación Carbonera C1	52,52
Formación Barco	134,75
Formación Mito-Juan	133,54
Formación Aguardiente	173,81
Formación Rio Negro	171,34

Tabla 8. Temperatura determinada con el porcentaje de reflectancia de la vitrinita. Calculada con la fórmula $\ln Ro = 0,00959T - 1,42$

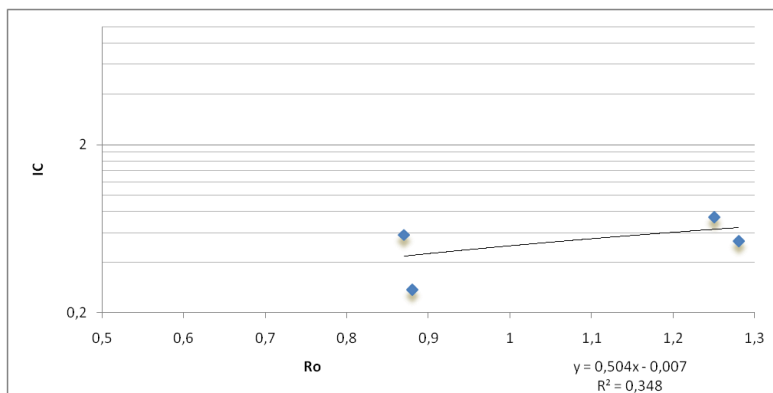
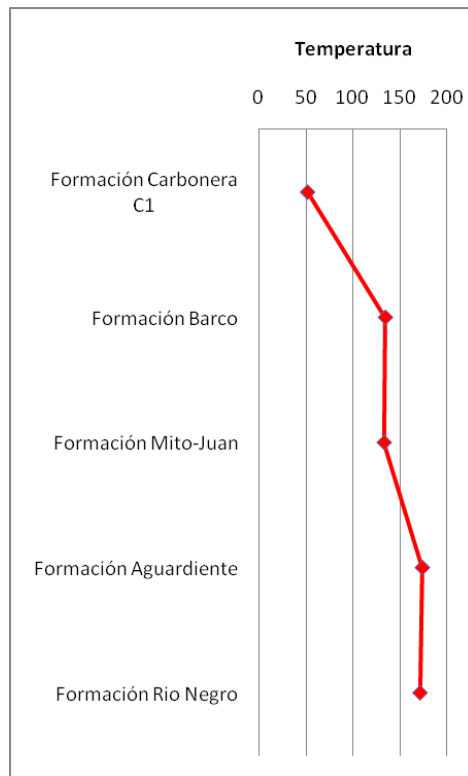


Figura 14. Variación de la temperatura según la reflectancia de la vitrinita y relación con el índice de cristalinidad de la illita.

En cuanto a la temperatura determinada con el porcentaje de esmectita en los interestratificados, no se da relación alguna ya que las Formaciones no presentan mayor variación cosa contraria a lo que se observa con la reflectancia de la vitrinita aunque se debería refinar la metodología por la cual se hizo la determinación de porcentaje de esmectita en los interestratificados.

7. DISCUSION DE RESULTADOS.

7.1 Arcillas pre y sin-diagenéticas.

En la diferenciación de las arcillas según su origen (pre y sin-diagenético), se utilizaron los datos obtenidos de la cuantificación de los minerales arcilla mediante difracción de rayos x en cada una de las fracciones separadas así como también se realizó el análisis de la morfología observada en la roca total de los minerales arcilla presentes allí.

De acuerdo con Wilson y Pittman, 1977 a fracción menor a 0.5 micras, en este caso, representa las arcillas de origen sin-diagenético y las otras fracciones de mayor tamaño (53-5, 5-2 y 2-0.5 micras) representan la de origen pre-diagenético, así también se tienen en cuenta las características morfológicas de los minerales, obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido. Las transectas estudiadas se presentan de norte a sur de la Cordillera Oriental.

Transecta Cubara-Pamplona

Formación Rio Negro, se tomaron muestras en la Serranía de San Lucas y en la Transecta Cubará-Pamplona, en la primera zona no se obtuvo fracción menor de dos micras y allí se encontraron minerales como cuarzo, moscovita, microclina, caolinita, albita, pirita, anatasa, yeso y clorita, se muestran en el anexo 1.3. Junto con los porcentajes de los minerales arcilla encontrados en la zona de Cubara-Pamplona, los porcentajes mostrados son los obtenidos de los difractogramas de las muestras a las que previamente se les hizo tratamiento con etilenglicol, esto para descartar la confusión entre la illita y los interestratificados. Teniendo en cuenta que la caolinita se forma abundantemente en suelos de masas de tierras intertropicales caracterizadas por climas templados y húmedos su concentración expresa una fuerte dependencia climática controlada por la intensidad de hidrólisis continental y la clorita detrítica, principalmente resulta de la erosión de rocas plutónicas y metamórficas, preservada desde notable meteorización química, esto caracterizaría el ambiente de depositación de esta formación (Chamley, 1989).

De la zona comprendida entre Cubara (Boyacá) y Pamplona (Norte de Santander), en esta formación se encuentra que si existen minerales arcilla de origen sin-diagenético ya que si se pudo realizar la separación de la fracción más fina (menor de 0.5 micras). Dentro de los minerales diagenéticos se encuentran concentraciones de caolinita, moscovita, anatasa. Estos minerales se dan por la presencia de elementos químicos necesarios para su formación los cuales derivan de algunos minerales pre-existentes en arenas, feldspatos potásicos y micas.

La Formación Aguardiente caracterizada por la ausencia de minerales arcilla de origen sin-diagenéticos, y dentro de los minerales pre-diagenéticos se encuentran la caolinita, moscovita y anatasa, esto sugiere un ambiente donde predomina la meteorización de rocas metamórficas.

La Formación Mito-Juan no presenta minerales arcilla de origen sin-diagenético ya que no se encuentran fracciones menores a 0.5 micras, dentro de los minerales arcilla encontrados en esta Formación están la caolinita, illita, clorita, que sugieren un ambiente de depositación de clima templado a cálido con presencia de meteorización.

La Formación Barco no presenta minerales arcilla de origen sin-diagenético y dentro de los minerales pre-diagenéticos están la caolinita, illita, clorita, microclina, anatasa que sugieren al igual que en el resto de la formaciones descritas anteriormente, un ambiente en donde se presenta meteorización de rocas metamórficas que dan el aporte de minerales como la clorita, caolinita.

Para la Formación Carbonera C1, con los datos de concentración de minerales en las facciones separadas se concluye que esta Formación no presenta minerales arcilla de origen sin-diagenético, y dentro de lo minerales pre-diagenéticos se encuentran la caolinita, moscovita y abundante pirita esto sugiere un ambiente anóxico ya que este contribuye a la conservación de los cristales de la pirita.

Transecta Chita-Hato Corozal.

Dentro de esta Transecta de donde se obtuvieron cuatro muestras se Lutitas de Macanal, una muestra de la Formación Areniscas de las Juntas y dos muestras de la Formación Chipaque.

Formación Lutitas de Macanal, esta se caracteriza por la no presencia de minerales arcilla de origen sin-diagenético y por la presencia de minerales como caolinita, illita, microclina, clorita, pirofilita, con esto se concluye que esta Formación está en una facies de metamorfismo media, ya que la pirofilita es característica de esta zona. Esta Formación también fue muestreada en la Transecta La Calera-Quetame, Sabana de Bogotá, en esta muestra se observa presencia de minerales arcilla de origen sin-diagenético principalmente la illita.

Para la Formación Areniscas de las Juntas se encuentran minerales de origen si-diagenético como caolinita, moscovita, microclina, anatasa, y pirofilita. Estos minerales pueden ser originados por las condiciones químicas que están presentes cuando esta formación se va profundizando y también cuando va aumentando la temperatura, esto porque la pirofilita es originada a grandes profundidades y altas temperaturas

La Formación Chipaque presenta arcillas de origen sin-diagenético como caolinita, moscovita, rutilo, pirofilita, anatasa y microclina, estos minerales sugieren una ambiente de meteorización y metamorfismos de grado medio.

Transecta La Calera-Quetame.

La Formación Bogotá presenta en su composición mineralógica solo minerales arcilla de origen pre-diagenético estos minerales como la caolinita, moscovita, anatasa y microclina, determinan que pueden estar siendo reciclados de formaciones que presenten rocas metamórficas o ígneas.

La Formación Guaduas presenta en su composición mineralógica, minerales arcilla de origen si-diagenético, como la caolinita y la moscovita, estos minerales requieren ambientes donde haya buena cantidad de elementos como potasio y magnesio para realizar intercambios con el medio que les contiene

Formación Une, se da la presencia de minerales predominantemente pre-diagenéticos dentro de lo que se cuentan caolinita, moscovita, anatasa y microclina, esto al igual que en todas las formaciones antes descritas sugiere un ambiente de meteorización y ambientes de climas templados y húmedos.

La Formación Dura presenta minerales predominantemente pre-diagenéticos como caolinita, moscovita, anatasa, microclina, que al igual que en la Formación Une se pueden dar en ambientes con meteorización de rocas ígneas y metamórficas y climas templados y húmedos.

En la Formación Tierna, se encuentran minerales de origen pre-diagenético predominan minerales como caolinita, moscovita, anatasa, pirita, microclina, se sugiere ambiente con la mismas características que para las formaciones Dura y Une, de climas templados y húmedos, además de la presencia de meteorización de rocas metamórficas e ígneas. Además predomina ambiente anóxico para la preservación de la pirita aunque esta se encuentra solo en las fracciones menores a 5 micras.

7.2 Paleo-termometría

Transecta Cubara-Pamplona

Por medio de los datos de paleo-termometría obtenidos con el índice de cristalinidad de la illita, las formaciones Mito-Juan y Aguardiente se ubican dentro del rango de diagénesis profunda y la Formación Barco se ubica en la zona de anquizona. La Formación Río Negro que está a la base de toda la secuencia presenta el mayor índice de cristalinidad, es decir, la menor temperatura.

Lo contrario sucede con los otros dos paleo-termómetros utilizados los cuales muestran una tendencia definida de tope a base de la secuencia.

Esto sugiere que el índice de cristalinidad puede tener en esta zona otros factores que le estén afectando como la tectónica con lo cual se indicaría el porque de los cambios de temperatura en la secuencia.

Transecta Chita-Hato Corozal

Según el índice de cristalinidad de la illita determinado en las muestras de esta transecta se concluye que la Formación Areniscas de las Juntas se encuentra en una zona de diagénesis superficial, su temperatura máxima ha sido de aproximadamente 96°C, la Formación Chipaque está en una zona de diagénesis profunda con una temperatura aproximada de 174°C, las muestras de las Formación Lutitas de Macanal a las que se les realizó la determinación del índice de cristalinidad están en la anquizona a epizona, tienen un índice entre 0,4 y 0,2, estaría concorde a que esta formación es la base de la secuencia estratigráfica en esta zona y que además hay una fuerte influencia de fallas y pliegues que afectan también el índice de cristalinidad. En cuanto a la Formación Areniscas de las Juntas, habría que corroborar ese dato ya que esta es la única formación en esta transecta que presenta minerales arcilla de origen sin-diagenético y para esto al menos debió haber estado en una zona de diagénesis profunda donde las condiciones químicas y físicas ayudaran para la formación de estos minerales en especial de la pirofilita.

Teniendo en cuenta los datos de interestratificados determinados sugieren que toda la secuencia se encuentra en diagénesis superficial lo cual da unas temperaturas menores a 100°C

Transecta La Calera-Quetame

Los índices de cristalinidad van desde 2,01 hasta 0,25, es decir que se encuentran en todas las zonas de diagénesis distribuidas de la siguiente manera, la Formación Bogotá se encuentra en diagénesis muy superficial o prácticamente de depositación o que se encuentra reciclando minerales arcilla y dentro de ellos esta reciclando illita poco cristalina, las formaciones Guaduas, Une y Dura se encuentran en zona de diagénesis profunda, esto de acuerdo a la presencia de minerales de origen sin-diagenético de la Formación Guaduas, en esta zona la Formación Lutitas de Macanal se ubica nuevamente en la zona de anquizona como en la transecta Chita-Hato Corozal y la Formación Tierna se ubica en el límite de la anquizona y la epizona, esto quiere decir que presento una temperatura de aproximadamente 300°C, solo que es raro no encontrar minerales de origen sin-diagenético.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Las formaciones Guaduas, Lutitas de Macanal de la Transecta La Calera-Quetame y Formación Rio Negro de la Transecta Cubara-Pamplona, son las únicas que presentan minerales arcilla de origen sin-diagenético, esto determinado por la concentración de minerales arcilla en la fracción menor a 0.5 micras y por las características morfológicas observadas por microscopia electrónica de barrido, en donde se observan minerales morfológicamente bien definidos.
2. Con el cálculo de la concentración de los diferentes minerales arcilla presentes en las muestras de las formaciones analizadas se pudo determinar que en general estas formaciones presentan minerales que han sido producto de la meteorización de rocas metamórficas y plutónicas que están presentes en esta zona.
3. Las sucesiones estratigráficas de asociaciones de minerales de arcillas representan una herramienta útil para reconstruir la evolución de ambientes pasados, especialmente cuando ellos están combinados con data litológica, geoquímica y micro morfológica, por lo tanto se hace necesario realizar análisis mas detallados de cada una de las asociaciones de minerales arcilla para poder concluir exactamente sobre los ambientes en que se depositaron esta secuencias.
4. El índice de cristalinidad de la illita en las diferentes transectas se pudo determinar en las formaciones donde fue posible realizar la concentración de este mineral en la fracción 2 y 0.5 micras, este índice varía de acuerdo al aumento de temperatura producido por el enterramiento, en la Transecta La Calera-Quetame disminuye de tope a base del registro estratigráfico estudiado, en la Transecta Chita-Hato Corozal sucede lo contrario aumentando de tope a base al igual que en la Transecta Cubara-Pamplona. Aunque se debe evaluar si este método da los mismos resultados en esta zona que está fuertemente influenciada por tectonismo y una zona mas estable.
5. El porcentaje de esmectita en los interestratificados illita/esmectita se determina de una forma cualitativa según la posición del pico de este mineral, este porcentaje no se pudo determinar en todas las formaciones ya que no lo presentaban. En las formaciones donde se pudo determinar se observa que este porcentaje disminuye de tope a base, comportamiento que se mantiene en todas las transectas.

6. El índice de cristalinidad de la illita y porcentaje de esmectita en los interestratificados illita/esmectita no presentan un comportamiento similar como paleo-termómetros, esto se puede presentar por la forma como fue determinado el porcentaje de esmectita en los interestratificados, ya que se hizo de una forma cualitativa y se debería realizar de forma cuantitativa por medio del software NEWMOD-3 el cual permite realizar este cálculo con bajo porcentaje de error.
7. El índice de cristalinidad de la illita y porcentaje de reflectancia de la vitrinita como paleo-termómetros se correlacionaron en la Transecta Cubara-Pamplona en donde tienen un índice de correlación de 0,3, que aunque es muy bajo esto se puede dar por el bajo número de muestras analizadas.
8. La metodología propuesta para este trabajo dio buenos resultados ya que por medio de ella fue posible realizar los diferentes cálculos solo que se debe tener en cuenta recomendaciones como, que el paso del goniómetro sea más lento para poder refinar la lectura de los picos de interés, además que esto permitirá realizara una mejor caracterización de los minerales presentes en las fracciones menores a 0.5 micras.
9. Con el estudio detallado de la concentración y cristalinidad de los minerales arcilla presentes en la Cordillera Oriental se puede llegar a determinar las condiciones tectónicas que están influenciando cambios diagenéticos laterales en arcilla en áreas de montaña que llegan a reflejar los efectos atenuados de metamorfismo asociado a orogenia.
10. El índice de cristalinidad de la illita puede ser utilizado para determinar zonas de diagénesis en la que se encuentra la roca que lo contiene donde no se haya recobro de materia orgánica para realizar el cálculo de la reflectancia que es comúnmente el método por el que realiza esta determinación.

9. BIBLIOGRAFIA

Altaner S., and Bethke C., Interlayer order in illite/smectite. *American Mineralogist*, 73. P 766-774. 1988

Barrero D., Pardo A., Vargas C. A., Martinez J. F. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries an petroleum Geology a new proposal. Bogotá-Colombia. ANH. 92 p. 2007

Informe técnico de análisis mineralógico por difracción de rayos x. Instituto Colombiano del Petróleo Mayo 2010

Collo G., Do Campo M., Astini R., Caracterización mineralógica, micro-estructural e historia pos-deposicional de la Formación la Aguadita, sistema Famatima, la Rioja, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias geológicas*. 283-297 p 22. 2003.

Chamley H., *Clay Sedimentology*. Springer. P. 529

Fuquen J. y Osorno J.F. *Geología De La Plancha 190-Chiquinquirá Bogotá D.C*, Febrero De 2005.

Guthrie J. M., Houseknecht D. W. and Johns W.D., Relationships among vitrinite reflectance, illite crystallinity and organic geochemistry in carboniferous strata, Ouachita Mountains, Oklahoma and Arkansas. *The American of Petroleum Geologists Bulletin*. 70, 1,p 26-33. 1986

Héroux Y., Chagnon A. and Bertrand R. Compilation and correlation of major termal maturation indicators. *AAPG Bulletin*, 63 p 2128-2144. 1979

Ingeominas – Geostratos Ltda. Levantamiento De Información Estratigráfica Y Muestreo Paleontológico, Geoquímico E Isotópico En Secciones Estratigráficas En El Terreno Del Cretáceo Inferior Del Sector Central De La Cordillera Oriental. Seccion Chivor – Boyacá. 2005

Ku"bler B. (1968) Evaluation quantitative du me'tamorphisme par la cristallinite' de l'illite: Etat des progre`s re'alise's ces dernie`res anne'es. *Bulletin de Centre Recherche Pau-SNPA*, 2, 385_397.

Kubler B. (1967) La cristallinite de l'illite et les zones tout aÂ fait supeÂrieures du meÂtamorphisme. *Etages Techtoniques. Coll NeuchaÂtel*, 105ÿ122.

Kubler B. (1968) Evaluation quantitative du meÂta- morphisme par la cristalliniteÂ de l'illite. *Bulletin de Centre Recherche, Pau SNPA*, 2, 385- 397.

Lobo-Guerrero A. Informe sobre la Cuenca Petrolífera de la Sabana de Bogotá, Colombia. 29 p. 1993.

Mantilla Figueroa, L. C. Termocronología K-Ar En Illitas: Aspectos Metodológicos. Boletín de Geología 2001.

Schroeder P. A., And Mclain A. A. Illite-smectites and the influence of burial diagenesis on the geochemical cycling of nitrogen. *Clay Minerals* (1998) 33, 539–546.

Spalletti L.A., Paleogeotermometria. 28 p. 2009

Thorez, J., 1975. Phyllosilicates and clay minerals. A laboratory handbook for their X-ray diffraction analysis. G. Lelotte (Dison): 579 pp.

Thorez, J., 1976. Practical identification of clay minerals. G. Lelotte (Dison): 90 pp. *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw* 83 (3): 179-185 (2004)

Tobon J., Analisis de minerales arcillosos para la determinacion de paleotemperaturas en el Valle Superior del Magdalena. Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellin. 1992.

Ulloa C. E. Rodríguez E. Fuquen J. A. Acosta J. E. GEOLOGÍA DE LA PLANCHA Watanabe T. The Estructural Model Of Illite/Esmectite Interstratified Mineral Andhe Diagramm For Its Identification. *Clay Science* 7, 97-114 (1988).

Velde B. and Nicot E. Diagenetic clay mineral composition as a function of pressure, temperature and chemical activity. *Journal Sedimentary Petrology*, 55. P 0541-0547. 1985.

Weber, K. (1972). Notes on the determination of crystallinity. *Neues Jahrbuch fur Mineralogie*, 11, 267-276

Wilson, M. D. and Pittman, E. D. (1977). Authigenic clays in sandstones: recognition and influence on reservoir properties and paleoenvironmental analysis. *J. Sedim. Petrol.* 47: 3-31.

ANEXOS

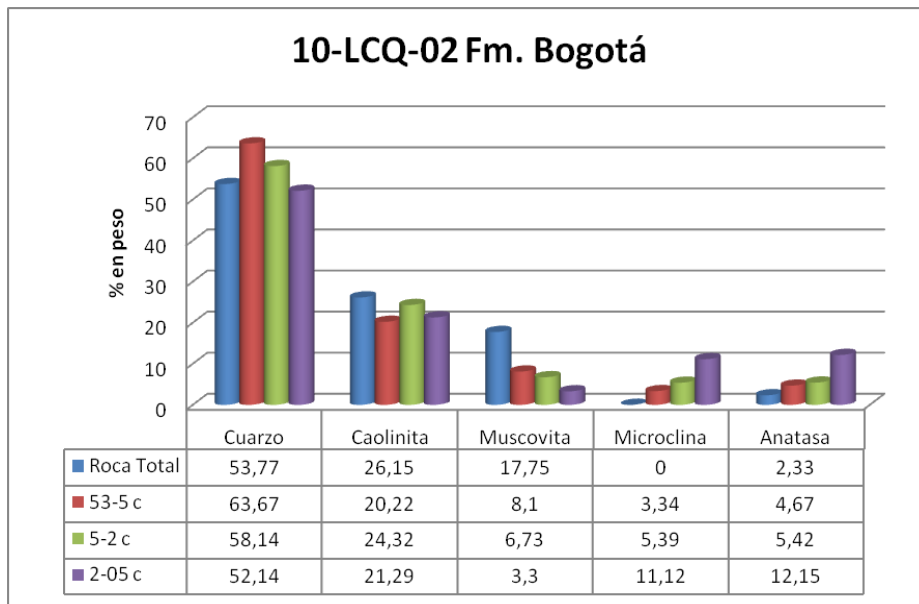
Anexo 1. RESULTADOS DE LOS ANALISIS DIFRACCIÓN DE RAYOS X Y MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO.

Difractogramas, imágenes SEM y espectros composicionales de las muestras analizadas, se presentan por transectas de sur a norte y ubicadas estratigráficamente de techo a base en la secuencia.

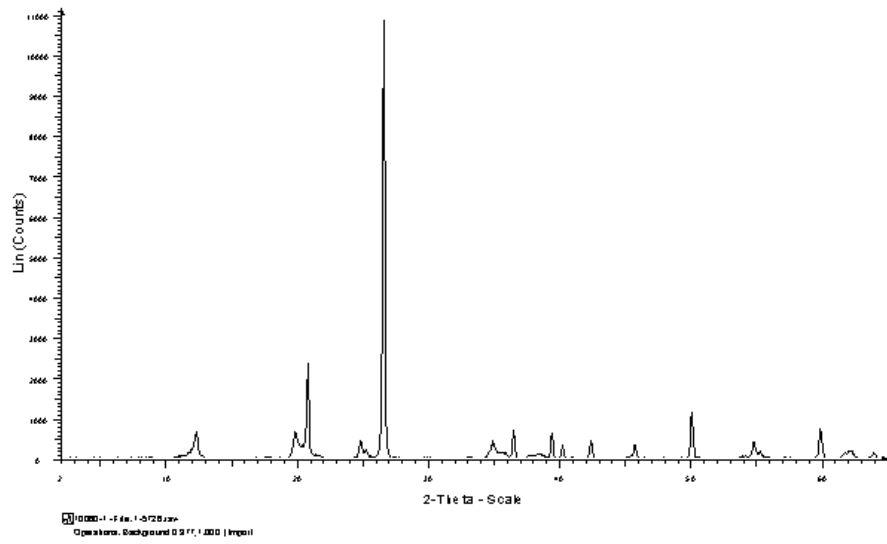
En los difractogramas de las fracciones el azul representa el difractograma tomado en condiciones normales, en verde el difractograma que se lee después de haber sometido la muestra a glicolación y en rojo el difractograma que se leyó después de haber sometido la muestra a una temperatura de 550°C.

1.1 TRANSECTA LA CALERA-QUETAME

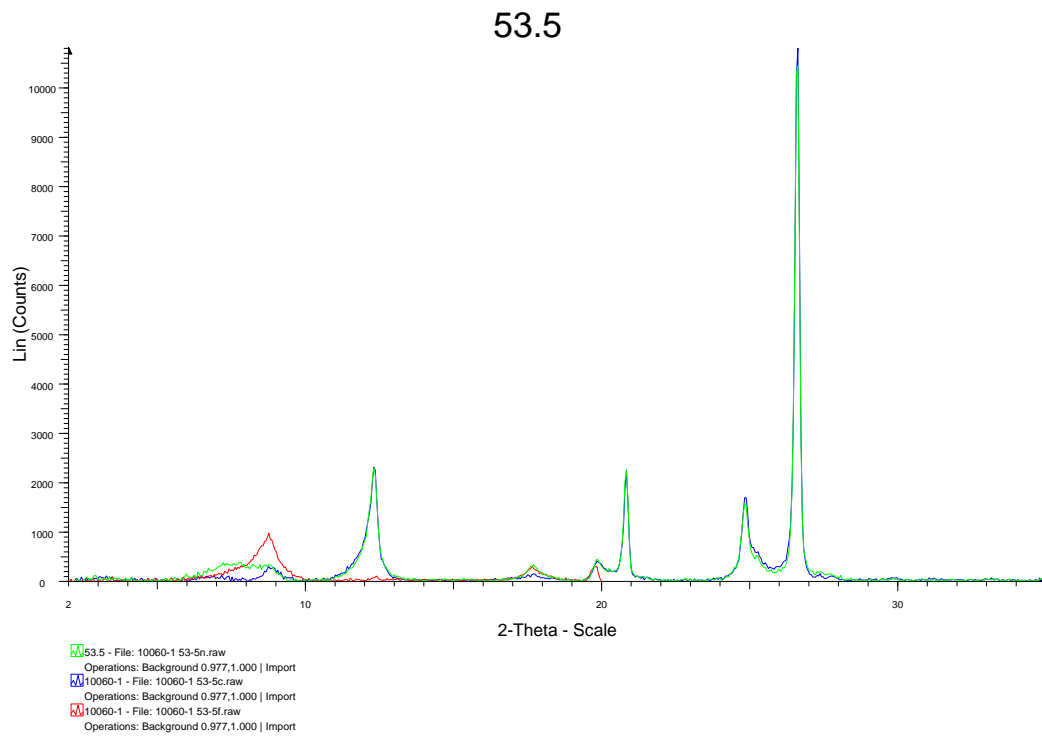
1.1.1 FORMACIÓN BOGOTÁ (muestra 10-LCQ-02)



Histograma de concentración de minerales arcilla en roca total y fracciones separadas para esta muestra después de la glicolación.

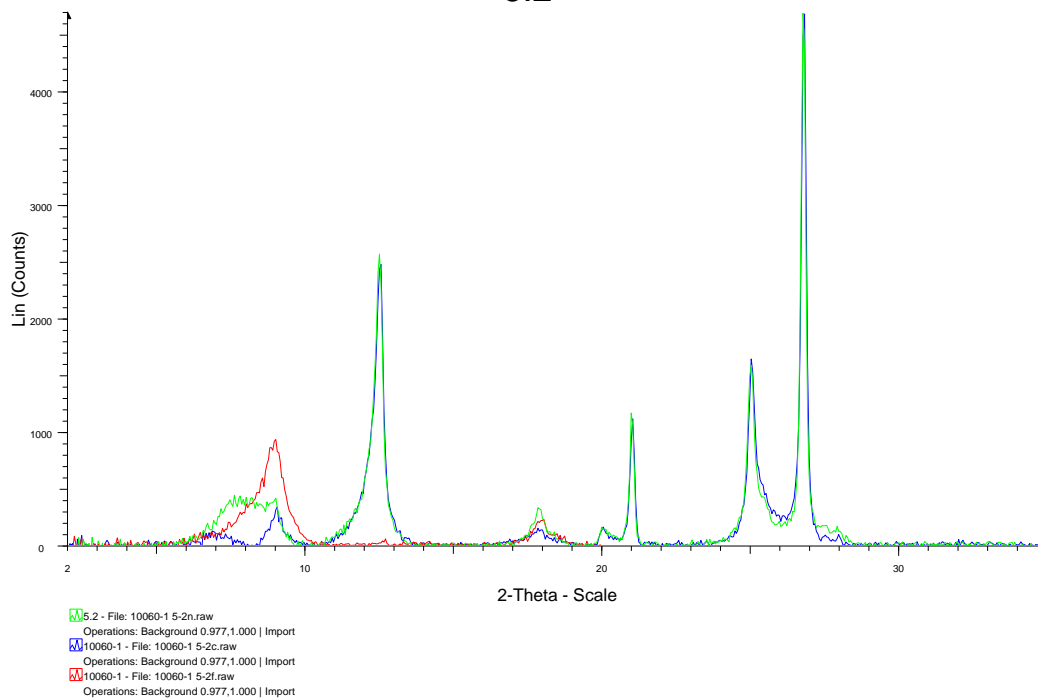


Difractograma de roca total.



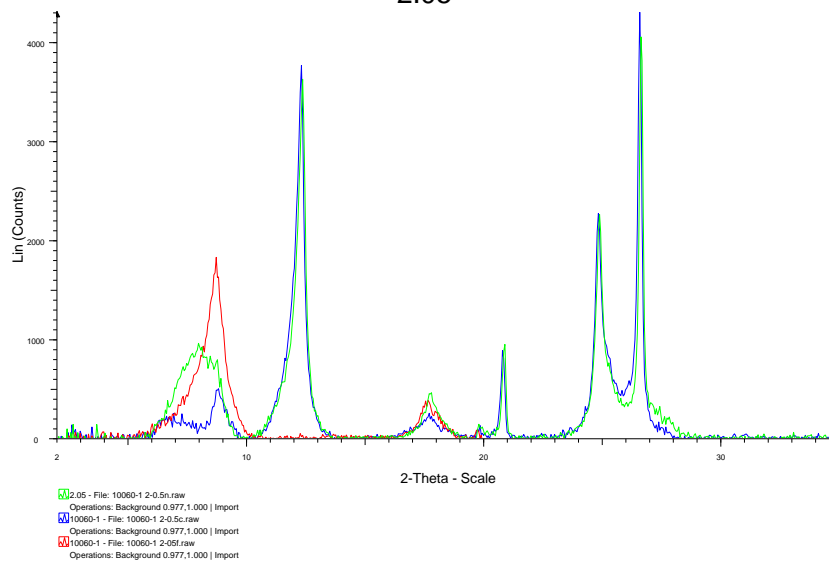
Difractograma fracción entre 53-5 micras.

