

**PETROGRAFÍA Y PROCEDENCIA SEDIMENTARIA DE LAS SECUENCIAS DEL CRETÁCICO
SUPERIOR – PLIOCENO EN EL ÁREA DEL MACIZO DE FLORESTA: CONSIDERACIONES
PALEOGEOGRÁFICAS REGIONALES**

YALEFF KATHERINE AMAYA DÍAZ

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
MEDELLÍN – ANTIOQUIA
2018

**PETROGRAFÍA Y PROCEDENCIA SEDIMENTARIA DE LAS SECUENCIAS DEL CRETÁCICO
SUPERIOR – PLIOCENO EN EL ÁREA DEL MACIZO DE FLORESTA: CONSIDERACIONES
PALEOGEOGRÁFICAS REGIONALES**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de **Geóloga**

Yaleff Katherine Amaya Díaz

yamayad@eafit.edu.co

DIRECTOR

Alejandro Beltrán Triviño, PhD.

aibeltrant@eafit.edu.co

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
MEDELLÍN – ANTIOQUIA
2018

*“Porque nunca es tarde, y el tiempo solo se
acaba cuando la vida termina. Y hasta ese
momento siempre existe una
posibilidad para todo.”
Anónimo.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar mis más sinceros agradecimientos:

A Dios por su fortaleza espiritual.

A mis padres, porque a pesar de la distancia siempre me han apoyado y hacen diariamente hasta lo imposible porque cumpla mis sueños.

A mis hermanos, que siempre están ahí para un consejo y una voz de aliento cuando lo necesito.

A Cristian Camilo, por ser el acompañante perfecto de todas mis aventuras y, sobre todo, la definición perfecta de apoyo y felicidad.

A Alejandro Beltrán Triviño, por darme la oportunidad de realizar este proyecto, la disposición de aclarar todas mis dudas y obviamente, por toda su buena energía y palabras de ánimo.

A Edison Duarte Gomez por toda la ayuda, los consejos, la enseñanza y el tiempo brindado para la realización de este proyecto.

A María Isabel Marín Cerón por su apoyo, su disposición a ayudarme y resolver dudas en cualquier momento.

A Wilton y Ana Lucia por toda la disposición prestada para poder realizar satisfactoriamente este proyecto y otros más a lo largo de la carrera.

A mis amigos: Laurita, Silvia, Rafita, Salas, Grequito, Andrés Felipe, Camilín, Linda, Susana y los del "322" por darme pequeñas dosis de felicidad y sabiduría con todos los momentos compartidos.

A la Universidad de los Niños, por darme la oportunidad de conocer personas tan maravillosas, amigos que seguramente serán para siempre y por hacer de mí una persona con mejores cualidades y capacidades.

Y, por último, pero no menos importante a todos mis compañeros y profesores de la carrera, de todos siempre me llevaré un bonito recuerdo.

CONTENIDO

RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
2. LOCALIZACIÓN.....	16
3. METODOLOGÍA.....	18
4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	21
4.1 Geología Regional.....	21
4.2 Geología Estructural.....	22
4.3 Estratigrafía.....	23
4.3.1 Formación Guaduas.....	24
4.3.2 Formación Areniscas de Socha.....	24
4.3.3 Formación Arcillas de Socha.....	25
4.3.4 Formación Bogotá.....	25
4.3.5 Formación Picacho.....	26
4.3.6 Formación Concentración.....	26
4.3.7 Formación Tilatá.....	26
5. RESULTADOS: PETROGRAFIA.....	28
5.1 Formación Guaduas.....	28
5.2 Formación Areniscas de Socha.....	32

5.3	Formación Arcillas de Socha	36
5.4	Formación Bogotá	39
5.5	Formación Picacho	42
5.6	Formación Concentración	45
5.7	Formación Tilatá	50
6.	DISCUSIÓN: ANÁLISIS DE PROCEDENCIA.....	54
	CONCLUSIONES	62
	RECOMENDACIONES.....	63
	BIBLIOGRAFÍA.....	64
	ANEXOS.....	68

Tabla de Figuras

Figura 1. Mapa geológico de la región de Paz del Rio, Boyacá, ilustrando la localización de las muestras recolectadas en la zona norte del área de estudio (base cartográfica plancha 172 Paz del Rio. Servicio geológico Colombiano, 1998).	16
Figura 2. Mapa geológico de la región de Tunja, Boyacá, ilustrando la localización de las muestras recolectadas en la zona sur del área de estudio (base cartográfica plancha 191 Tunja. Servicio geológico Colombiano, 1998).	17
Figura 3. Esquema metodológico utilizado para el desarrollo del presente estudio.....	18
Figura 4. Mapa del noroccidente de Suramérica ilustrando los principales rasgos tectónicos y las principales cuencas sedimentarias. Cordilleras Occidental (COcc), Central (CC) y Oriental (COr), Macizo de Santander (MZS), Cuencas del valle superior del Magdalena (VSM), valle medio del Magdalena (VMM), valle inferior del Magdalena (VIM) y Cauca-Patía (CCP). Tomado y modificado de: Caballero et al., (2010).	21
Figura 5. Columna estratigráfica generalizada del área central de la Cordillera Oriental. Modificado de Horton et al., (2010).	23
Figura 6. Muestra 09-DC-12A (4X, NX), correspondiente a la Fm. Guaduas. Contactos suturados y puntuales (indicados por las flechas) en cuarzo monocristalino (Qm) y glauconita (Glau).	28
Figura 7. Muestra 09-DC-12B (4X, NX), correspondiente a la Fm. Guaduas. Variedad de cuarzo monocristalino (Qm), calcita (Cal), glauconita (Glau) y feldespato pótasico (K).	29
Figura 8. Muestra 09-DC-12A (10X, NX), correspondiente a la Fm. Guaduas. Cuarzo monocristalino (Qm) y lítico sedimentario, asociado a cuarzo chert (Qc).	30
Figura 9. Muestra 09-DC-12B (4X, NX), correspondiente a la Fm. Guaduas. Granos con fracturas rellenas de material calcáreo (Indicado con las flechas). Cuarzo monocristalino (Qm), esparita (Esp) y calcita (Cal).	30
Figura 10. Muestra 09-DC-12A (A-4X, NX; B-4X, NP) correspondiente a la Fm. Guaduas. Glauconita presente como mineral accesorio. Cuarzo monocristalino (Qm), glauconita (Glau) y materia orgánica (Mo).	31
Figura 11. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Guaduas basada en Folk, (1974).	32

Figura 12. Muestra 09-DC-10 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Areniscas de Socha. Contactos suturados, puntuales y cóncavo - convexo (indicados por las flechas) en cuarzo monocristalino (Qm), lítico volcánico (Lv) y lítico metamórfico (Lm).	32
Figura 13. Muestra 09-DC-10 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Areniscas de Socha. Variedades de cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino difuso (Qpd) y presencia de líticos volcánicos (Lv).	33
Figura 14. A: Muestra 09-DC-10 (4X, NX). B: Muestra 09-DC-11 (10X, NX); C: 09-DC-10 (4X, NX), correspondientes a la Fm. Areniscas de Socha. Fragmentos de cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qpd), lítico volcánico (Lv), lítico metamórfico (Lm), feldespato pótasio (K), moscovita (M) y cuarzo chert (Qc).	34
Figura 15. Muestra 09-DC-10 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Areniscas de Socha. Epidota (Epi) como mineral accesorio, además presencia de cuarzo monocristalino (Qm), lítico volcánico (Lv) y moscovita (M).	35
Figura 16. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Areniscas de Socha, basado en Folk, (1974).	35
Figura 17. Muestra 09-DC-05 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Arcillas de Socha. Contactos suturados, puntuales y cóncavo - convexo (indicados por las flechas) en cuarzo monocristalino (Qm).	36
Figura 18. Muestra 09-DC-05 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Arcillas de Socha. Variedades de Cuarzo monocristalino (Qm), Cuarzo policristalino difuso (Qpd) y Lítico metamórfico (Lm).	36
Figura 19. Muestra 09-DC-05 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Arcillas de Socha. Líticos metamórfico (esquisto micáceo y cuarzomicáceo) y líticos sedimentarios. Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qpd), cuarzo Chert (Qc), lítico metamórfico (Lm) y lítico volcánico (Lv).	37
Figura 20. Muestra 09-DC-05 (10X, NP), correspondiente a la Fm. Arcillas de Socha. Arcillas como cemento y Materia Orgánica presente en la Formación Arcillas de Socha. Arcillas (AR) y Materia Orgánica (Mo).	38
Figura 21. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Arcillas de Socha, basado en Folk, (1974).	38
Figura 22. Muestra 09-DC-02 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Bogotá. Contactos cóncavo - convexo y puntuales (indicados por las flechas). Cuarzo monocristalino (Qm).	39

Figura 23. Muestra 09-DC-02 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Bogotá. Variedades de cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino difuso (Qpd), lítico volcánico (Lv) y moscovita (M).	39
Figura 24. Muestra 09-DC-02 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Bogotá. Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo chert (Qc), lítico metamórfico (Lm), lítico sedimentario (Ls) y lítico volcánico (Lv).	40
Figura 25. Muestra 09-DC-02 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Bogotá. Epidota presente como mineral accesorio de la Formación Bogotá. Cuarzo monocristalino (Qm), epidota (Epi), lítico volcánico (Lv), lítico metamórfico (Lm) y lítico sedimentarios (Ls).	41
Figura 26. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Bogotá, basado en Folk, (1974).	41
Figura 27. Muestra 09-DC-09 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Picacho. Contactos suturados y puntuales (indicados por las flechas) en cuarzo monocristalino (Qm).	42
Figura 28. Muestra 09-DC-07 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Picacho. Variedades de cuarzo monocristalino (Qm) y cuarzo policristalino difuso (Qpd).	42
Figura 29. Muestra 09-DC-04 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Picacho. Granos de Feldespato pótasico (K), cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino difuso (Qpd) y líticos volcánicos criptocristalino (Lv).	43
Figura 30. Muestra 09-DC-07 (4X, A: NX; B: NP), correspondiente a la Fm. Picacho. Líticos metamórfico (esquisto grafitoso), cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo chert (Qc), lítico metamórfico (Lm) y lítico volcánico (Lv).	44
Figura 31. A: Muestra 09-DC-04 (10X, NX); B: Muestra 09-DC-09 (4X, NX), correspondientes a la Fm. Picacho. Circón y moscovita presente como mineral accesorio de la Formación Picacho. Cuarzo monocristalino (Qm), moscovita (M), circón (Zr) y cuarzo policristalino (Qpd).	45
Figura 32. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Picacho, basado en Folk, (1974).	45
Figura 33. Muestra 09-DC-08 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Concentración. Contactos suturados y puntuales (indicados por las flechas) en cuarzo monocristalino (Qm) y líticos volcánicos (Lv).	46
Figura 34. Muestra 09-DC-06 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Concentración. Variedades de cuarzo monocristalino (Qm) y cuarzo policristalino difuso (Qpd).	46

Figura 35. Muestra 09-DC-06 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Concentración. Feldespato potásico (K) en la muestra, corresponde a un grano de ortoclasa.	47
Figura 36. Muestra 09-DC-08 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Concentración. Líticos metamórfico (esquisto cuarzomíceo) y líticos sedimentarios, cuarzo Chert (Qc). cuarzo monocristalino (Qm), y lítico volcánico (Lv).	48
Figura 37. A: Muestra 09-DC-08 (10X, NX) B: Muestra 09-DC-06 (10X, NX), correspondientes a la Fm. Concentración. circón (Zr) y moscovita (M) presentes como mineral accesorio de la Formación Concentración. Cuarzo monocristalino (Qm), lítico metamórfico (Lm) y lítico volcánico (Lv).....	49
Figura 38. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Concentración basada en Folk, (1974).	49
Figura 39. Muestra 09-DC-03 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Tilatá. Contactos suturados y puntuales (indicados por las flechas) en cuarzo monocristalino (Qm).	50
Figura 40. Muestra 09-DC-03 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Tilatá. Variedades de cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino difuso (Qpd) y cuarzo policristalino foliado (Qpf). Presencia de lítico sedimentario (Ls), y óxidos de hierro (Oxi).	51
Figura 41. Muestra 09-DC-03 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Tilatá. Líticos y Feldespato pótasio (K) presente en la muestra. Lítico sedimentario (Ls) compuesto por areniscas cuarzosas. Cuarzo monocristalino (Qm).....	52
Figura 42. Muestra 09-DC-03 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Tilatá. Circón (Zr) presente como mineral accesorio de la Formación Tilatá. Cuarzo monocristalino (Qm), lítico sedimentario (Ls) y óxidos de hierro (Oxi).	53
Figura 43. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Tilatá, basado en Folk, (1974).....	53
Figura 44. Clasificación composicional de las secuencias del Cretácico superior – Plioceno del área central de la Cordillera Oriental basada en Folk, (1974).	55
Figura 45. Diagrama de la naturaleza de los tipos de cuarzo presentes en las secuencias del Cretácico superior – Plioceno del área central de la Cordillera Oriental. (Tortosa et al., 1991, modificado de Basu et al., 1975).	56
Figura 46. Diagrama ternario de procedencia de las secuencias del Cretácico superior – Plioceno (Dickinson, 1985).	58

Figura 47. Mapa de relación de áreas de aporte y depósito para el Maastrichtiano en la zona de la actual cuenca de la Cordillera Oriental. Diagrama no escala..... 60

Figura 48. Mapa de relación de áreas de aporte y depósito para el Paleoceno – Oligoceno temprano en la zona de la actual cuenca de la Cordillera Oriental. Diagrama no escala. 60

Figura 49. Mapa de relación de áreas de aporte y depósito para el Oligoceno tardío - Mioceno temprano en la zona de la actual cuenca de la Cordillera Oriental. Diagrama no escala. 61

Figura 50. Mapa de relación de áreas de aporte y depósito para el Mioceno tardío - Plioceno en la zona de la actual cuenca de la Cordillera Oriental. Diagrama no escala. 61

Lista de Tablas

Tabla 1. Secciones delgadas utilizadas para el desarrollo del proyecto asociadas a su unidad Litoestratigráfica.....	19
Tabla 2. Códigos de conteo aplicados en el análisis petrográfico.....	19
Tabla 3. Códigos de conteo aplicados en el análisis petrográfico para los tipos de cuarzo.....	20
Tabla 4. Parámetros de normalización en porcentajes para los constituyentes del armazón de las muestras.....	20
Tabla 5. Conteo modal normalizado para los tipos de cuarzo presentes en la Formación Guaduas.	29
Tabla 6. Conteo modal normalizado del armazón de las muestras de la Formación Guaduas. Clasificación composicional basada en Folk, (1974).	29
Tabla 7. Conteo modal normalizado para los tipos de cuarzo presentes en la Formación Areniscas de Socha.....	33
Tabla 8. Conteo modal normalizado del armazón de las muestras de la Formación Areniscas de Socha. Clasificación composicional basada en Folk, (1974).	33
Tabla 9. Conteo modal normalizado para los tipos de cuarzo presentes en la Formación Arcillas de Socha.....	37
Tabla 10. Conteo modal normalizado para los tipos de cuarzo presentes en la Formación Bogotá. .	40
Tabla 11. Conteo modal normalizado para los tipos de cuarzo presentes en la Formación Picacho.	43
Tabla 12. Conteo modal normalizado del armazón de las muestras de la Formación Picacho. Clasificación composicional basada en (Folk, 1974).	43
Tabla 13. Conteo modal normalizado de los tipos de cuarzo presentes en la Formación Concentración.	46
Tabla 14. Conteo modal normalizado del armazón de las muestras de la Formación Concentración. Clasificación composicional basada en Folk, (1974).	47
Tabla 15. Conteo modal normalizado para los tipos de cuarzo presentes en la Formación Tilatá. ...	51

Lista de Anexos

Anexo 1. Mapa geológico zona norte del área de estudio (Base cartográfica plancha 172 Paz del Rio. Servicio geológico Colombiano, 1998).....	69
Anexo 2. Mapa geológico zona sur del área de estudio (Base cartográfica plancha 172 Paz del Rio. Servicio geológico Colombiano, 1998).....	70

RESUMEN

Se analizó la petrografía de 13 secciones delgadas de las secuencias del Cretácico Superior - Plioceno aflorantes en el área central de la Cordillera Oriental, específicamente en el área del Macizo de Floresta, con el objetivo de determinar la procedencia sedimentaria y su relación con la evolución orogénica de la Cordillera Oriental.

Estas secuencias sedimentarias corresponden a las formaciones Guaduas (Maastrichtiano), Socha (Paleoceno), Bogotá (Paleoceno-Eoceno), Picacho (Eoceno), Concentración (Eoceno - Oligoceno) y Tilotá (Plioceno) y gracias al análisis petrográfico se logró identificar cambios texturales y composicionales. Dichos cambios podrían ser el resultado de la evolución orogénica de la Cordillera Central y Oriental durante esta época.

El Cretácico Superior representado por la Formación Guaduas presenta características texturales y composicionales que sugiere que la fuente de aporte es el Escudo de Guyana a diferencia de las secuencias sedimentarias del Paleoceno – Oligoceno representadas por las formaciones Socha, Bogotá, Picacho y Concentración, que presentan madurez composicional y textural similares, así como el contenido de fragmentos líticos sedimentarios, volcánicos y metamórficos lo que sugiere que estas formaciones presentan la misma fuente de sedimentos que podría corresponder al Escudo de Guyana y la Cordillera Central. Entre el Oligoceno tardío y el Mioceno temprano, en esta cuenca no ocurre depositación lo que podría indicar altas tasas de erosión, confirmando el levantamiento de la Cordillera Oriental según lo propuesto por Villamil, (1999) y Horton et al., (2010). En el Mioceno tardío – Plioceno ocurre la acumulación de la Formación Tilotá caracterizada por contener líticos netamente sedimentarios, lo que sugiere que para esta época la posible fuente de aporte de sedimentos es la Cordillera Oriental y se confirma su levantamiento entre el Oligoceno Tardío y el Mioceno temprano.

INTRODUCCIÓN

La parte más septentrional de los Andes es el resultado de complejos procesos geodinámicos (Toussaint, 1996). Durante el Maastrichtiano al Paleoceno un evento de deformación compresivo produjo el acortamiento y levantamiento de la Cordillera Central (Cooper et al., 1995), generando la depositación de formaciones cuya área fuente fue la misma Cordillera Central (Ecopetrol 2001 en Caballero et al., 2010). Posteriormente, desde el Eoceno hasta el presente ocurre un cambio en la configuración tectónica regional que induce a un régimen compresivo en la Cordillera Oriental (Cortés et al., 2005).

Por otra parte, Gómez et al. (2003), sugiere que la deformación de la Cordillera Oriental inició en el Eoceno medio – tardío en el Anticlinorio de Villeta, posteriormente más al oriente, diversos autores confirman que la deformación eocena asociada al área del Macizo de Floresta está relacionada directamente al movimiento inicial de la Falla Soapaga, mientras que en el flanco oriental la deformación inició en el Oligoceno tardío hace menos de 25 Ma (Caballero et al. 2010).

Con el uso de geocronología de circones detríticos, Horton et al., (2010) afirma que en el Oligoceno tardío al Mioceno temprano ocurre la exhumación de la Cordillera Oriental, generando una división topográfica y erosión de una gruesa sucesión sedimentaria del Paleógeno.

En la zona central de la Cordillera Oriental existen pocos estudios paleogeográficos, petrográficos y de procedencia que permitan establecer claramente la evolución de las paleocuecas del área y de sus fuentes de aporte sedimentario, lo que genera un déficit de información crucial para el entendimiento de la evolución paleogeográfica y representa implicaciones importantes en análisis de cuencas para la exploración de hidrocarburos y de aguas subterráneas, campos en los cuales las rocas de esta región tienen un alto potencial.

Una de las herramientas utilizadas para la reconstrucción paleogeográfica de una zona, son los estudios sedimentológicos y estratigráficos que documentan los procesos, las causas y las variaciones espacio – temporales de las unidades analizadas. Estos estudios se llevan a cabo con diversos análisis de procedencia (petrografía, minerales densos, geocronología de circones detríticos, retrabajamiento de polen y glauconita), subsidencia tectónica y exhumación (e.g. Bayona et al., 2010). Los análisis de procedencia consisten principalmente en identificar fuentes de detritos en rocas siliciclásticas, teniendo en cuenta factores como litología, relieve y características de las áreas fuentes (Méndez, 2017).

La presente investigación se realiza en la parte central de la Cordillera Oriental de Colombia, en el departamento de Boyacá, donde está localizado el Macizo de Floresta y afloran las secuencias sedimentarias del Cretácico Superior – Plioceno, representadas por las formaciones Guaduas, Socha,

Bogotá, Picacho, Concentración y Tilatá (Figura 1 y Figura 2). Con este trabajo se pretende evaluar y redefinir la historia geológica de esta región usando como herramienta el estudio de procedencia de las rocas siliciclásticas por medio del análisis petrográfico de 13 secciones delgadas pertenecientes a las secuencias sedimentarias del Cretácico Superior – Plioceno. Los resultados fueron integrados en los diagramas ternarios de Folk, (1974) y Dickinson, (1985) para clasificar las rocas en términos composicionales, texturales y de procedencia sedimentaria.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Establecer las fuentes de aporte sedimentario de las secuencias sedimentarias del Cretácico Superior - Plioceno en el área del Macizo de Floresta por medio del análisis petrográfico. Particularmente, para las formaciones Guaduas, Socha, Bogotá, Picacho, Concentración y Tiltatá para así contribuir a la reconstrucción de la evolución geológica regional de la zona durante el Cretácico Superior – Plioceno.

1.2. Objetivos específicos

- 1.2.1. Recopilar información existente de estudios paleogeográficos y petrográficos de la zona de estudio.
- 1.2.2. Realizar la descripción petrográfica de las muestras representativas tomadas para cada formación estudiada.
- 1.2.3 Realizar conteo modal siguiendo la metodología Gazzi – Dickinson (Ingersoll et al., 1984) en las secciones delgadas.
- 1.2.4 Interpolar los datos resultantes en diagramas de clasificación de procedencia propuestos por (Dickinson, 1985) y en diagramas ternarios de clasificación de areniscas QFL propuesto por Folk (1980).
- 1.2.5 Interpretar y correlacionar los resultados de los diagramas en términos de reconstrucciones paleogeográficas y paleotectónicas regionales.

2. LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se encuentra localizada en la parte central de la Cordillera Oriental, específicamente en el área del Macizo de Floresta donde afloran las secuencias del Cretácico Superior – Plioceno. Las muestras se recolectaron al norte (Figura 1) y al sur (Figura 2) de la zona de estudio en los alrededores de los municipios Paz del Río, Socha, Tasco y Tunja en el departamento de Boyacá – Colombia entre las planchas geológicas 172 (Paz del Río) y 191 (Tunja) del Servicio Geológico Colombiano a escala 1:100.000 (Anexo 1 y Anexo 2: Mapas geológicos zona de estudio).

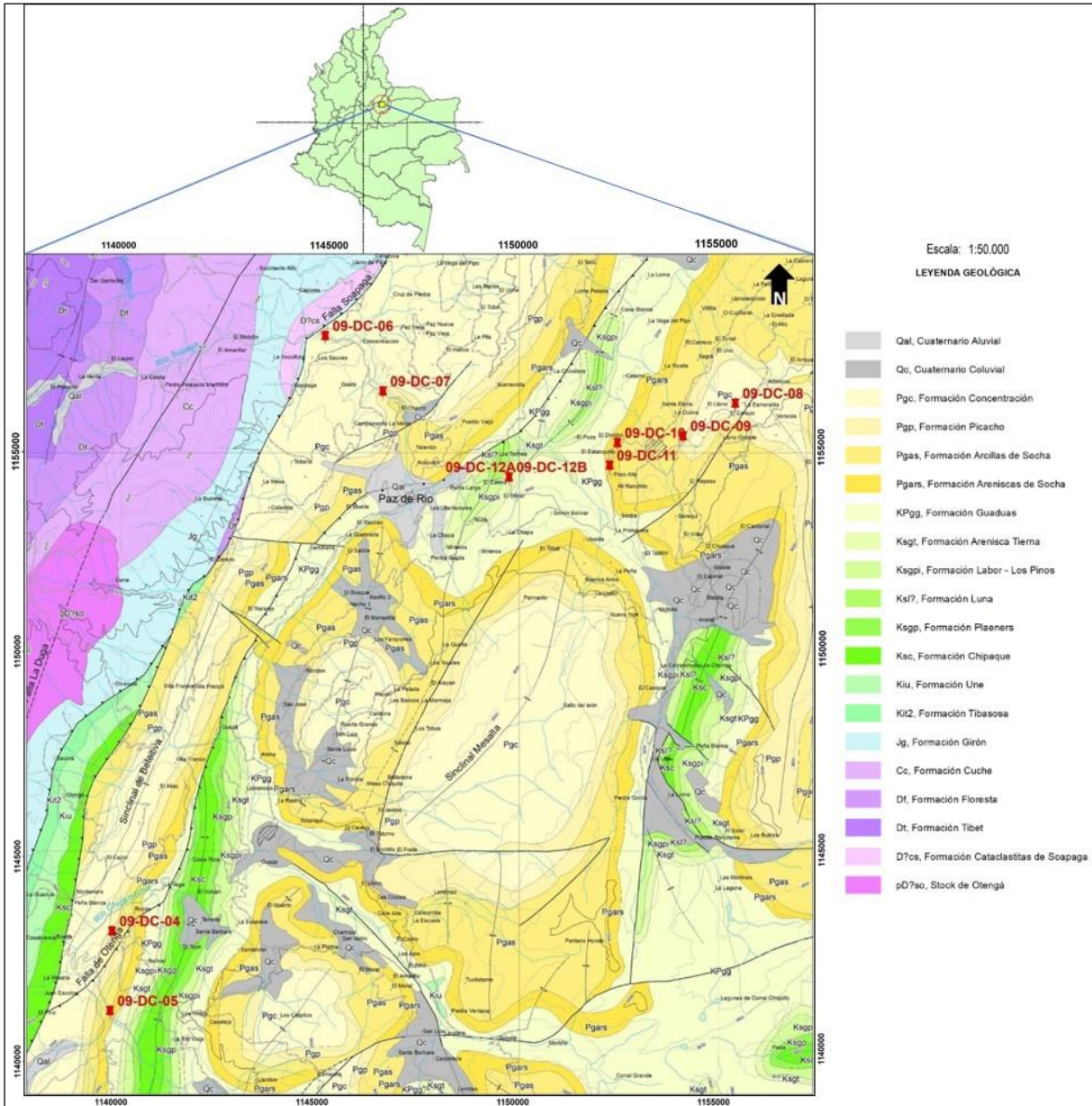


Figura 1. Mapa geológico de la región de Paz del Río, Boyacá, ilustrando la localización de las muestras recolectadas en la zona norte del área de estudio (base cartográfica plancha 172 Paz del Río. Servicio geológico Colombiano, 1998).

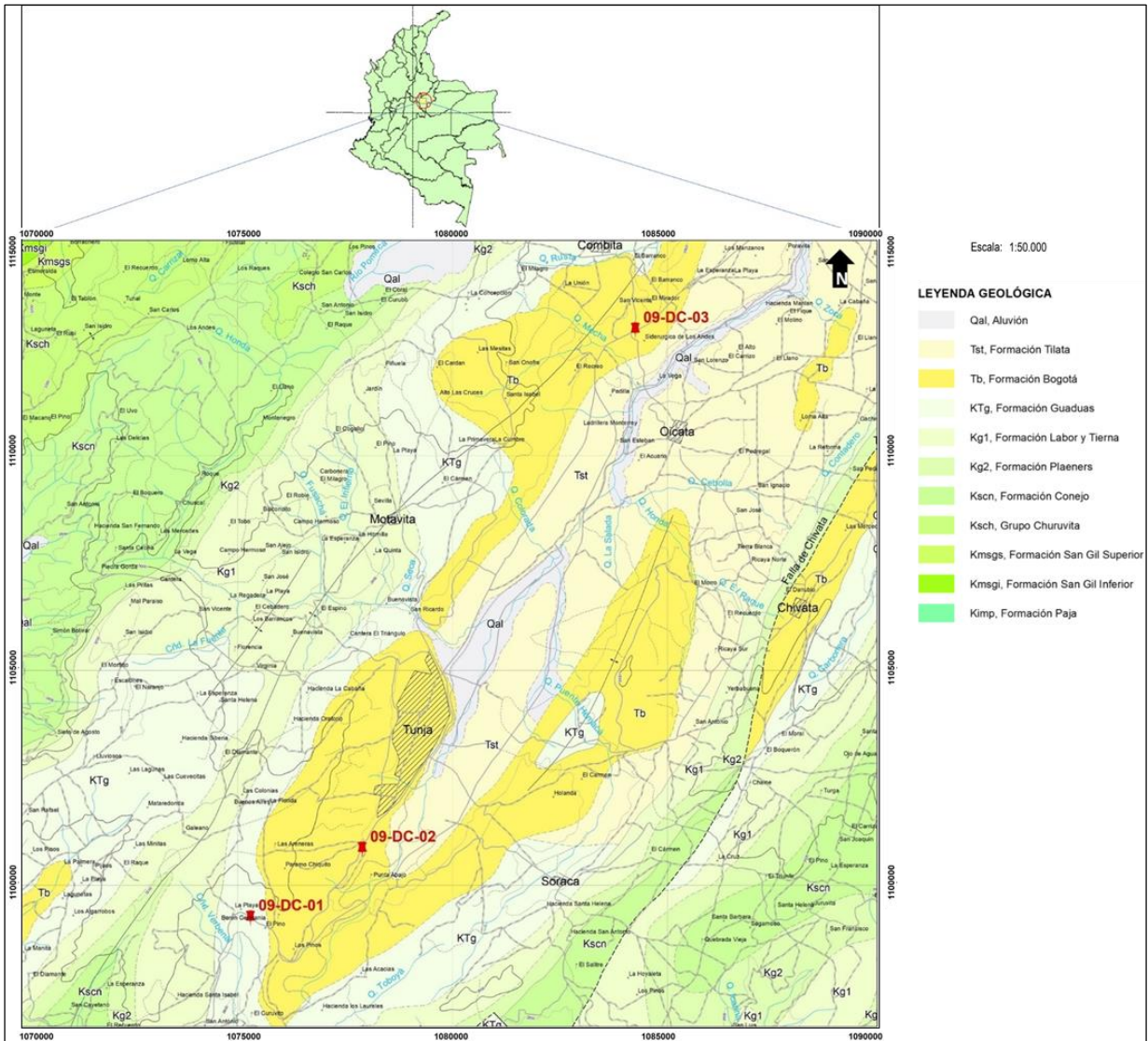


Figura 2. Mapa geológico de la región de Tunja, Boyacá, ilustrando la localización de las muestras recolectadas en la zona sur del área de estudio (base cartográfica plancha 191 Tunja. Servicio geológico Colombiano, 1998).

3. METODOLOGÍA

La metodología para el desarrollo de este trabajo se dividió en tres fases (Figura 3) que son explicadas a continuación.

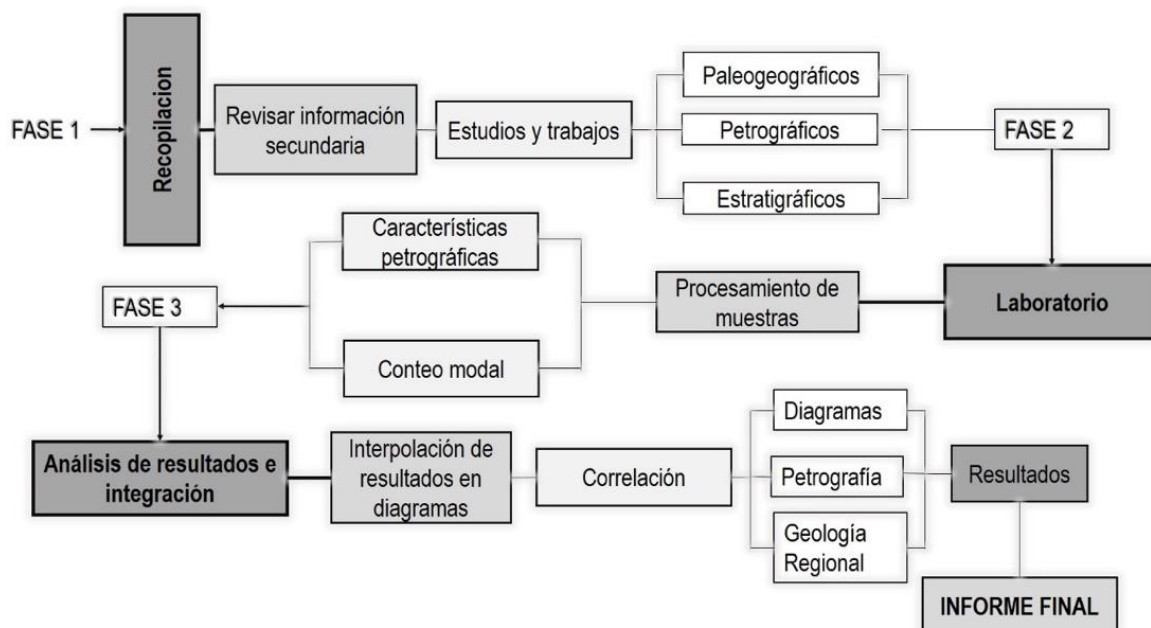


Figura 3. Esquema metodológico utilizado para el desarrollo del presente estudio.

3.1. Fase 1 – Recopilación: Esta fase consistió en la recopilación de los trabajos y la información existente acerca de las secuencias del Cretácico Superior – Plioceno y los estudios paleogeográficos, petrográficos y estratigráficos realizados en la zona de estudio. Estos trabajos son compilados en la sección Marco Geológico del presente manuscrito.

3.2. Fase 2 – Laboratorio: Las características texturales y composicionales permiten reconocer las fuentes de aporte sedimentario y eventos diagenéticos con el fin de establecer variaciones estratigráficas (Dickinson, 1985). Para esto, se describieron petrográficamente 13 secciones delgadas de secuencias del Cretácico Superior – Plioceno representadas por las formaciones Guaduas, Socha, Bogotá, Picacho, Concentración y Tilatá (Tabla 1) tomadas y suministradas por el Dr. Alejandro Beltrán.

Este análisis se efectuó con el uso del microscopio petrográfico estándar. Se determinaron las características texturales (tamaño de grano, redondez y selección), incluyendo, el tipo de contacto entre partículas, el contenido de matriz y cemento. Así, como la realización de los conteos modales de las areniscas y litoarenitas siguiendo el método Gazzi – Dickinson (Ingersoll et al., 1984). Este método consistió en contar los constituyentes del armazón que tengan tamaño arena (> 0,0625 mm) ignorando matriz, cemento y vetillas.

Tabla 1. Secciones delgadas utilizadas para el desarrollo del proyecto asociadas a su unidad Litoestratigráfica. Nota: el datum de las coordenadas es Magna Colombia Bogotá.

Muestra	Unidad Litoestratigráfica	Coordenadas	
		Este (X)	Norte (Y)
09-DC-01	Guaduas	1 075 303	1 099 224
09-DC-02	Bogotá	1 077 901	1 100 827
09-DC-03	Tilatá	1 084 256	1 112 910
09-DC-04	Picacho	1 139 770	1 142 926
09-DC-05	Arcillas de Socha	1 139 718	1 140 928
09-DC-06	Concentración	1 145 127	1 157 879
09-DC-07	Picacho	1 146 575	1 156 486
09-DC-08	Concentración	1 155 430	1 156 181
09-DC-09	Picacho	1 154 115	1 155 361
09-DC-10	Areniscas de Socha	1 152 465	1 155 190
09-DC-11	Areniscas de Socha	1 152 270	1 154 624
09-DC-12A	Guaduas	1 149 744	1 154 329
09-DC-12B	Guaduas	1 149 744	1 154 329

Adicionalmente, se realizó un conteo de 300 puntos, por cada sección delgada para lograr confiabilidad en los valores estadísticos. Particularmente, con este método se contaron los minerales tamaño arena (>0,0625 mm) que estaban presentes dentro de los fragmentos grandes de roca, es decir, que si un lítico presentaba un cuarzo con un tamaño mayor a 0,0625 mm fue contando como Qm (Cuarzo monocristalino). Para determinar la composición modal de las areniscas y litoarenitas se establecieron 13 categorías para identificar y distinguir los constituyentes del armazón de las muestras sedimentarias (Tabla 2).