5.2

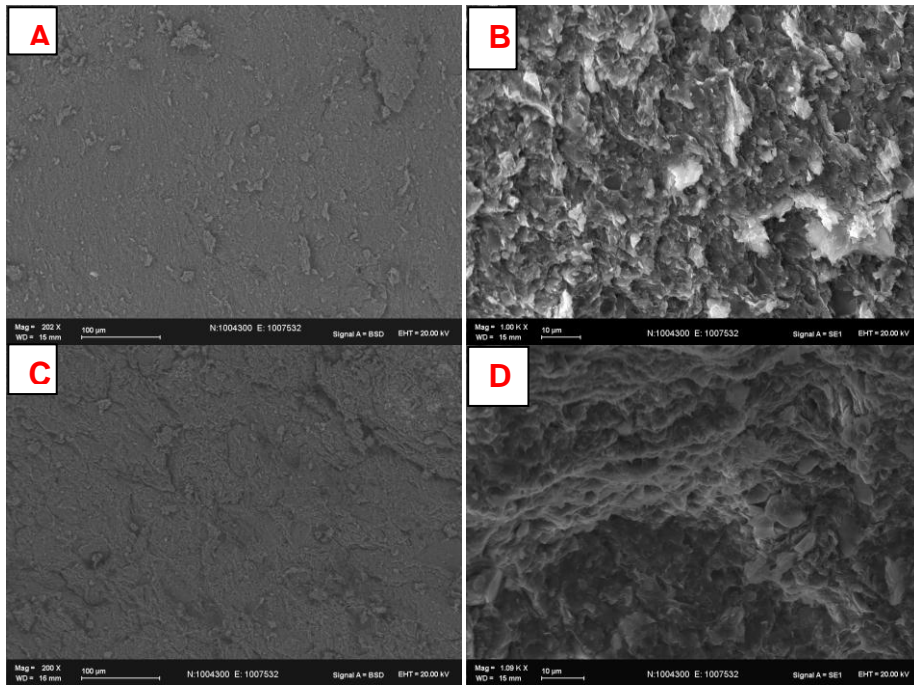


Difractograma fracción entre 5-2 micras

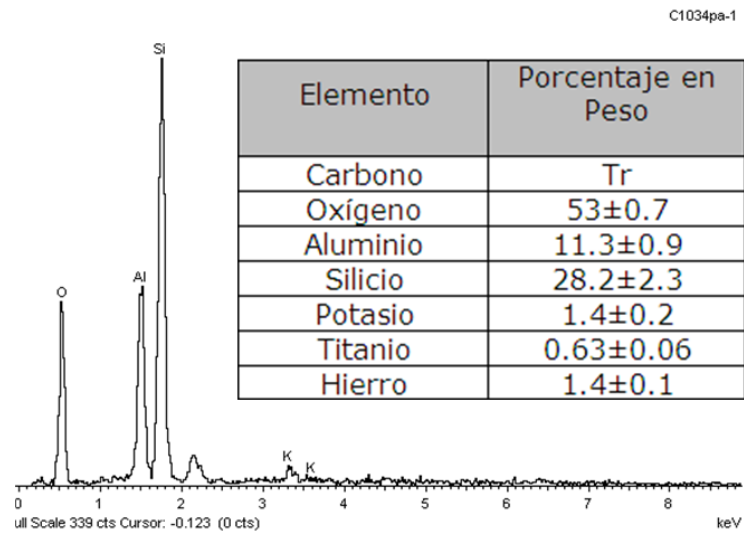
2.05



Difractograma fracción entre 2-0.5 micras

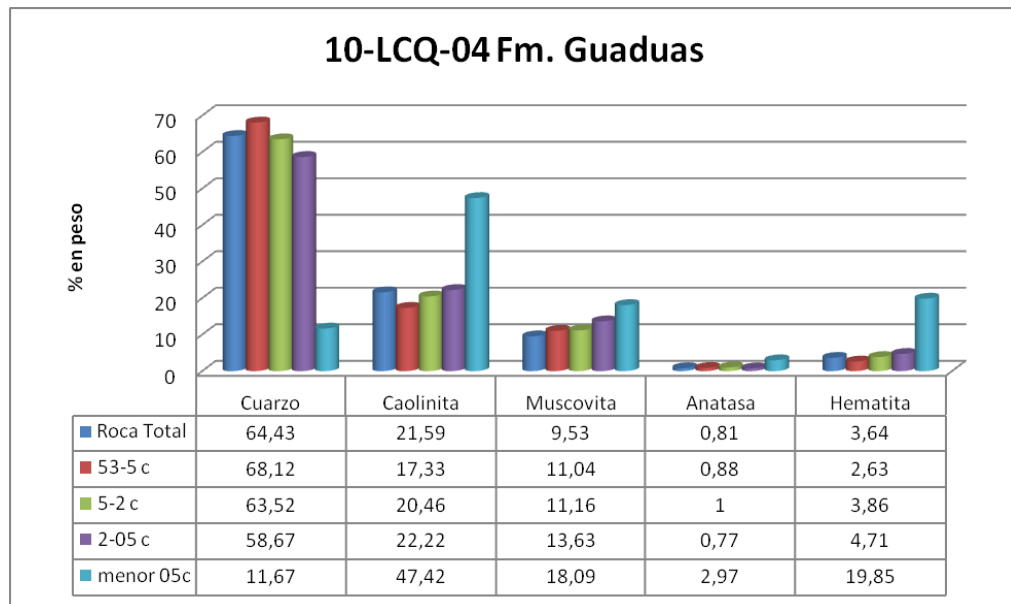


Imágenes al SEM de la muestra 10-LCQ-02 Formación Bogotá A y B tomadas paralela a laminación, C y D perpendicular a la laminación.

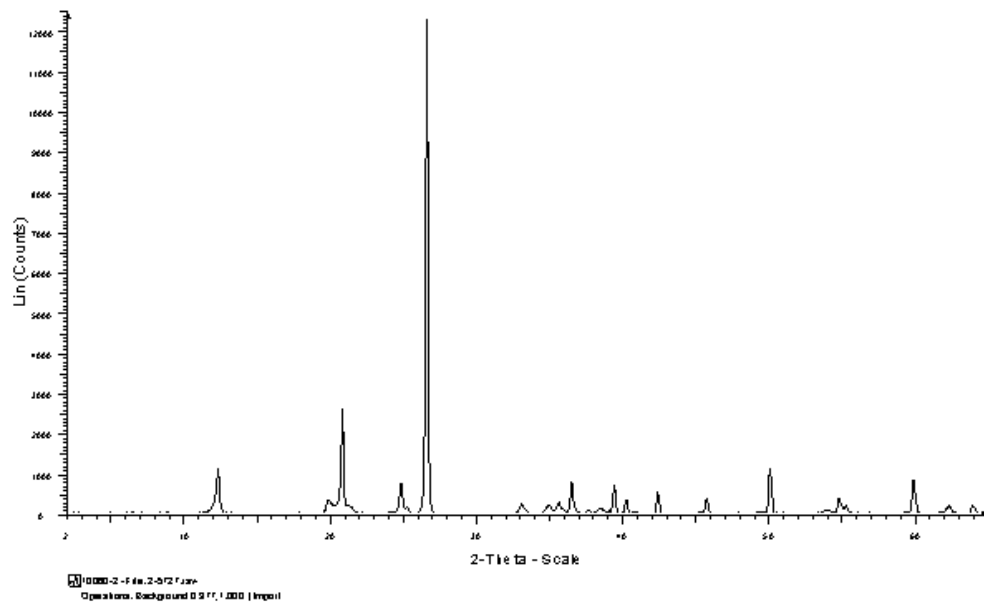


Espectro de composición elemental y porcentaje en peso de cada elemento en la muestra.

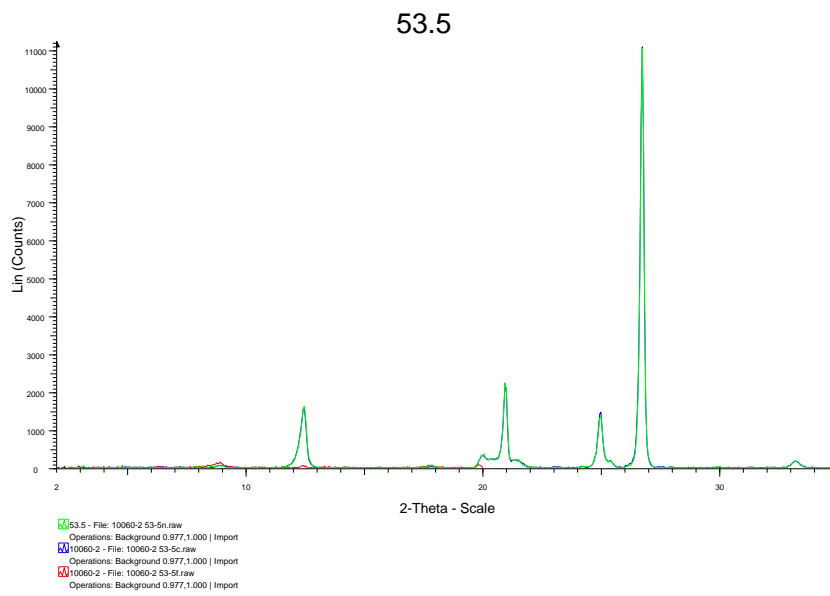
1.1.2 FORMACIÓN GUADUAS (muestra 10-LCQ-04)



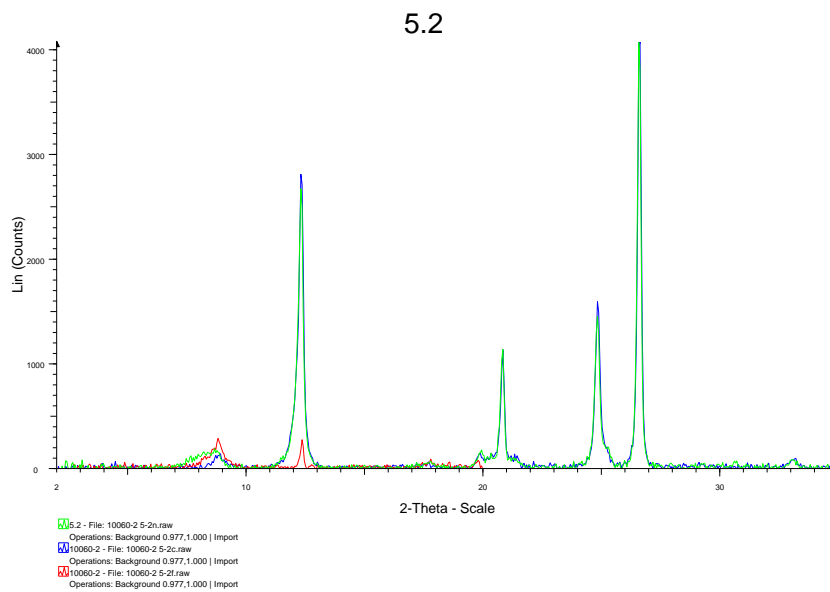
Histograma de concentración de minerales arcilla en roca total y fracciones separadas para esta muestra después de la glicolación.



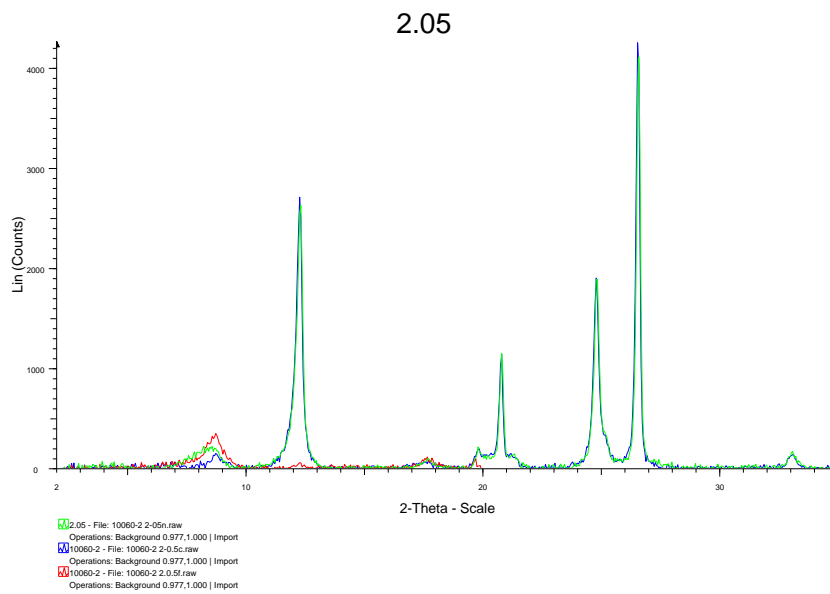
Difractograma de roca total.



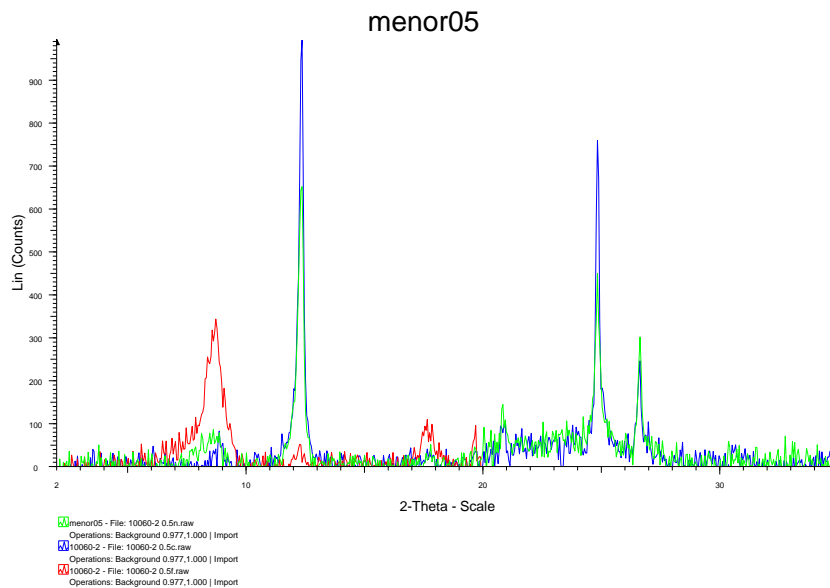
Fracción entre 53-5 micras



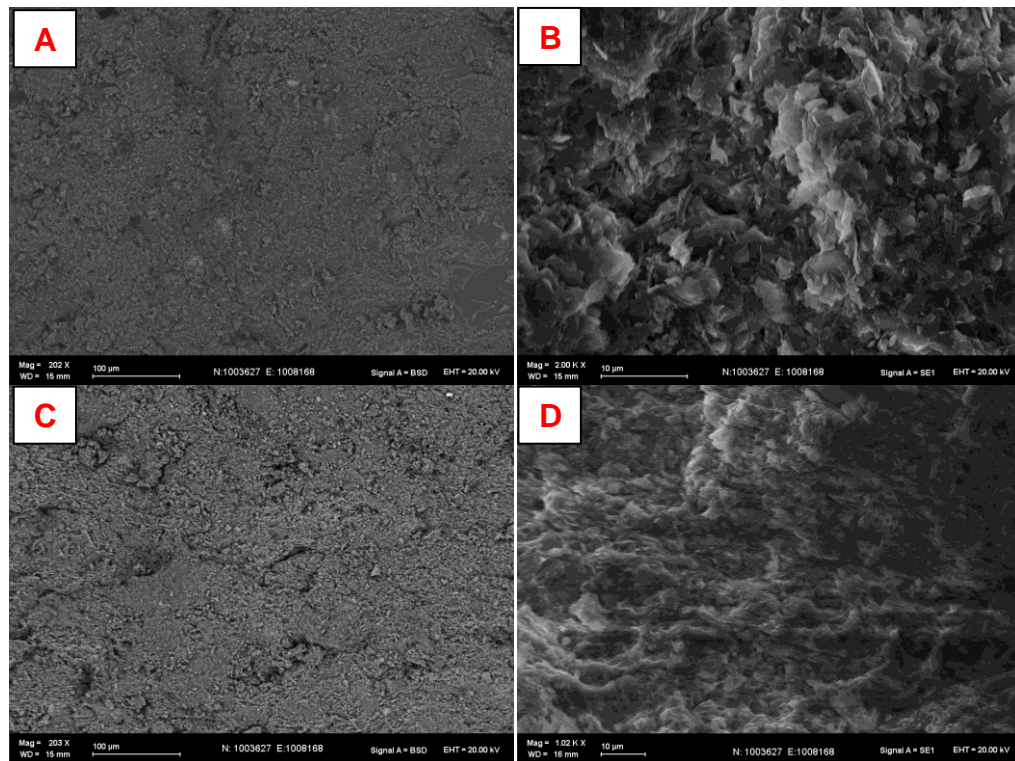
Fracción entre 5-2 micras



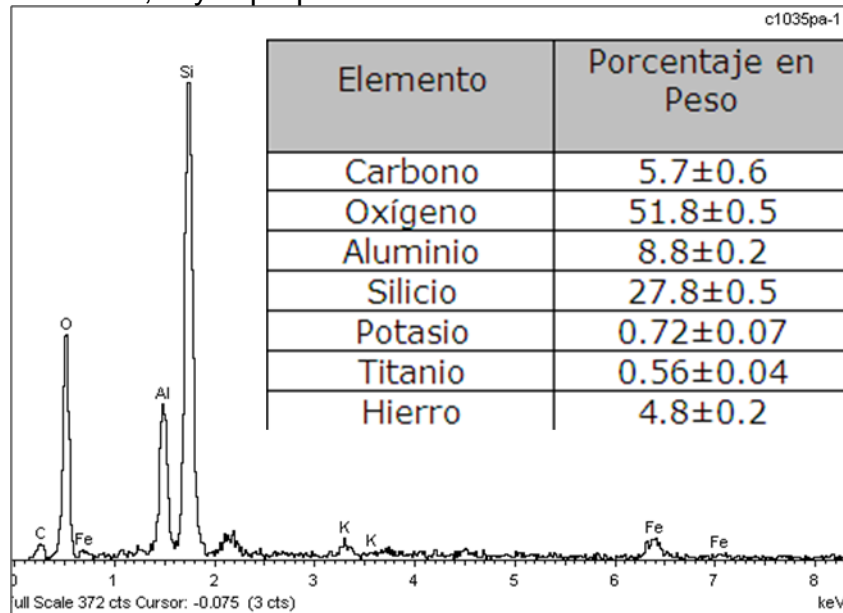
Fracción entre 2-0.5 micras



Fracción menor de 0.5 micras

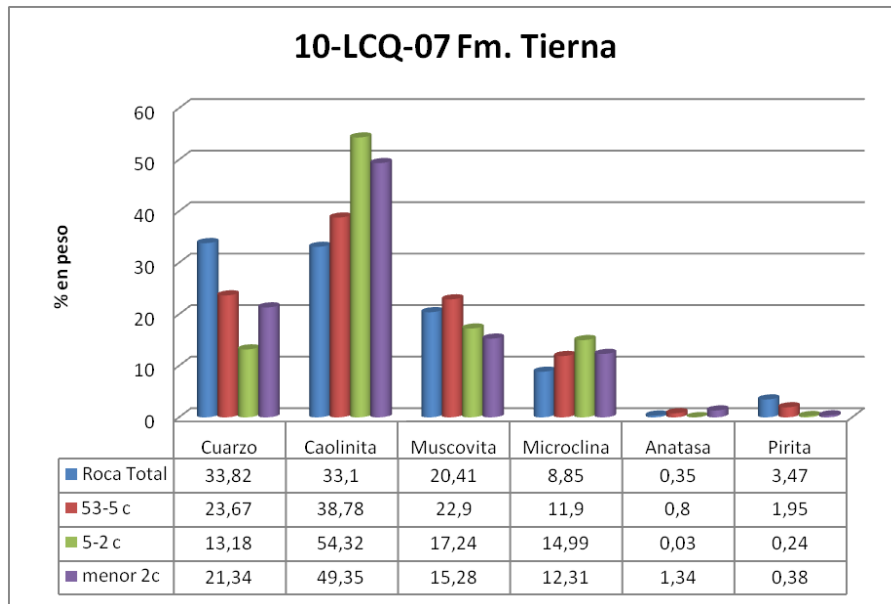


Imágenes al SEM de la muestra 10-LCQ-04 Formación Guaduas A y B tomadas paralela a laminación, C y D perpendicular a la laminación.

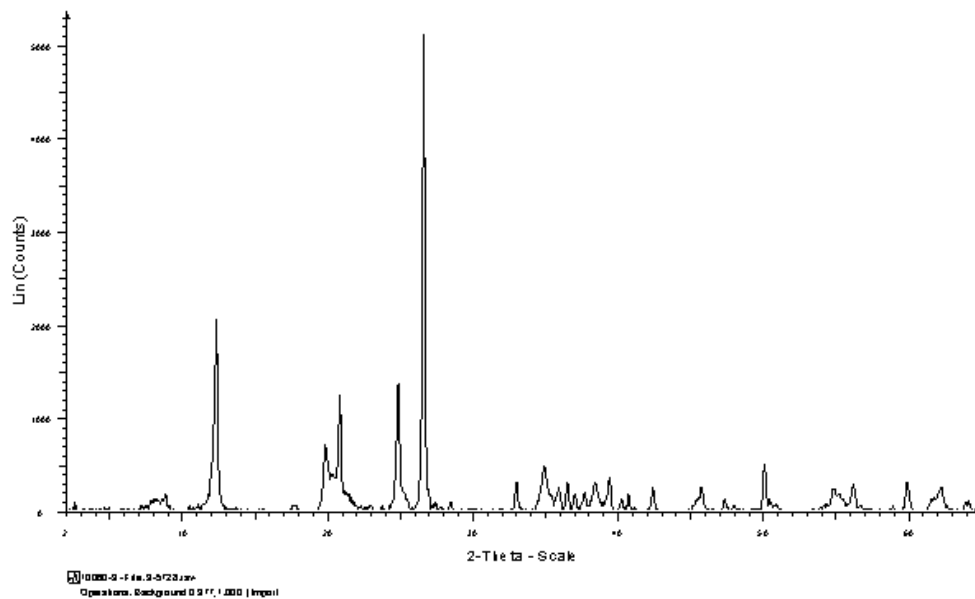


Espectro de composición elemental y su respectiva composición semi-cuantitativa.

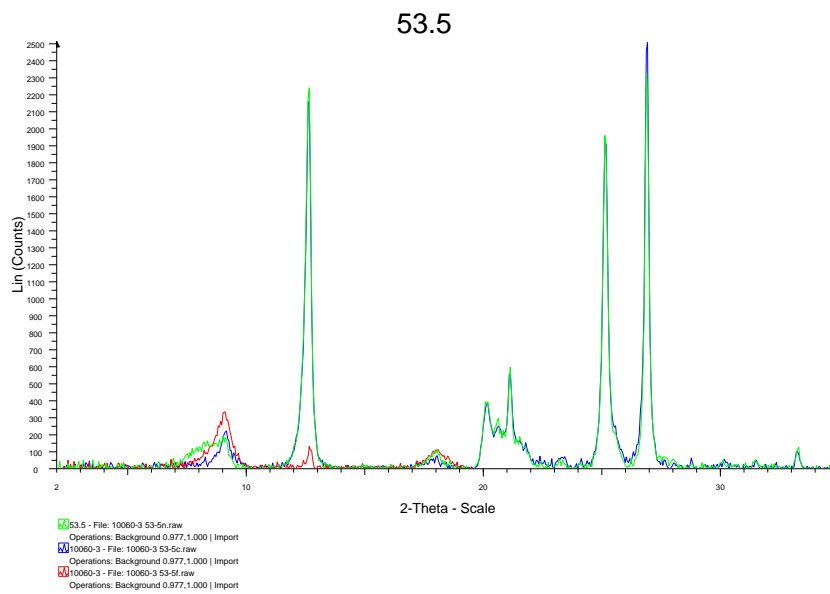
1.1.3 FORMACIÓN TIERNA (muestras 10-LCQ-07)



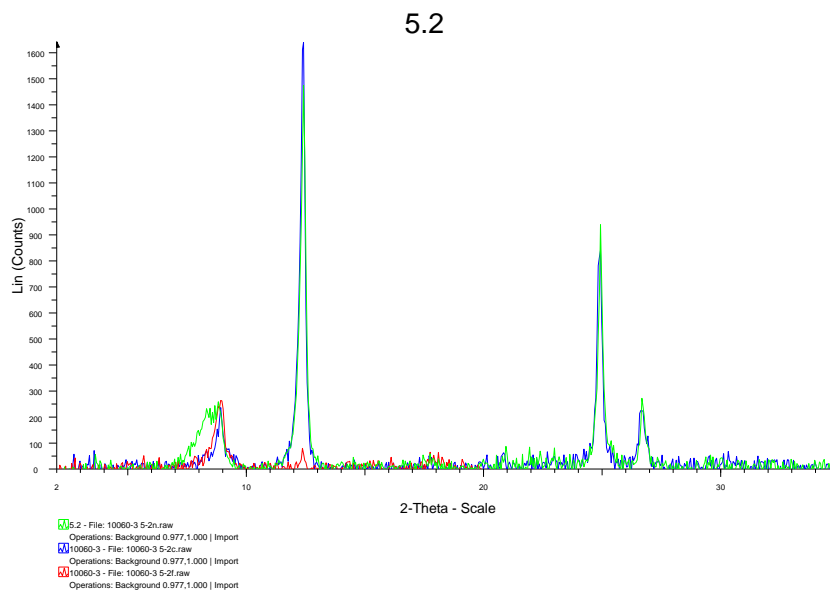
Histograma de concentración de minerales arcilla en roca total y fracciones separadas para esta muestra después de la glicolación.



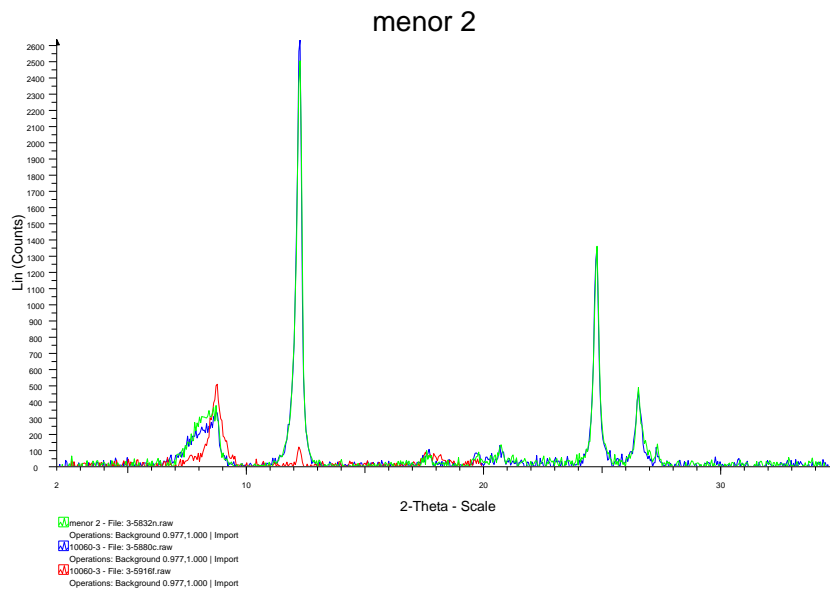
Difractograma Roca Total



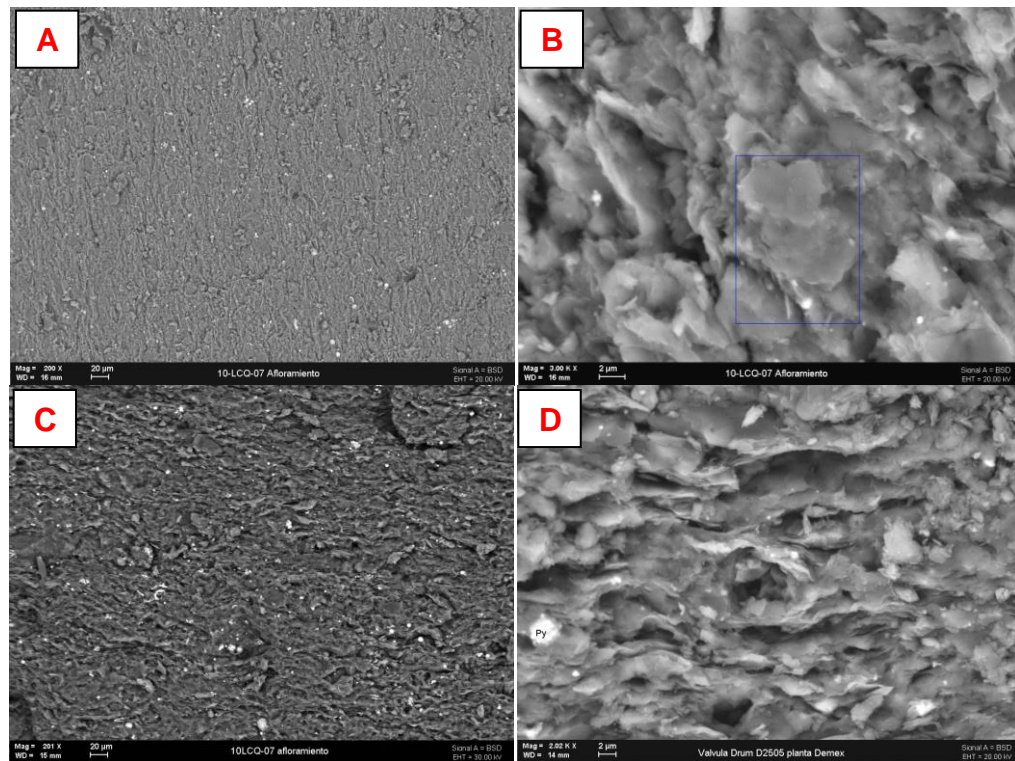
Fracción entre 53-5 micras



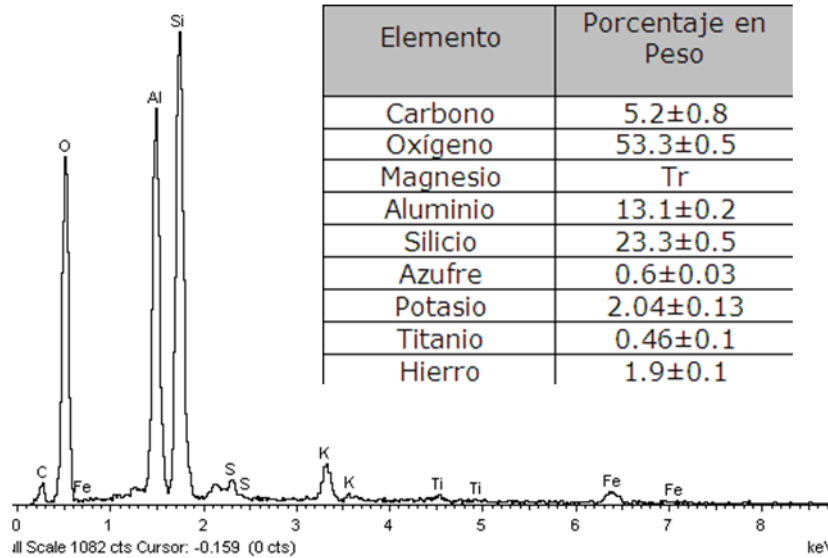
Fracción entre 5-2 micras



Fracción menor de 2 micras

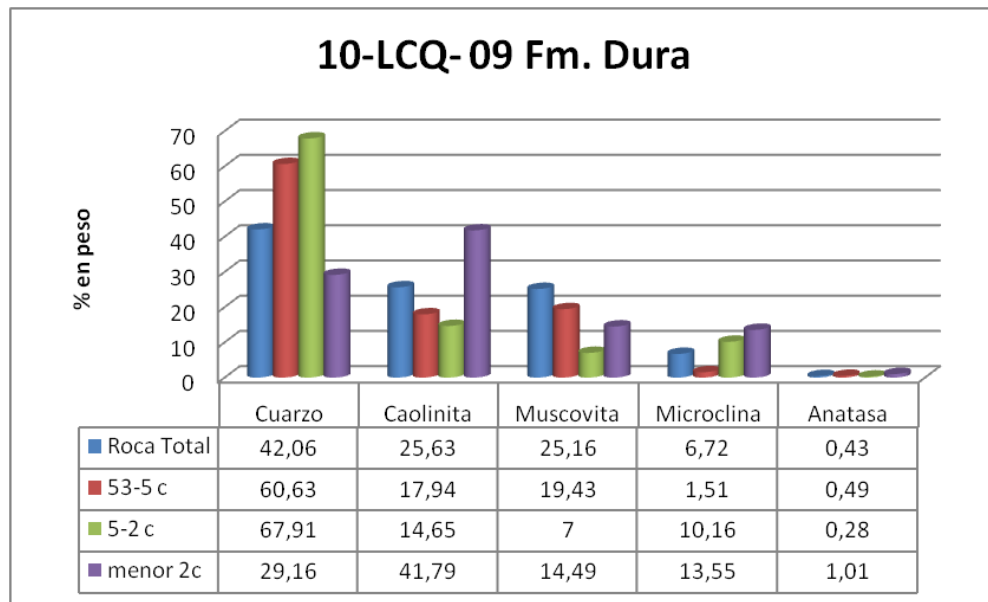


Imágenes al SEM de la muestra 10-LCQ-07 Formación Tierna A y B tomadas paralela a laminación, C y D perpendicular a la laminación.