Tabla 2. Códigos de conteo aplicados en el análisis petrográfico.

Código	Tipo de grano	Descripción
Qm	Cuarzo monocristalino	Granos de cuarzo con caras limpias con extinción recta u ondulatoria
Qpf	Cuarzo policristalino foliado	Granos de cuarzo alargados y alineados con contactos suturados
Qpd	Cuarzo policristalino difuso	Granos de Cuarzo con contactos suturados y cristales equidimensionales
Qc	Chert	Cuarzo microcristalino
Plag	Plagioclasa	Grano con forma subhedral y maclas
K	Feldespato potásico	Grano con apariencia terroso y figura de interferencia biáxica
Ls	Lítico sedimentario	Granos minerales embebidos en matriz. En nicoles paralelos presentan colores marrones a pardos.
Lm	Lítico metamórfico	Esquistos micaceos, cuarzomicaceos y grafitosos
Lv	Lítico volcánico	Cristales muy finos embebidos en matriz cristalina
Zr	Circón	Cristales en forma ehedrales, con alto relieve y colores de birrefringencia
Epi	Epidota	Granos con forma prismática alargada, incoloro, relieve alto y colores de birrefringencia medio – alto
M	Micas	Granos alargados tabulares, con extinción tipo ojo de pájaro, colores de birrefringencia altos y en ocasiones deformados
Glau	Glauconita	Granos de color verde en nicoles paralelos con forma redondeada. Con nicoles cruzados se observan colores moteados amarillos y verdes

Adicionalmente, siguiendo la metodología de Basu et.al., (1975) se identificaron y se clasificaron los granos de cuarzo en 4 categorías (Tabla 3), en función del carácter de la extinción y la policristalinidad.

Tabla 3. Códigos de conteo aplicados en el análisis petrográfico para los tipos de cuarzo.

Código	Tipo de grano
Qp 2-3	Cuarzo policristalino con 2 o 3 granos
Qp +3	Cuarzo policristalino con más de 3 granos
Qrec	Cuarzo con extinción recta
Qond	Cuarzo con extinción ondulatoria

3.3. Fase 3 – Análisis de resultados e integración: Luego de obtener las características texturales y los resultados de los conteos modales en cada una de las muestras analizadas se normalizaron los porcentajes de los constituyentes del armazón y se establecieron 4 categorías: Cuarzo total, feldespatos y líticos totales (Tabla 4) para luego ser clasificadas en los diagramas ternarios QtFL propuesto por Folk, (1974), QtFLt y QmFLt propuestos por Dickinson, (1985). Adicionalmente, se graficaron en el diagrama de la naturaleza de los cuarzoes propuesto por Basu et al., (1975).

Tabla 4. Parámetros de normalización en porcentajes para los constituyentes del armazón de las muestras.

Código	Nombre	Normalización (%)
Qt	Cuarzo total	$(Qm+Qpf+Qpd) / 300 * 100$
Qm	Cuarzo monocristalino	$(Qm) / 300 * 100$
F	Feldespatos	$(K+Plag) / 300 * 100$
Lt	Líticos totales	$(Lm+Ls+Lv+Qc) / 300 * 100$

Con la interpolación de los resultados de los conteos modales en los diagramas ternarios arriba descritos, se procedió a la interpretación de estos y se concluyó acerca de la procedencia sedimentaria de las secuencias del Cretácico Superior – Plioceno, enfocados en la reconstrucción paleogeográfica regional en el área del Macizo de Floresta.

4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

4.1. Geología Regional

Los Andes Colombianos se componen de tres cordilleras: Occidental, Central y Oriental separadas una de otra por prominentes depresiones topográficas de los Valles Cauca – Patía y Magdalena (e.g. Villagómez et al., 2011) (Figura 4). Este capítulo se centra en la Cordillera Oriental ya que es el foco de esta investigación. La Cordillera Oriental, consiste en rocas de basamento metamórficas e ígneas de edades precámbricas y paleozoicas, las cuales están cubiertas por secuencias sedimentarias paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas (e.g. González et al., 1988). Su basamento se compone principalmente de granulitas y neises del Precámbrico, filitas, esquistos, cuarcitas, migmatitas y rocas plutónicas paleozoicas y mesozoicas (Forero Suarez, 1990). Las rocas sedimentarias marinas del Paleozoico superior recubren discordantemente las rocas metamórficas del Paleozoico inferior (Caballero et al., 2010) e incluye unidades litoestratigráficas del Paleozoico inferior como el Neis de San Lucas, Neis de Bucaramanga, Grupo Quetame, entre otros, además de cuerpos ígneos intrusivos que se hacen más jóvenes hacia el oeste (Forero Suarez, 1990).

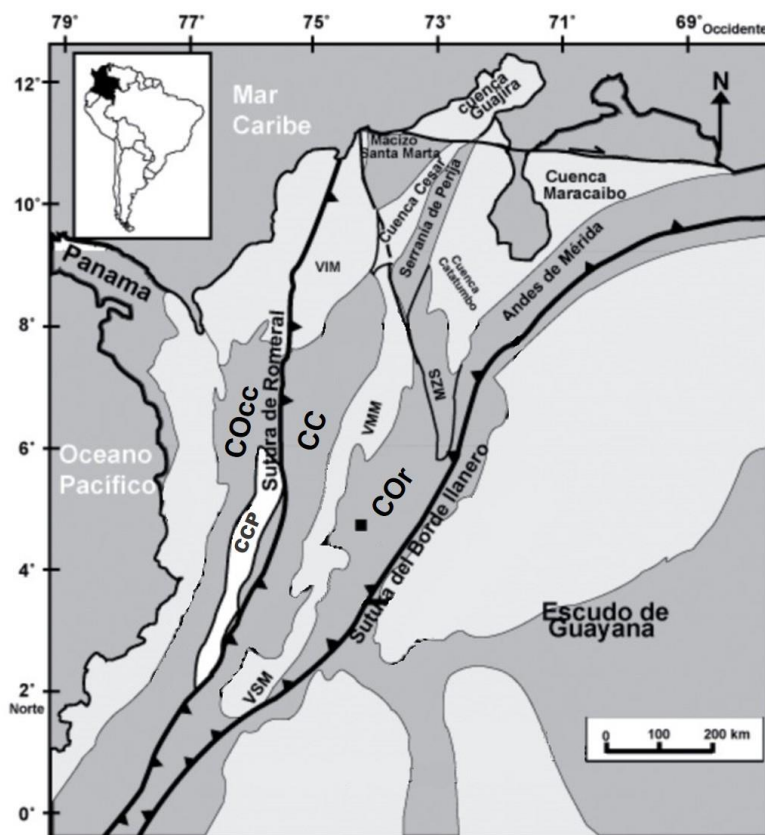


Figura 4. Mapa del noroccidente de Suramérica ilustrando los principales rasgos tectónicos y las principales cuencas sedimentarias. Cordilleras Occidental (COcc), Central (CC) y Oriental (COOr), Macizo de Santander (MZS), Cuencas del valle superior del Magdalena (VSM), valle medio del Magdalena (VMM), valle inferior del Magdalena (VIM) y Cauca-Patía (CCP). Tomado y modificado de: Caballero et al., (2010).

Durante un evento de rifting junto con volcanismo explosivo fueron depositadas formaciones sedimentarias entre el Triásico tardío y Jurásico medio (Sarmiento Rojas, 2001). Estas unidades están cubiertas por sedimentos aluviales y rocas piroclásticas (Caballero et al., 2010) que fueron intruidas durante el Jurásico medio (Butler & Schamel, 1988). Durante el Cretácico se depositaron potentes secuencias de rocas sedimentarias marinas que luego fueron cubiertas por rocas sedimentarias de ambiente continental del Eoceno temprano a tardío (Caballero et al., 2010). Finalmente, se acumularon depósitos de facies aluviales y algunos volcanoclásticos (Gómez et al., 2005).

En la parte central de la Cordillera Oriental, específicamente en el área del Macizo de Floresta, donde se centra este estudio, afloran rocas que abarcan el basamento ígneo-metamórfico y una potente cobertura compuesta por sedimentos paleozoicos, mesozoicos y cenozoicos (Mojica & Villarroel, 1984). El basamento cristalino paleozoico lo componen rocas metamórficas del Neis de Buntía y de la Formación Esquistos y Filitas de Busbanzá las cuales son cortadas por rocas intrusivas de los stocks de Chuscales y Otengá (Manosalva et al., 2017) de edades ordovícico – paleozoico superior no precisado (Mojica & Villarroel, 1984).

Durante el Triásico – Cretácico temprano se desarrolla una cuenca extensional producto de la separación entre Norteamérica y Suramérica que genera dos cuencas separadas por el Alto de Santander (Macizos Floresta y Santander), en las cuales se deposita una sucesión de rocas sedimentarias, las cuales fueron deformadas durante el Paleógeno y Neógeno como resultado de la Orogenia Andina (Cooper et al., 1995). Las rocas que componen el basamento fueron cubiertas por una secuencia continua que corresponde a un solo ciclo sedimentario, representado por las formaciones El Tibet, Floresta y Cucho (Mojica & Villarroel, 1984). Además, en el triásico - jurásico se depositaron algunas formaciones como Arcabuco, Rusia, Girón, Montebel y Palermo; cubiertas a su vez por rocas cretáceas como el Grupo Cáqueza, Guadalupe, las formaciones Tibabosa, Guaduas, entre otras (Ulloa et al., 2003; Renzoni & Rosas, 2008; Renzoni et al., 2008). Entre el Paleógeno y Neógeno se depositaron las formaciones Socha, Bogotá, Picacho, Concentración y Tiltatá (Renzoni et al., 2008) las cuales están cubiertas por depósitos cuaternarios que se dividen en tres tipos: glaciares, coluviales y aluviales (Ulloa et al., 2003).

Actualmente la configuración tectónica de la Cordillera Oriental es generada principalmente por la tectónica de placas del Neógeno que se ha superpuesto a anteriores episodios de deformación (e.g. Mendez, 2017).

4.2. Geología Estructural

En el área de estudio se observa un estilo estructural predominantemente compresivo (Ulloa et al., 2003) que se manifiesta a partir de estructuras como el sinclinal de Mesalta y sinclinal de Beteitiva y algunas fallas como: Otengá, Soapaga y Chivata (Anexo 1 y Anexo 2: Mapas geológicos zona de estudio).

La Falla Soapaga es una estructura de carácter regional de tipo inverso que se ha interpretado como una estructura de cabalgamiento con vergencia al oeste (Mora et al., 2006; Saylor et al., 2011). Esta falla pone en contacto al oeste las formaciones Girón, Tibasosa, Une y Churuvíta; el grupo Guadalupe y las Cataclasitas de Soapaga con el Macizo de Floresta; mientras que al lado este de la falla afloran rocas del Cretácico Superior como el grupo Guadalupe y la Fm. Guaduas y rocas cenozoicas como las formaciones Socha, Picacho y Concentración (Ulloa et al., 2003).

4.3. Estratigrafía

El área del Macizo de Floresta (parte central de la Cordillera Oriental) involucra rocas metamórficas ígneas y sedimentarias con edades que van desde el paleozoico hasta el cenozoico (González et al., 1988; Forero Suarez, 1990; Toussaint, 1996; Sarmiento Rojas, 2001; Ulloa et al., 2003; Caballero et al., 2010).

El estudio se centra en las secuencias sedimentarias del Cretácico Superior - Plioceno aflorantes en el área central de la Cordillera Oriental que corresponde a las Formaciones Guaduas (Maastrichtiano), Socha (Paleoceno), Bogotá (Paleoceno-Eoceno), Picacho (Eoceno), Concentración (Eoceno - Oligoceno) y Tilatá (Plioceno) (Figura 5). A continuación, se describen brevemente las características principales de cada una de ellas de acuerdo a los trabajos anteriores.

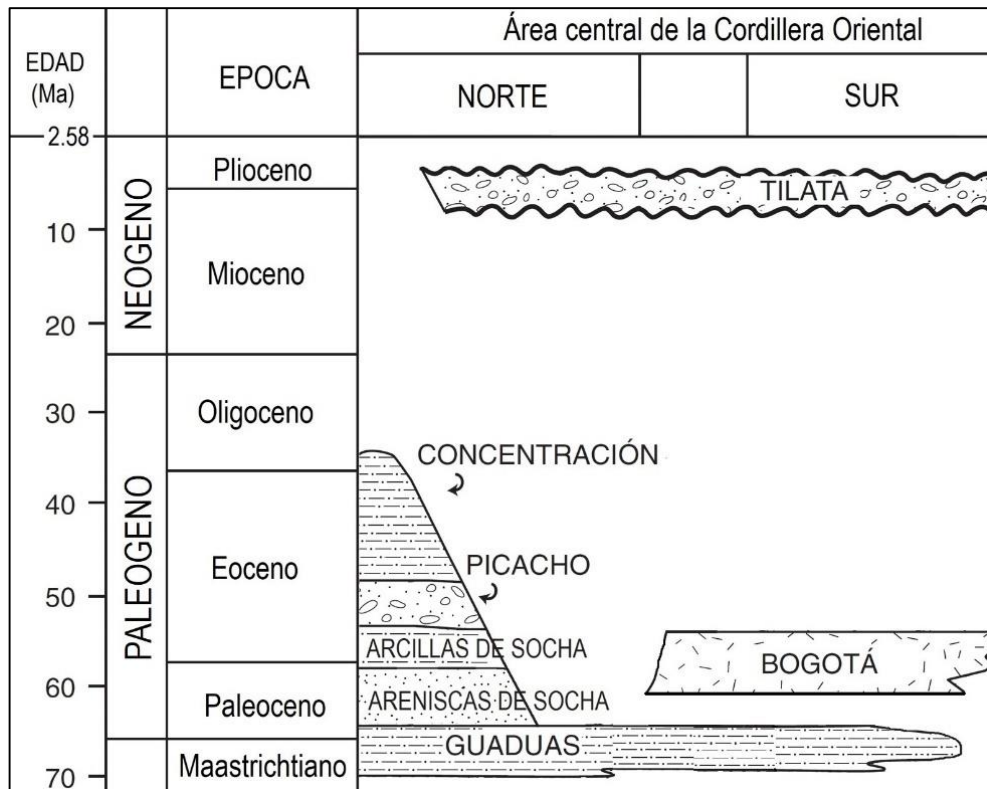


Figura 5. Columna estratigráfica generalizada del área central de la Cordillera Oriental. Modificado de Horton et al., (2010).

4.3.1. Formación Guaduas

La Formación Guaduas fue descrita inicialmente como una secuencia de arcillolitas intercaladas con limolitas y areniscas, luego, Hubach (1957) aplica este término para la Formación que en los alrededores de la Sabana de Bogotá contenía mantos de carbón (en Amaya et al., 2010). El contacto inferior es neto y concordante con la Formación Arenisca Labor – Tierna (Montoya & Reyes Torres, 2005) y en su parte superior se encuentra en contacto con dos formaciones Bogotá y Areniscas de Socha, localizadas en regiones diferentes (Ulloa et al., 1981).

Esta unidad se caracteriza por contener estratos sedimentarios de 250 a 392 metros de espesor que corresponden a intercalaciones de mantos de carbón (Ulloa, et al. 2001) dentro de arcillolitas laminadas a no laminadas de color gris con intercalaciones de cuarzoarenitas de edad Maastrichtiano – Paleoceno (Rodríguez & Solano, 2000). Por otro lado, Correa & Valbuena (2007) clasifica estas rocas composicionalmente como Cuarzoarenitas y Sublitoarenitas y texturalmente como areniscas.

La Formación Guaduas es dividida en tres segmentos: Segmento A) compuesto por lodolitas gris oscuras que meteorizan a rojo; Segmento B) Constituidos por arcillolitas gris verdosas con intercalaciones de arenitas de cuarzo y mantos de carbón, y Segmento C) caracterizado por la presencia de arcillolitas grises que meteorizan a rojo con intercalaciones de arenitas de cuarzo (Ulloa et al. 2001).

Basados en estudios estratigráficos, sedimentológicos y palinológicos, se reconocen ambientes transicionales de frente costero, estableciendo 4 sistemas deposicionales que van desde lagunas costeras hasta llanuras aluviales pasando por llanuras mareales, que reflejan una tendencia oscilatoria en la transición de ambientes transicionales a continentales, mostrando variaciones del nivel del mar en esa época (Amaya et al., 2010).

4.3.2. Formación Areniscas de Socha

También conocido como la Formación Socha Inferior, esta unidad se compone de areniscas pardas de grano grueso a medio, de 120 a 170 metros de espesor (Rodríguez & Solano, 2000). Además, se caracteriza por ser una sucesión de 231.6 metros de arenitas de cuarzo color amarillo y blanco de grano medio, por sectores finos a muy finos y esporádicamente gruesos (Guerrero & Sarmiento, 1996). Yace sobre la Formación Guaduas en la región de Sogamoso y por debajo de la Formación Socha Superior (Ulloa et al., 1981).

Rodríguez & Solano (2000) le asignan una edad de Paleoceno superior a esta unidad. Clasificada texturalmente como areniscas y composicionalmente como Cuarzoarenitas, Sublitoarenitas, Litoarenitas Arcóscicas y Litoarenitas (Correa & Valbuena, 2007).

Esta unidad aflora en los alrededores de los municipios de Beteitivá y Tasco y presenta un contacto paraconforme con la Formación Guaduas y concordante – transicional con la Formación Arcillas de Socha o Socha Superior (C. Ulloa et al., 2003).

Según Fabre (1981 y 1983) el ambiente de depósito de esta unidad es de barras litorales y playas.

4.3.3. Formación Arcillas de Socha

También conocido como la Formación Socha Superior, esta unidad corresponde a lodolitas de color gris oscuro con espesor de 217 m y en la parte media intercalaciones de 0.5 a 1.5 metros de arenas líticas (Rodríguez & Solano, 2000); Ulloa et al., (1981), describe esta formación como arcillas grises, verduscas hasta violáceas con niveles de arenisca gris y lignitos. Por otro lado, Guerrero & Sarmiento, (1996) asocian esta unidad con una lodolita negra muy fisil y lodolitas grises con moteado rojizo y esfarulitas de siderita. Además, se le designa este nombre a la sucesión estratigráfica comprendida entre la Formación Areniscas de Socha y la Formación Picacho (Ulloa et al., 2003). El contacto de esta unidad es concordante y transicional en la base con la Formación Areniscas de Socha y corcondante y neto en la parte superior con la Formación Picacho (Ulloa et al., 2003).

Presenta una edad aproximada del Paleoceno medio al Eoceno y se asocia a un ambiente de llanuras de inundación (Rodríguez & Solano, 2000).

4.3.4. Formación Bogotá

La Formación Bogotá fue denominada por Hubach (1931 en Montoya & Reyes Torres, 2005) como la secuencia del Terciario Medio que esta constituida por tres conjuntos. El inferior, arenoso y arcilloso; el conjunto medio, arcillolitas abirragadas y el superior, conformado por bancos de areniscas de grano grueso. Además, se caracteriza por ser la sucesión sedimentaria que yace sobre la Formación Guaduas y está cubierta discordantemente por la Formación Tilatá (Ulloa et al., 1981).

Por otro lado, Julivert (1963 en Rodriguez & Solano, 2000), divide esta formación en dos miembros. El miembro inferior se encuentra asociado a una sucesión de areniscas feldespáticas a sublitoarenitas de grano medio a fino con colores gris verdoso a marrón y una serie de lodolitas y arcillolitas interestratificadas de color gris claro con motas gris claras y rojizas. El miembro superior consta de arcillolitas y limolitas abirragadas con esporádicas capas de cuarzoarenitas.

Esta unidad se asocia con edades del Paleoceno tardío al Eoceno Temprano, un espesor aproximado de 750 metros (Rodríguez & Solano, 2000) y registra la migración de canales meandriformes en ambientes de llanuras de inundación continental (Bayona et al., 2010).

4.3.5. Formación Picacho

El nombre de Formación Picacho fue dado por Alvarado & Sarmiento (1944) al conjunto de areniscas que descansan sobre la Formación Arcillas de Socha (en Ulloa et al., 2003). Esta unidad se divide en tres conjuntos: El primero, corresponde a arenitas cuarzofeldespáticas con lentes de conglomerados, el segundo como lodolitas rojizo-amarillentas y por último las arenitas cuarzofeldespáticas con características similares a las del primer conjunto.

Se clasifican texturalmente como areniscas y composicionalmente como Cuarzoarenitas Sublitoarenitas y Litoarenitas Arcósicas (Correa & Valbuena, 2007) y presenta contactos concordante y netos con las Formaciones Arcillas de Socha y la Formación Concentración (Ulloa et al., 2003)

El posible ambiente de formación de estas rocas fue fluvial de ríos trezados o llanuras bien drenadas (Rodríguez & Solano, 2000). De acuerdo con estudios palinológicos realizados por Vergara y Rodríguez (1997) a esta formación se le asigna una edad del paleoceno superior (en Ulloa et al. 2001).

4.3.6. Formación Concentración

Según Alvarado & Sarmiento (1944) la Formación Concentración es una sucesión de arcillolitas y areniscas de grano fino con estratos de hierro oolítico que descansa sobre la Formación Picacho (en Ulloa et al., 2003). Presenta un espesor entre los 1368 y 1554 metros (Ulloa et al. 2001).

Se clasifica texturalmente como areniscas y composicionalmente como Sublitoarenitas y Litoarenitas (Correa & Valbuena, 2007). Y su ambiente de acumulación corresponde a un ambiente litoral o de pantano marino durante el Eoceno medio y Oligoceno medio (Ulloa et al. 2001).

4.3.7. Formación Tiltatá

La Formación Tiltatá corresponden a arenas compactas, limos y abundantes arcillolitas de color grisáceo a pardusco, con un espesor aproximado de 260 metros (Álvarez, 1998).

Ulloa et al., (1981) describe esta unidad como el conjunto formado por capas de gravas, arcillas, arenas y esporádicos lignitos que yacen discordantemente sobre todas las formaciones comprendidas entre la Formación Bogotá y la Formación Une. Además, Lobo-Guerrero Uscátegui (1992), afirma que la composición de esta formación son gravas, gravillas, arenas, limos, arcillas, turbas y numerosos niveles de piroclastos finos, con un espesor variable entre 10 cm y 300 metros.

La edad que se le asigna a esta formación es del Mioceno al Plioceno y un ambiente de depositación que corresponde a lacustre y fluvial (Álvarez, 1998).

5. RESULTADOS: PETROGRAFIA

Se analizaron un total de 13 secciones delgadas pertenecientes a las secuencias del Cretácico Superior – Plioceno, en el área del Macizo de Floresta (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Se realizó un conteo de 300 puntos siguiendo la metodología Gazzi – Dickinson (Ingersoll et al., 1984) donde se identificó el contenido de cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qp), chert (Qc), feldespato potásico (K), plagioclasa (Plag), líticos volcánicos (Lv), líticos sedimentarios (Ls) y líticos metamórficos (Lm). Así, como la clasificación de los tipos de cuarzo presentes en las formaciones.

5.1. Formación Guaduas

Para el análisis de esta formación se utilizaron tres muestras representativas (09-DC-01, 09-DC-12A y 09-DC-12B) (Figs.1-2 y Tabla 1).

En general el tamaño de grano varía de fino a grueso (0,1 a 1 mm), de forma subangular, con baja esfericidad. Las areniscas son principalmente granosportadas (82% granos), presentan una selección buena y los contactos entre partículas son suturados (80%) y puntuales (20%) (Figura 6).

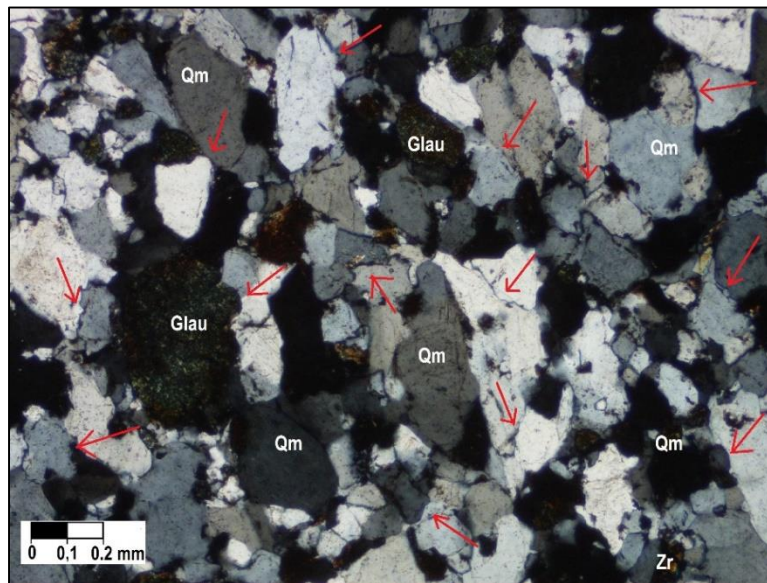


Figura 6. Muestra 09-DC-12A (4X, NX), correspondiente a la Fm. Guaduas. Contactos suturados y puntuales (indicados por las flechas) en cuarzo monocristalino (Qm) y glauconita (Glau).

Dentro de los cuarzoes, la variedad más abundante es el monocristalino (99%) (Figura 7) y menor cantidad el policristalino difuso (1%). De acuerdo con los tipos de cuarzo, se evidencia

predominancia de granos con extinción ondulatoria, seguidos con extinción recta y en menor cantidad variedad policristalina de más de tres granos (Tabla 5).

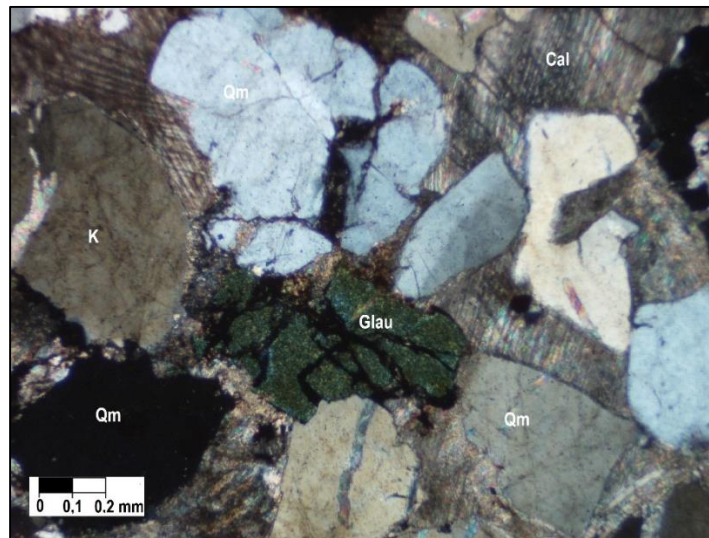


Figura 7. Muestra 09-DC-12B (4X, NX), correspondiente a la Fm. Guaduas. Variedad de cuarzo monocristalino (Qm), calcita (Cal), glauconita (Glau) y feldespato pótasio (K).

Tabla 5. Conteo modal normalizado para los tipos de cuarzo presentes en la Formación Guaduas.

<i>Muestra</i>	<i>Tipos de cuarzo (%)</i>			
	<i>Qp 2 - 3</i>	<i>Qp +3</i>	<i>Qm (recto)</i>	<i>Qm (Ondulatoria)</i>
09-DC-01	0	0	63	37
09-DC-12A	0	1	18	81
09-DC-12B	0	0	19	81

En términos composicionales el componente más abundante es el cuarzo, seguido por feldespato potásico y fragmentos líticos (Tabla 6).

Tabla 6. Conteo modal normalizado del armazón de las muestras de la Formación Guaduas. Clasificación composicional basada en Folk, (1974).

<i>Muestra</i>	<i>Armazón (%)</i>			<i>Clasificación composicional</i>
	<i>Qt</i>	<i>F</i>	<i>Lt</i>	
09-DC-01	86	7	7	Sublitoarenita
09-DC-12A	85	11	4	Subarcosa
09-DC-12B	88	12	0	Subarcosa

El feldespato presente en la formación es la ortoclasa, con poca alteración (Figura 7). Aunque la cantidad general de líticos en la formación es baja, se componen en su mayoría de líticos metamórficos esquistosos, seguidos de líticos sedimentarios, compuestos de Chert (Figura 8).

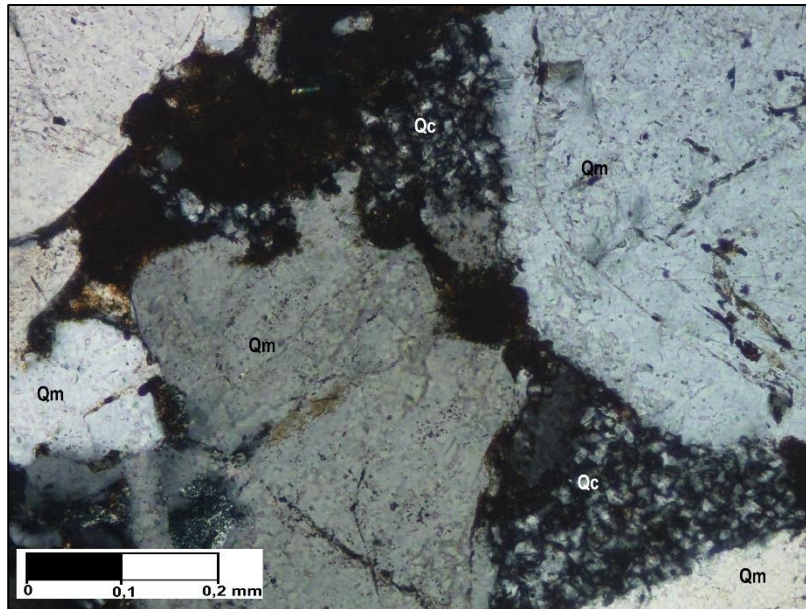


Figura 8. Muestra 09-DC-12A (10X, NX), correspondiente a la Fm. Guaduas. Cuarzo monocristalino (Qm) y lítico sedimentario, asociado a cuarzo chert (Qc).

Los granos dentro de la muestra presentan fracturas rellenas por material calcáreo (Figura 9).

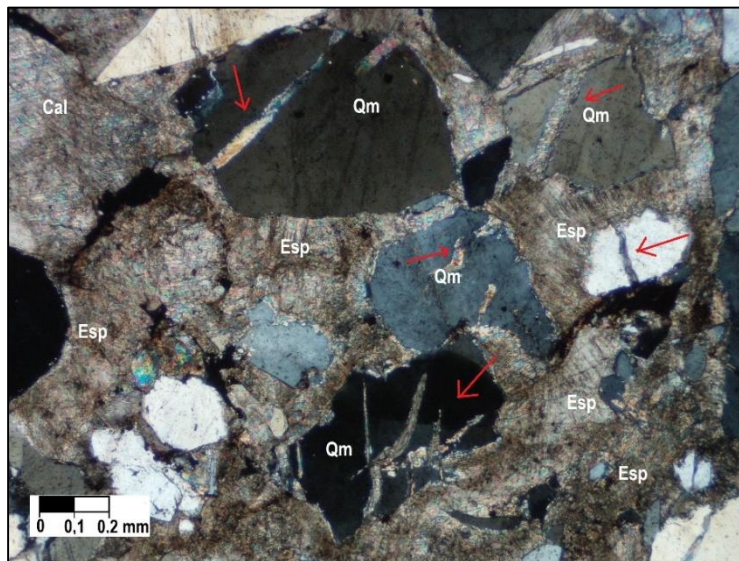


Figura 9. Muestra 09-DC-12B (4X, NX), correspondiente a la Fm. Guaduas. Granos con fracturas rellenas de material calcáreo (Indicado con las flechas). Cuarzo monocristalino (Qm), esparita (Esp) y calcita (Cal).

Las muestras tienen variaciones en la composición en términos del contenido de matriz y cemento. La muestra 09-DC-01 se clasifica como una lodolita con alto porcentaje de matriz (60%), mientras que para las otras dos muestras el porcentaje de matriz es del 6%, compuesta de pequeños

cristales de cuarzo (>0,1mm); y cemento sintaxial con un porcentaje alto ($\approx 12\%$), compuesto de carbonatos, específicamente esparita.

Los minerales accesorios más representativos son glauconita, circón, epidota, anfíbol, opacos y moscovita, además, presencia de materia orgánica (Figura 10). El porcentaje de glauconita en la formación es aproximadamente del 10%, mientras que el resto de los minerales accesorios es del 2%. De acuerdo con Folk (1974) la muestra se clasifica como sublitoarcosa y sublitoarenita (Figura 11).

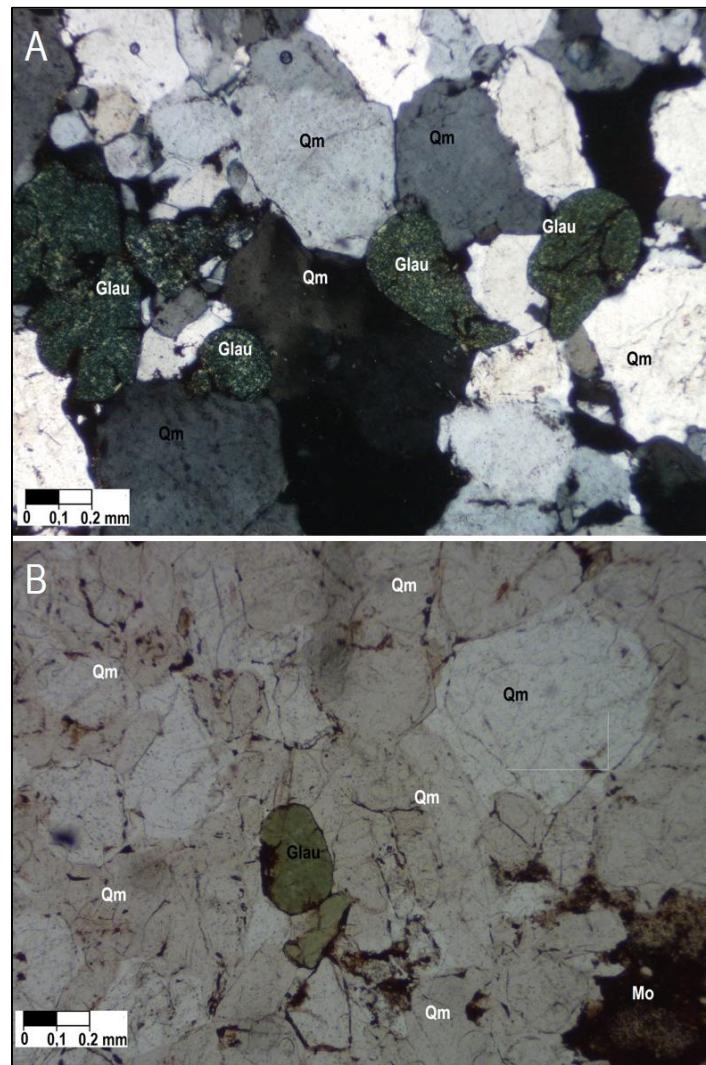


Figura 10. Muestra 09-DC-12A (A-4X, NX; B-4X, NP) correspondiente a la Fm. Guaduas. Glauconita presente como mineral accesorio. Cuarzo monocristalino (Qm), glauconita (Glau) y materia orgánica (Mo).

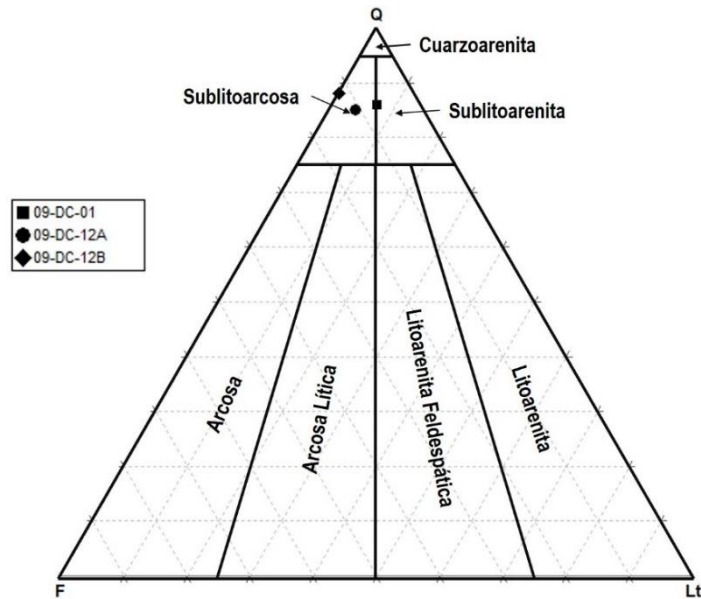


Figura 11. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Guaduas basada en Folk, (1974).