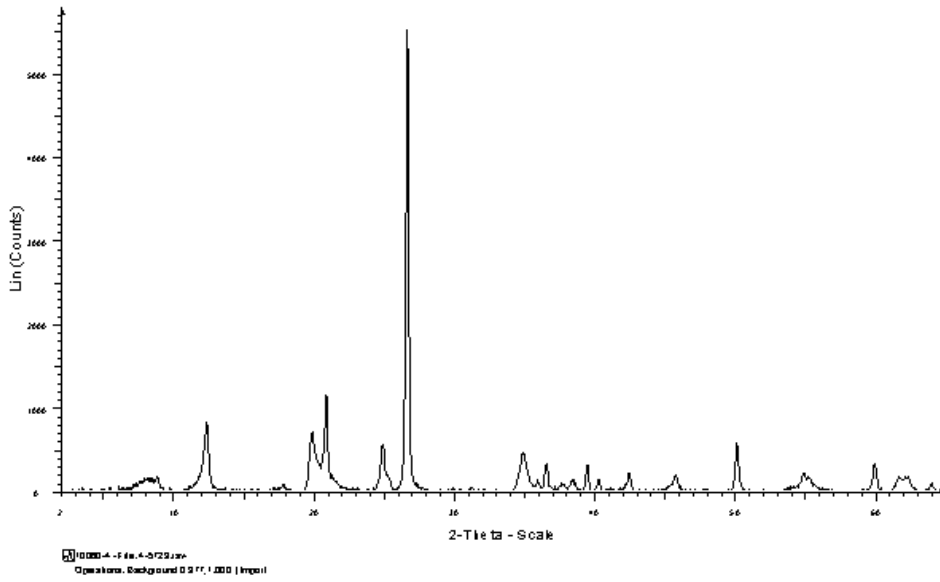


Composición elemental de la muestra en general, con su respectivo análisis cuantitativo.

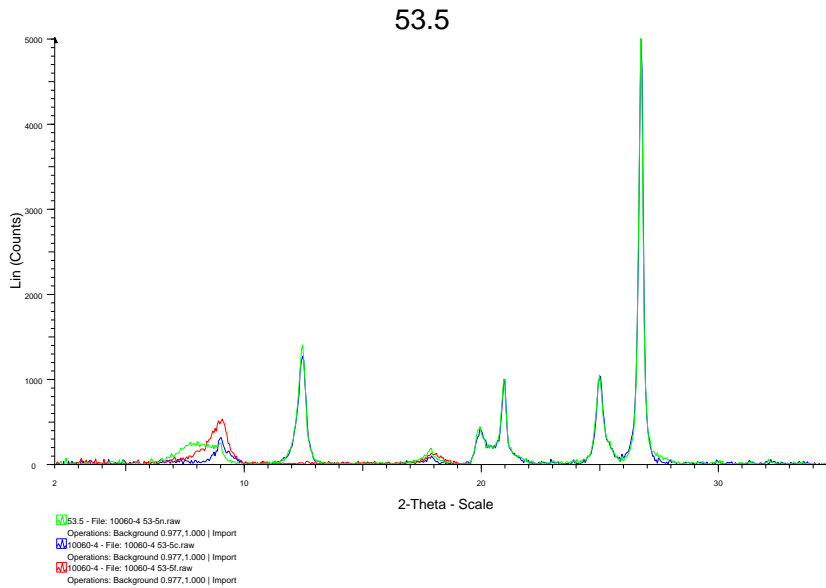
1.1.4 FORMACIÓN DURA (muestra 10-LCQ-09)



Histograma de concentración de minerales arcilla en roca total y fracciones separadas para esta muestra después de la glicolación.

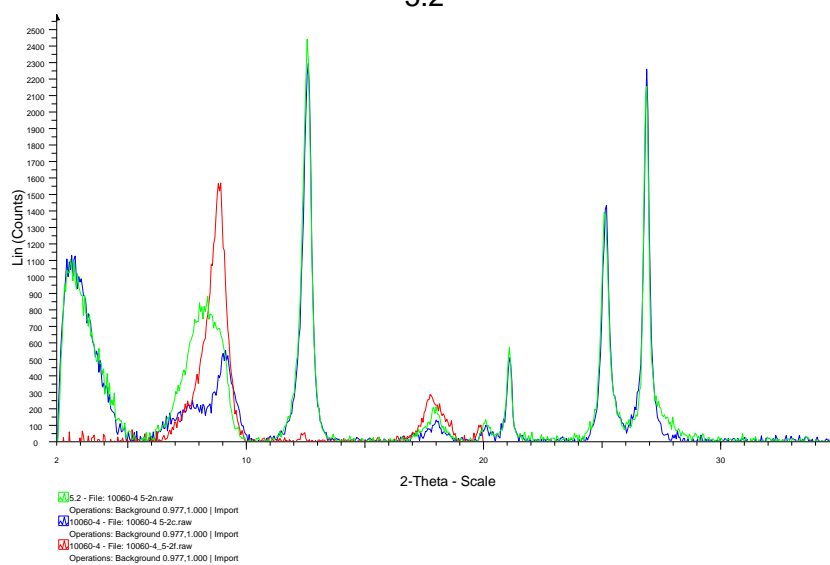


Difractograma Roca Total



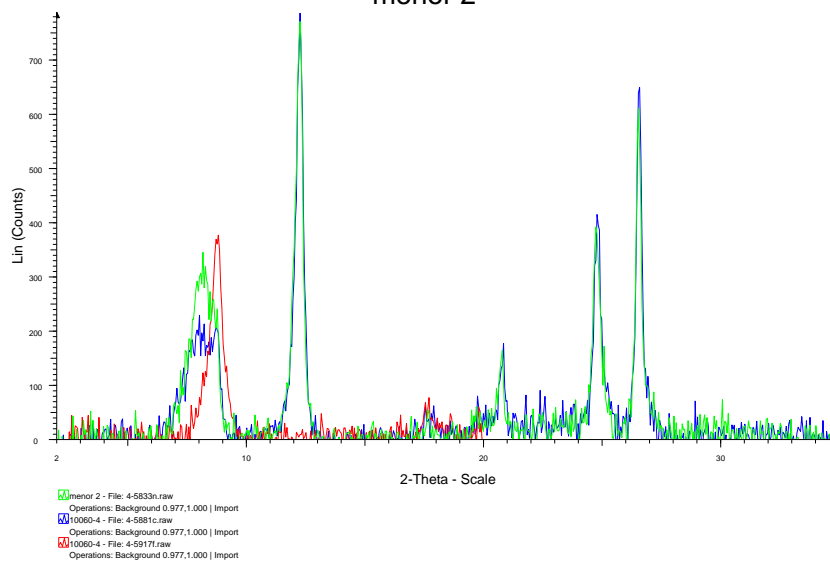
Fracción entre 53-5 micras

5.2

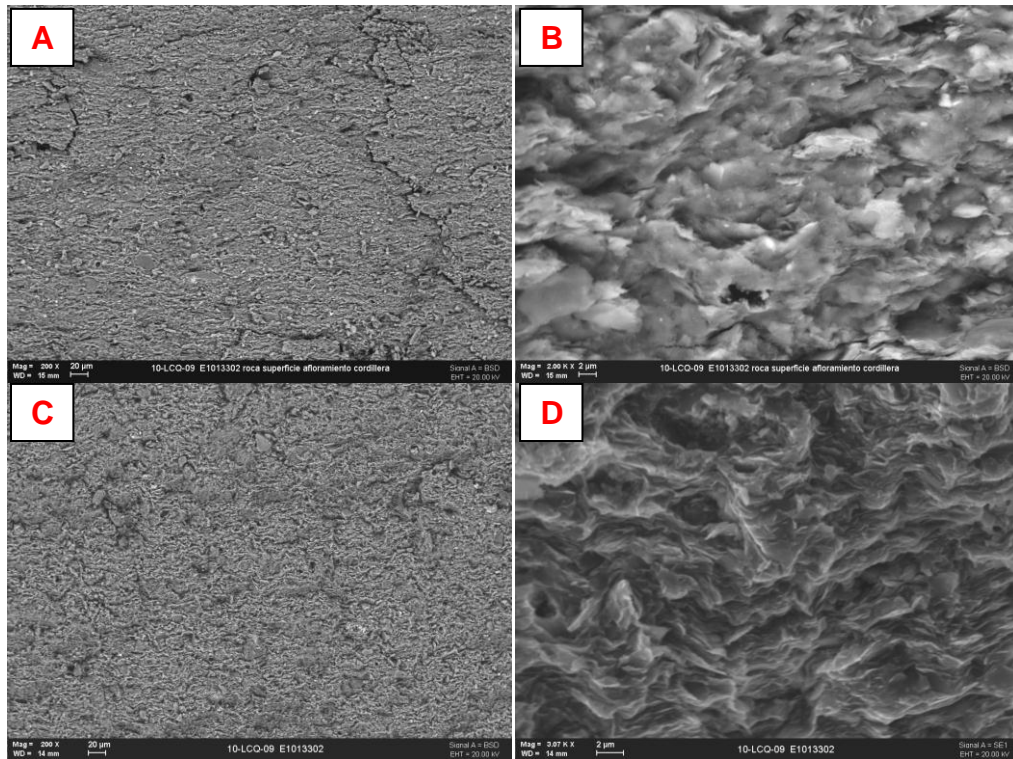


Fracción entre 5-2 micras

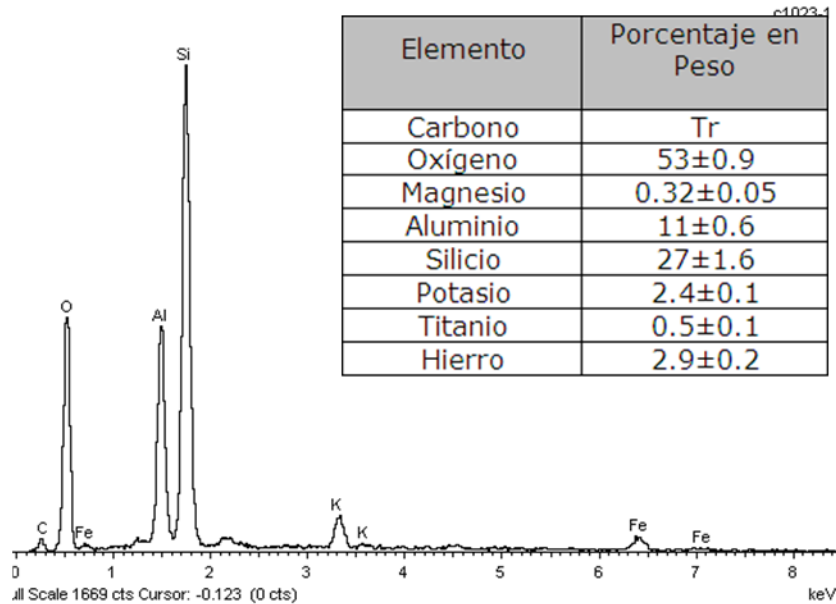
menor 2



Fracción menor de 2 micras

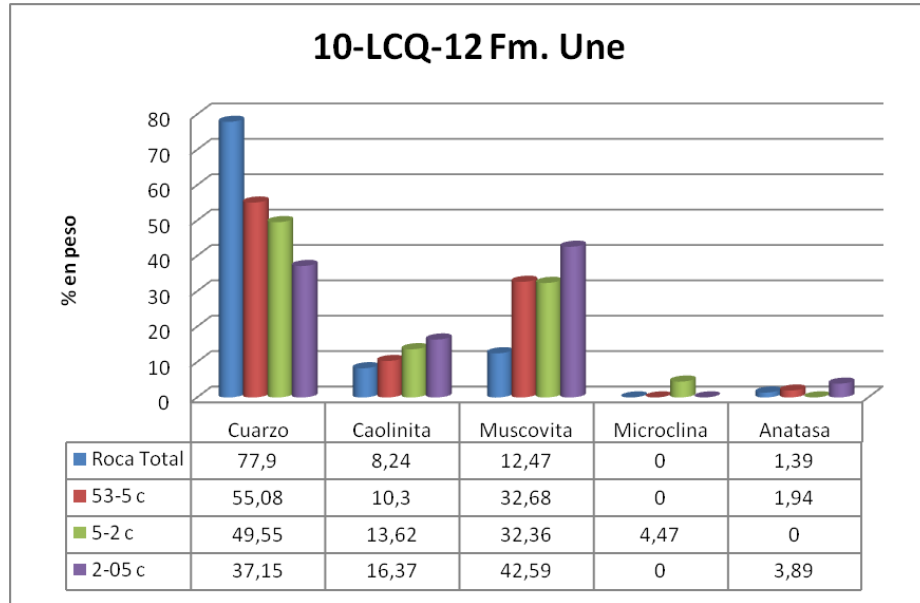


Imágenes al SEM de la muestra 10-LCQ-09 Formación Dura A y B tomadas paralela a laminación, C y D perpendicular a la laminación.

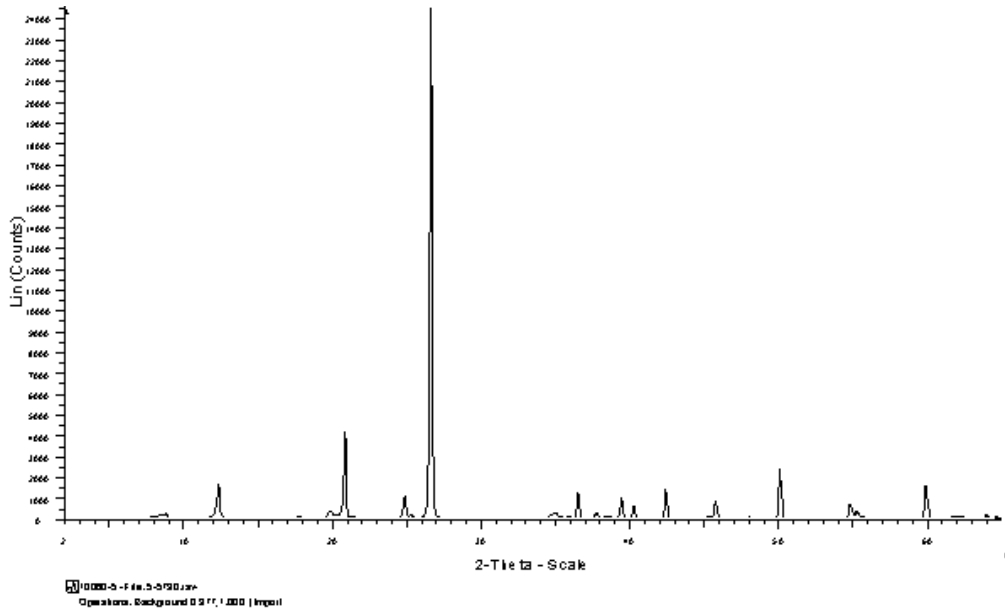


Espectro de composición elemental con su respectivo análisis semi-cuantitativo.

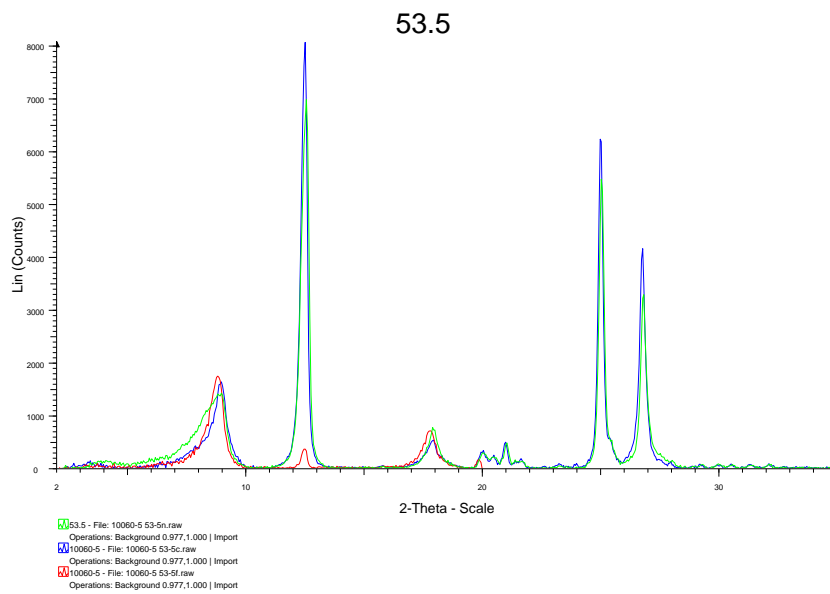
1.1.5 FORMACIÓN UNE (muestra 10-LCQ-12)



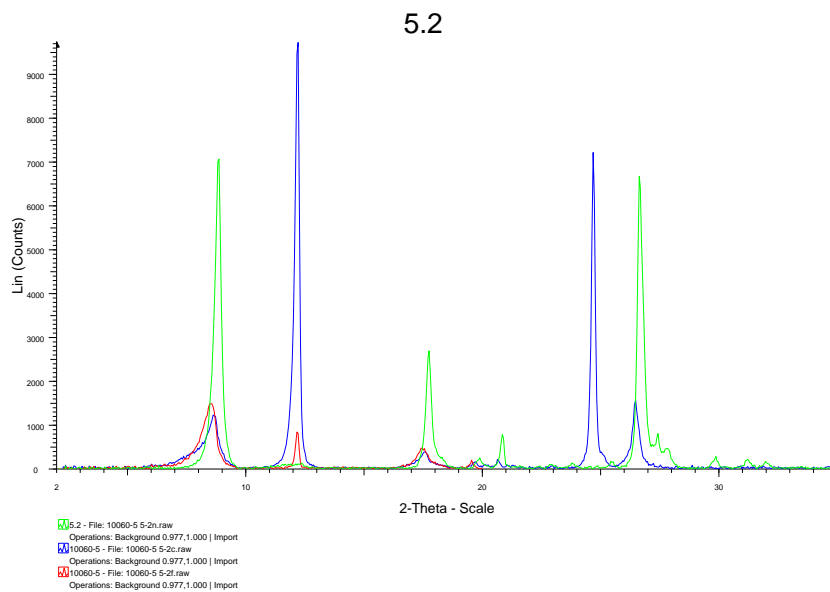
Histograma de concentración de minerales arcilla en roca total y fracciones separadas para esta muestra después de la glicolación.



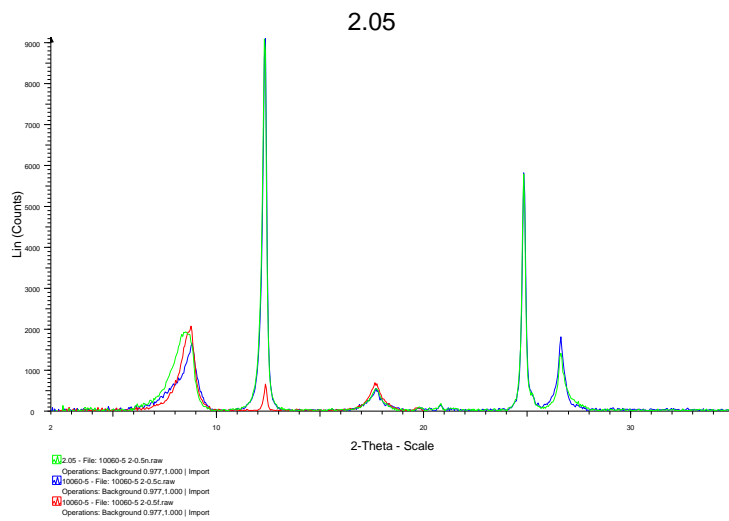
Difractograma Roca Total



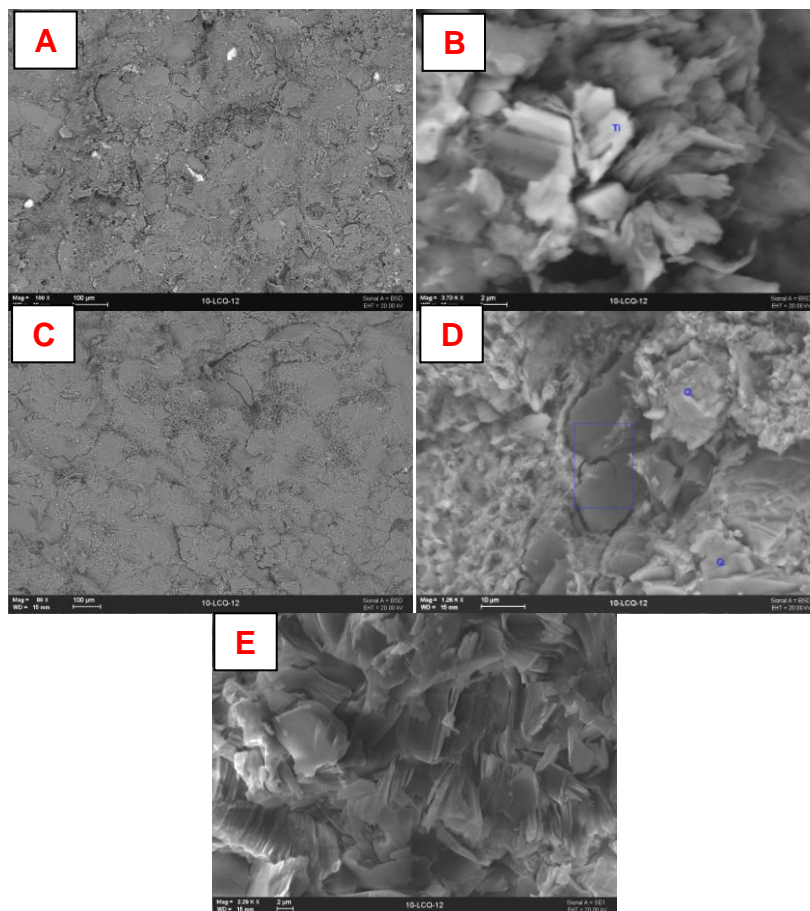
Fracción entre 53-5 micras



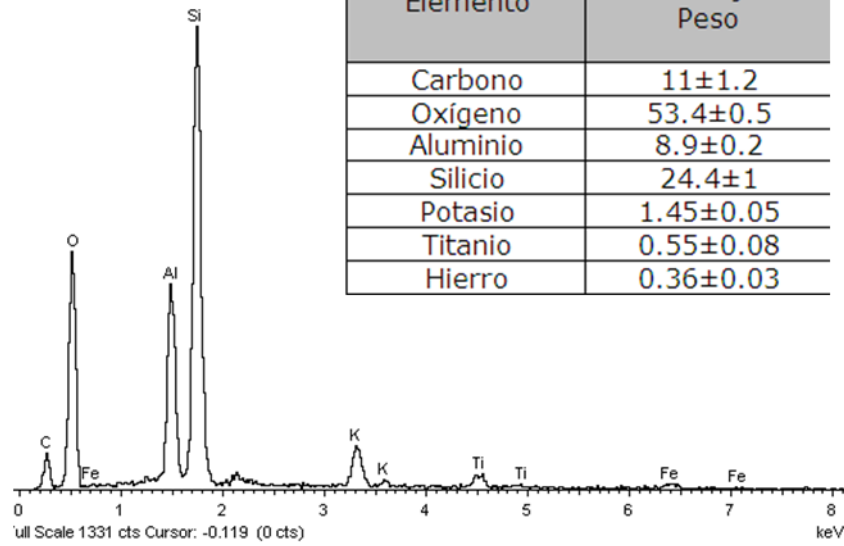
Fracción entre 5-2 micras



Fracción entre 2-0.5 micras

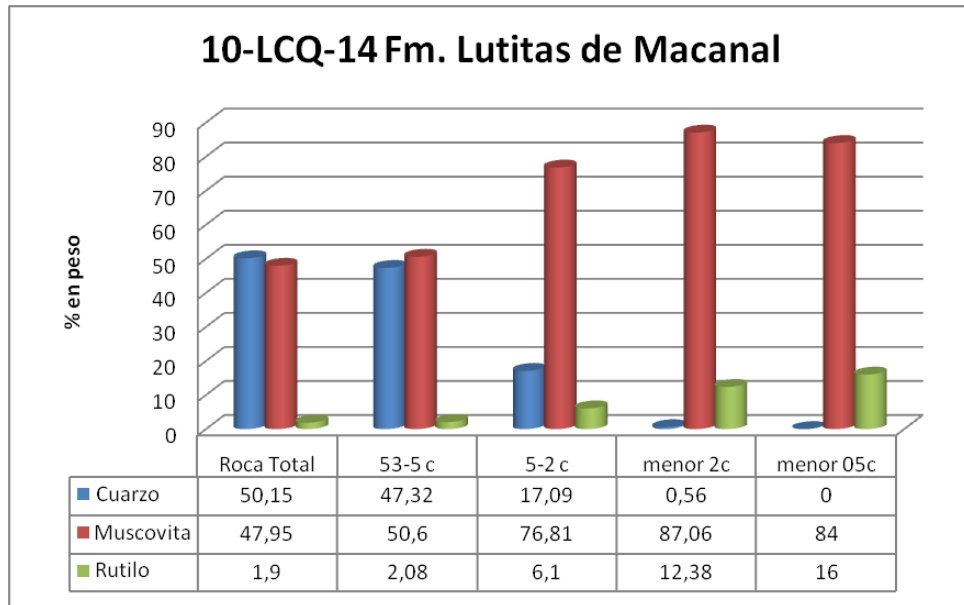


Imágenes al SEM de la muestra 10-LCQ-12 Formación Une A y B tomadas paralela a laminación, C, D y E perpendicular a la laminación.

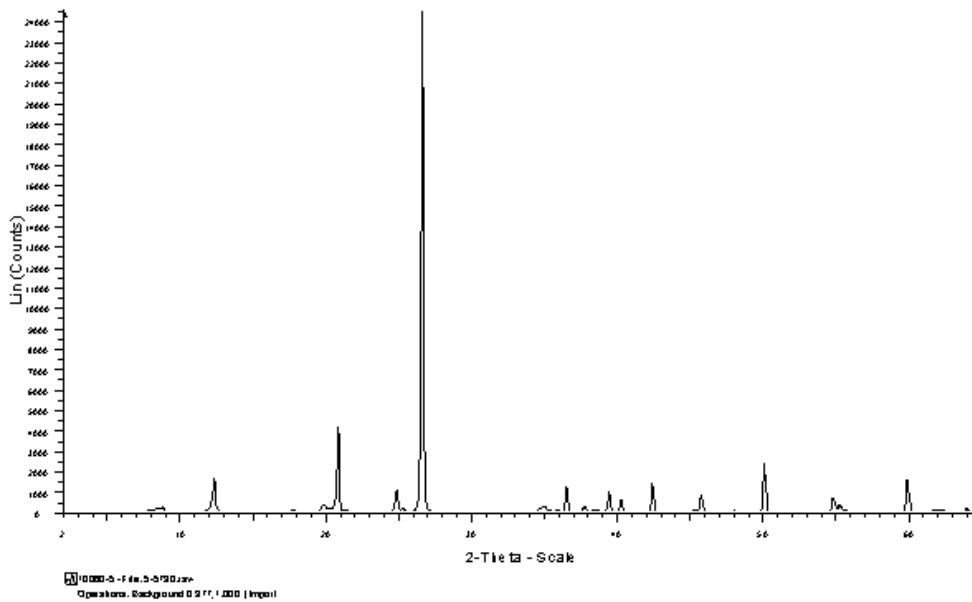


Espectro y análisis semi-cuantitativo elemental de la roca total.

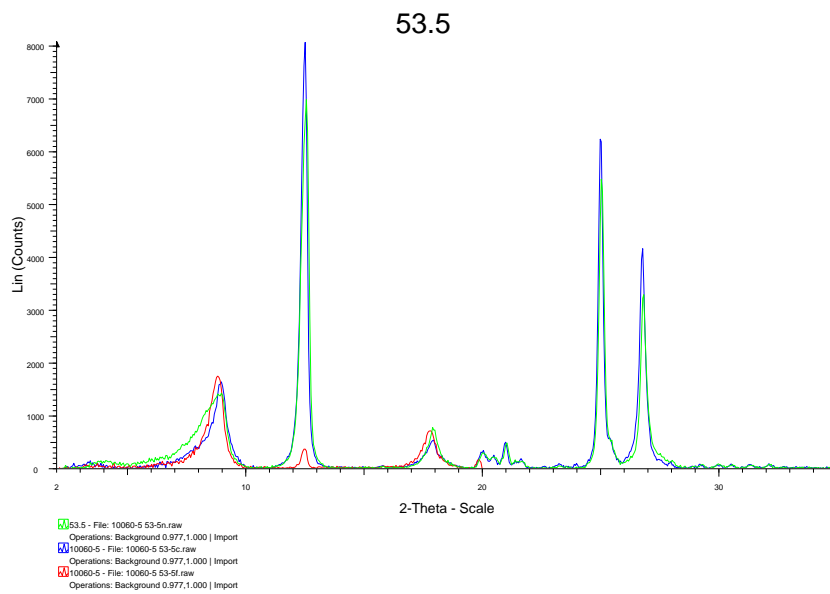
1.1.6 FORMACIÓN LUTITAS DE MACANAL (muestra 10-LCQ-14)



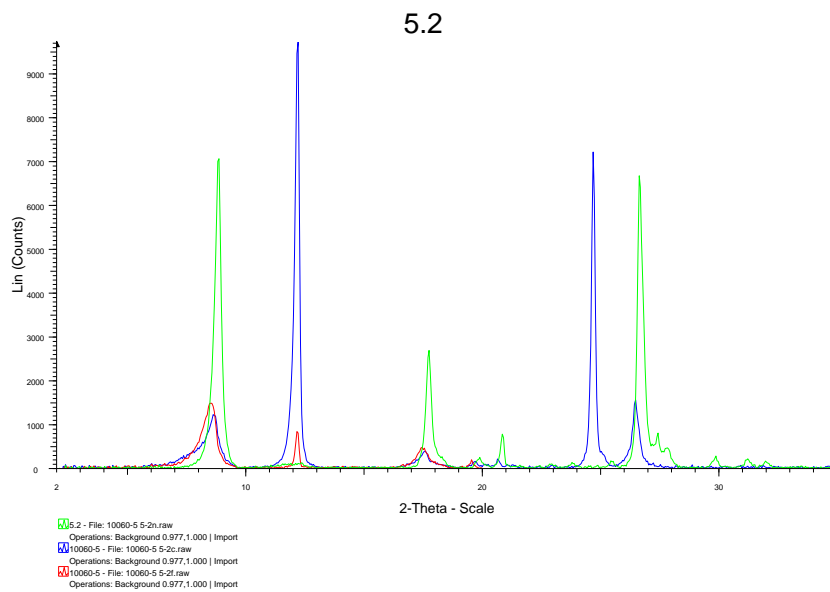
Histograma de concentración de minerales arcilla en roca total y fracciones separadas para esta muestra después de la glicolación.