5.2. Formación Areniscas de Socha

Para el análisis de esta formación se analizaron las muestras 09-DC-10 y 09-DC-11 (Fig.1 y Tabla 1). En términos generales se presenta una variación en el tamaño de grano de fino a grueso (0,1 a 0,3 mm), con un tamaño promedio de 0,2 mm, de forma subangular a subredondeada, con baja esfericidad. Granosoportada (94%), buena selección y los contactos entre partículas son suturados (52%), puntuales (41%) y cóncavo – convexo (7%) (Figura 12).

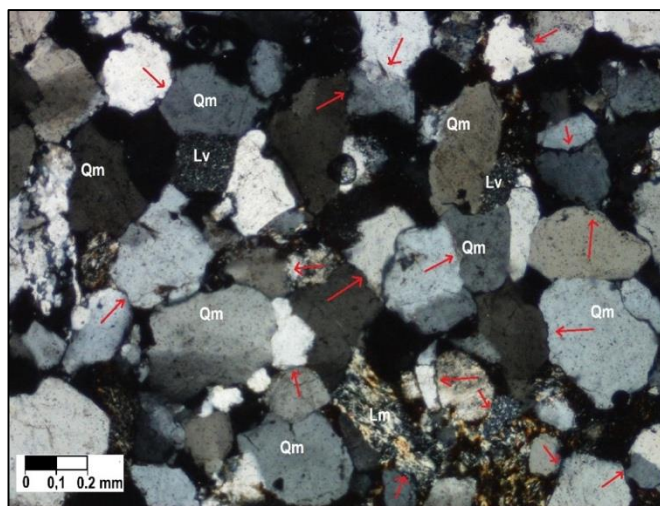


Figura 12. Muestra 09-DC-10 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Areniscas de Socha. Contactos suturados, puntuales y cóncavo - convexo (indicados por las flechas) en cuarzo monocristalino (Qm), lítico volcánico (Lv) y lítico metamórfico (Lm).

Dentro de los cuarzos la variedad más abundante es el monocristalino (81%), seguido por el policristalino difuso (19%) (Figura 13). De acuerdo con los tipos de cuarzo, se evidencia predominancia de granos con extinción ondulatoria, seguidos por extinción recta y en menor cantidad variedad policristalina (más de tres granos) (Tabla 7).

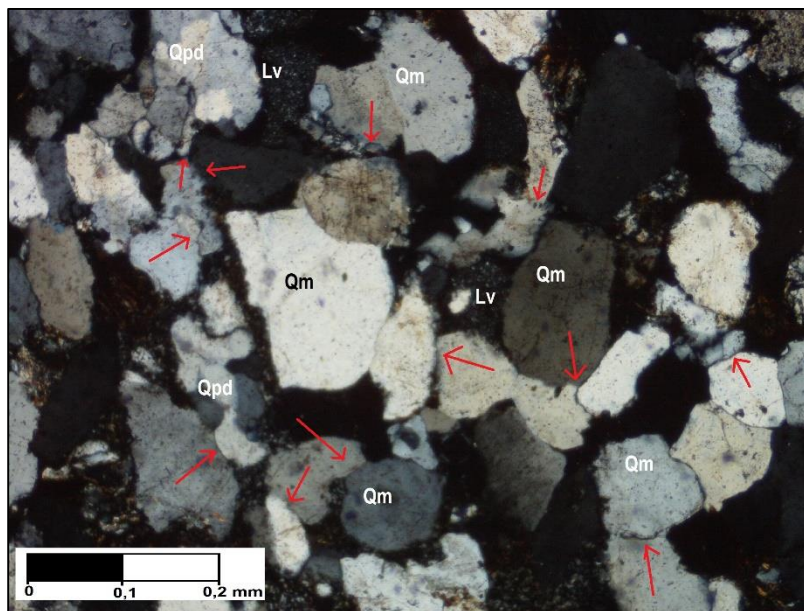


Figura 13. Muestra 09-DC-10 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Areniscas de Socha. Variedades de cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino difuso (Qpd) y presencia de líticos volcánicos (Lv).

Tabla 7. Conteo modal normalizado para los tipos de cuarzo presentes en la Formación Areniscas de Socha.

Muestra	Tipos de cuarzo (%)			
	Qp 2 - 3	Qp +3	Qm (recto)	Qm (Ondulatoria)
09-DC-10	0	14	19	67
09-DC-11	0	17	28	55

En términos composicionales el componente más abundante es el cuarzo, seguido por fragmentos líticos y, por último, feldespato potásico (Tabla 8).

Tabla 8. Conteo modal normalizado del armazón de las muestras de la Formación Areniscas de Socha. Clasificación composicional basada en Folk, (1974).

Muestra	Armazón (%)			Clasificación composicional
	Qt	F	Lt	
09-DC-10	81	3	16	Sublitoarenita
09-DC-11	53	5	42	Litoarenita

El feldespato se encuentra moderadamente fresco y corresponde a ortoclasa. Los fragmentos líticos se componen en su mayoría de líticos volcánicos criptocristalinos (basaltos). Los líticos

metamórficos aparecen en segundo orden y se componen de esquistos micaceos y cuarzo-micaceos y, por último, se presentan líticos sedimentarios compuestos de chert y areniscas (Figura 14).

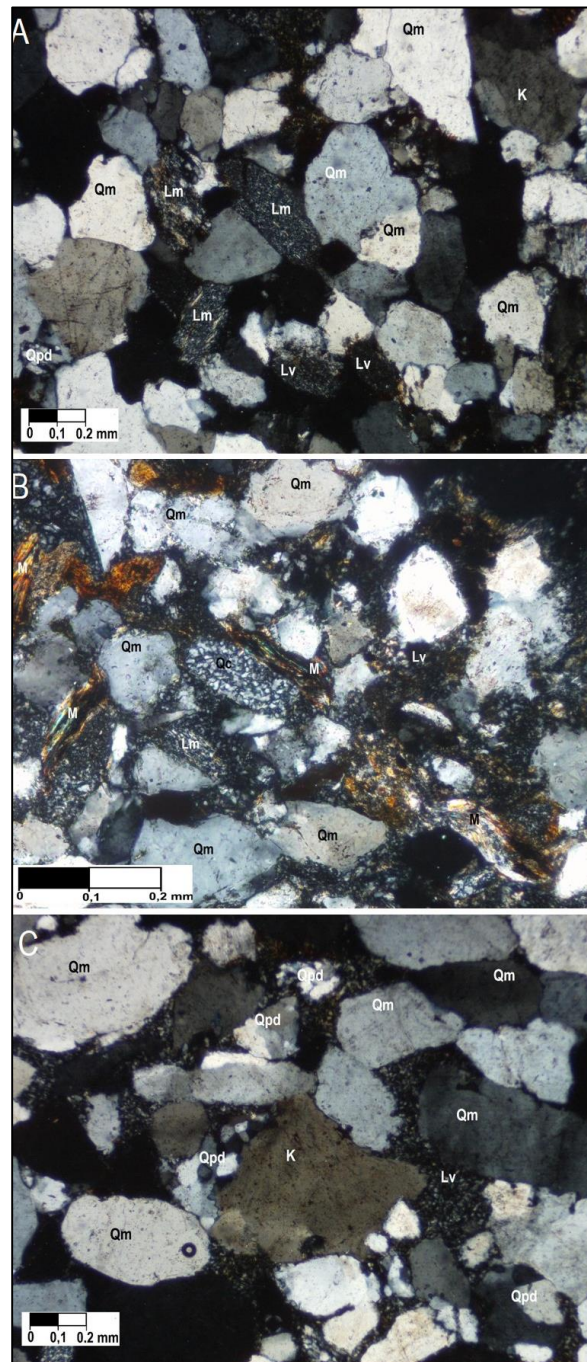


Figura 14. A: Muestra 09-DC-10 (4X, NX). B: Muestra 09-DC-11 (10X, NX); C: 09-DC-10 (4X, NX), correspondientes a la Fm. Areniscas de Socha. Fragmentos de cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qpd), lítico volcánico (Lv), lítico metamórfico (Lm), feldespato pótasio (K), moscovita (M) y cuarzo chert (Qc).

El porcentaje de matriz es bajo aproximadamente del 4%, compuesto de pequeños fragmentos de cuarzo y cemento sintaxial (2%) compuesto de arcillas y óxidos de hierro. Los minerales accesorios más representativos son opacos, epidota y moscovita, estos minerales aparecen con un porcentaje aproximado del 10%. Además, la moscovita presente en la muestra se encuentra flexionada (Figura 15).

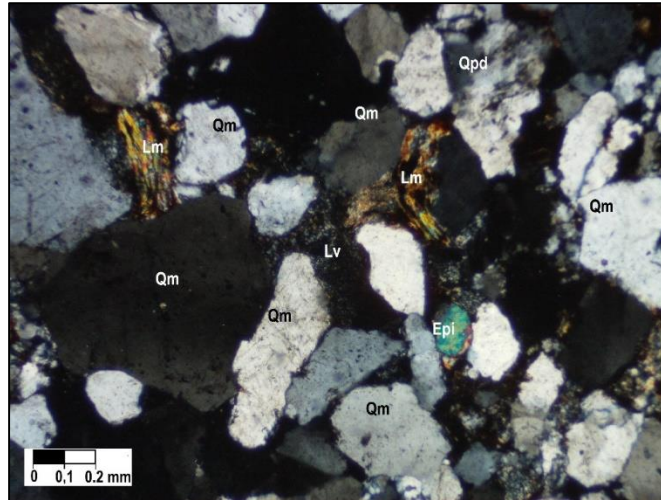


Figura 15. Muestra 09-DC-10 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Areniscas de Socha. Epidota (Epi) como mineral accesorio, además presencia de cuarzo monocristalino (Qm), lítico volcánico (Lv) y moscovita (M).

De acuerdo con Folk (1974) la muestra se clasifica como sublitoarenita y litoarenita (Figura 16).

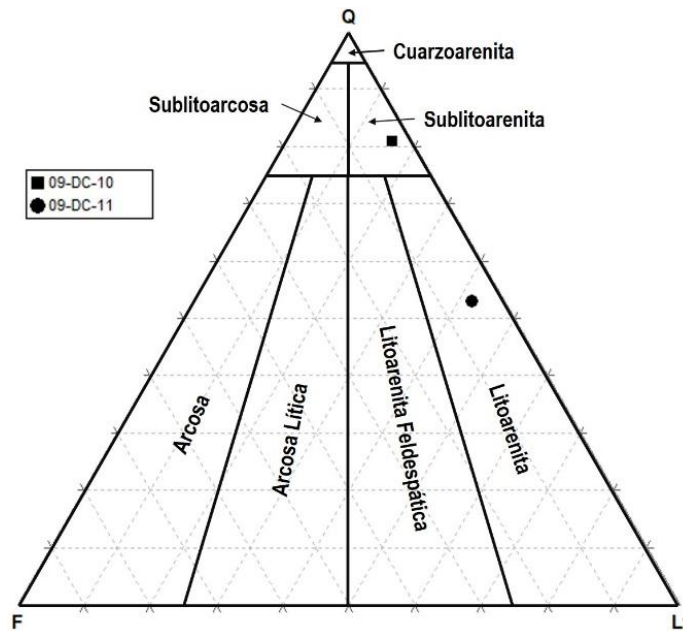


Figura 16. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Areniscas de Socha, basado en Folk, (1974).

5.3. Formación Arcillas de Socha

Para el análisis de esta formación se utilizó una muestra representativa (09-DC-05) (Fig.1 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El tamaño de grano es fino (0,1 mm), de forma subredondeada, con baja esfericidad. Además, matrizsoportada (52%), muy buena selección y los contactos entre granos son generalmente puntuales (41%), suturados (34%) y cóncavo - convexo (25%) (Figura 17).

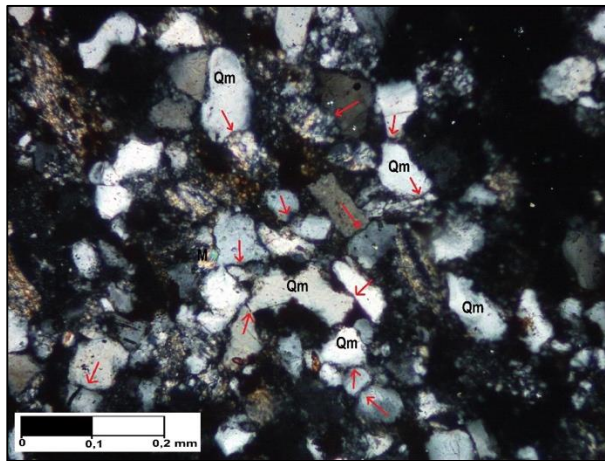


Figura 17. Muestra 09-DC-05 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Arcillas de Socha. Contactos suturados, puntuales y cóncavo - convexo (indicados por las flechas) en cuarzo monocristalino (Qm).

Dentro de los cuarzos la variedad más abundante es el monocristalino (80%), seguido por el policristalino difuso (20%) (Figura 18). De acuerdo con los tipos de cuarzo, se evidencia predominancia de granos con extinción ondulatoria, seguidos con extinción recta y en menor cantidad de variedad policristalina (más de tres granos) (Tabla 9).

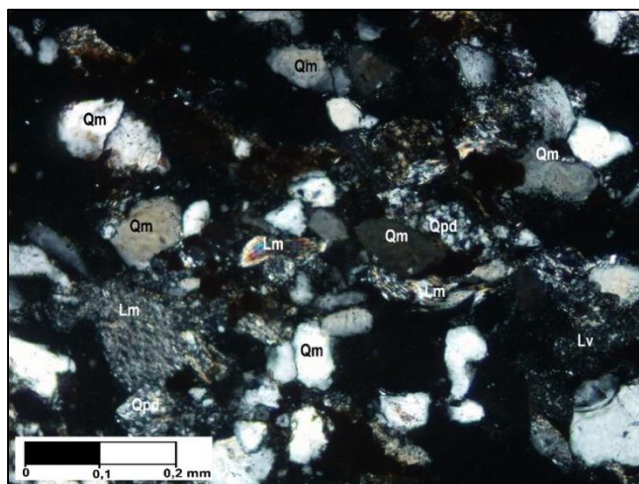


Figura 18. Muestra 09-DC-05 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Arcillas de Socha. Variedades de Cuarzo monocristalino (Qm), Cuarzo policristalino difuso (Qpd) y Lítico metamórfico (Lm).

Tabla 9. Conteo modal normalizado para los tipos de cuarzo presentes en la Formación Arcillas de Socha

<i>Muestra</i>	<i>Tipos de cuarzo (%)</i>			
	<i>Qp 2 - 3</i>	<i>Qp +3</i>	<i>Qm (recto)</i>	<i>Qm (Ondulatoria)</i>
09-DC-05	0	7	32	61

En términos composicionales el componente más abundante es el cuarzo (67%), seguido de fragmentos líticos (30%) metamórficos que se componen de esquistos micaceos y cuarzo micaceos, seguidos de volcánicos criptocristalino (Basaltos) y líticos sedimentarios, compuestos de chert y areniscas cuarzosas (Figura 19). El feldespato potásico presente en la muestra es la ortoclasa con un porcentaje del 3%. Los granos de cuarzo muestran procesos de compactación y rotación, que podría estar asociado con los procesos diagenéticos de la formación.

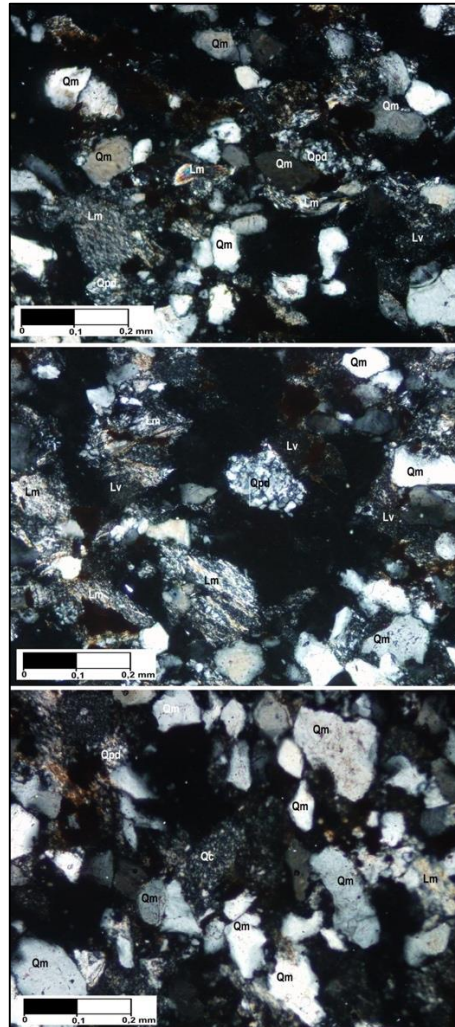


Figura 19. Muestra 09-DC-05 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Arcillas de Socha. Líticos metamórfico (esquisto micáceo y cuarzomíceo) y líticos sedimentarios. Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino (Qpd), cuarzo Chert (Qc), lítico metamórfico (Lm) y lítico volcánico (Lv).

La muestra presenta una matriz del 52% y cantidad moderada de cemento sintaxial (8%) compuesto de arcillas. Como minerales accesorios se encuentra la moscovita y materia orgánica en gran cantidad dentro de la muestra (Figura 20), estos minerales aparecen con un porcentaje aproximado del 4%. De acuerdo con Folk (1974) la muestra se clasifica como litoarenita (Figura 21).

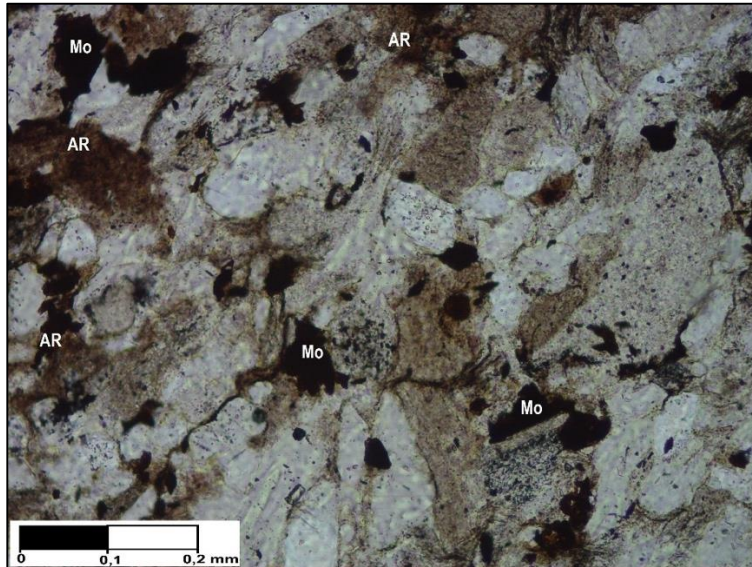


Figura 20. Muestra 09-DC-05 (10X, NP), correspondiente a la Fm. Arcillas de Socha. Arcillas como cemento y Materia Orgánica presente en la Formación Arcillas de Socha. Arcillas (AR) y Materia Orgánica (Mo).

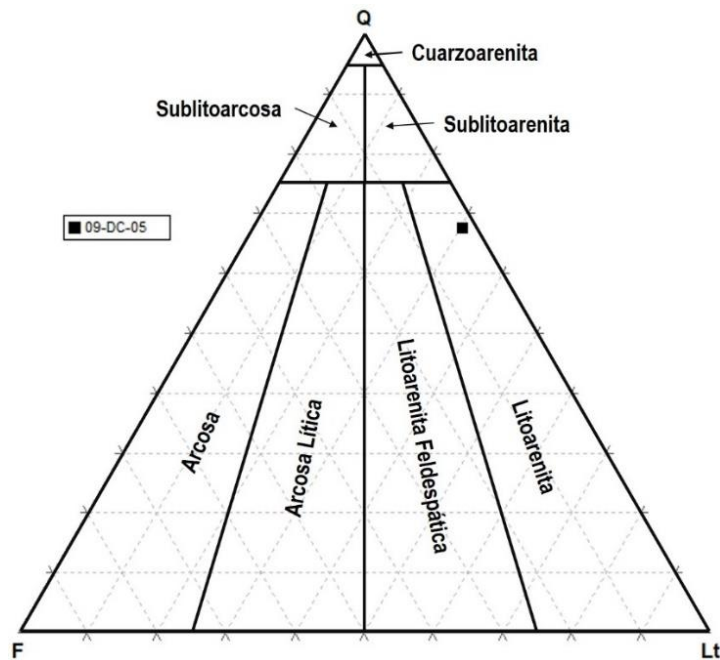


Figura 21. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Arcillas de Socha, basado en Folk, (1974).

5.4. Formación Bogotá

Para el análisis de esta formación se utilizó una muestra representativa (09-DC-02) (Fig. 2 y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). El tamaño de grano es fino (0,1 mm), de forma subangular a subredondeada, con baja esfericidad. Además, granosoportada (96%), buena selección

y los contactos entre granos son generalmente cóncavo – convexo (92%) y puntuales (8%) (Figura 22).

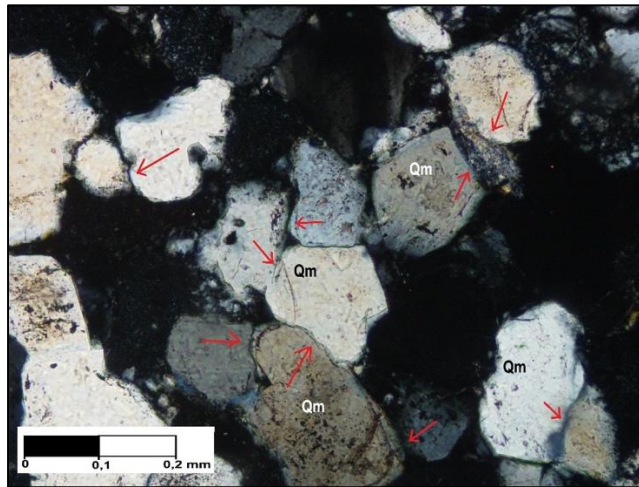


Figura 22. Muestra 09-DC-02 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Bogotá. Contactos cóncavo - convexo y puntuales (indicados por las flechas). Cuarzo monocristalino (Qm).

Dentro de los cuarzos la variedad más abundante es el monocristalino (82%), seguido por el policristalino difuso (18%) (Figura 23). De acuerdo con los tipos de cuarzo, se evidencia predominancia de granos con extinción recta, seguidos de variedad policristalina de más de tres granos, en menor cantidad con extinción ondulatoria y presencia de variedad policristalina de 2 a 3 granos (Tabla 10).

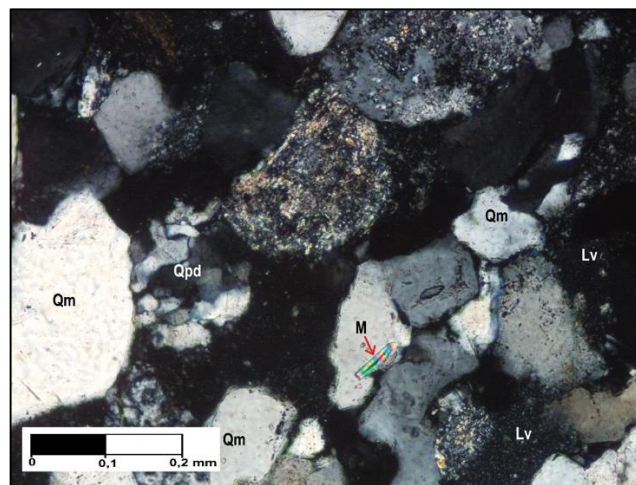


Figura 23. Muestra 09-DC-02 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Bogotá. Variedades de cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino difuso (Qpd), lítico volcánico (Lv) y moscovita (M).

Tabla 10. Conteo modal normalizado para los tipos de cuarzo presentes en la Formación Bogotá.

<i>Muestra</i>	<i>Tipos de cuarzo (%)</i>			
	<i>Qp 2 - 3</i>	<i>Qp +3</i>	<i>Qm (recto)</i>	<i>Qm (Ondulatoria)</i>
09-DC-02	1	26	63	10

En términos composicionales el componente más abundante es el cuarzo (74%), seguido de fragmentos líticos (25%) compuestos principalmente volcánicos criptocristalinos (Basaltos), seguidos por metamórficos que se componen de esquistos micáceos y cuarzos micáceos. Por último, líticos sedimentarios, compuestos de chert y ortoclasa (1%), como feldespato potásico (Figura 24).

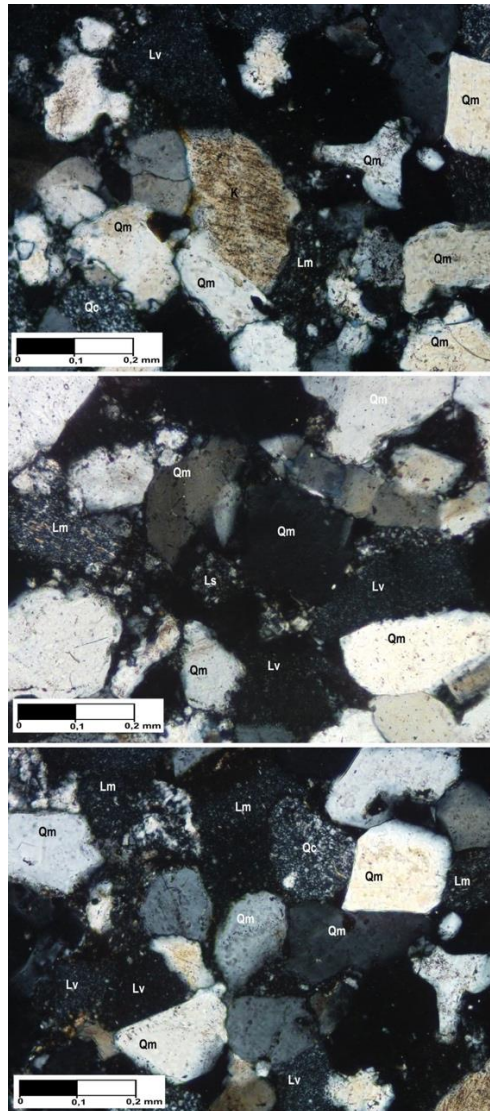


Figura 24. Muestra 09-DC-02 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Bogotá. Cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo chert (Qc), lítico metamórfico (Lm), lítico sedimentario (Ls) y lítico volcánico (Lv).

La muestra presenta muy poca matriz (1%) y cemento con porcentaje bajo (3%) compuestos de óxidos de hierro. Dentro de los minerales accesorios más representativos se encuentran epidota (Figura 25), moscovita, vidrio volcánico y opacos, estos minerales aparecen con un porcentaje aproximado del 5%. De acuerdo con Folk (1974) la muestra se clasifica como litoarenita (Figura 26).

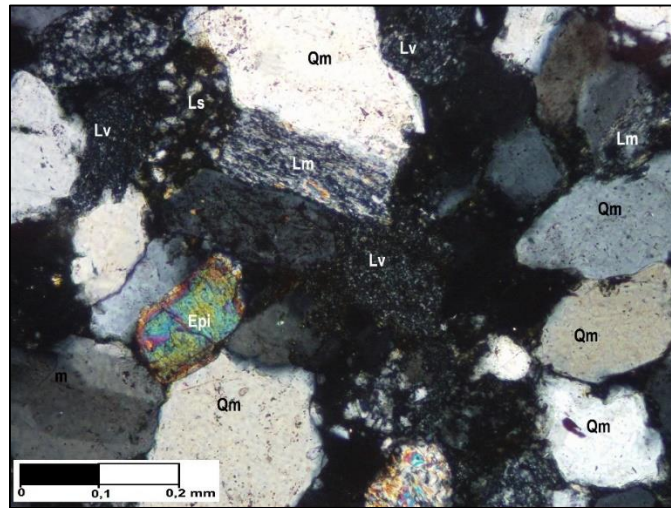


Figura 25. Muestra 09-DC-02 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Bogotá. Epidota presente como mineral accesorio de la Formación Bogotá. Cuarzo monocristalino (Qm), epidota (Epi), lítico volcánico (Lv), lítico metamórfico (Lm) y lítico sedimentarios (Ls).

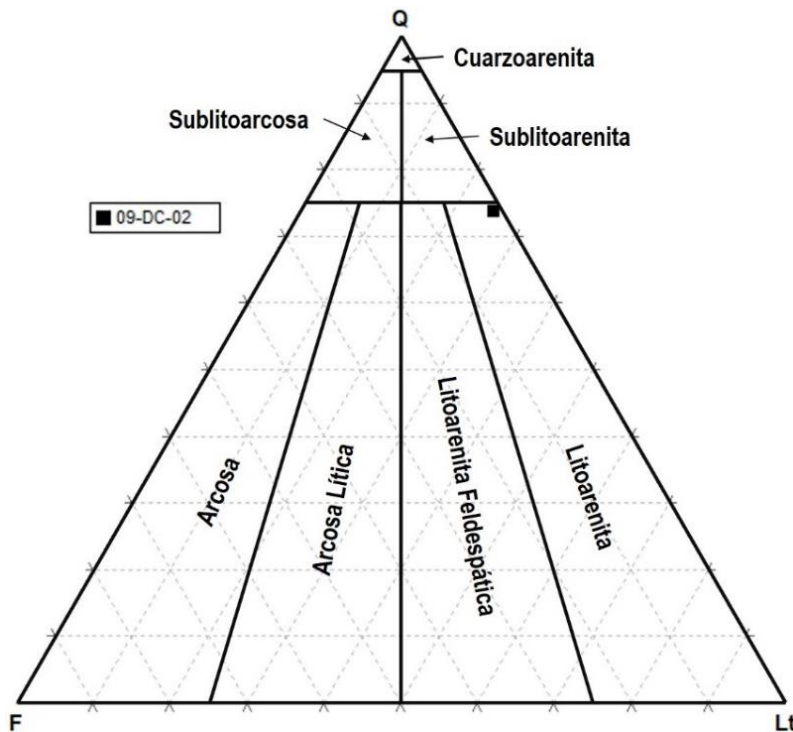


Figura 26. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Bogotá, basado en Folk, (1974).

5.5. Formación Picacho

Para el análisis de esta formación se utilizaron tres muestras representativas (09-DC-09, 09-DC-07 y 09-DC-04) (Fig. 1 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Generalmente el tamaño de grano varía de fino a medio (0,1 a 0,3 mm) con tamaños promedio de 0,2 mm, de forma subangular, con baja esfericidad. Granos portados (92%), buena selección y los contactos entre partículas son cóncavos – convexos (44%), puntuales (36%) y suturados (20%) (Figura 27).

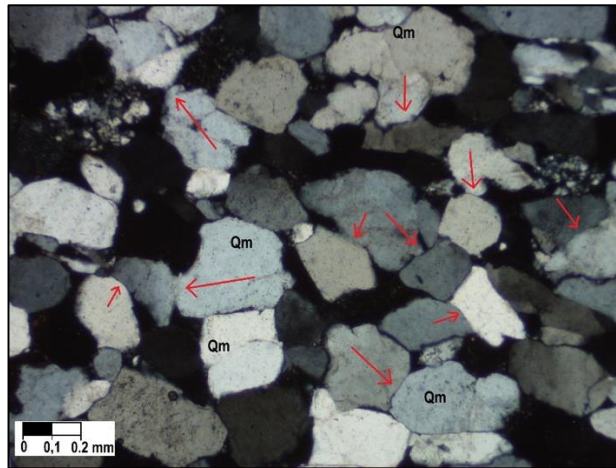


Figura 27. Muestra 09-DC-09 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Picacho. Contactos suturados y puntuales (indicados por las flechas) en cuarzo monocristalino (Qm).

Dentro de los cuarzos la variedad más abundante es el monocristalino (92%), seguido por el policristalino difuso (8%) (Figura 28). De acuerdo con los tipos de cuarzo, se evidencia predominancia de granos con extinción ondulatoria, seguidos con extinción recta y en menor cantidad de variedad policristalina de más de tres granos (Tabla 11).

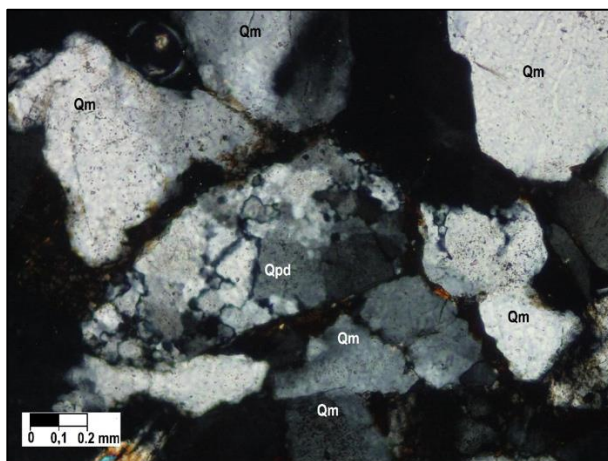


Figura 28. Muestra 09-DC-07 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Picacho. Variedades de cuarzo monocristalino (Qm) y cuarzo policristalino difuso (Qpd).

Tabla 11. Conteo modal normalizado para los tipos de cuarzo presentes en la Formación Picacho.

Muestra	Tipos de cuarzo (%)			
	Qp 2 - 3	Qp +3	Qm (recto)	Qm (Ondulatoria)
09-DC-04	0	9	21	71
09-DC-07	0	6	15	79
09-DC-09	0	7	16	77

En términos composicionales el componente más abundante es el cuarzo, seguido por fragmentos líticos y feldespato potásico (Tabla 12).

Tabla 12. Conteo modal normalizado del armazón de las muestras de la Formación Picacho. Clasificación composicional basada en (Folk, 1974).

Muestra	Armazón (%)			Clasificación composicional
	Qt	F	Lt	
09-DC-04	87	3	10	Sublitoarenita
09-DC-07	92	3	6	Sublitoarenita
09-DC-09	84	7	10	Sublitoarenita

El feldespato presente en la formación es la ortoclasa. Los fragmentos líticos se componen en su mayoría de líticos volcánicos criptocristalinos (Basaltos) (Figura 29). Los líticos metamórficos aparecen en segundo orden y se componen de esquistos micaceos, esquistos grafitosos y cuarzo-micaceos y, por último, se presentan líticos sedimentarios compuestos de chert y areniscas cuarzosas (Figura 30).

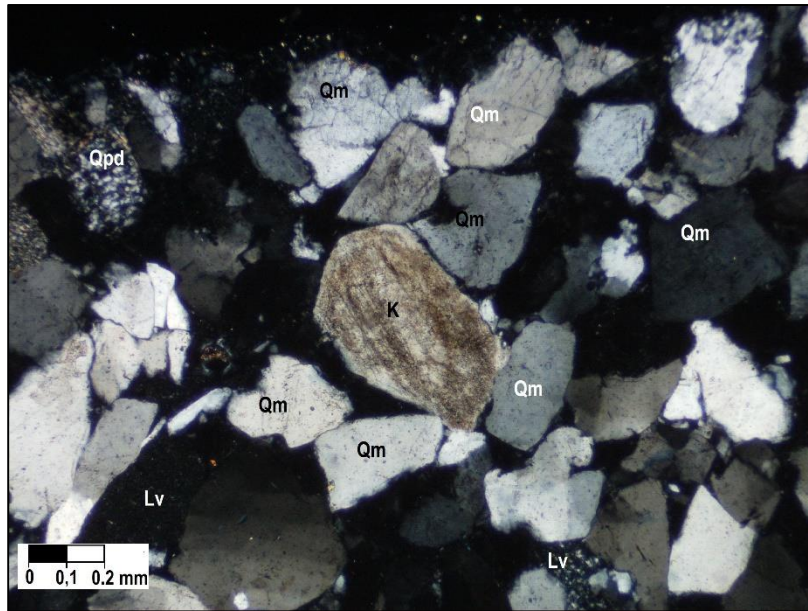


Figura 29. Muestra 09-DC-04 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Picacho. Granos de Feldespato pótasio (K), cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino difuso (Qpd) y líticos volcánicos criptocristalino (Lv).