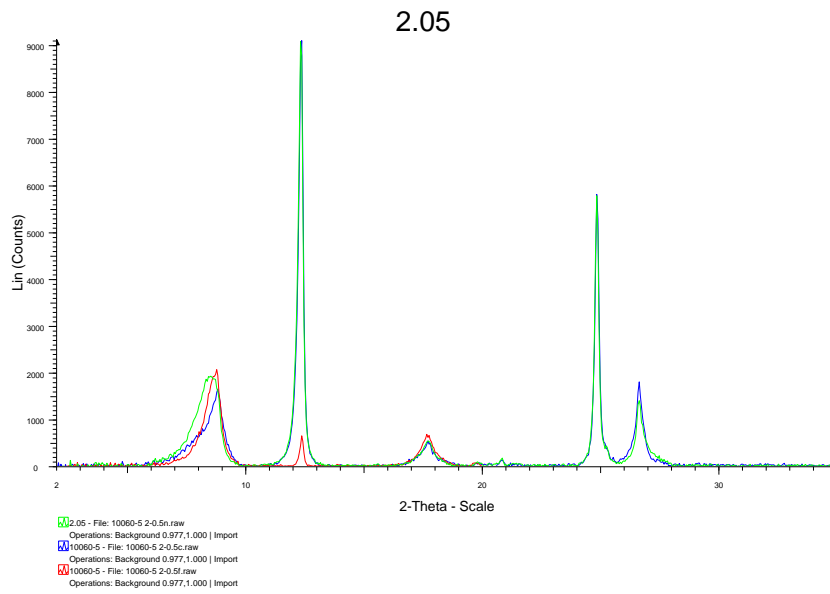
Difractograma Roca Total



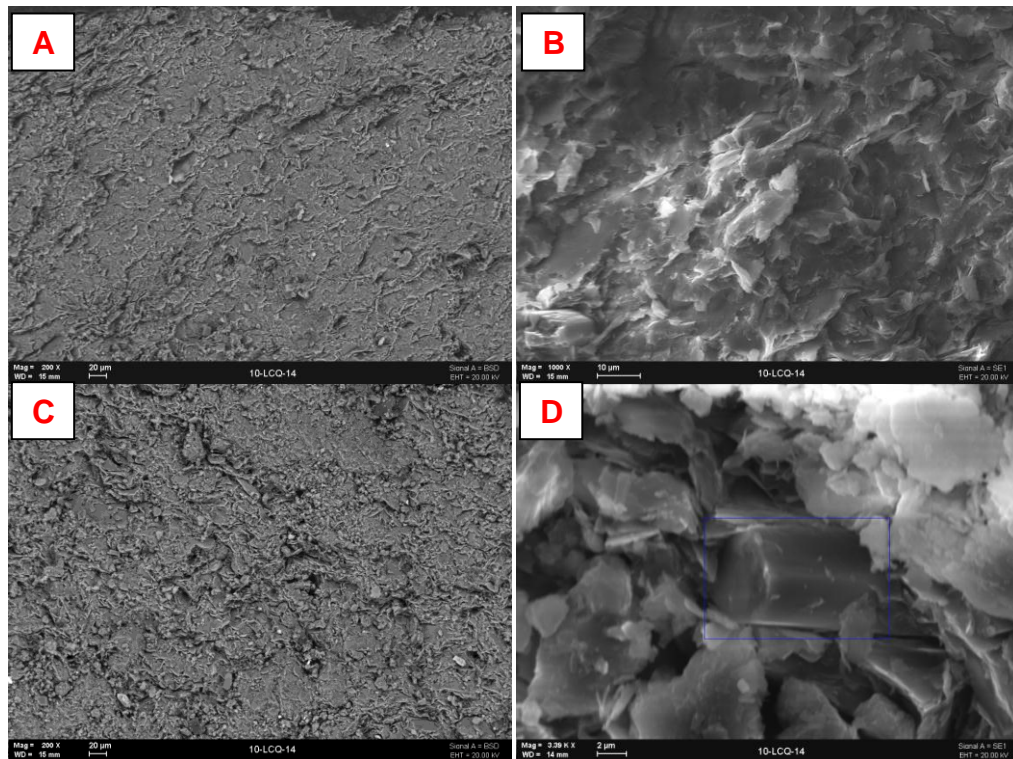
Fracción entre 53-5 micras



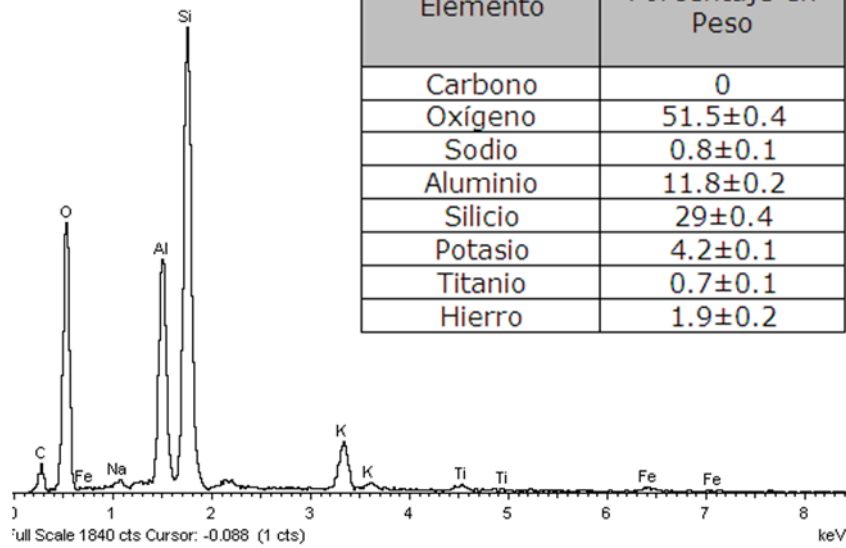
Fracción entre 5-2 micras



Fracción entre 2-0.5 micras



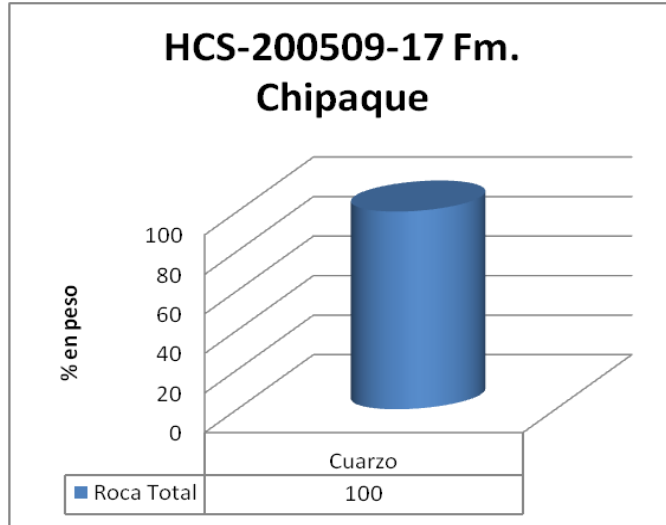
Imágenes al SEM de la muestra 10-LCQ-14 Formación Macanal A y B tomadas paralela a laminación, C y D perpendicular a la laminación.



Espectro composicional y su respectivo análisis semi-cuantitativo

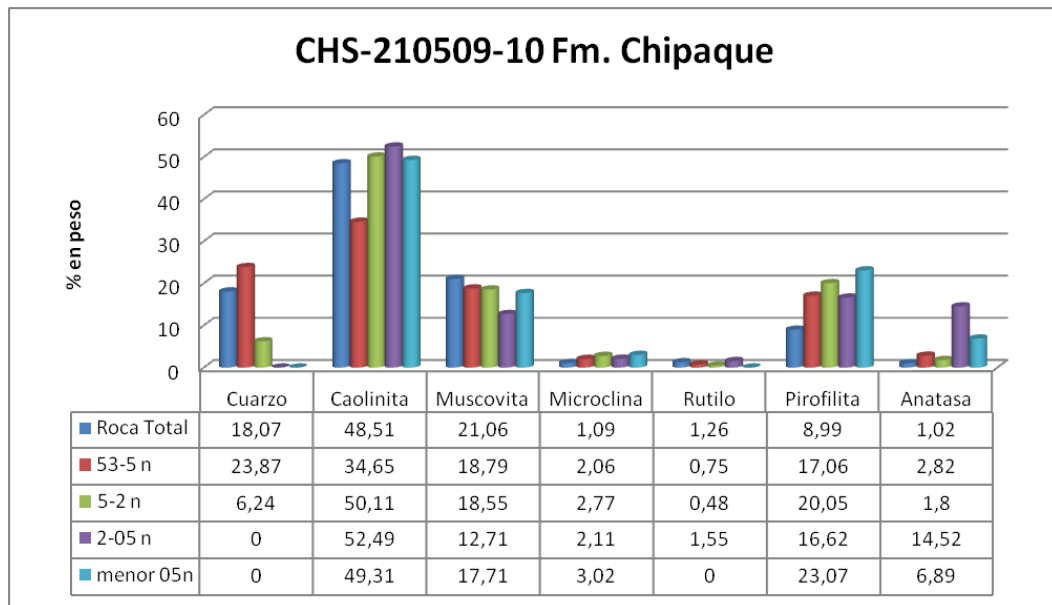
1.2 TRANSECTA CHITA-HATO COROZAL

1.2.1 FORMACIÓN CHIPAQUE (muestra HCS-200509-17)

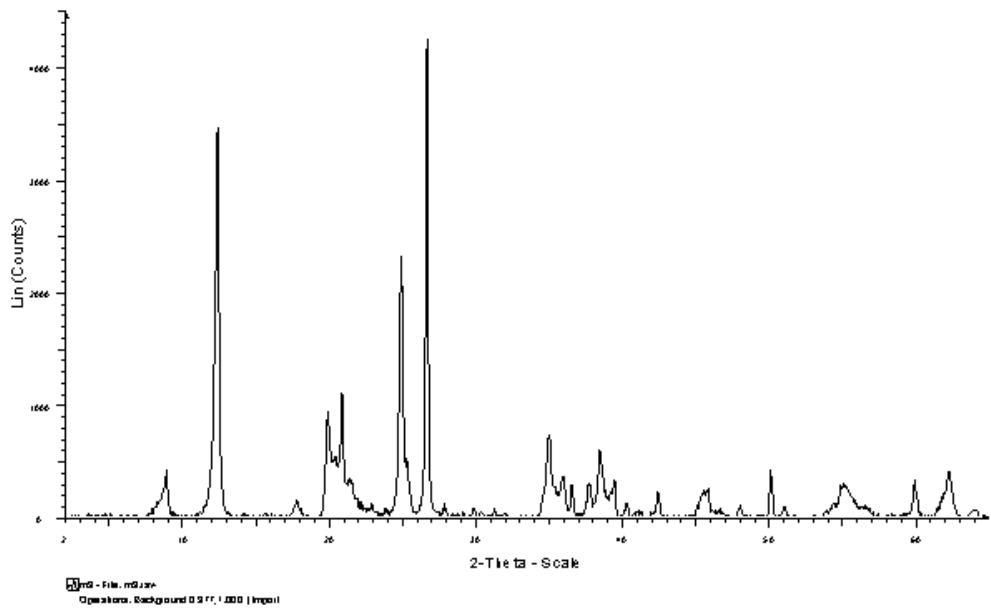


Histograma de concentración de minerales arcilla en roca total.

1.2.2 FORMACIÓN CHIPAQUE (muestra CHS-210509-10)

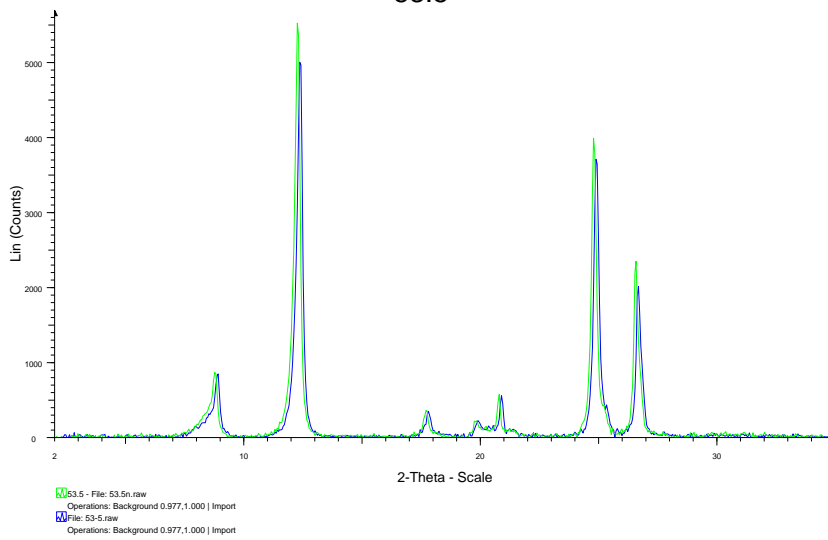


Histograma de concentración de minerales arcilla en roca total y fracciones separadas para esta muestra después de la gicolación.

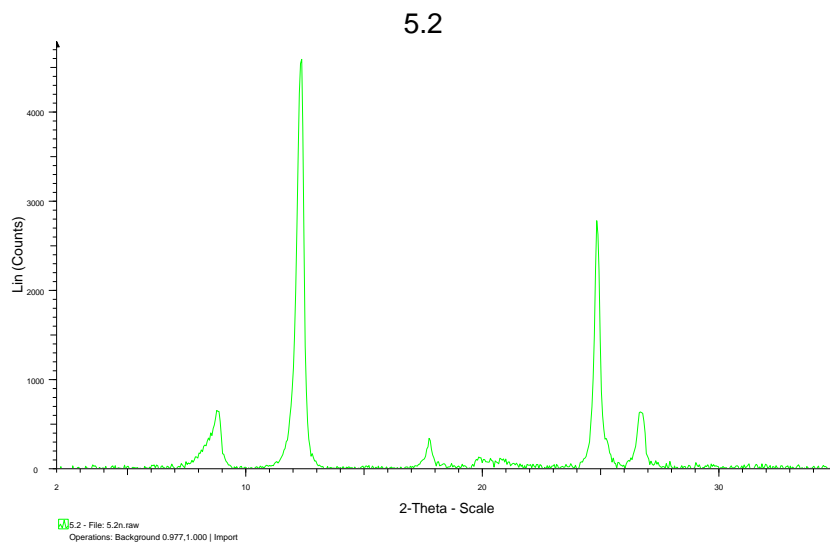


Difractograma Roca Total

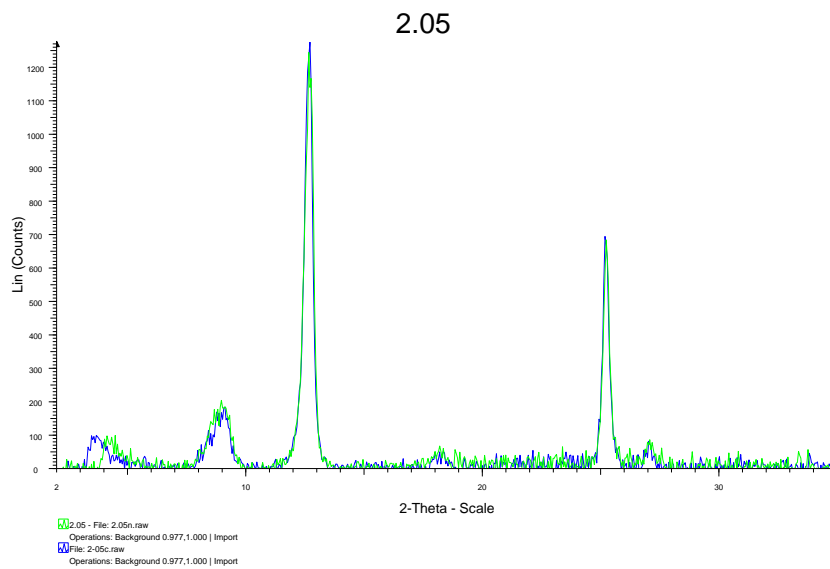
53.5



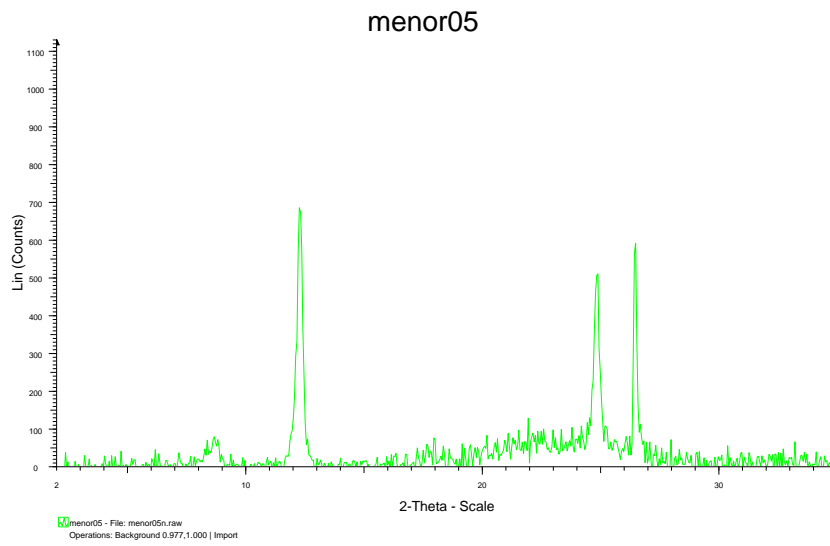
Fracción entre 53-5 micras



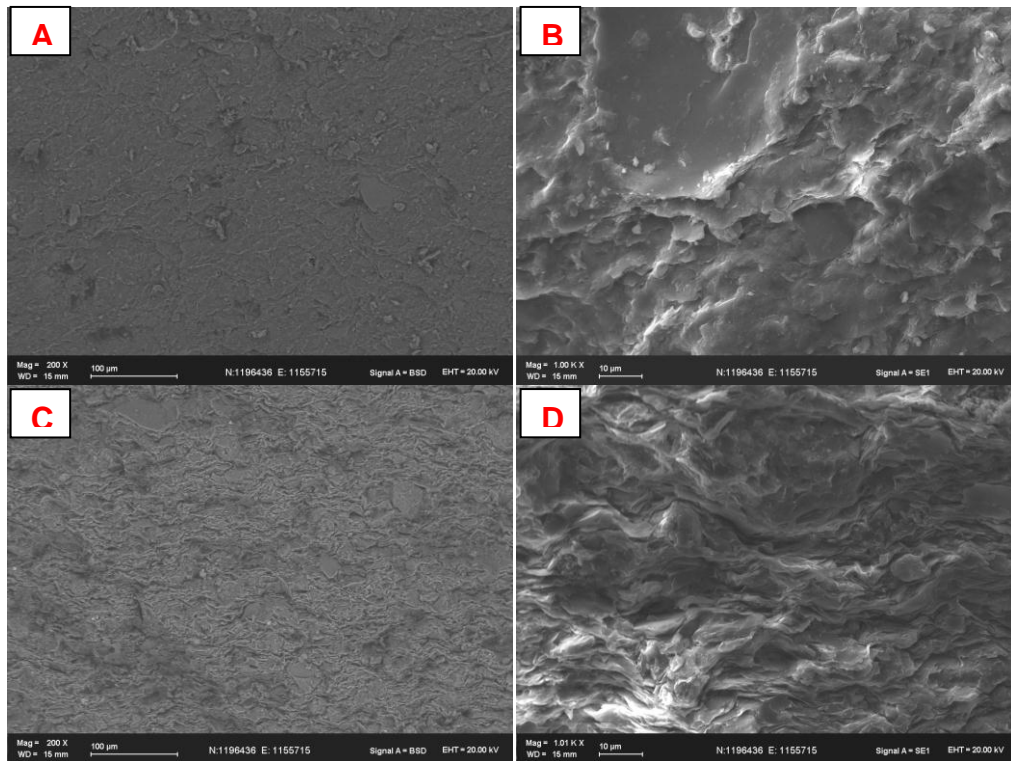
Fracción entre 5-2 micras



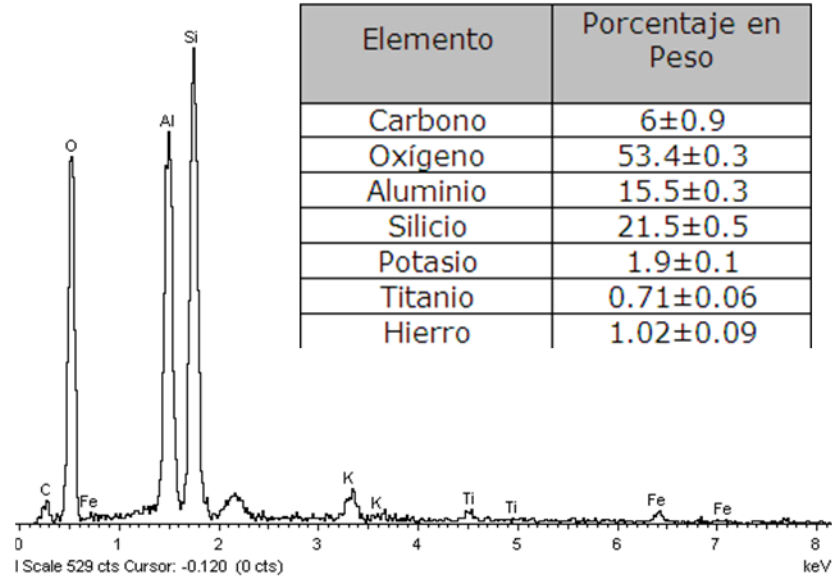
Fracción entre 2-0.5 micras



Fracción menor de 0.5 micras

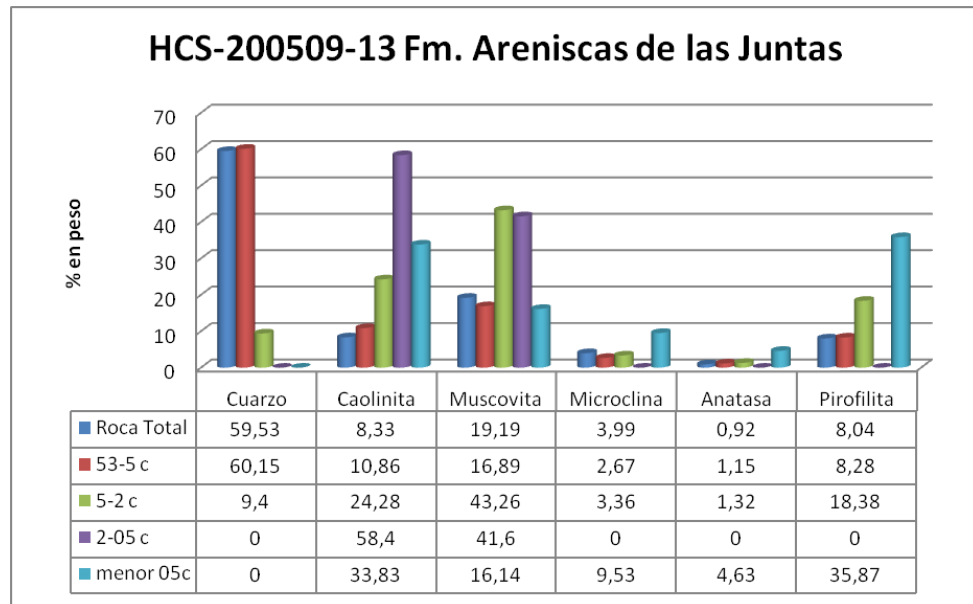


Imágenes al SEM de la muestra CHS-210509-10 Formación Chipaque. A y B tomadas paralelas a la laminación, C y D tomadas perpendicular a la laminación

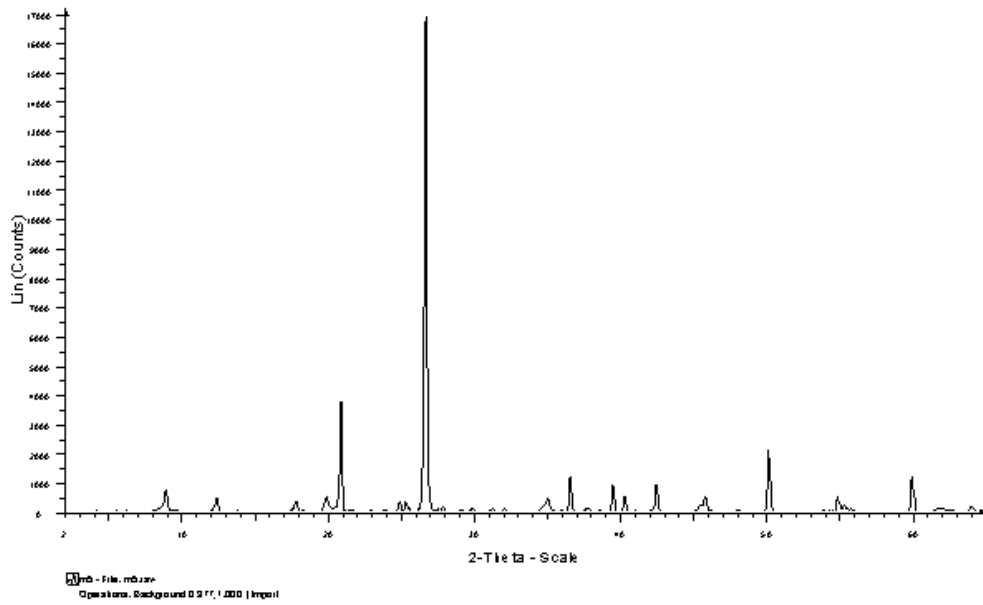


Espectro y análisis elemental semi-cuantitativo de la muestra en general.

1.2.3 FORMACIÓN ARENISCAS DE LAS JUNTAS (muestra)

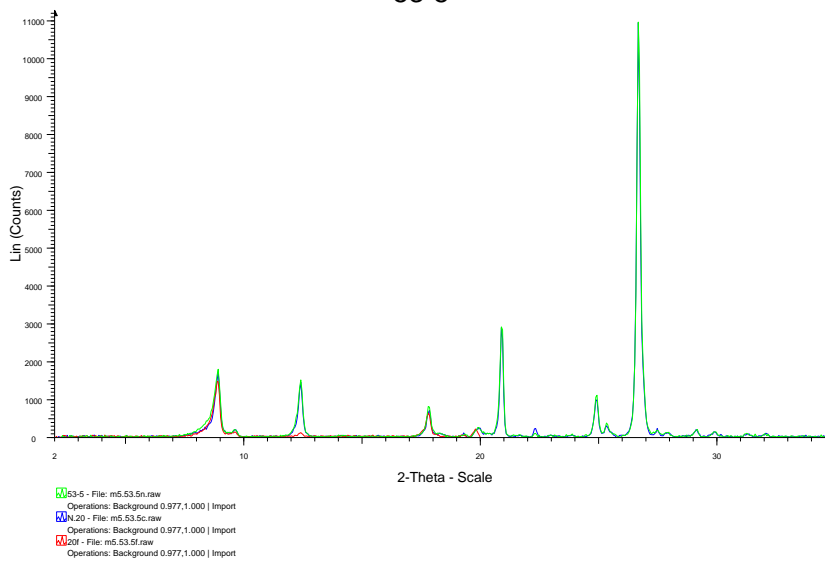


Histogramas de composición elemental de la muestra en roca total y fracciones separadas.



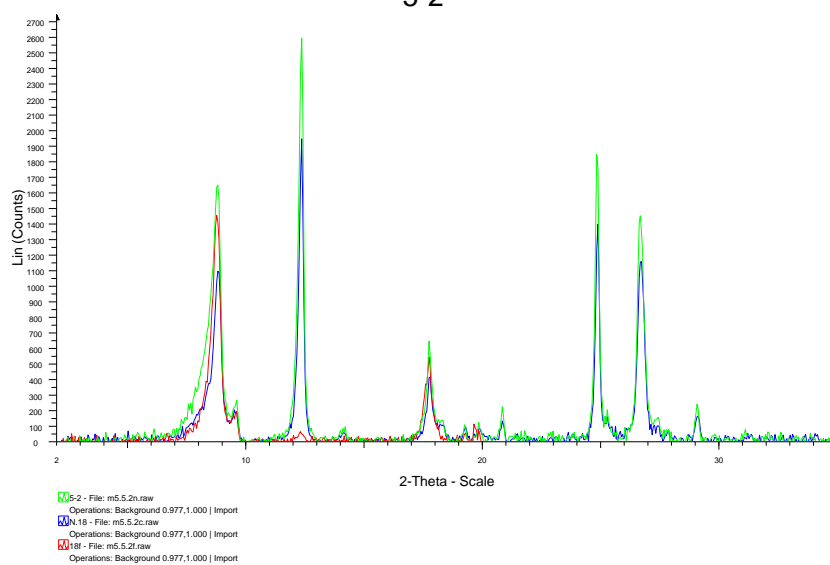
Difractograma Roca Total

53-5



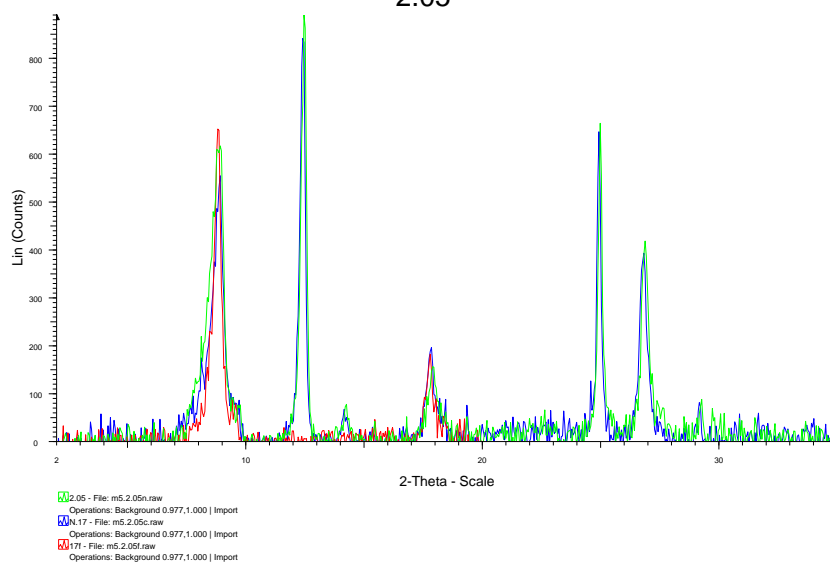
Fracción entre 53-5 micras

5-2

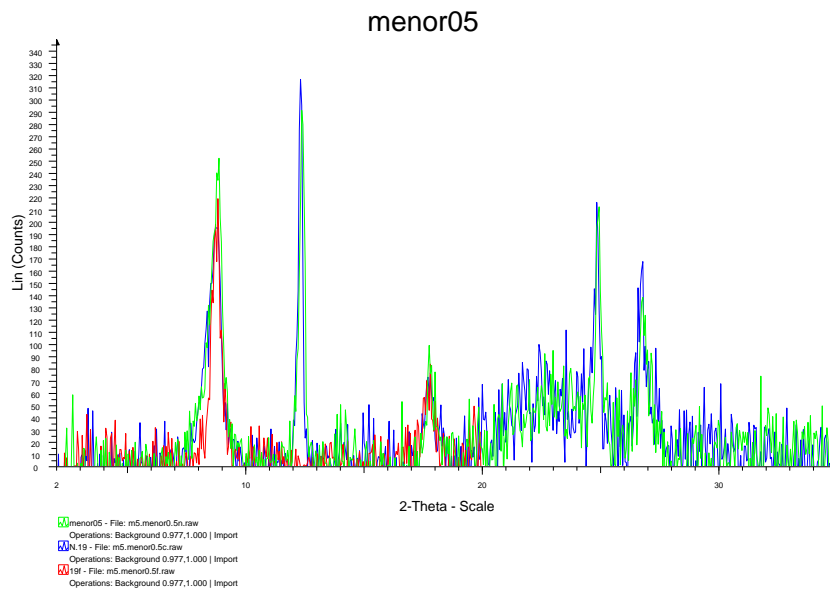


Fracción entre 5-2 micras

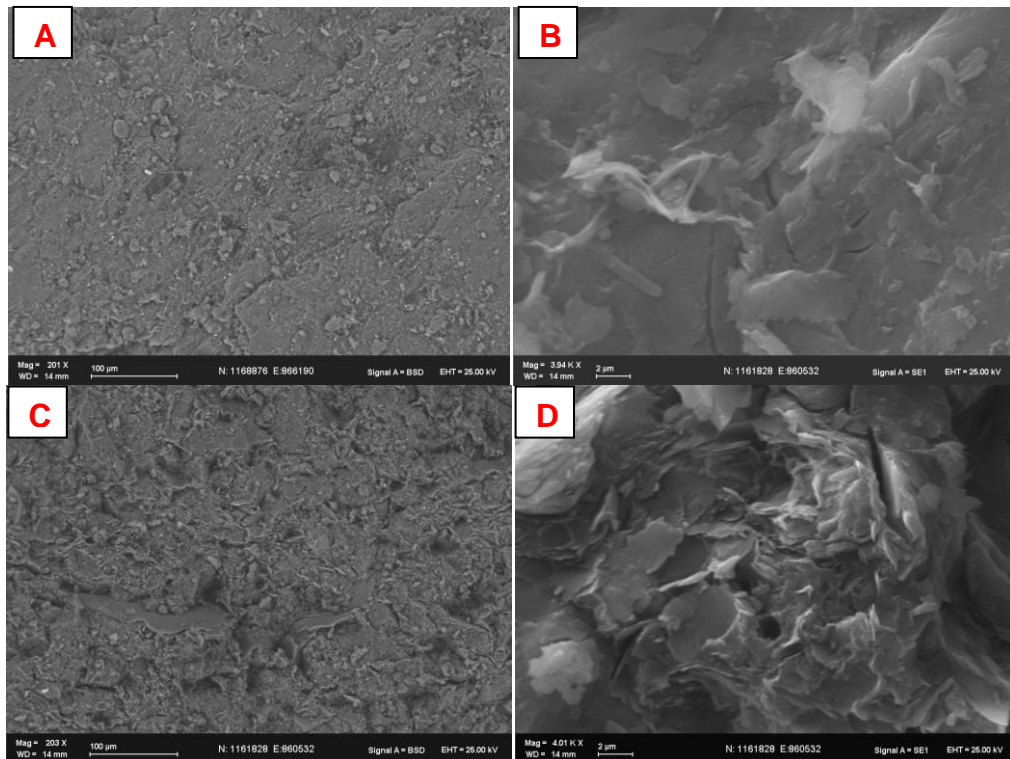
2.05



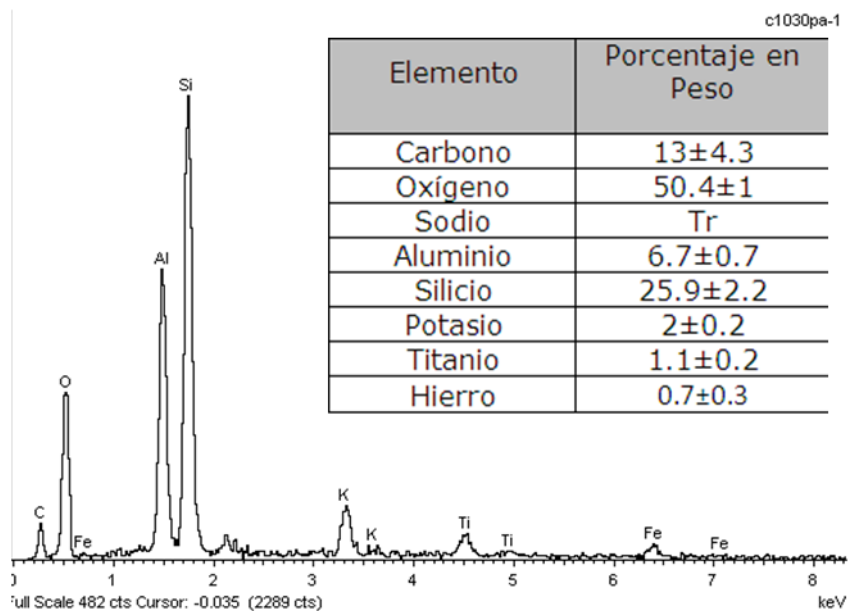
Fracción entre 2-0.5 micras



Fracción menor de 0.5 micras.

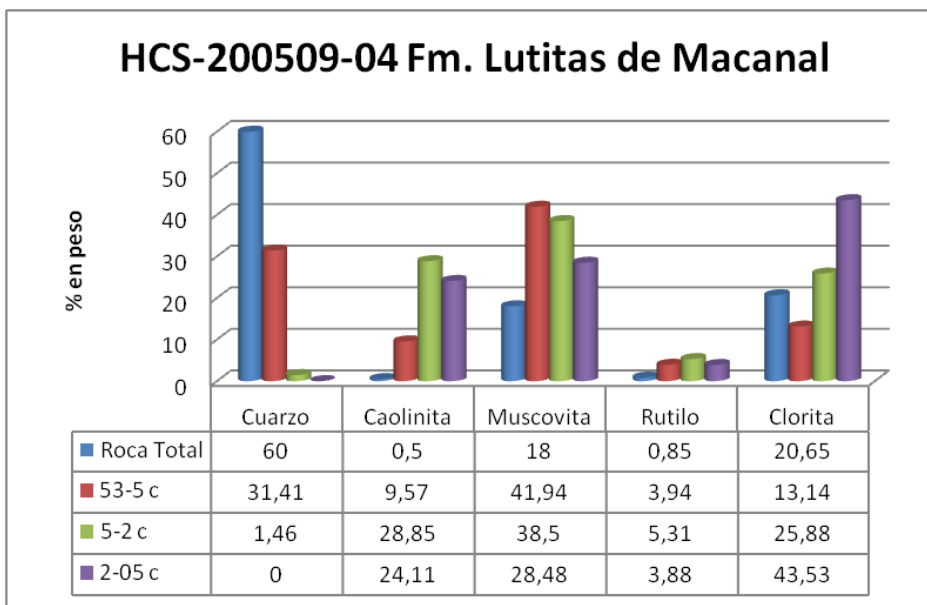


Imágenes al SEM de la muestra HCS-200509-13 Formación Areniscas de las Juntas A y B tomadas paralela a laminación, C y D perpendicular a la laminación.

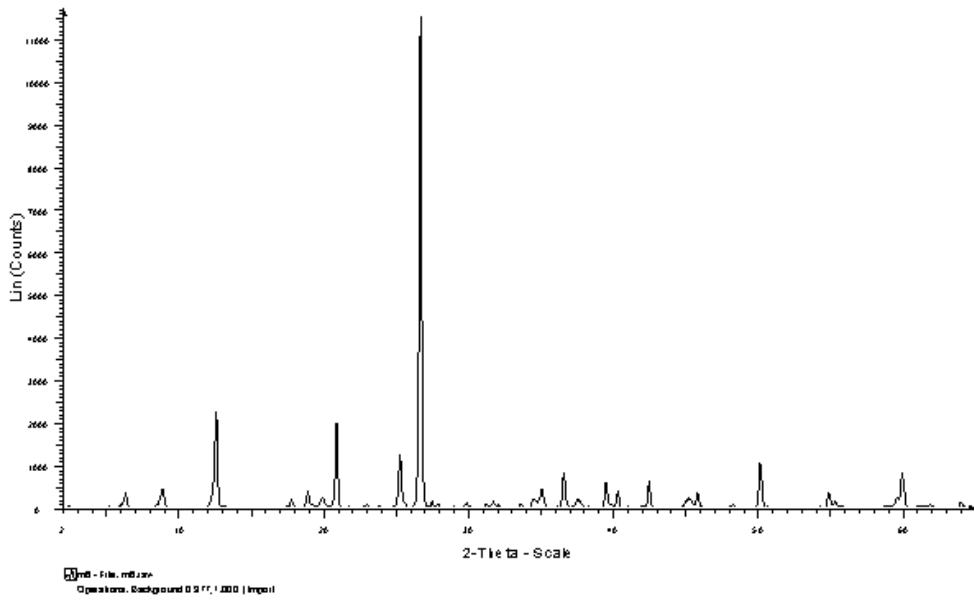


Composición elemental general de la muestra.

1.2.4 FORMACIÓN LUTITAS DE MACANAL (muestra HCS-200509-04)

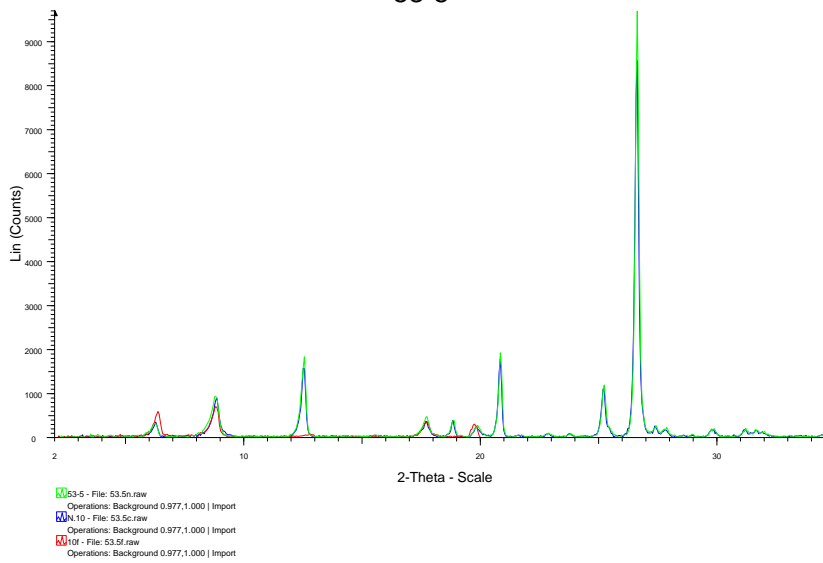


Composición mineralógica de la muestra en roca total y fracciones separadas.



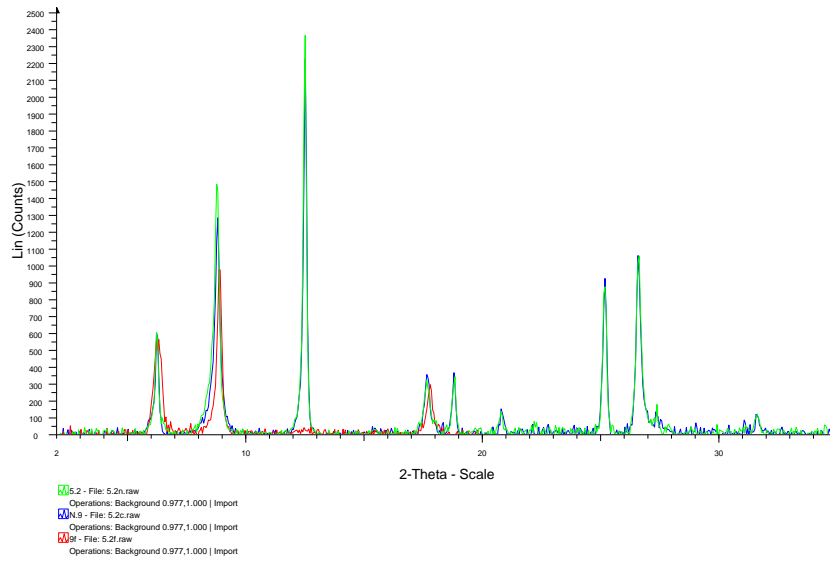
Difractograma Roca Total

53-5



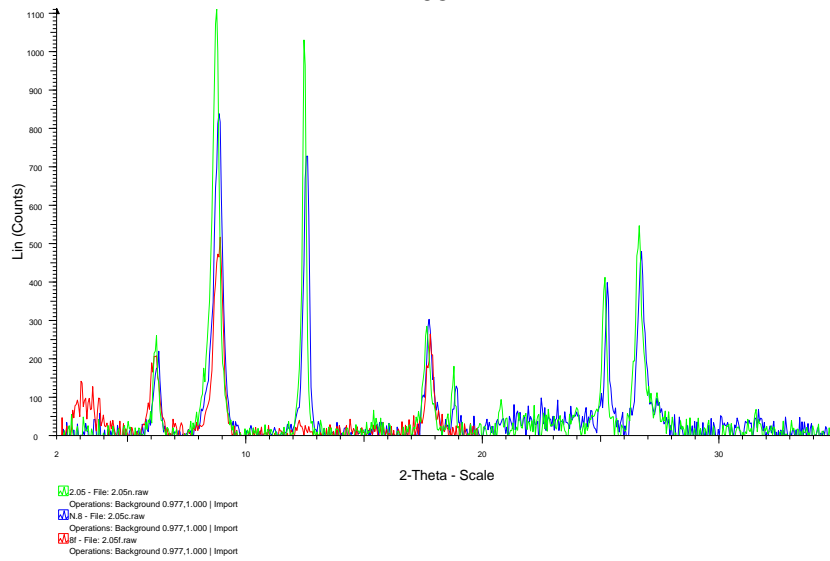
Fracción entre 53-5 micras

5.2

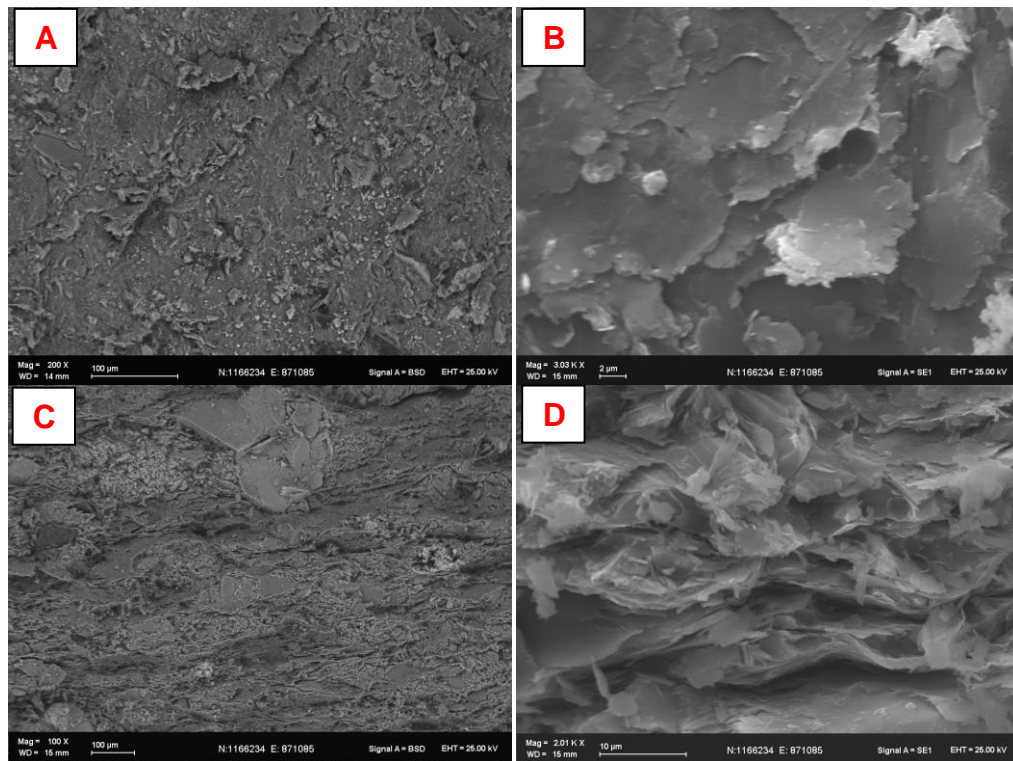


Fracción entre 5-2 micras

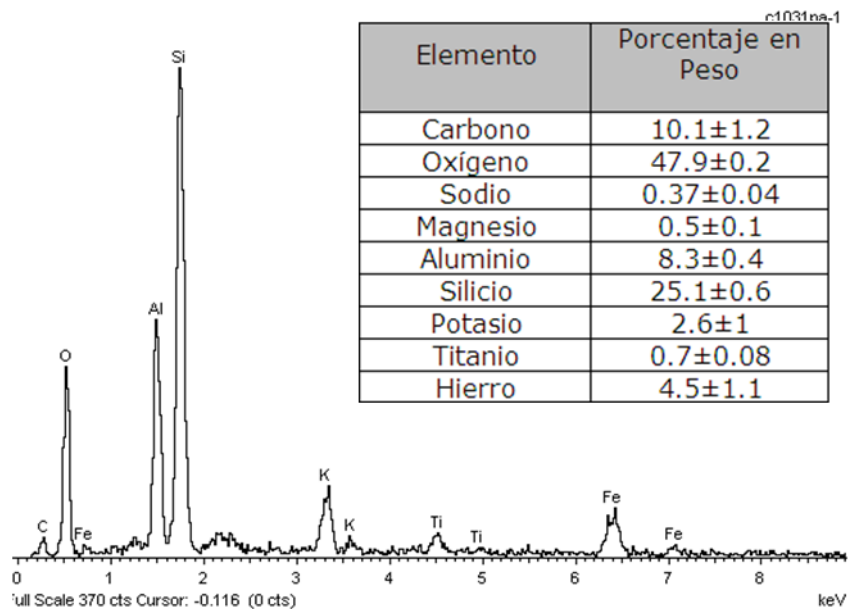
2.05



Fracción entre 2-0.5 micras

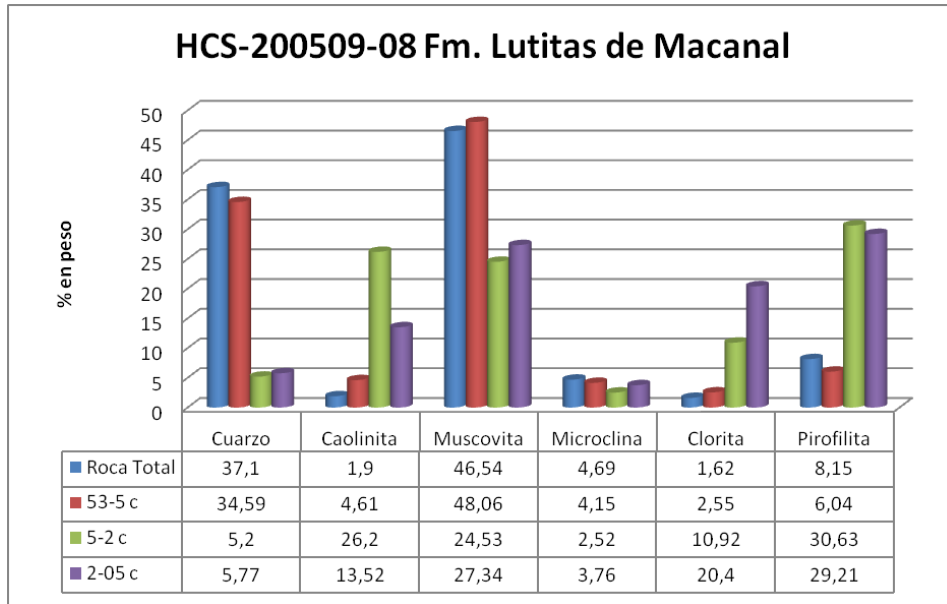


Imágenes al SEM de la muestra HCS-200509-04 de la Formación Lutitas de Macanal A y B tomadas paralela a laminación, C y D perpendicular a la laminación.

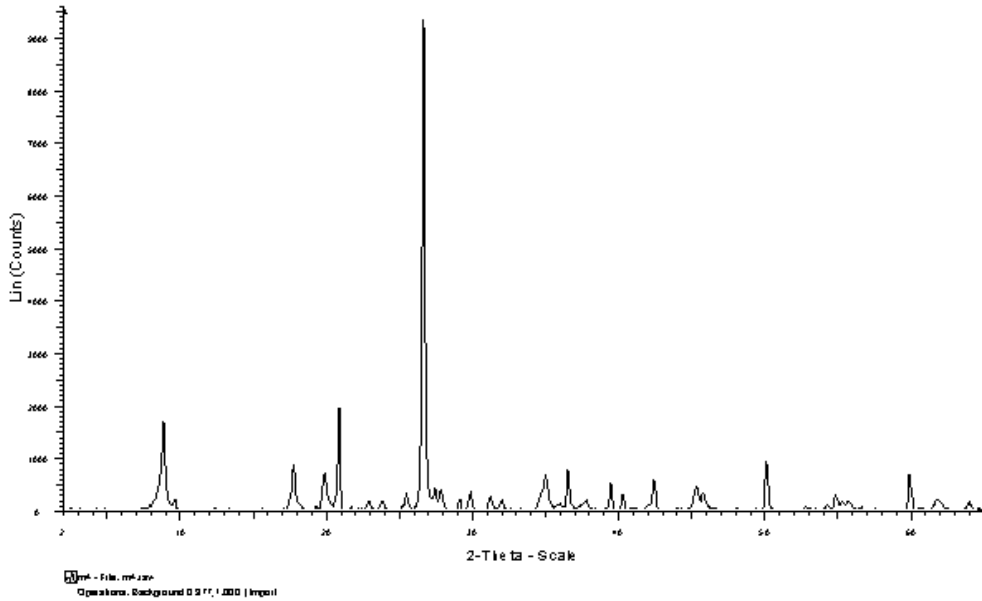


Composición elemental de la muestra en total.

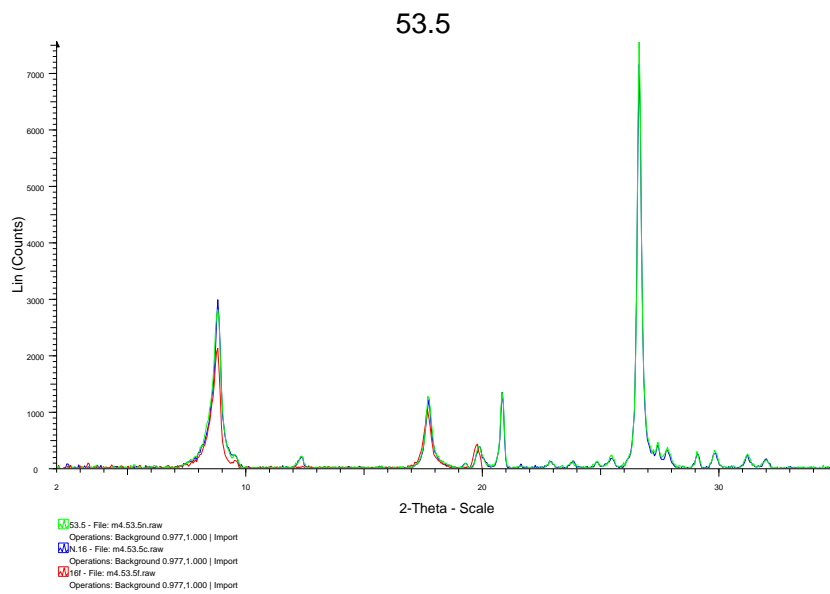
1.2.5 FORMACIÓN LUTITAS DE MACANAL (muestra HCS-200509-08)



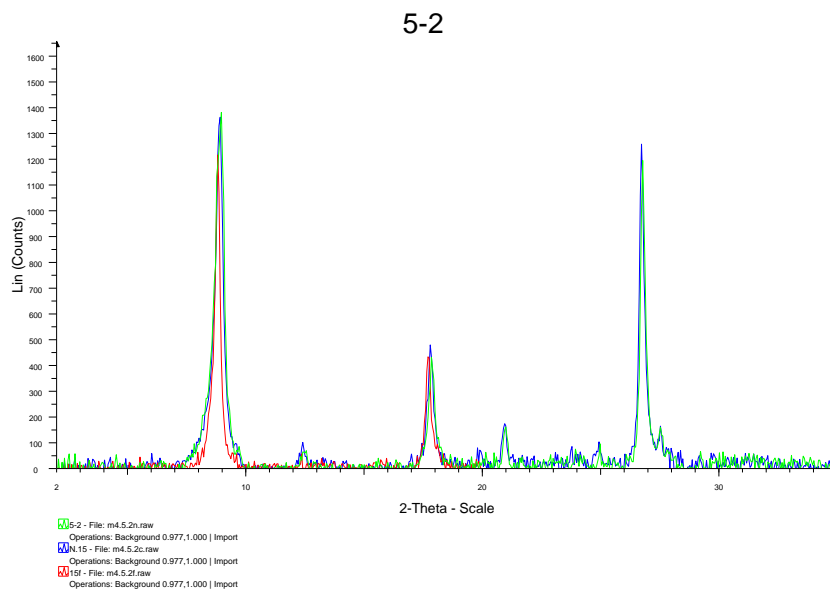
Composición mineralógica de la muestra total y en las fracciones separadas.



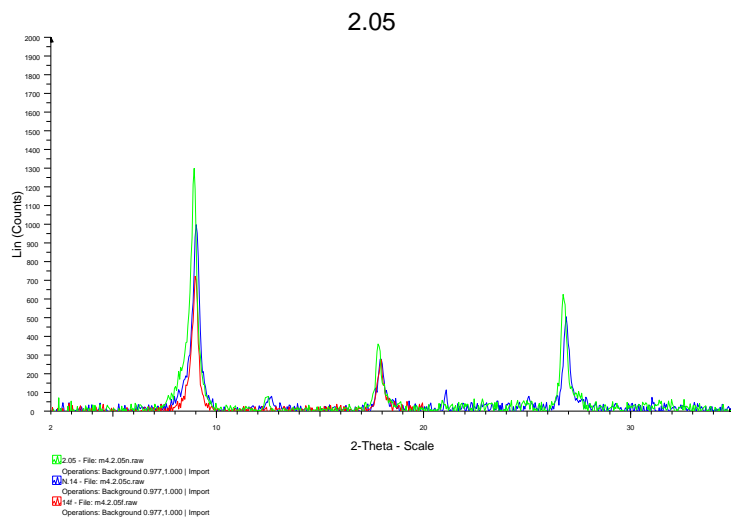
Roca Total.



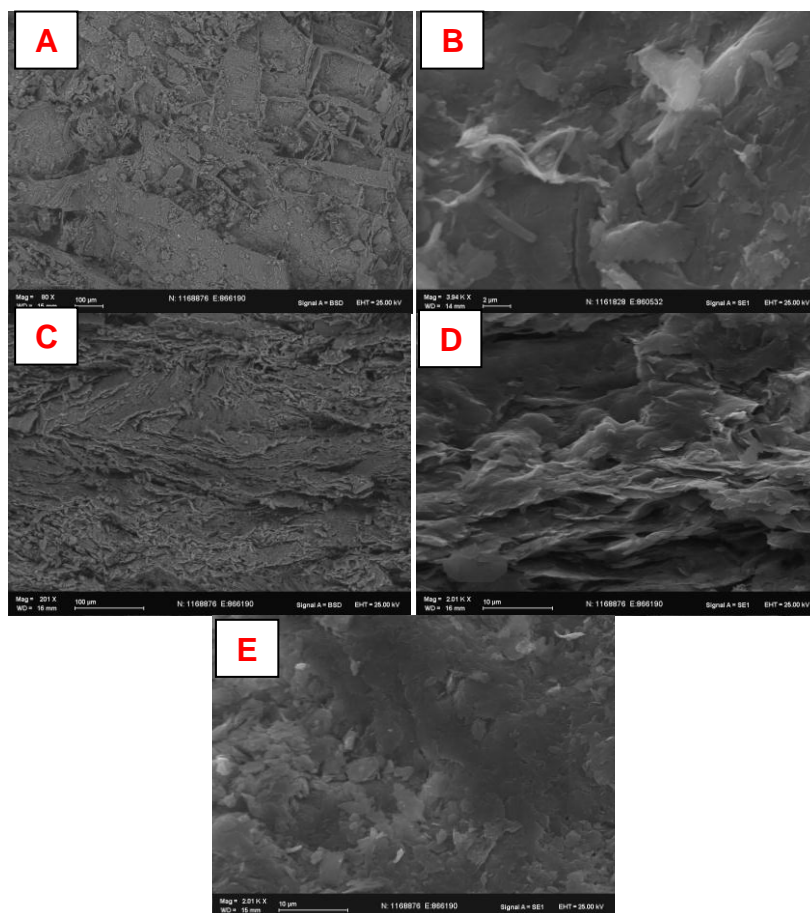
Fracción entre 53.5 micras



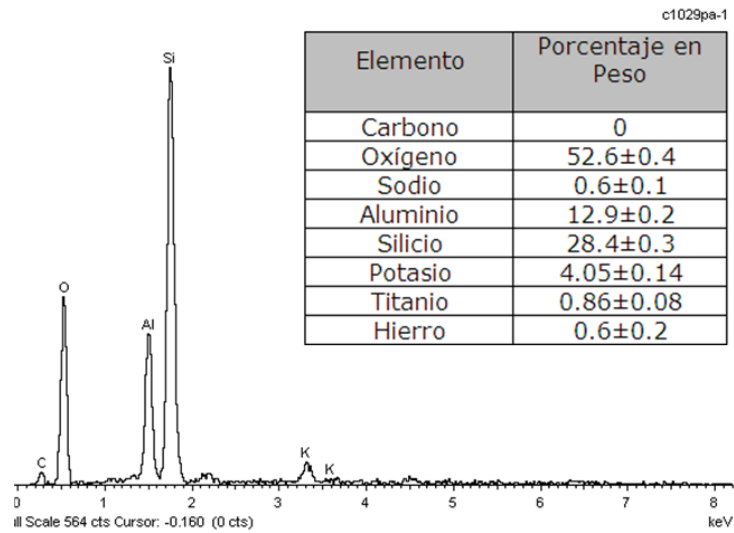
Fracción entre 5-2 micras



Fracción entre 2-05 micras

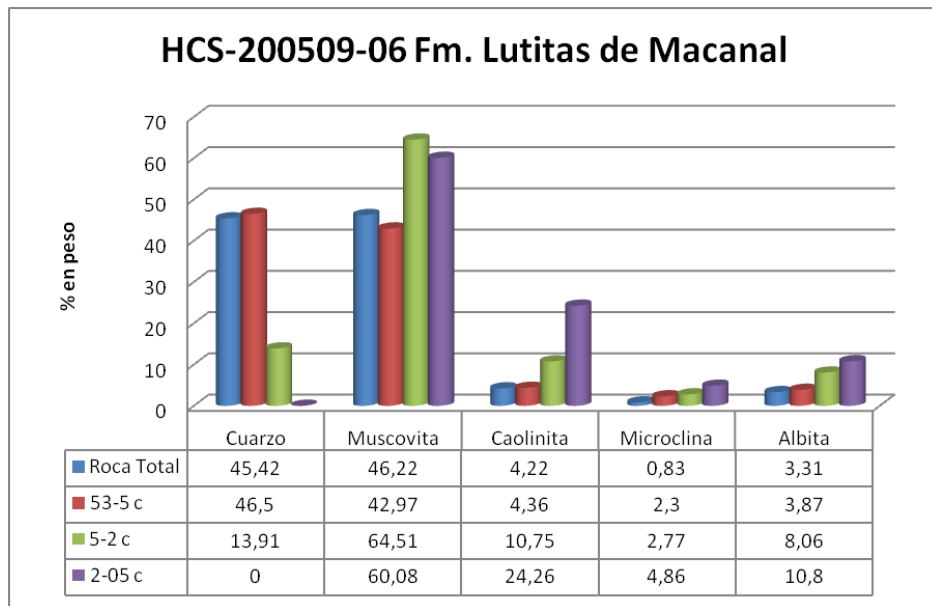


Imágenes al SEM de la muestra HCS-200509-08 Formación Lutitas de Macanal. A y B tomadas paralela a laminación, C, D y E perpendicular a la laminación.

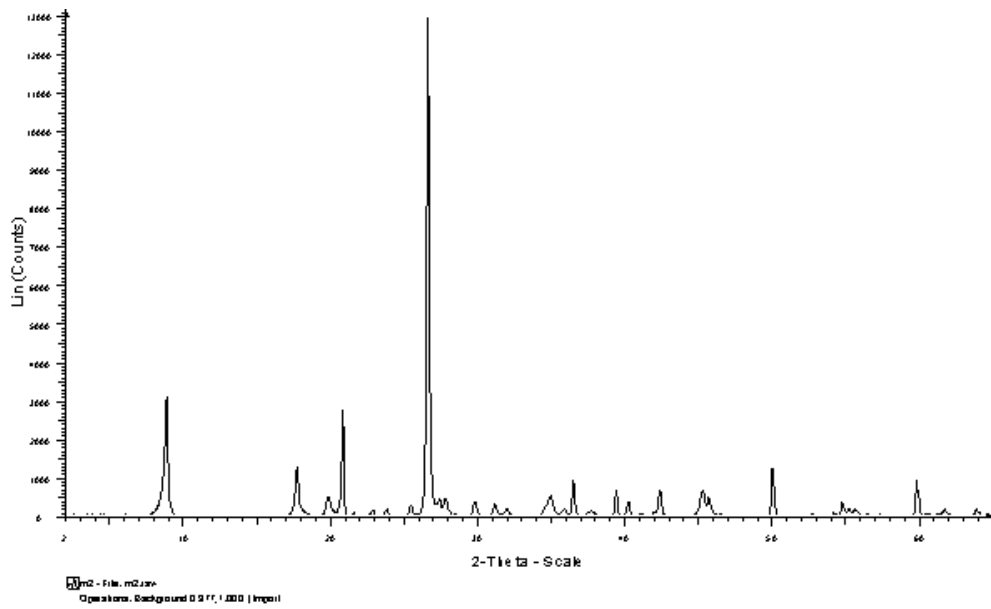


Espectro de composición elemental y análisis semi-cuantitativo.