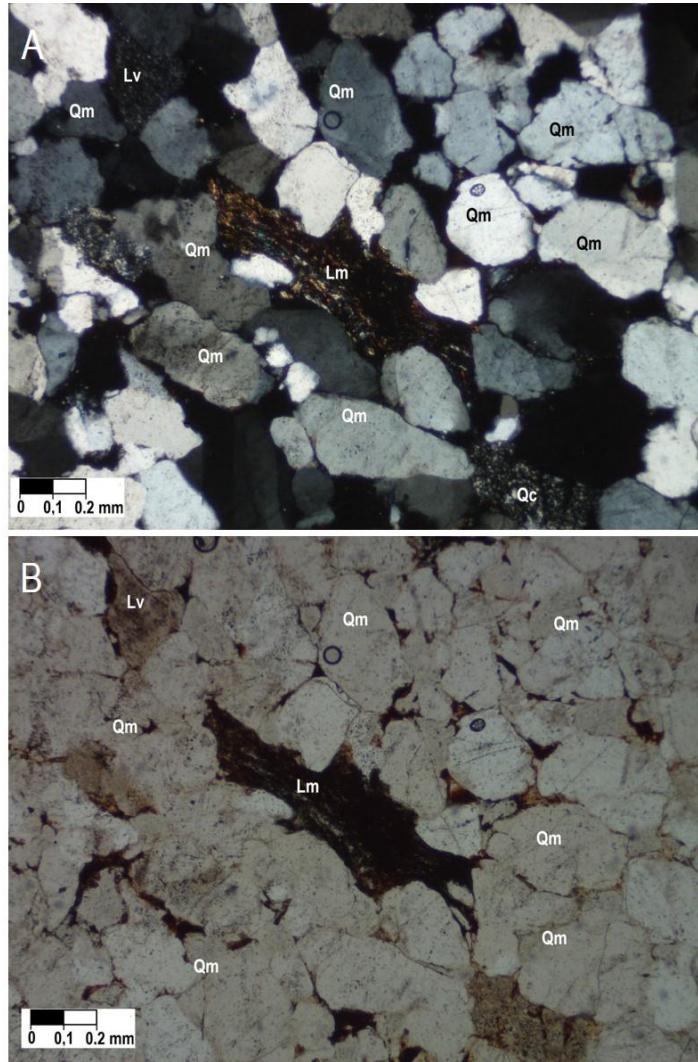


Figura 30. Muestra 09-DC-07 (4X, A: NX; B: NP), correspondiente a la Fm. Picacho. Líticos metamórfico (esquisto grafitoso), cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo chert (Qc), lítico metamórfico (Lm) y lítico volcánico (Lv).

El porcentaje de matriz es bajo (3%) compuestos de pequeños cristales de cuarzo y cemento sintaxial con un porcentaje del 5%, compuesta principalmente de óxidos de hierro. Los minerales accesorios más representativos son circón, moscovita (flexionada) (Figura 31), epidota, y biotita; estos minerales aparecen con un porcentaje aproximado del 7%. Además, presencia de materia orgánica y arcillas, que se comportan como cemento sintaxial adicional en la muestra 09-DC-09. De acuerdo con Folk (1974) la muestra se clasifica como sublitoarenita (Figura 32).

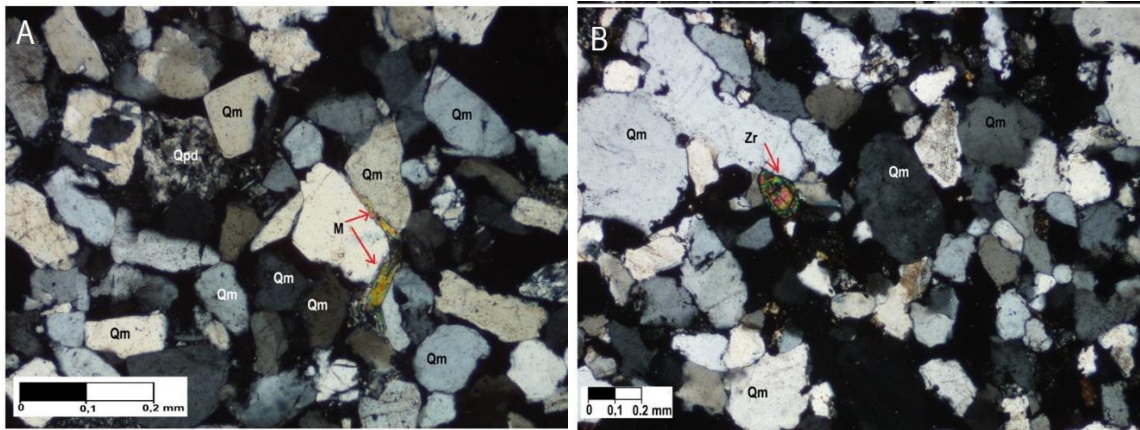


Figura 31. A: Muestra 09-DC-04 (10X, NX); B: Muestra 09-DC-09 (4X, NX), correspondientes a la Fm. Picacho. Circón y moscovita presente como mineral accesorio de la Formación Picacho. Cuarzo monocristalino (Qm), moscovita (M), circón (Zr) y cuarzo policristalino (Qpd).

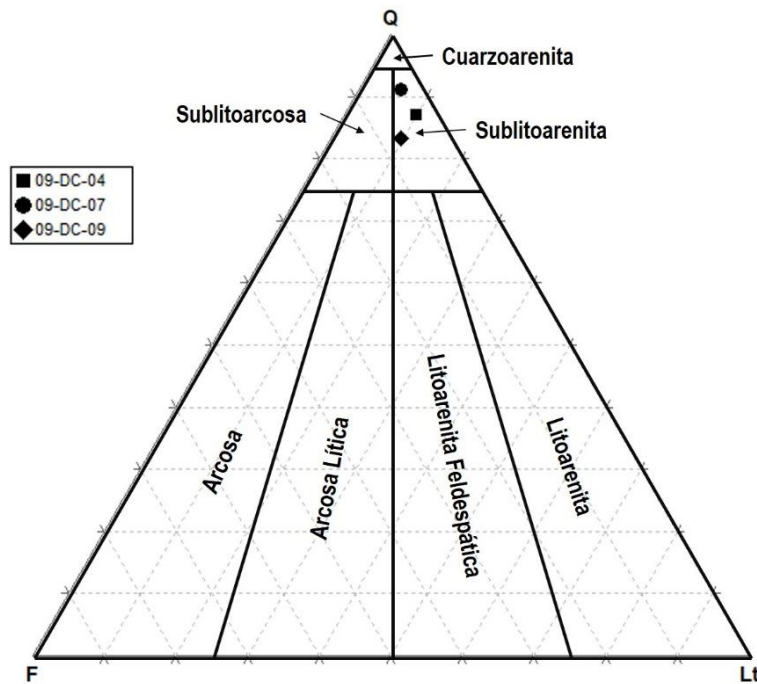


Figura 32. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Picacho, basado en Folk, (1974).

5.6. Formación Concentración

Para el análisis de esta formación se utilizaron dos muestras representativas (09-DC-08 y 09-DC-06) (Fig.1. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). Generalmente el tamaño de grano varía de fino a grueso (0,1 a 1 mm), con tamaño promedio de 0,2 mm, de forma subangular, con baja esfericidad. Las muestras son granosportadas (84%), presenta una selección buena a moderada y los contactos entre partículas son suturados (68%) y cóncavos – convexos (32%) (Figura 33).

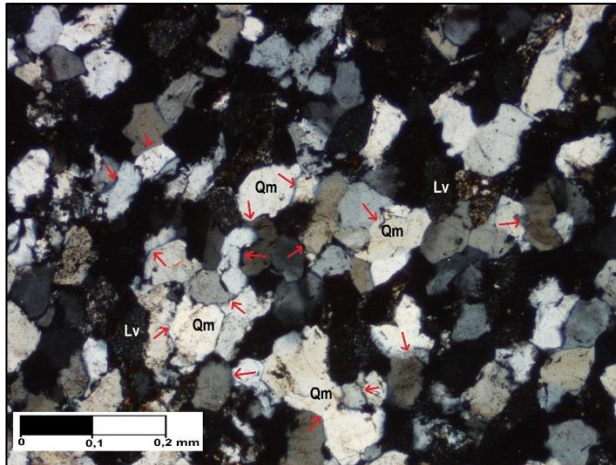


Figura 33. Muestra 09-DC-08 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Concentración. Contactos suturados y puntuales (indicados por las flechas) en cuarzo monocristalino (Qm) y líticos volcánicos (Lv).

Dentro de los cuarzos la variedad más abundante es el monocristalino (85%), seguido por el policristalino difuso (15%) (Figura 34). De acuerdo con los tipos de cuarzo, se evidencia predominancia de granos con extinción ondulatoria, seguidos de variedad policristalina de más de tres granos, en menor cantidad con extinción recta y presencia de variedad policristalina de 2 a 3 granos (Tabla 13).

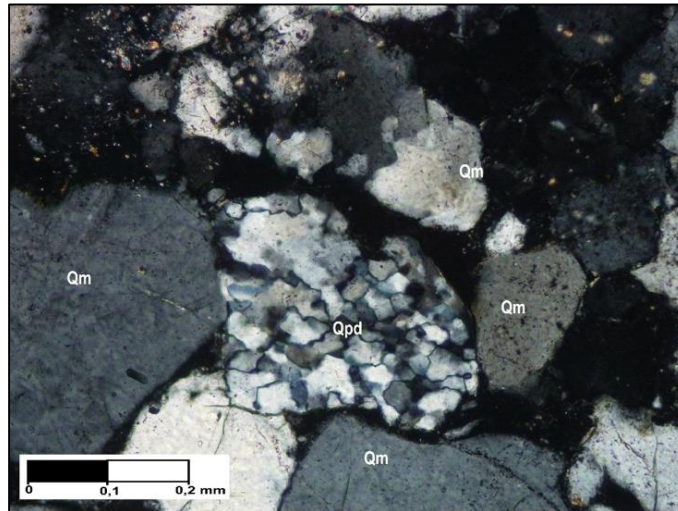


Figura 34. Muestra 09-DC-06 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Concentración. Variedades de cuarzo monocristalino (Qm) y cuarzo policristalino difuso (Qpd).

Tabla 13. Cuento modal normalizado de los tipos de cuarzo presentes en la Formación Concentración.

Muestra	Tipos de cuarzo (%)			
	Qp 2 - 3	Qp +3	Qm (recto)	Qm (Ondulatoria)

09-DC-06	3	9	8	80
09-DC-08	1	13	5	81

En términos composicionales el componente más abundante es el cuarzo, seguido por fragmentos líticos y feldespato potásico (Tabla 14).

Tabla 14. Conteo modal normalizado del armazón de las muestras de la Formación Concentración. Clasificación composicional basada en Folk, (1974).

<i>Muestra</i>	<i>Armazón (%)</i>			<i>Clasificación composicional</i>
	<i>Qt</i>	<i>F</i>	<i>Lt</i>	
09-DC-06	86	7	7	Sublitoarenita
09-DC-08	71	8	21	Litoarenita Feldespática

El feldespato presente en la formación es la ortoclasa (Figura 35). Los fragmentos líticos se componen en su mayoría de líticos volcánicos criptocristalinos (Basaltos). Los líticos metamórficos aparecen en segundo orden y se componen de esquistos micaceos y cuarzo-micaceos y, por último, se presentan líticos sedimentarios compuestos de chert, principalmente (Figura 36).

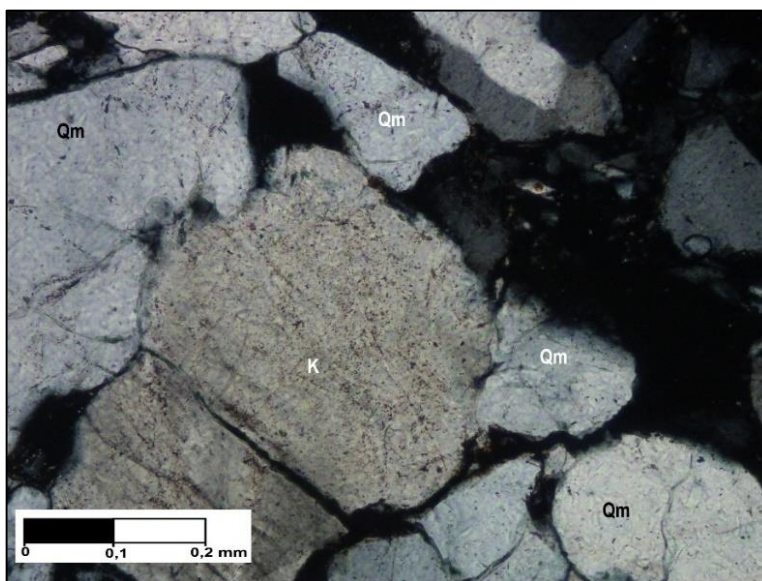


Figura 35. Muestra 09-DC-06 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Concentración. Feldespato potásico (K) en la muestra, corresponde a un grano de ortoclasa.

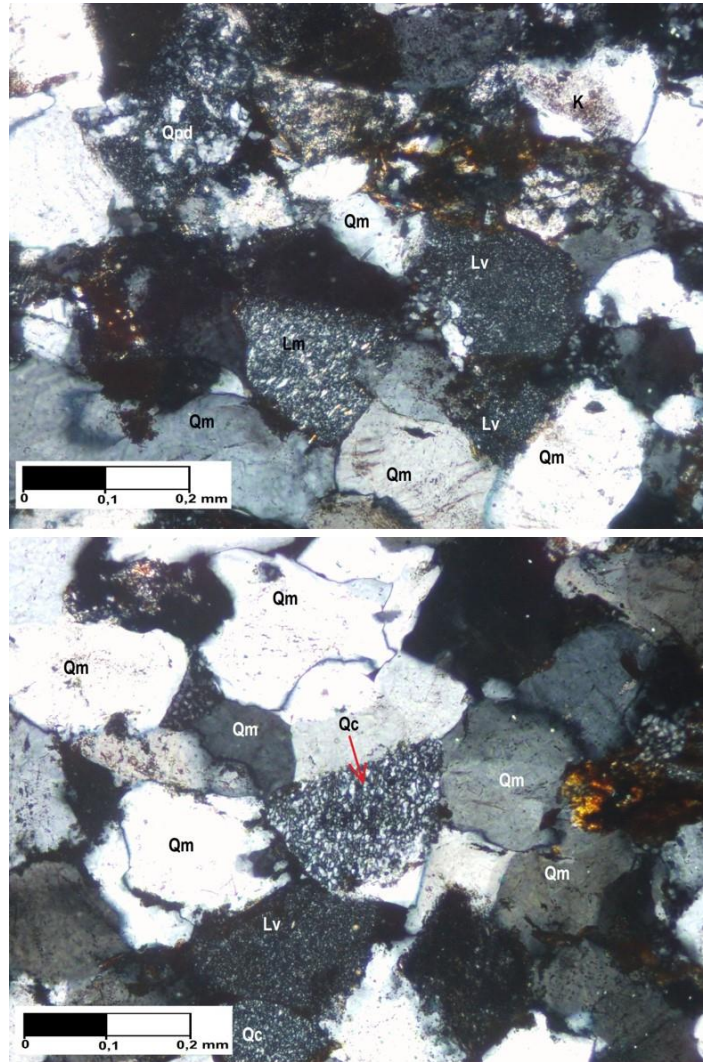


Figura 36. Muestra 09-DC-08 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Concentración. Líticos metamórfico (esquisto cuarzomicáceo) y líticos sedimentarios, cuarzo Chert (Qc), cuarzo monocristalino (Qm), y lítico volcánico (Lv).

El porcentaje de matriz es del 8% y cemento sintaxial compuesto de óxidos de hierro y arcillas se presenta en un porcentaje aproximado del 8%. Los minerales accesorios más representativos son circón, moscovita (flexionada) (Figura 37) y epidota, estos minerales aparecen con un porcentaje aproximado del 6%. De acuerdo con Folk (1974) la muestra se clasifica como sublitoarenita y litoarenita feldespática (Figura 38).

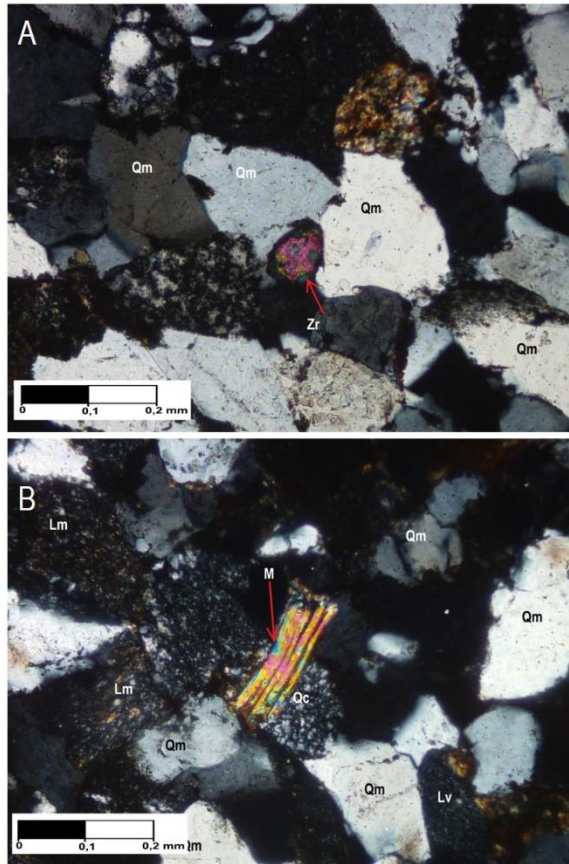


Figura 37. A: Muestra 09-DC-08 (10X, NX) B: Muestra 09-DC-06 (10X, NX), correspondientes a la Fm. Concentración. circón (Zr) y moscovita (M) presentes como mineral accesorio de la Formación Concentración. Cuarzo monocristalino (Qm), lítico metamórfico (Lm) y lítico volcánico (Lv).