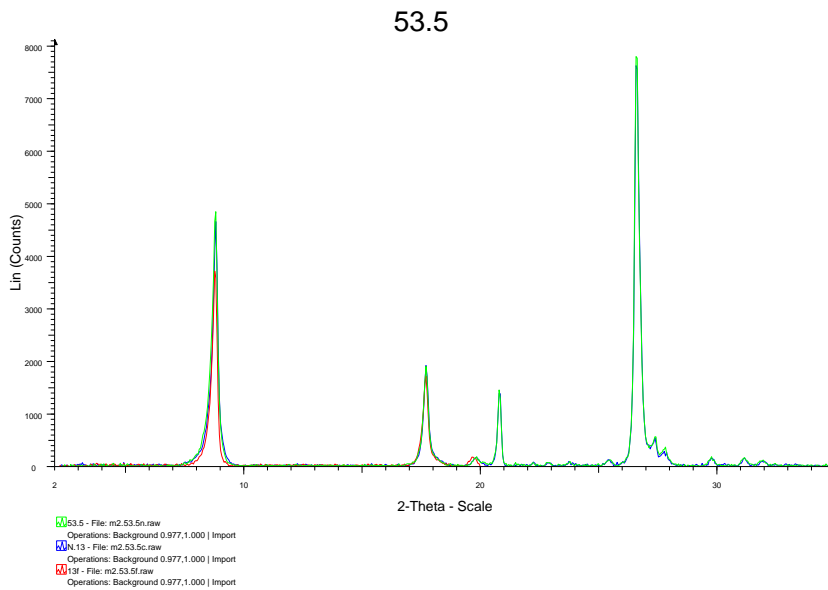
1.2.6 FORMACIÓN LUTITAS DE MACANAL (muestra HCS-200509-06)



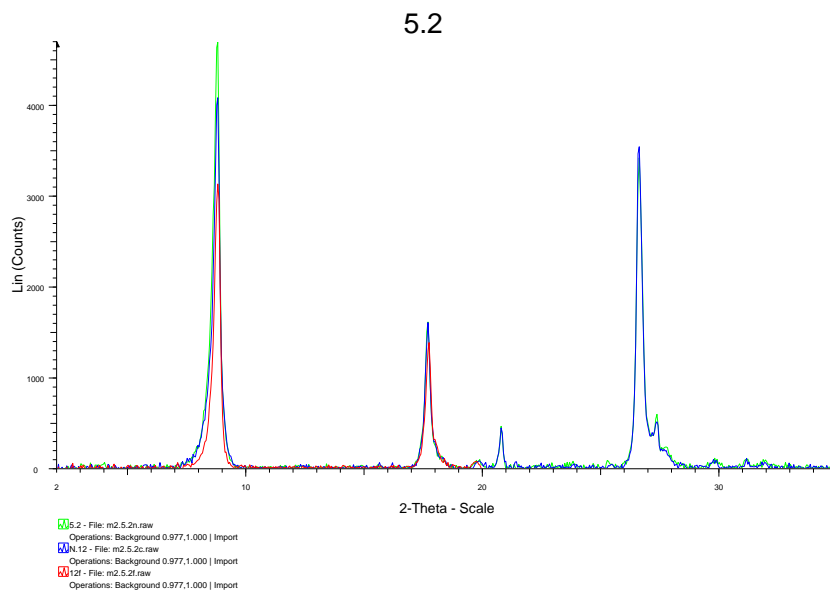
Composición mineralógica en roca total y fracciones separadas.



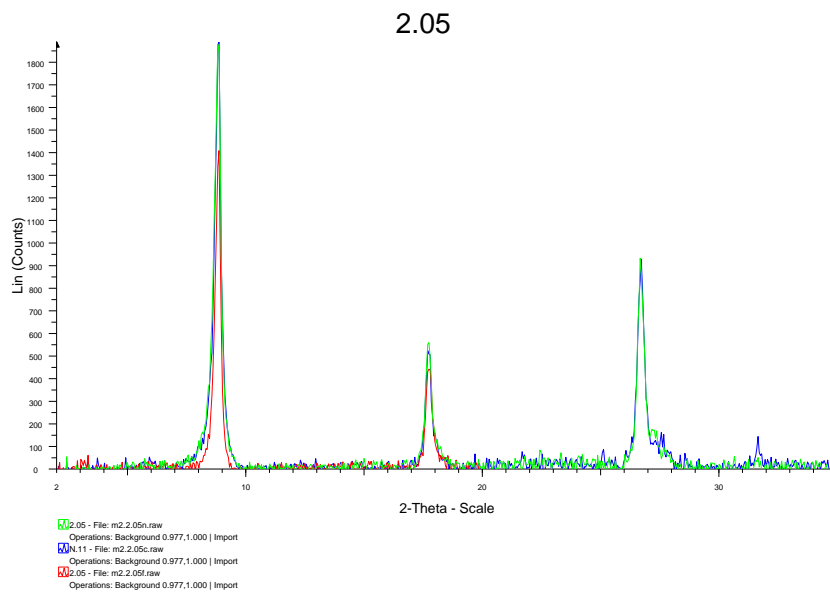
Difractograma Roca Total



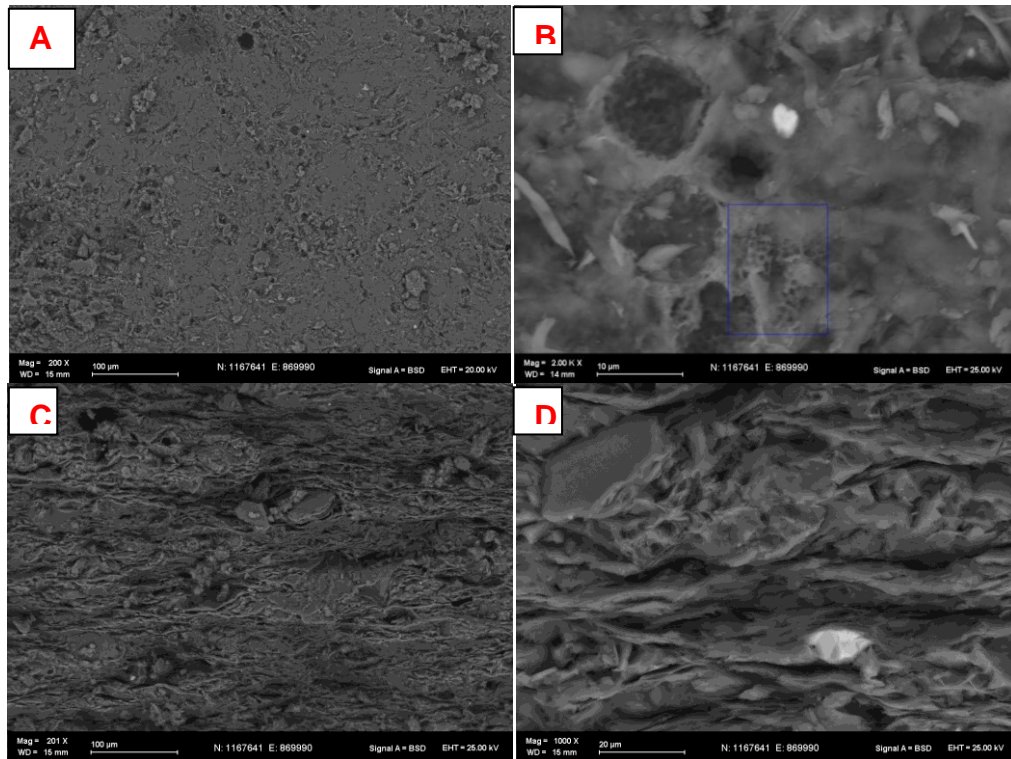
Fracción entre 53-5 micras



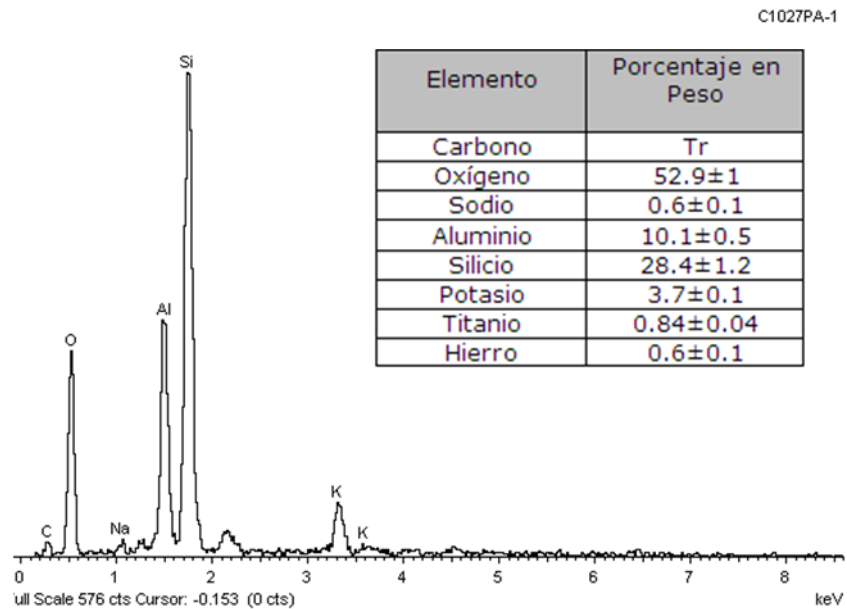
Fracción entre 5-2 micras



Fracción entre 2-0.5 micras

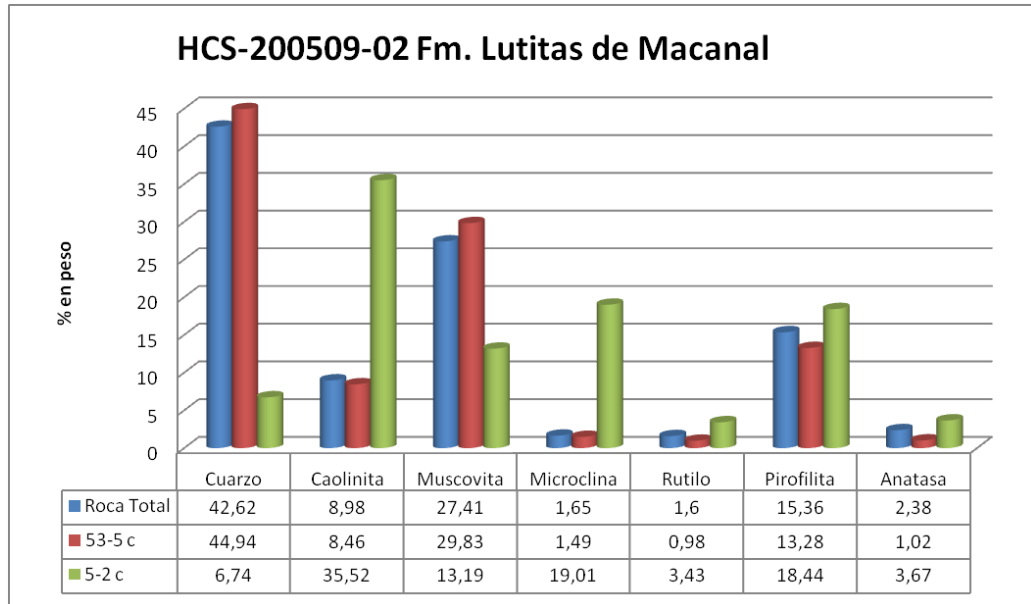


Imágenes al SEM de la muestra HCS-200509-06 Fm. Lutitas de Macanal A y B tomadas paralela a laminación, C y D perpendicular a la laminación.

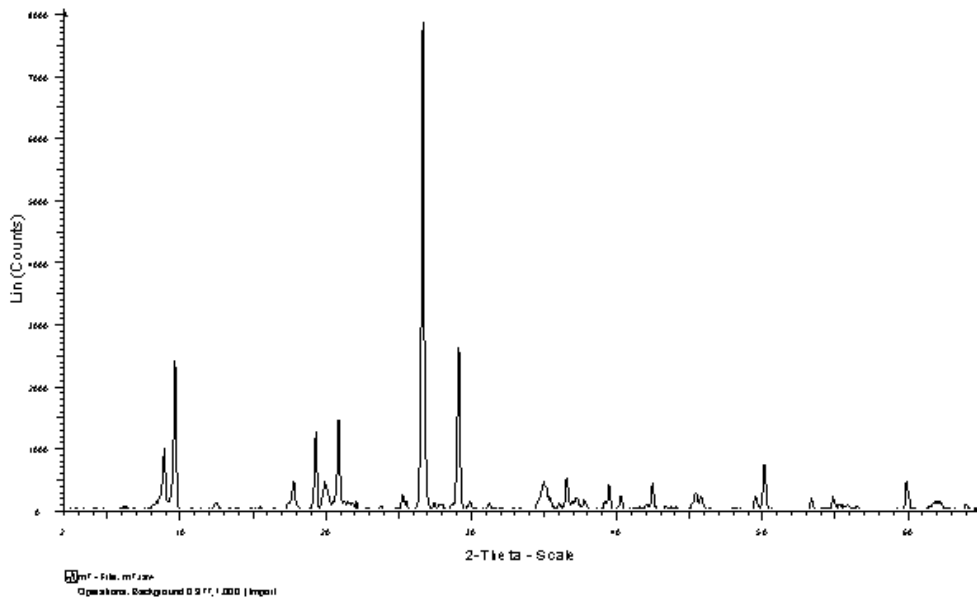


Espectro de composición elemental y semi-cuantitativos.

1.2.7 FORMACIÓN LUTITAS DE MACANAL (muestra HCS- -02)

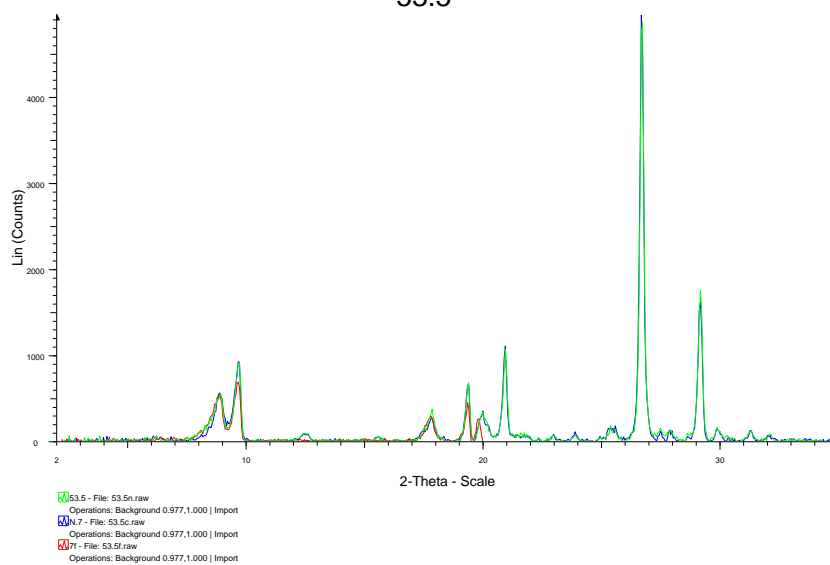


Composición mineralógica en cada una de las fracciones separadas y en roca total.



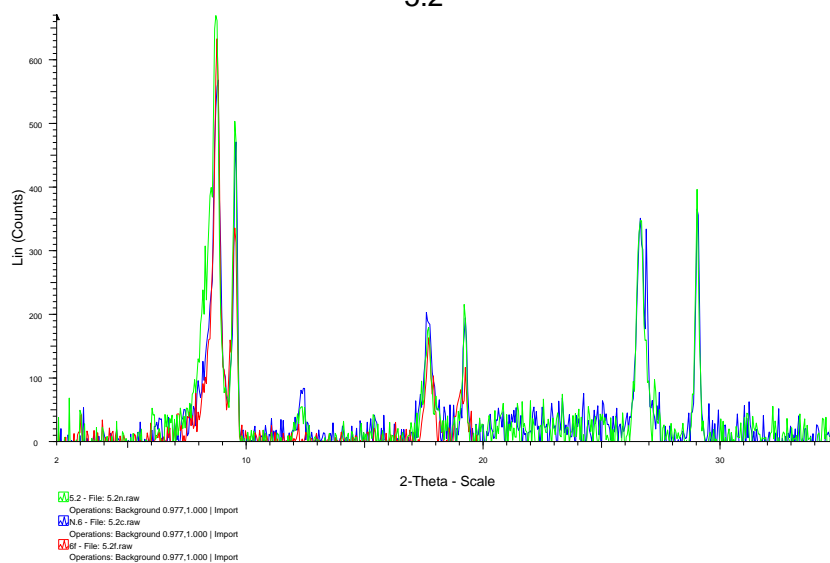
Roca Total

53.5

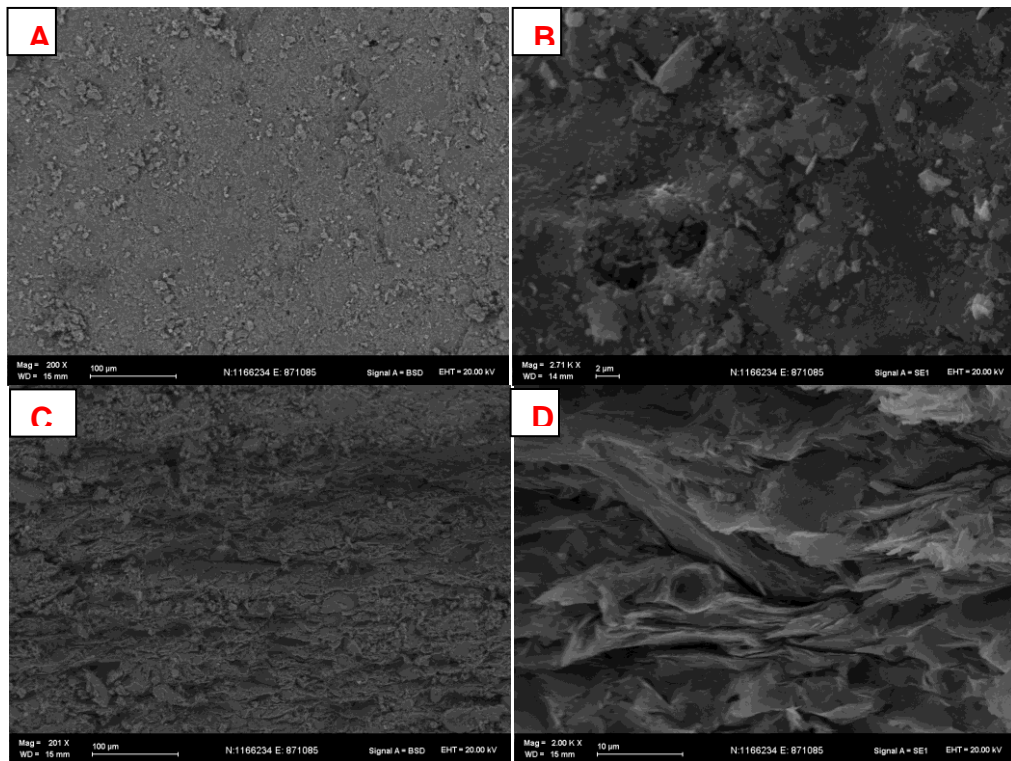


Fracción entre 53-5 micras

5.2

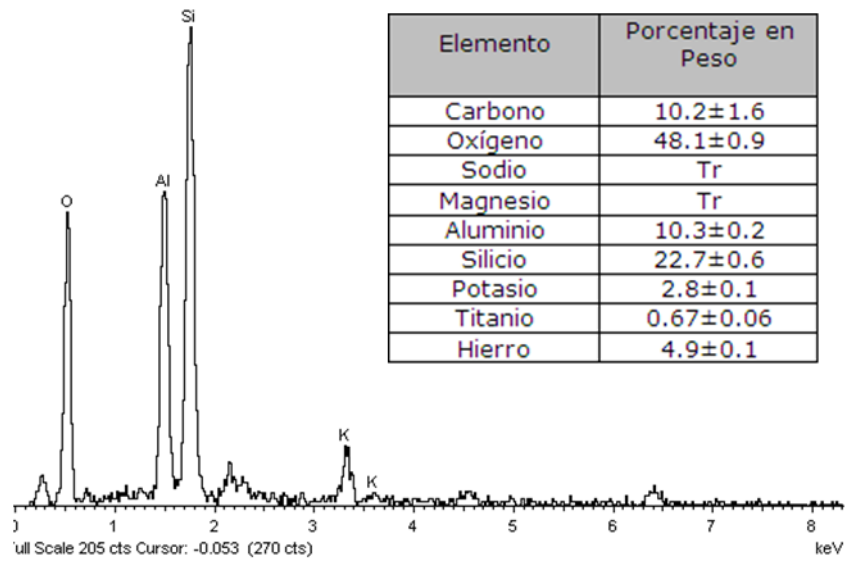


Formación entre 5-2 micras



Imágenes al SEM de la muestra HCS-200905-02 Fm. Lutitas de Macanal. A y B, tomadas paralela a la laminación, C y D perpendiculares a la laminación.

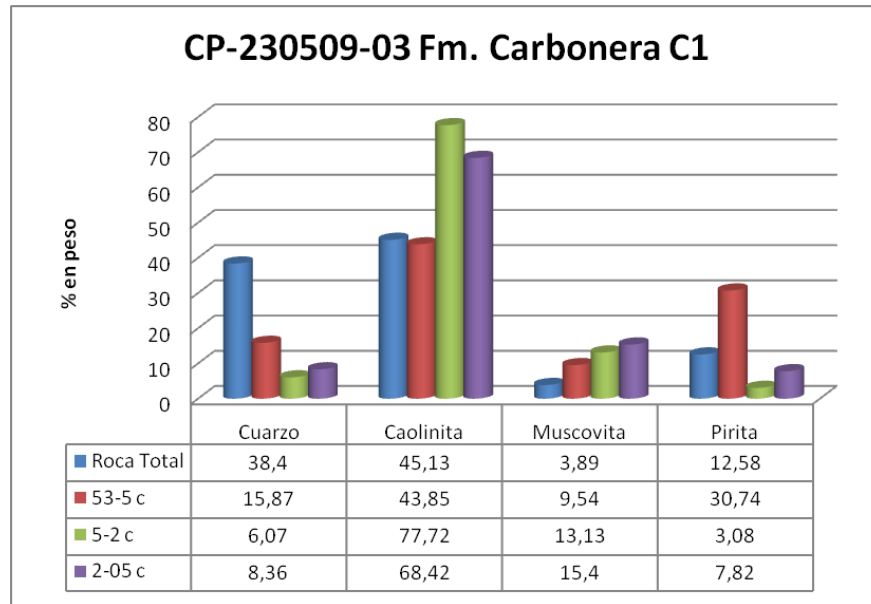
c103pa-1



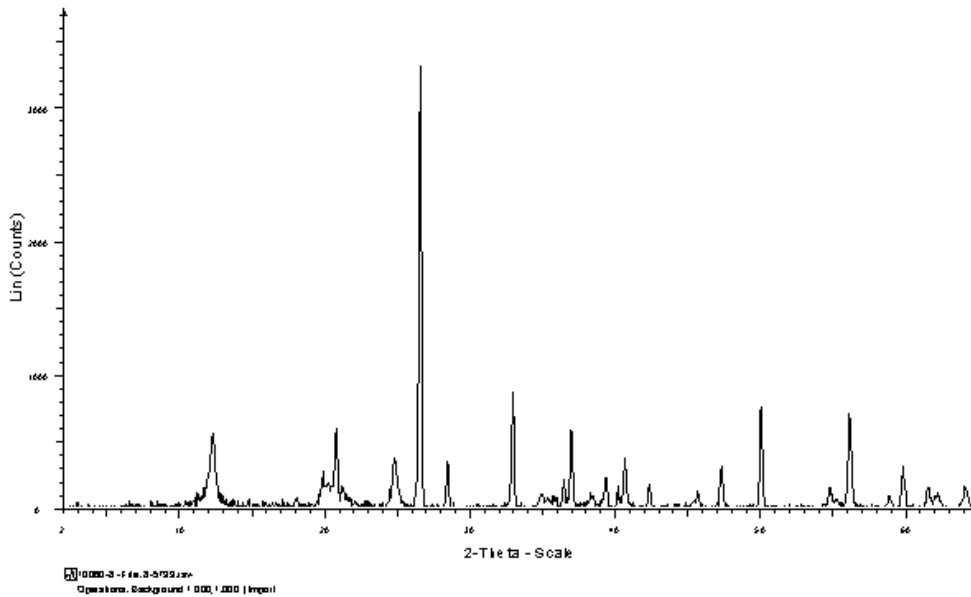
Composición elemental de la muestra total.

1.3 TRANSECTA CUBARA-PAMPLONA

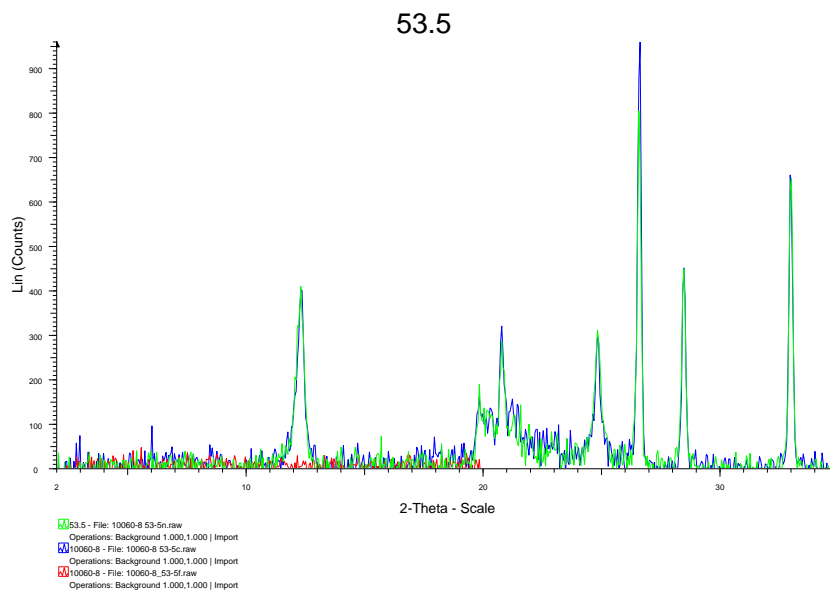
1.3.1 FORMACIÓN CARBONERA C1 (muestra CP-230509-03)



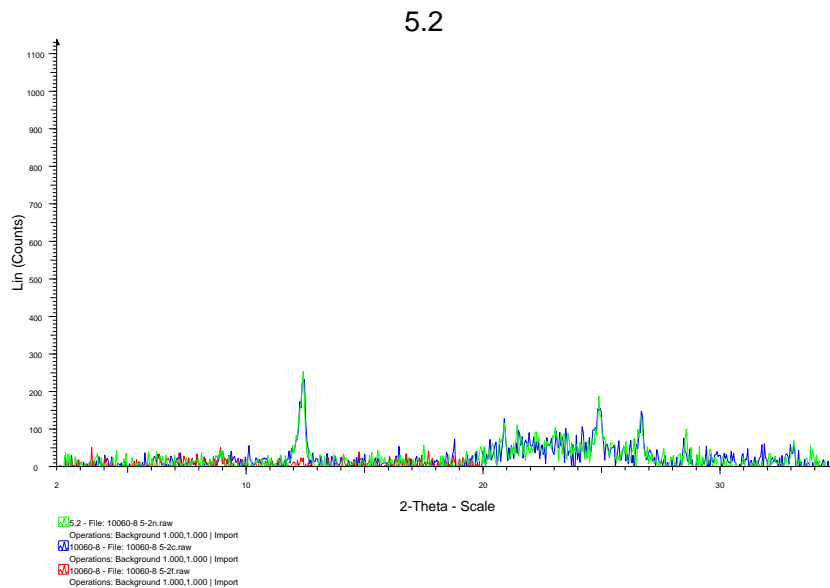
Composición mineralógica en roca tota y fracciones separadas de la muestra.



Roca Total

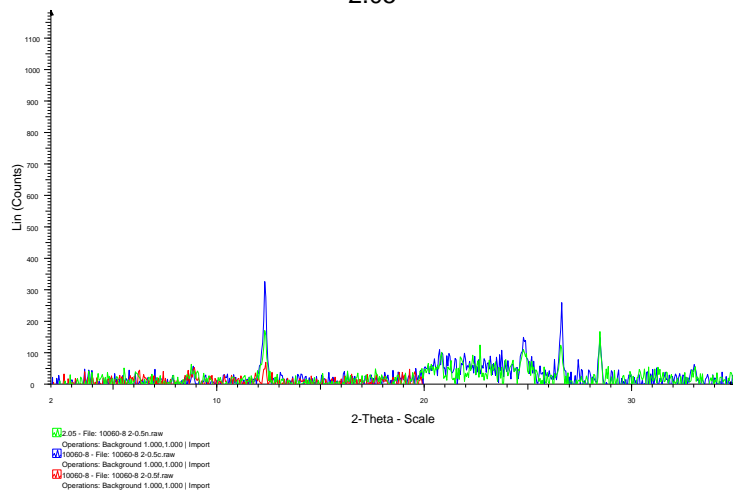


Fracción entre 53-5 micras

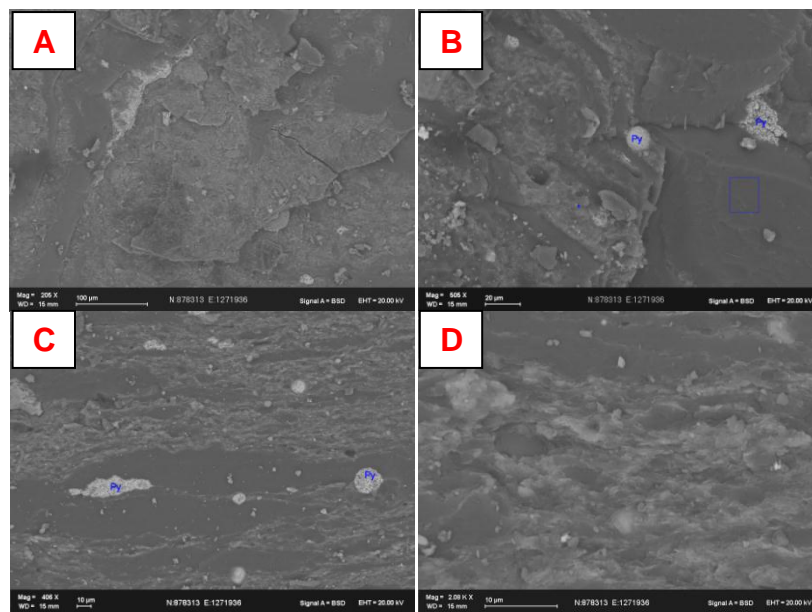


Fracción entre 5-2 micras

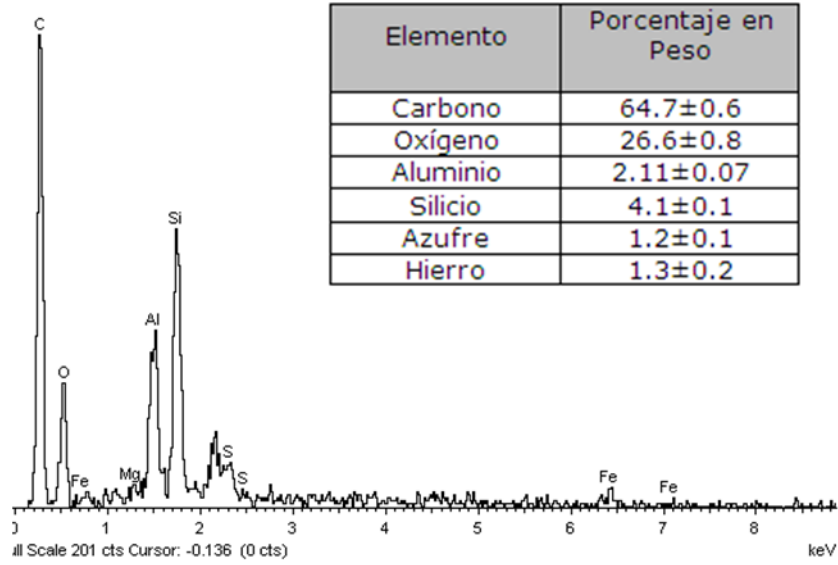
2.05



Fracción entre 2-0.5 micras

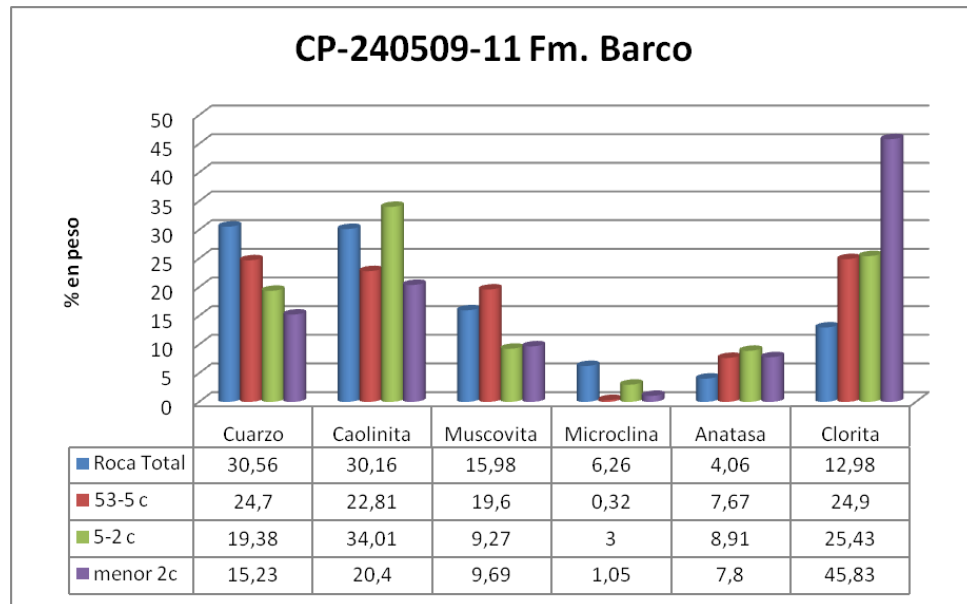


Imágenes al SEM de la muestra CP-230509-03-Carbonera C1 A y B tomadas paralela a laminación, C y D perpendicular a la laminación.

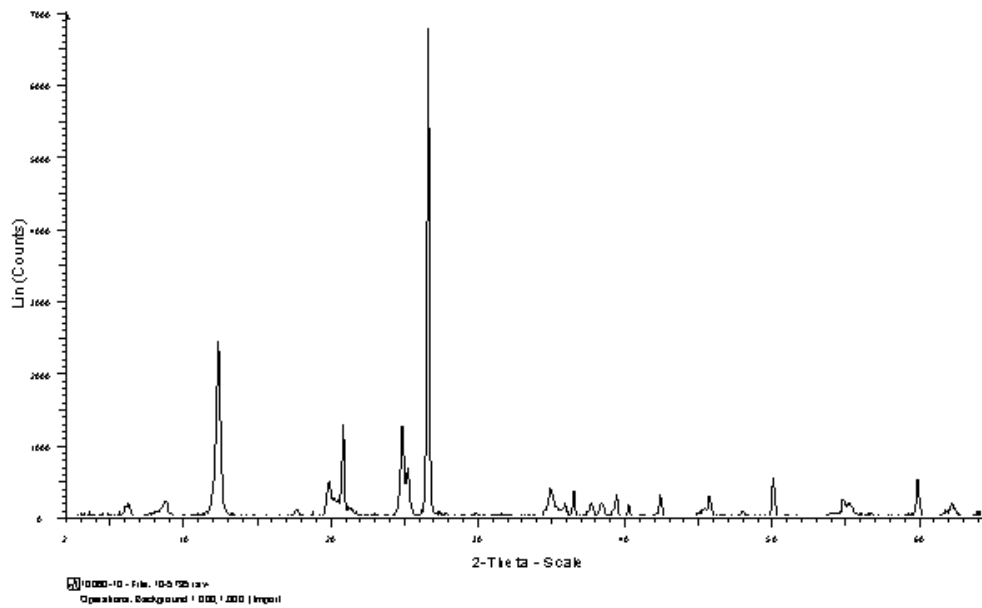


Composición elemental de la roca total.

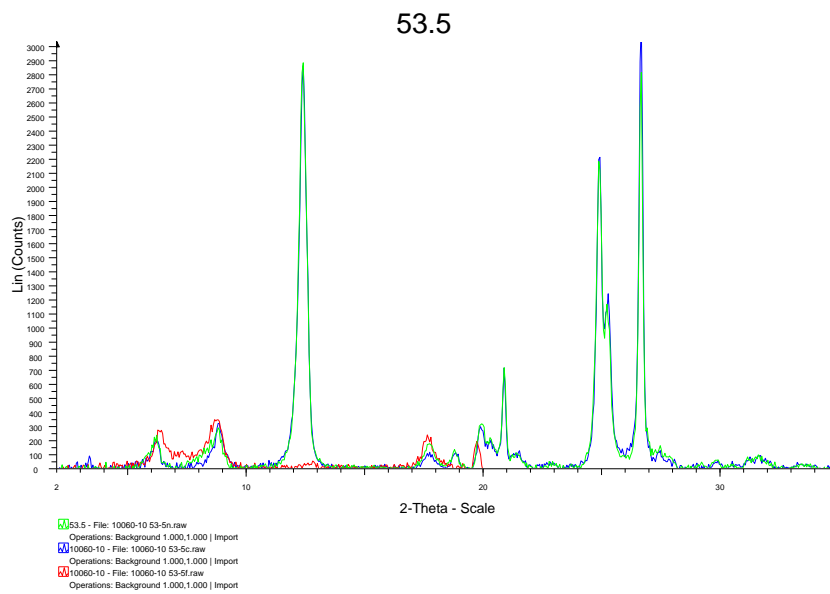
1.3.2 FORMACIÓN BARCO (muestra CP-240509-11)



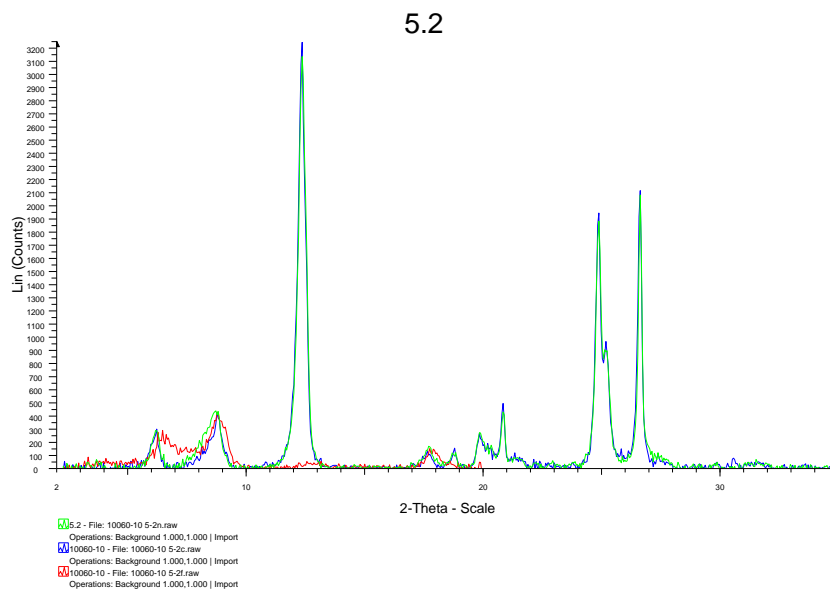
Composición mineralógica de la roca total y las fracciones separadas.



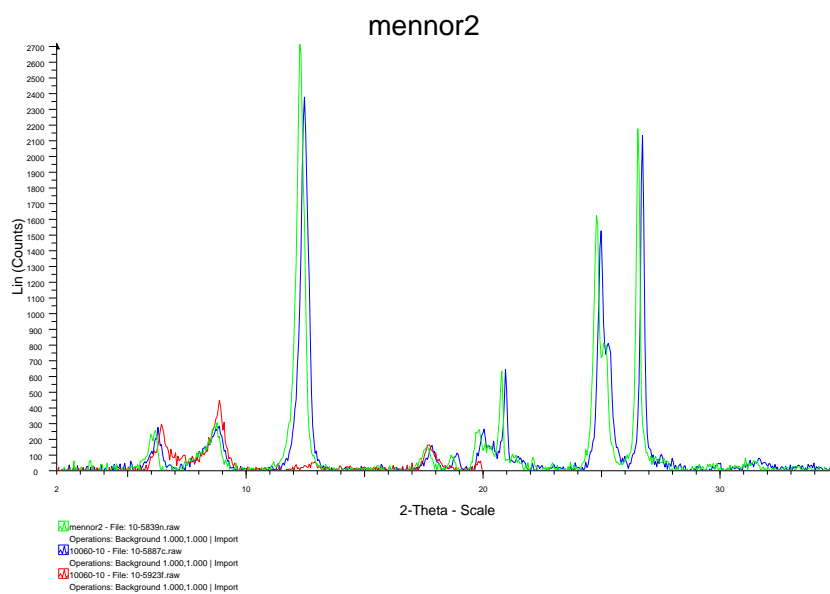
Difractograma Roca Total



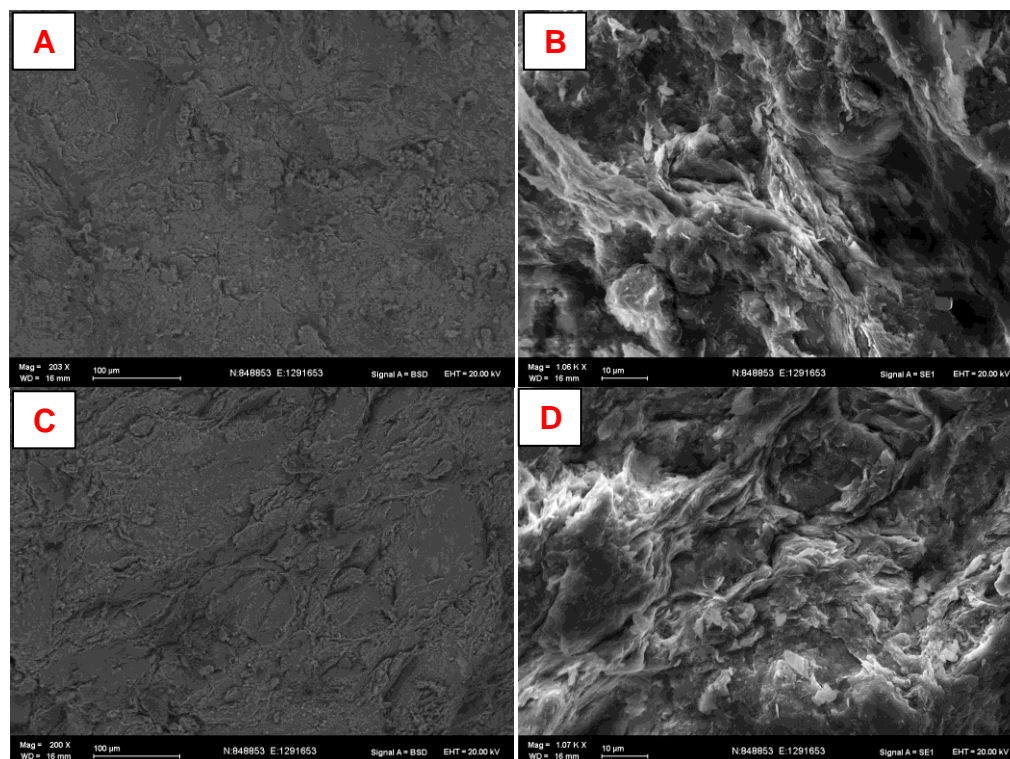
Fracción entre 53-5 micras



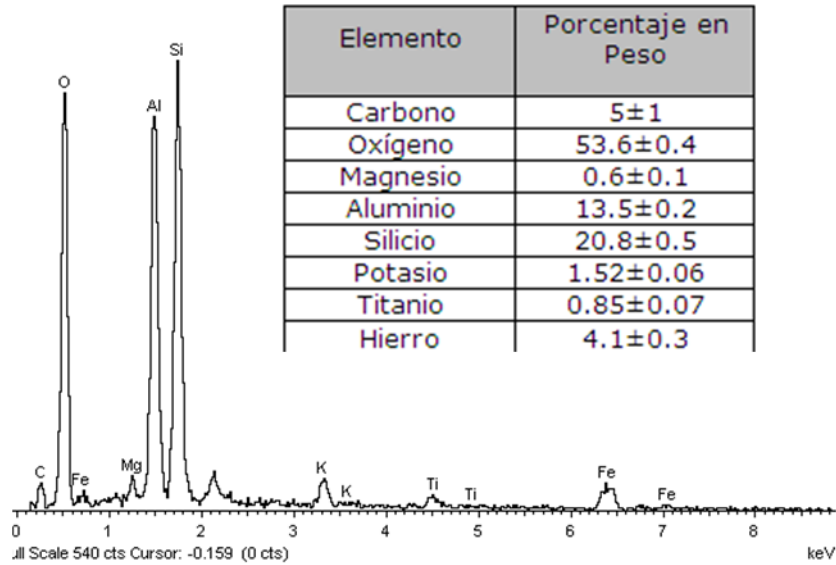
Fracción entre 5-2 micras



Fracción menor a 2 micras

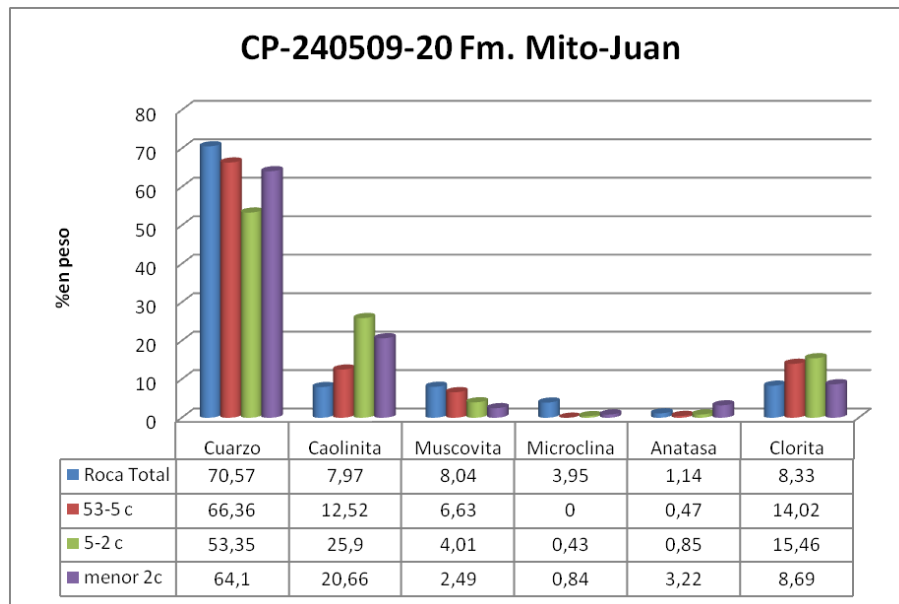


Imágenes al SEM de la muestra CP-240509-11 Formación Barco A y B tomadas paralela a laminación, C y D perpendicular a la laminación.

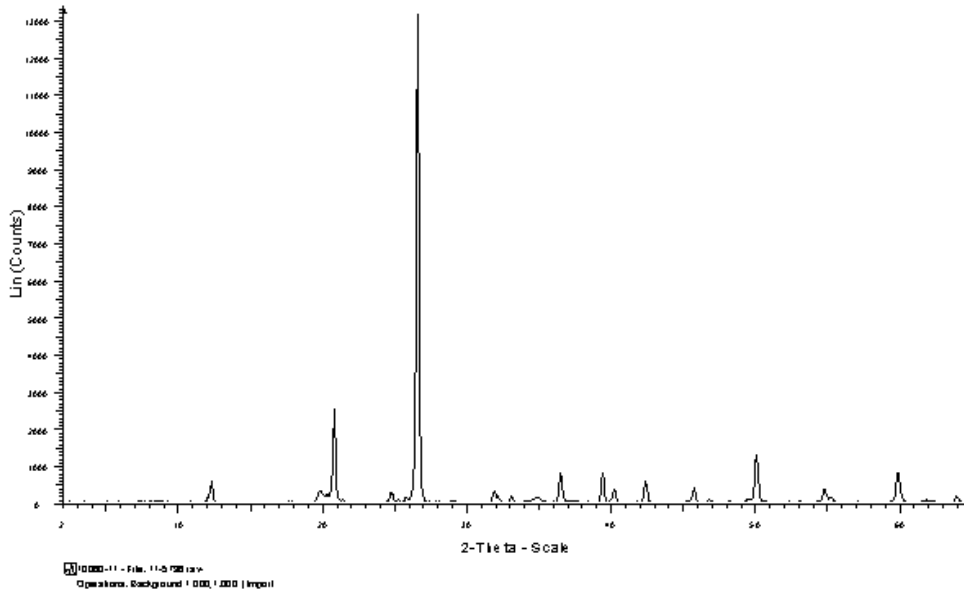


Composición elemental y análisis semi-cuantitativo.

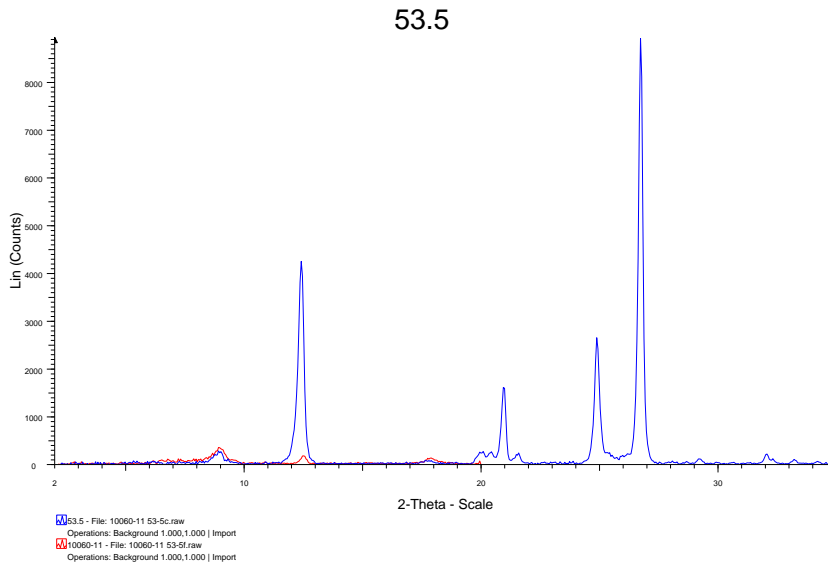
1.3.3 FORMACIÓN MITO-JUAN (muestra CP-240509-20)



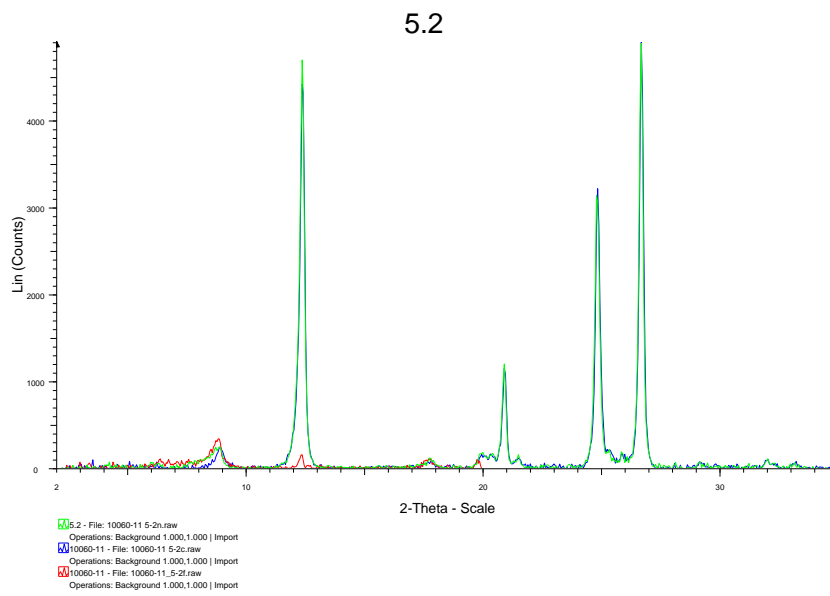
Composición mineralógica de la roca total y fracciones separadas.



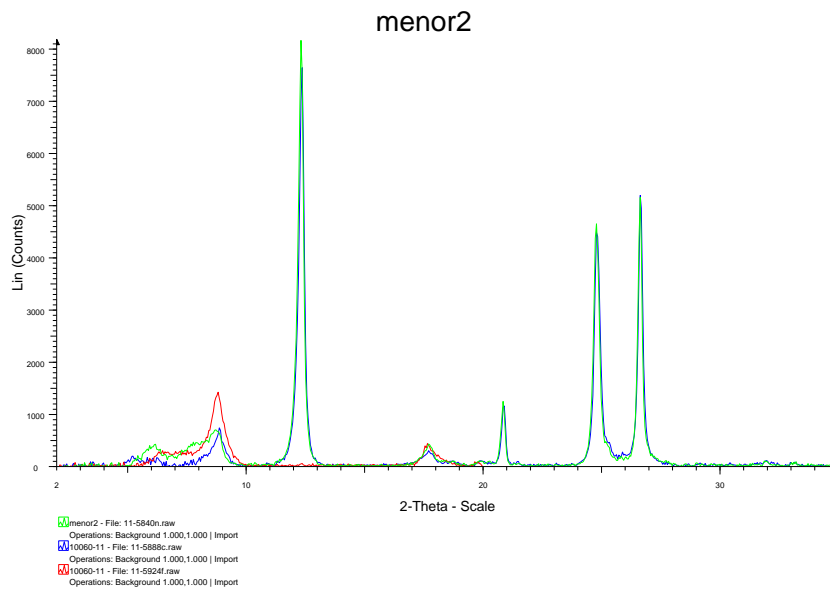
Difractograma Roca Total



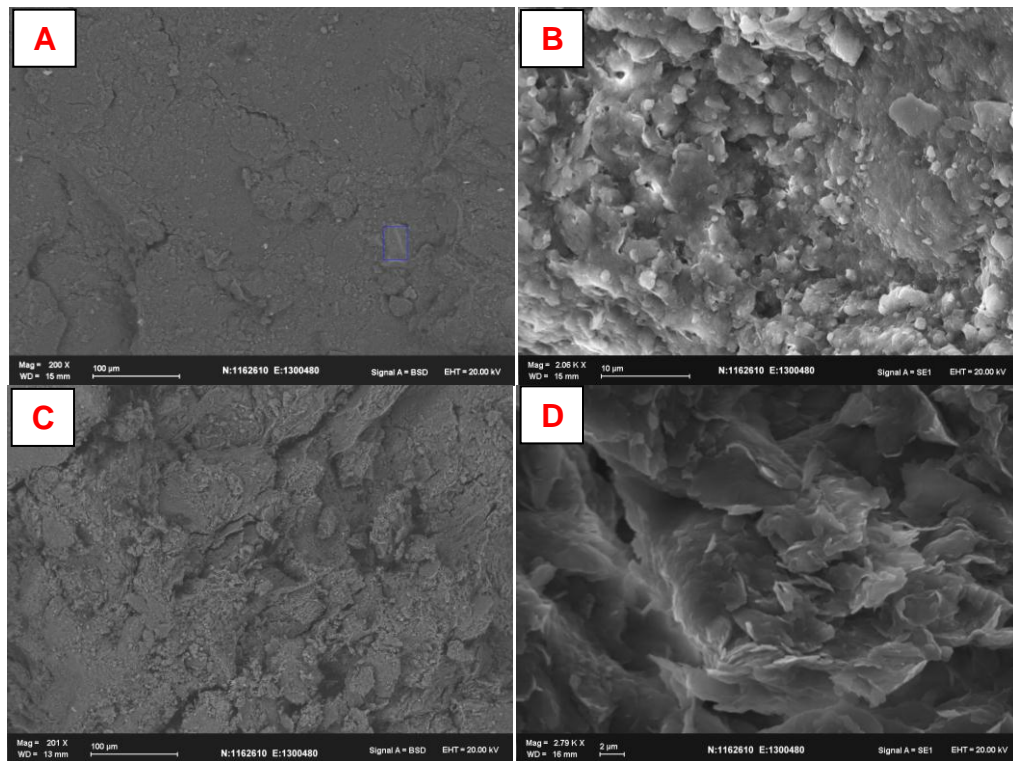
Fracción entre 53-5 micras



Fracción entre 5-2

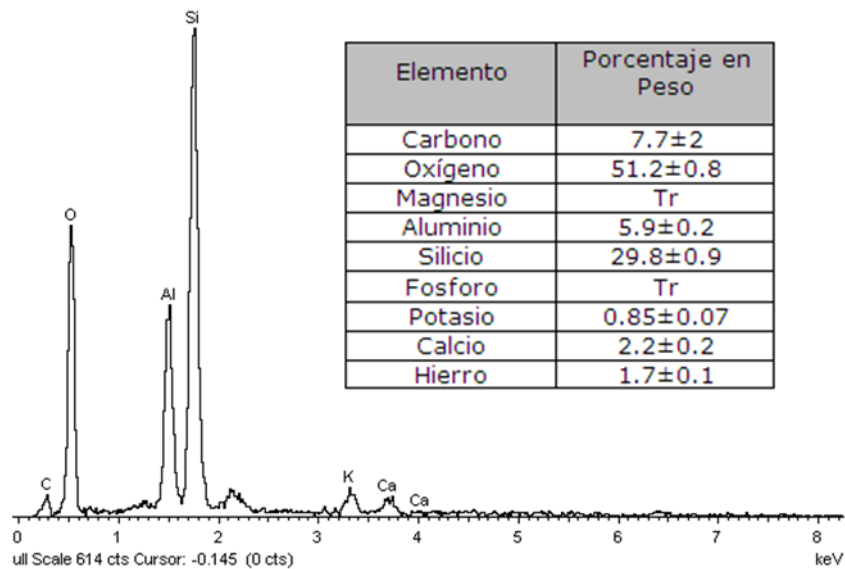


Fracción menor 2 micras



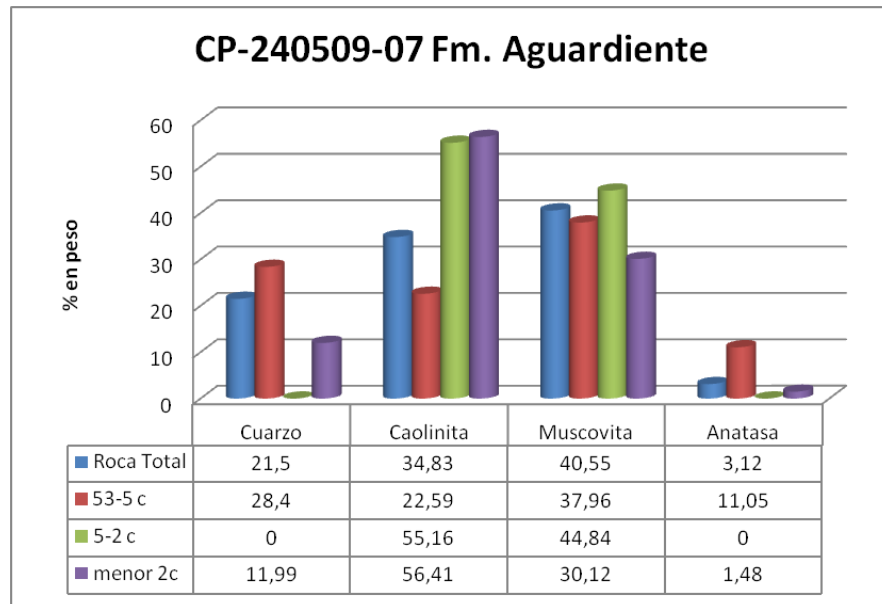
Imágenes al SEM de la muestra CP-240509-20 Fm. Mito-Juan A y B tomadas paralela a laminación, C y D perpendicular a la laminación.

c1039pa-1

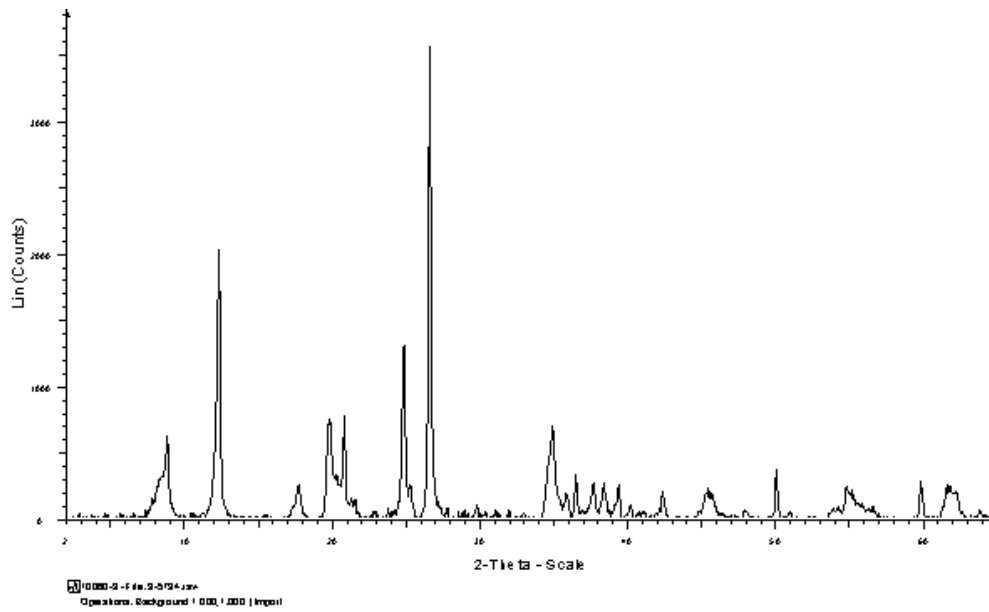


Composición elemental de la roca total.

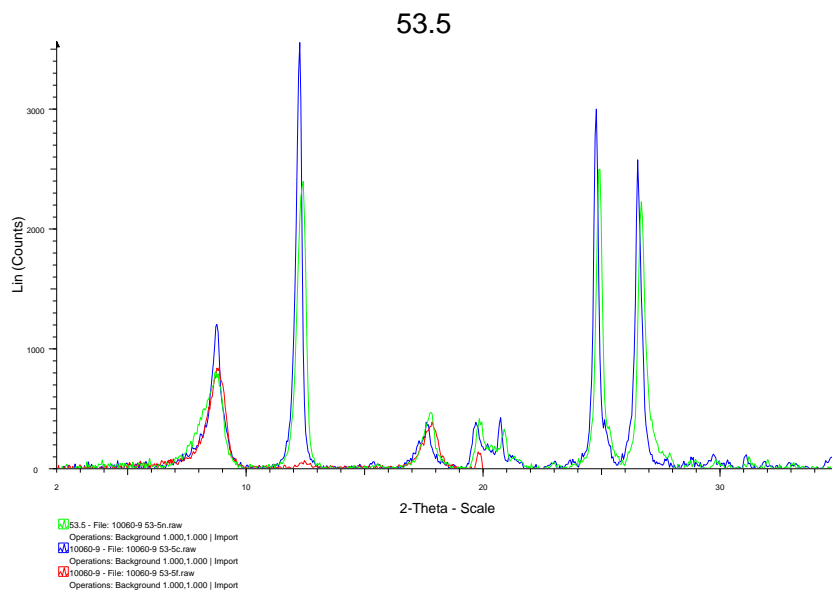
1.3.4 FORMACIÓN AGUARDIENTE (muestra CP-240509-07)



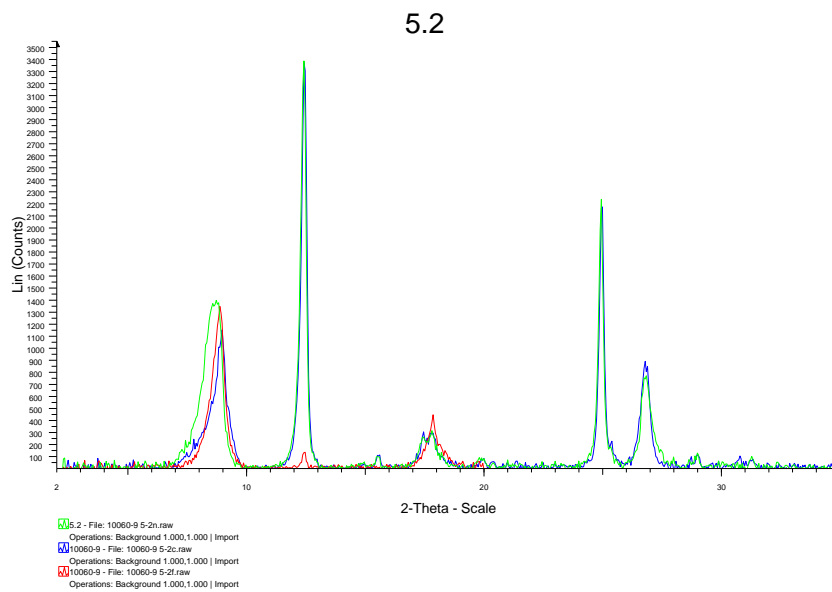
Histograma de composición mineralógica de la roca total y fracciones separadas.



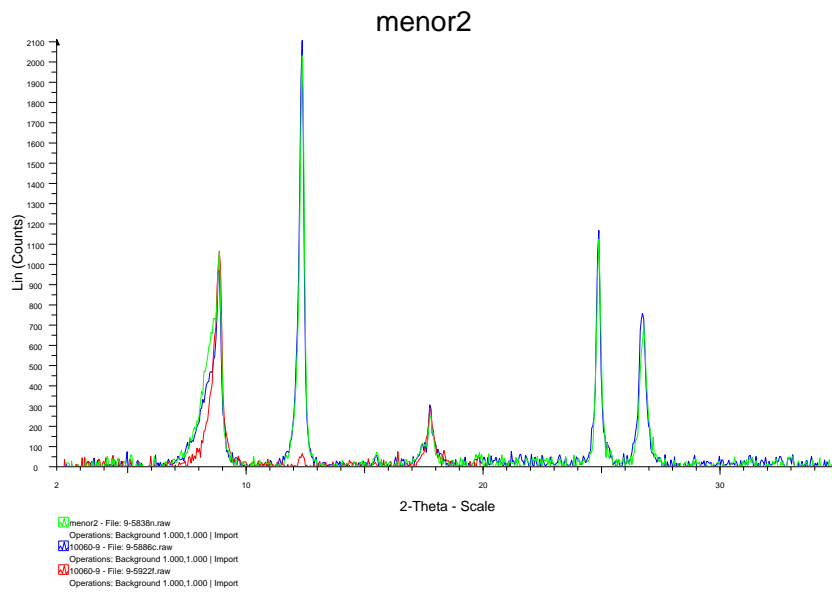
Difractograma Roca Total



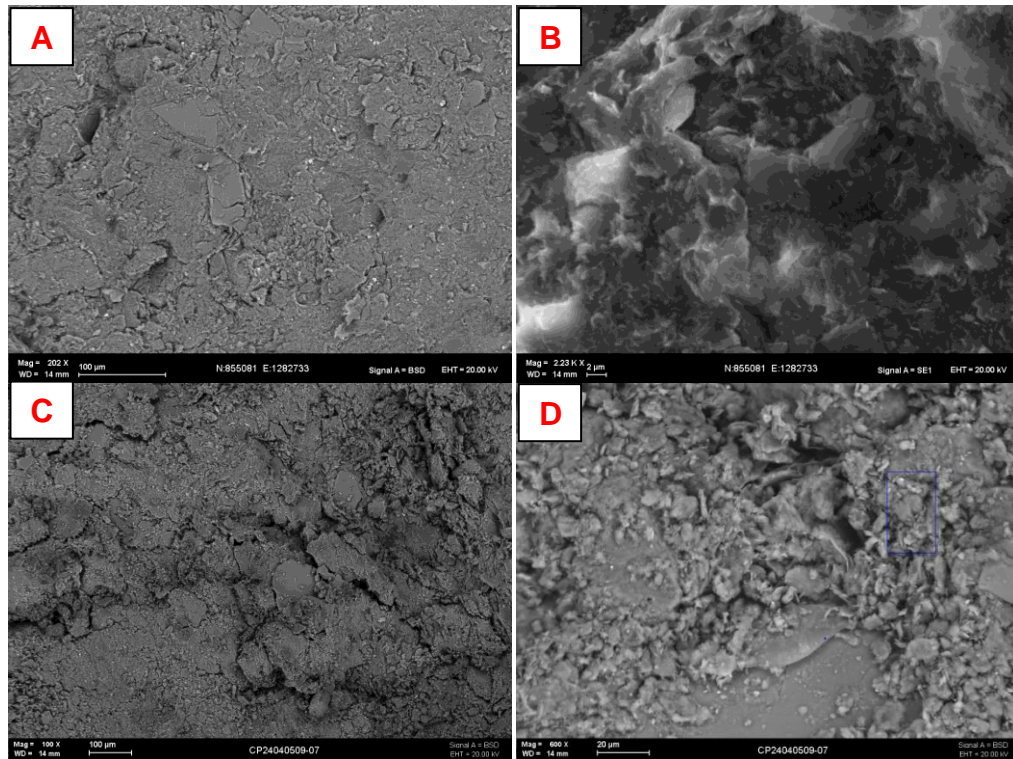
Fracción entre 53-5 micras



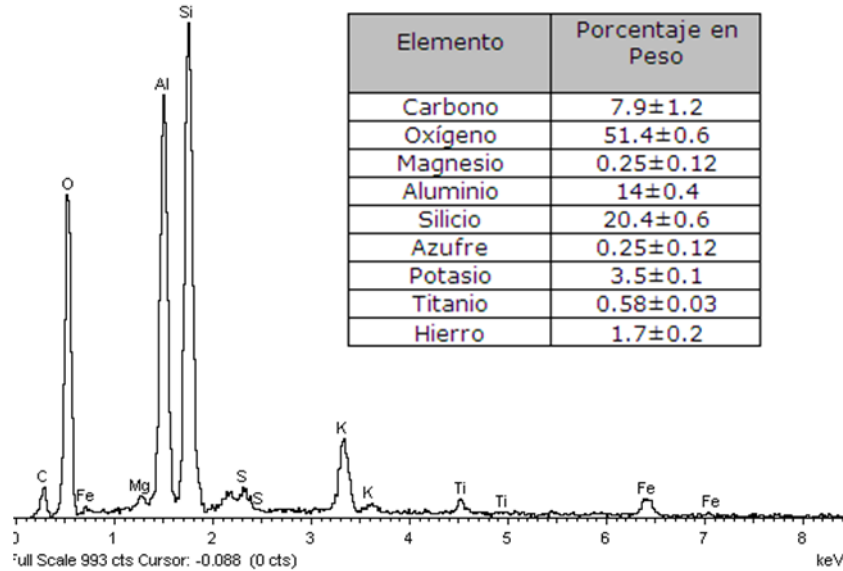
Fracción entre 5-2 micras



Fracción menor de 2 micras

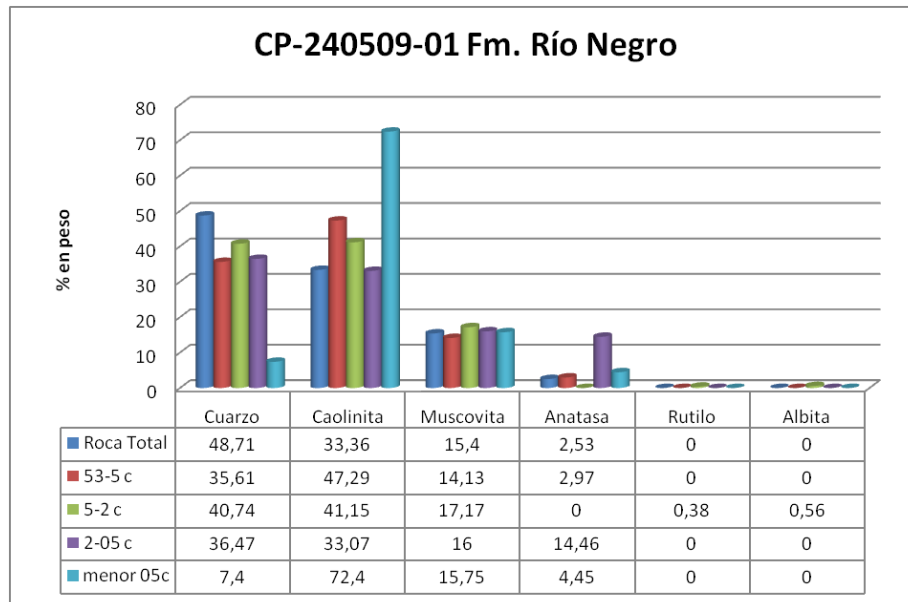


Imágenes al SEM de la muestra CP-240509-07 Formación Aguardiente A y B tomadas paralela a laminación, C y D perpendicular a la laminación.

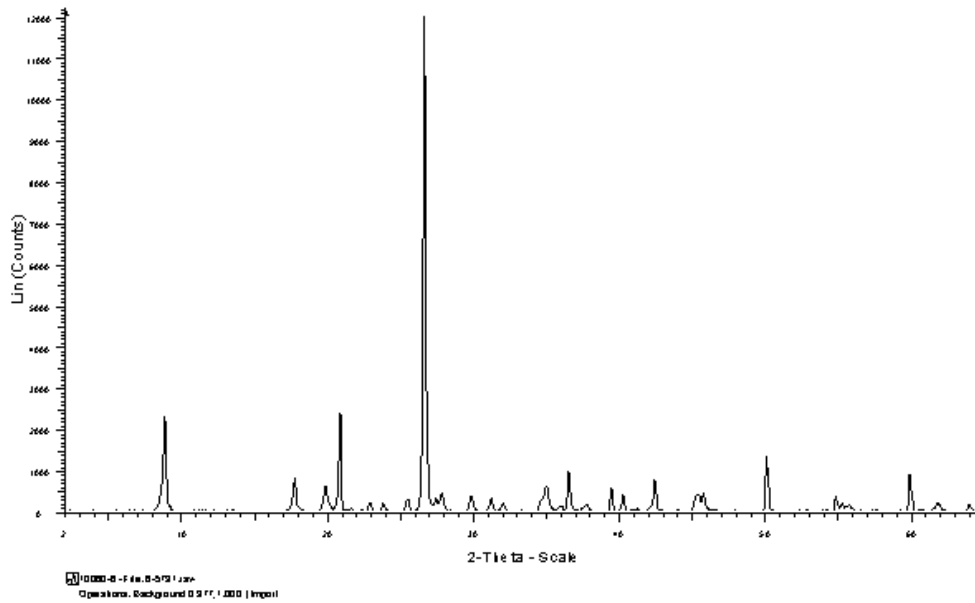


Composición elemental de la roca total.

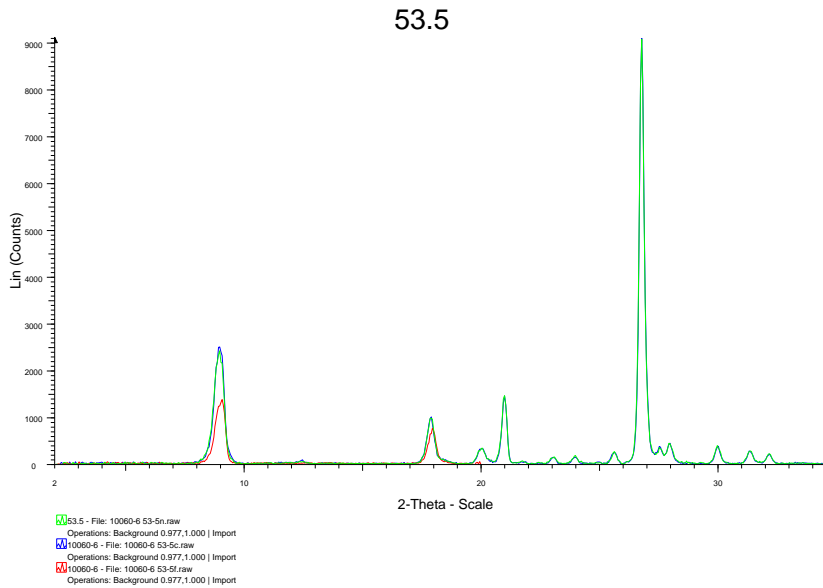
1.3.5 FORMACIÓN RIO NEGRO (muestra CP-240509-01)



Histograma de composición mineralógica de roca total y fracciones separadas.

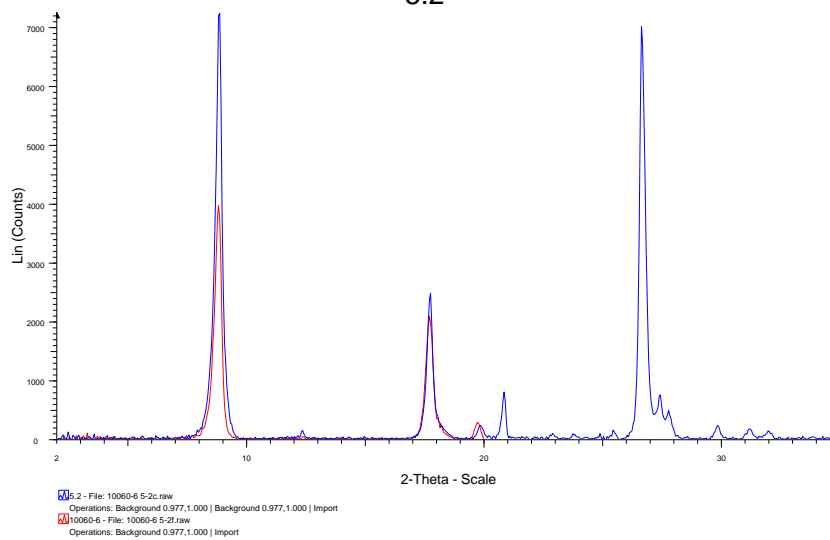


Difractograma Roca Total



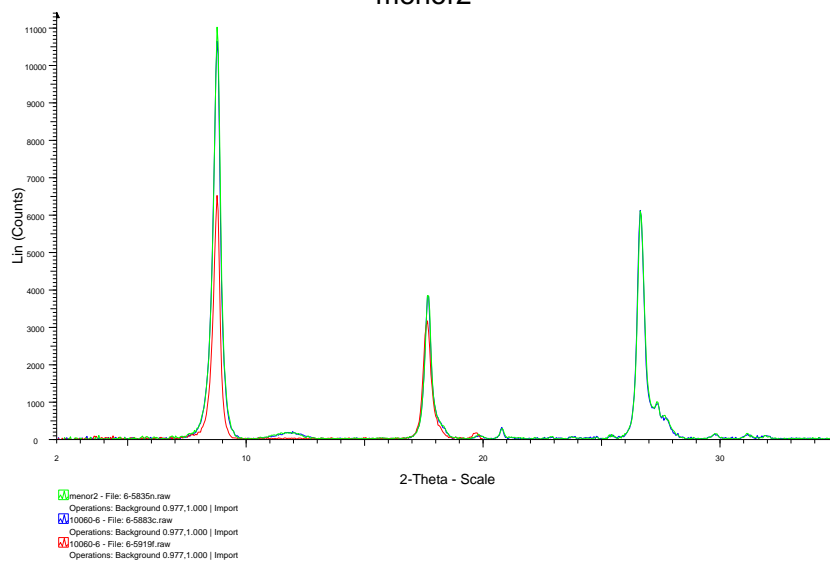
Fracción entre 53-5 micras

5.2

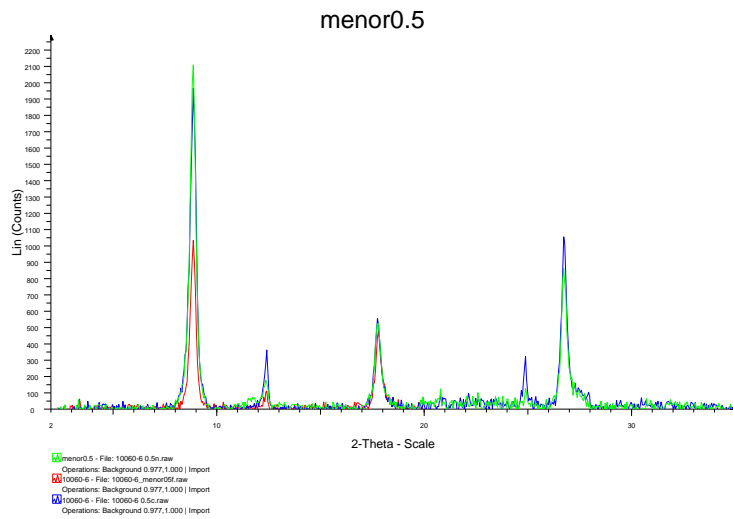


Fracción entre 5-2 micras

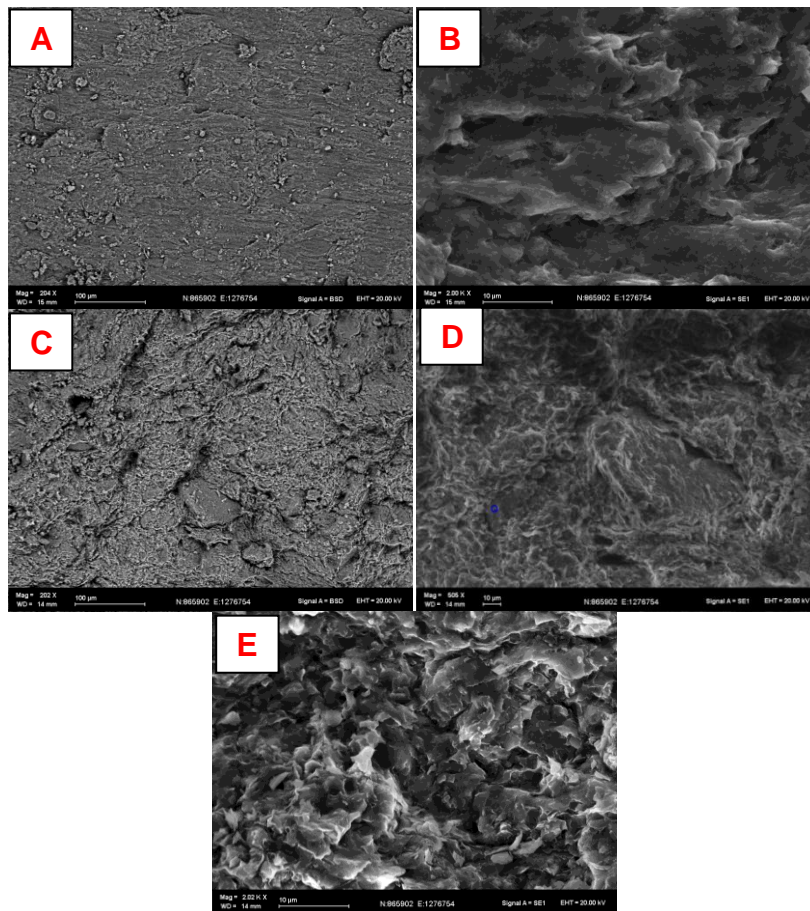
menor2



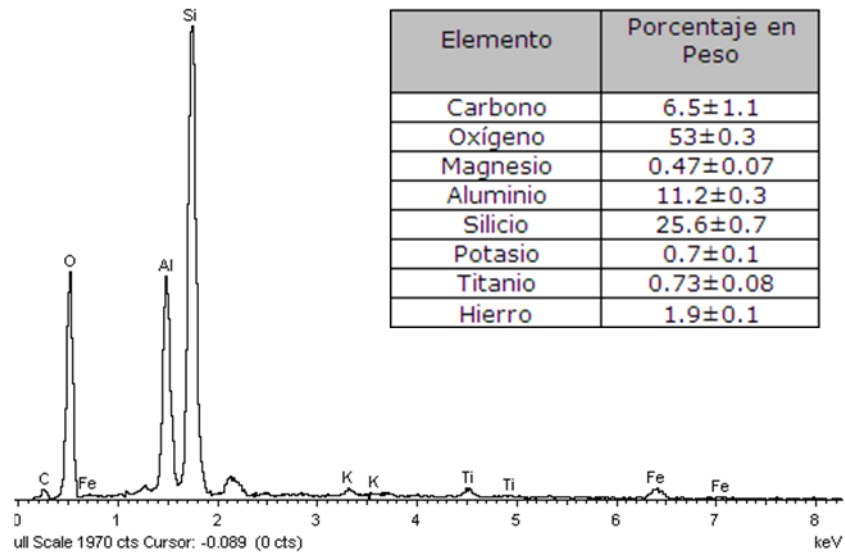
Fracción menor de 2 micras



Fracción menor de 05 micras



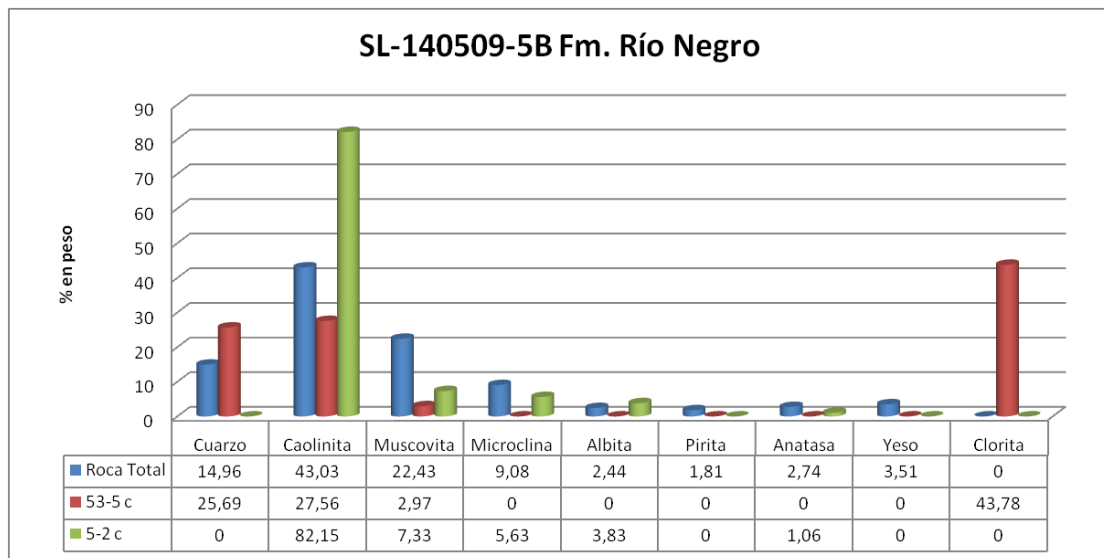
Imágenes al SEM de la muestra CP-240509-01 Fm. Río Negro A y B tomadas paralela a laminación, C, D y E perpendicular a la laminación.



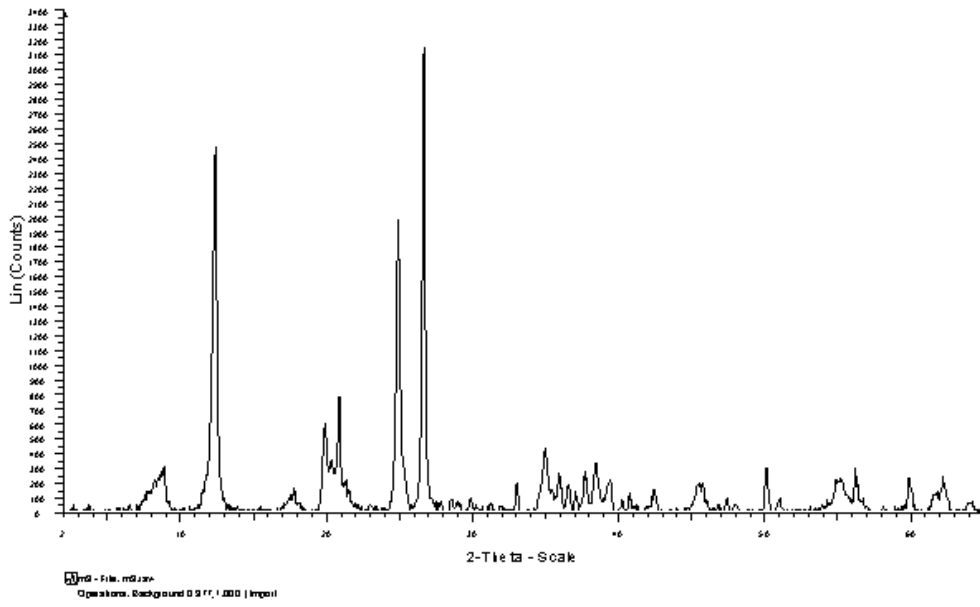
Composición elemental de la muestra en roca total.

1.4 SERRANIA DE SAN LUCAS

1.4.1 FORMACIÓN RIO NEGRO (muestra SL- -5B)

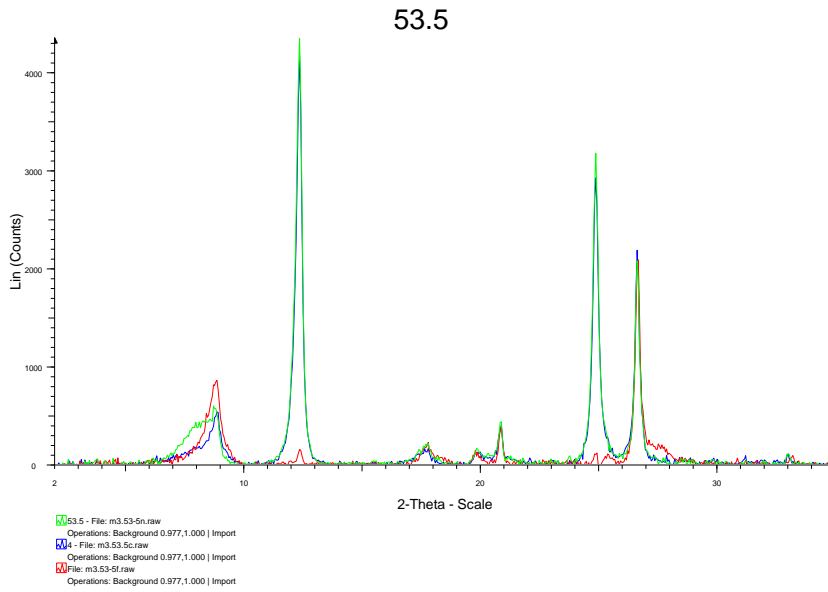


Composición mineralógica de la muestra en roca total y fracciones separadas.

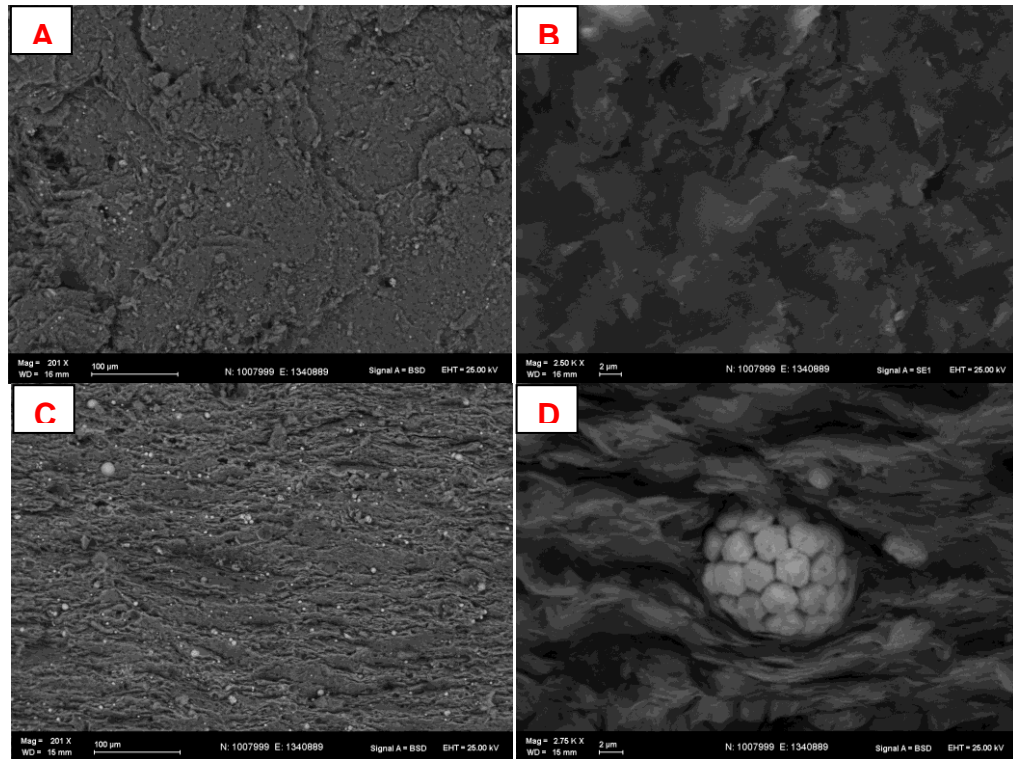
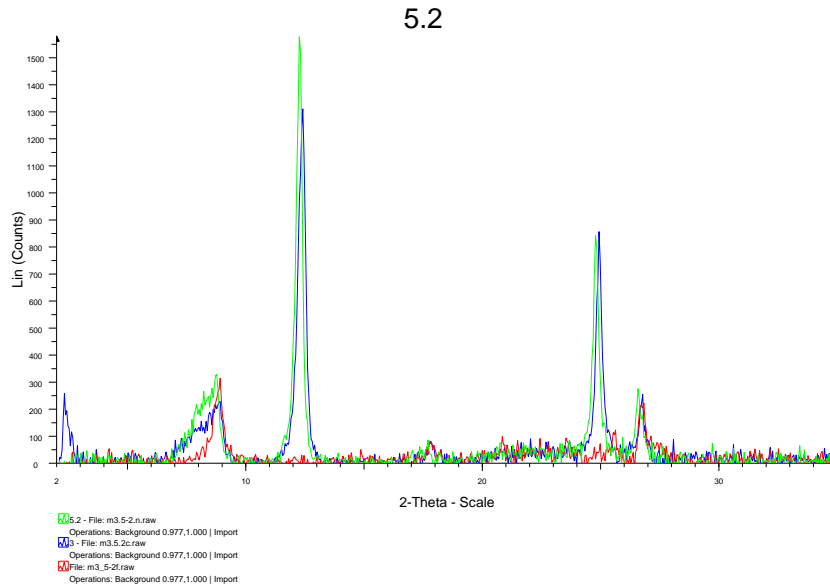


Difractometro Roca Total

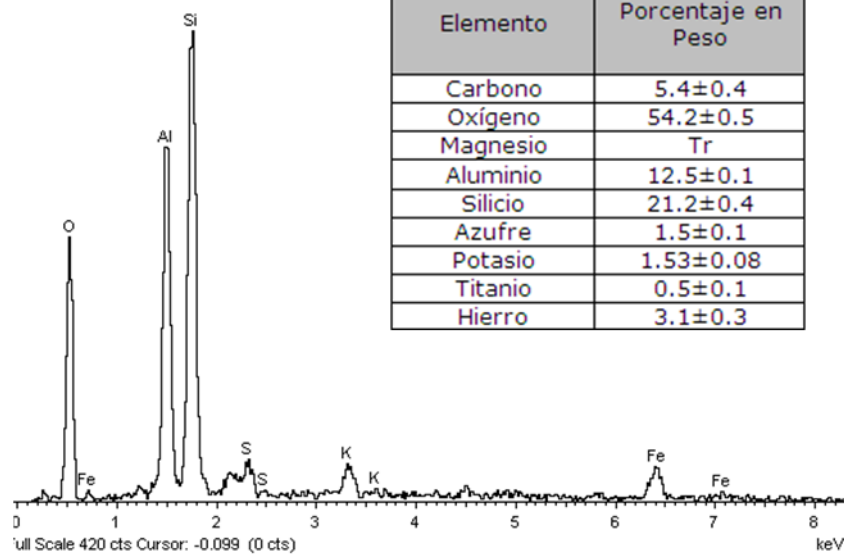
Fracción entre 53-5 micras



Fracción entre 5-2 micras



Imágenes al SEM de muestra SL-140509-5B de la Formación Rio Negro. A y B Paralelas a la laminación, B y C perpendiculares a la laminación.



Análisis elemental semi-cuantitativo y espectro elemental.