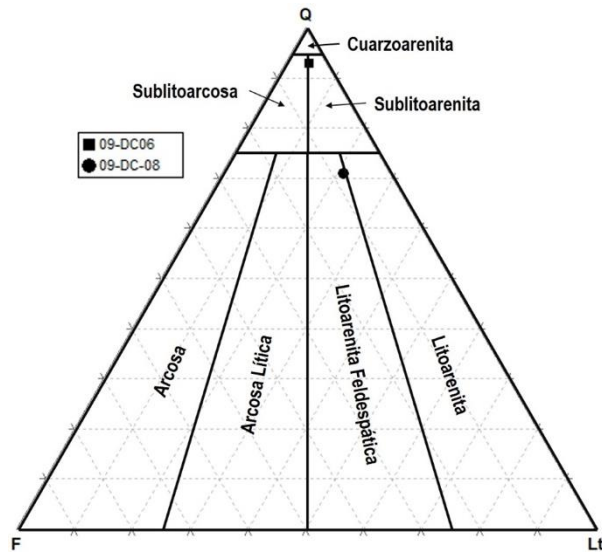


Figura 38. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Concentración basada en Folk, (1974).

5.7. Formación Tilatá

Para el análisis de esta formación se utilizó una muestra representativa (09-DC-03) (Fig.2 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El tamaño de grano varía de fino a grueso (0,1 a 1 mm), de forma subangular y subredondeada, con baja esfericidad. La roca es granosoportada (82%), presenta una selección pobre y los contactos entre granos son generalmente cóncavo – convexo (74%) y puntuales (26%) (Figura 39).

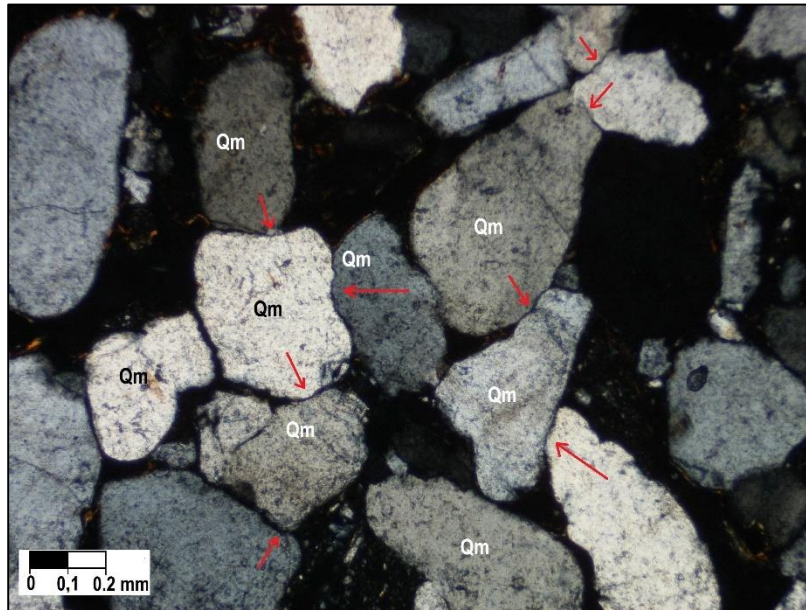


Figura 39. Muestra 09-DC-03 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Tilatá. Contactos suturados y puntuales (indicados por las flechas) en cuarzo monocristalino (Qm).

Dentro de los cuarzos la variedad más abundante es el monocristalino (89%), seguido por el policristalino difuso (10%) y en menor cantidad policristalino foliado (1%) (Figura 40). De acuerdo con los tipos de cuarzo, se evidencia predominancia de granos con extinción ondulatoria, seguidos de variedad policristalina de más de tres granos, en menor cantidad con extinción recta y presencia de variedad policristalina de 2 a 3 granos (Tabla 15).

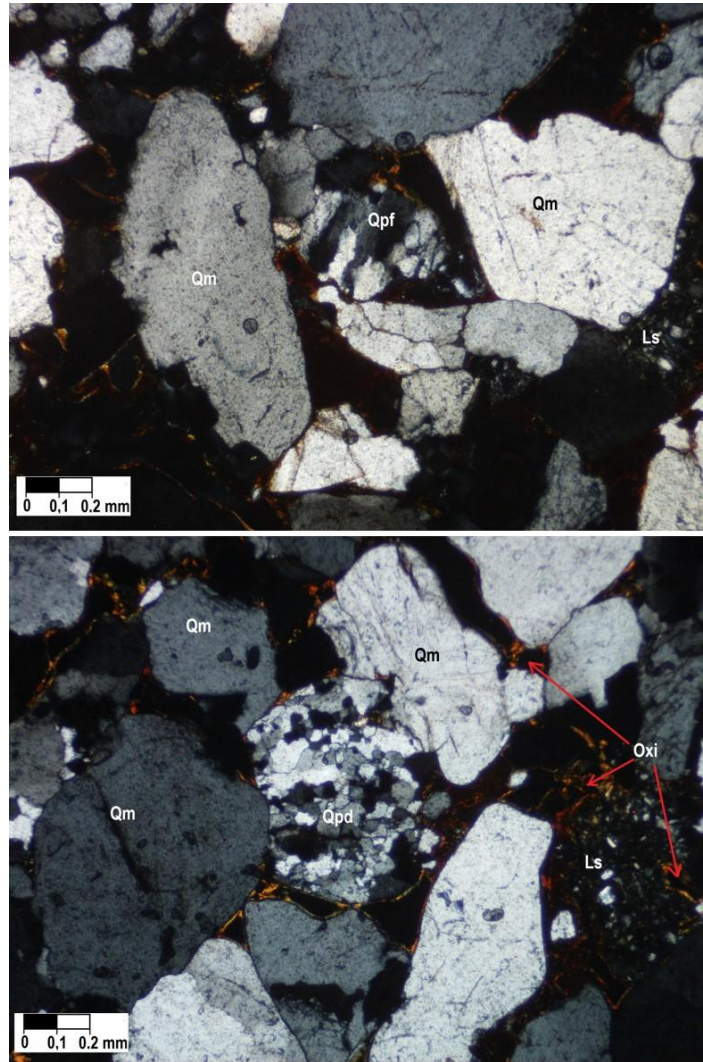


Figura 40. Muestra 09-DC-03 (10X, NX), correspondiente a la Fm. Tilatá. Variedades de cuarzo monocristalino (Qm), cuarzo policristalino difuso (Qpd) y cuarzo policristalino foliado (Qpf). Presencia de lítico sedimentario (Ls), y óxidos de hierro (Oxi).

Tabla 15. Cuento modal normalizado para los tipos de cuarzo presentes en la Formación Tilatá.

<i>Muestra</i>	<i>Tipos de cuarzo (%)</i>			
	<i>Qp 2 - 3</i>	<i>Qp +3</i>	<i>Qm (recto)</i>	<i>Qm (Ondulatoria)</i>
09-DC-03	2	10	6	82

En términos composicionales el componente más abundante es el cuarzo (94%), seguido de feldespato potásico (3%) representado por la ortoclasa y fragmentos líticos (3%) de origen sedimentario, compuesto por areniscas cuarzosas (Figura 41). Los minerales dentro de esta formación se encuentran muy alterados y fracturados.

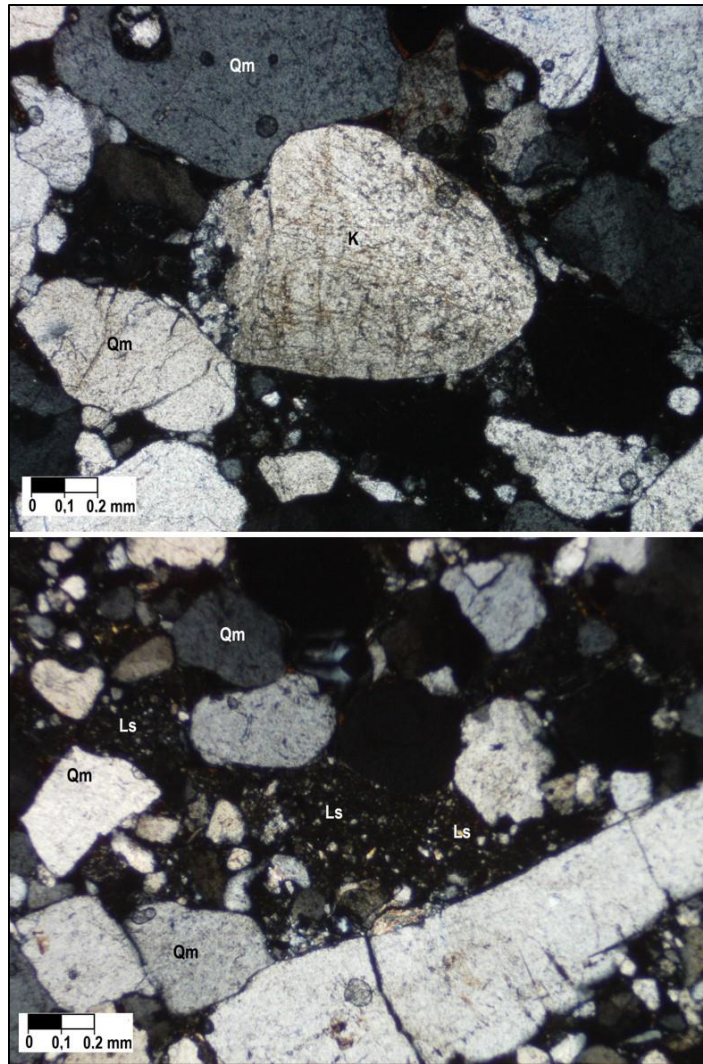


Figura 41. Muestra 09-DC-03 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Tiltatá. Líticos y Feldespato pótasio (K) presente en la muestra. Lítico sedimentario (Ls) compuesto por areniscas cuarzosas. Cuarzo monocristalino (Qm).

La matriz con un porcentaje del 8% está compuesta de cuarzo microcristalino y el cemento sintaxial (10%) lo componen óxidos de hierro. Dentro de los minerales accesorios más representativos se encuentran moscovita, opacos y circón (Figura 42), además, presencia de materia orgánica y arcillas dentro de los espacios entre granos, estos minerales aparecen con un porcentaje aproximado del 2%. De acuerdo con Folk (1974) la muestra se clasifica como sublitoarcosa a sublitoarenita (

Figura 43).

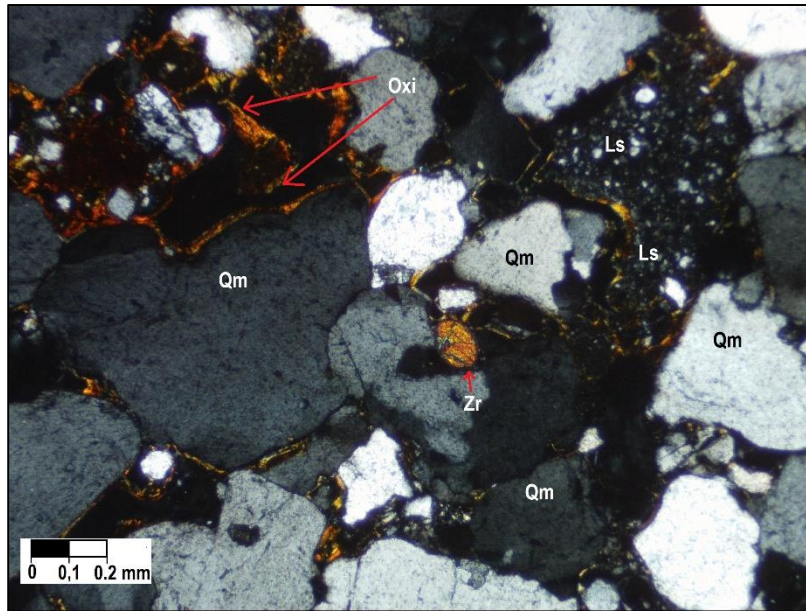


Figura 42. Muestra 09-DC-03 (4X, NX), correspondiente a la Fm. Tiltatá. Circón (Zr) presente como mineral accesorio de la Formación Tiltatá. Cuarzo monocristalino (Qm), lítico sedimentario (Ls) y óxidos de hierro (Oxi).

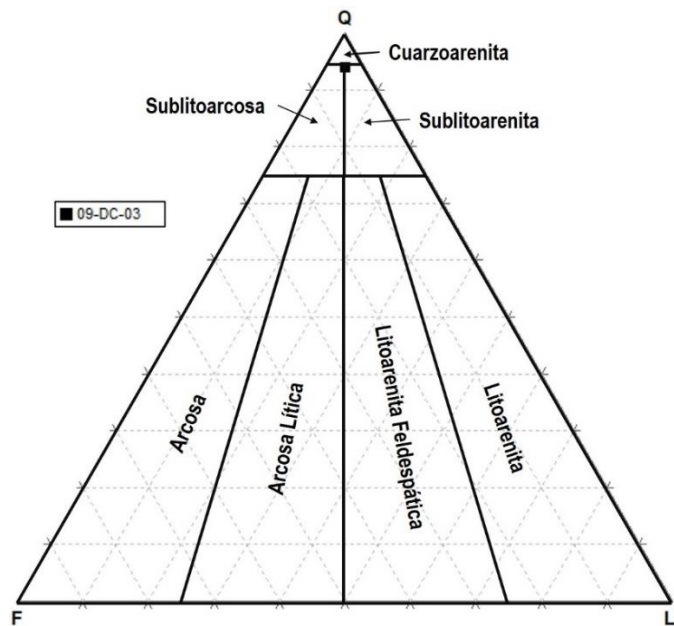


Figura 43. Clasificación composicional de las secciones delgadas de la Formación Tiltatá, basado en Folk, (1974).

6. DISCUSIÓN: ANÁLISIS DE PROCEDENCIA

La integración de los resultados de petrografía utilizados en este trabajo permite inferir las posibles áreas fuentes de las secuencias sedimentarias del Cretácico Superior – Plioceno y sus implicaciones en la reconstrucción paleogeográfica de la región. A continuación, se discuten los resultados presentados en esta investigación.

Cretácico tardío (Maastrichtiano):

El Maastrichtiano está representado por la Formación Guaduas, que se caracteriza por presentar dos petrofacies: sublitoarcosa y sublitoarenita (Figura 44; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) caracterizadas por altos contenidos de cuarzo monocristalino de extinción ondulatoria indicando fuentes metamórficas de bajo grado (Figura 45) y fragmentos líticos metamórficos esquistosos y líticos sedimentarios de chert, atribuidos a fuentes mixtas sedimentarias y metamórficas.

La madurez composicional y textural de las areniscas sugieren el aporte de fuentes metamórficas relativamente distales, así como aportes de fuentes retrabajadas de origen sedimentario. Por otro lado, la presencia de glauconita indica un ambiente marino somero, que estaría relacionado al ambiente transicional de frente costero reportado para esta formación por Amaya et al., (2010).

Los componentes modales de las areniscas de la Formación Guaduas en el diagrama de procedencia QtFL (Figura 46) sugieren que la secuencia presenta afinidad con un cratón interior y orógeno reciclado, distribuido principalmente en el campo de cratón interior (Figura 46b), es decir, que esta formación se depositó en un ambiente tectónico de plataforma estable y la posible área fuente es el escudo de Guyana.

Paleógeno temprano (Paleoceno):

Durante el Paleoceno se depositaron dos formaciones en zonas diferentes dentro del área central de la Cordillera Oriental: las formaciones Areniscas de Socha y Bogotá. La composición de estas unidades Paleocenas difiere de la composición de la Fm. Guaduas. Estos cambios composicionales posiblemente están relacionados al retrabajamiento de material volcánico de la Cordillera Central desde el Paleoceno.

En la zona norte del área de estudio ocurre la acumulación de la Fm. Areniscas de Socha, la cual presenta dos petrofacies: sublitoarenita y litoarenita (Figura 44; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Estas petrofacies se caracterizan por bajos contenidos de feldespatos y contenidos de cuarzo monocristalino de extinción ondulatoria y policristalino de más de tres granos similares al contenido de fragmentos líticos. Esta composición evidencia aporte de material volcánico,

sedimentario y metamórfico de bajo grado (Figura 45), sugiriendo así una nueva fuente de sedimentos de origen volcánico que no estaba presente en el Maastrichtiano.

Composicional y texturalmente estas areniscas son maduras, lo que podría sugerir fuentes de aporte sedimentario relativamente distales y por ende un alto grado de transporte. Estos resultados están en línea con un ambiente de depósito de ríos trezados sugerido por Osorno (1994 en Ulloa et al., 2001).

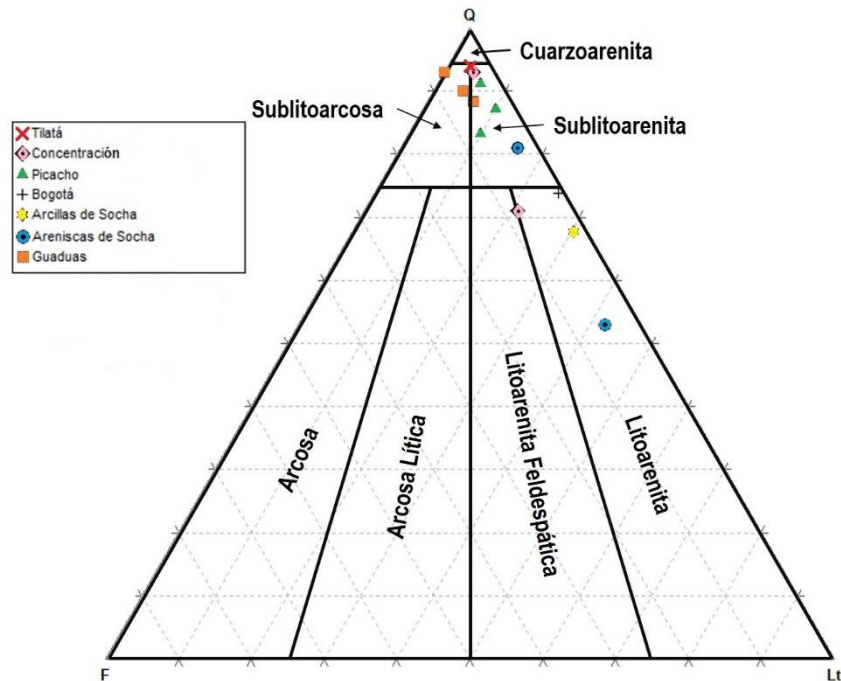


Figura 44. Clasificación composicional de las secuencias del Cretácico superior – Plioceno del área central de la Cordillera Oriental basada en Folk, (1974).

Los componentes modales de la Formación Areniscas de Socha en el diagrama de procedencia QtFL (Figura 46) sugieren que la secuencia presenta afinidad con orógenos reciclados, distribuidos entre los campos de cuarzo reciclado y transicional reciclado (Figura 46b). Con base en estos resultados, proponemos que el aporte de sedimentos de esta unidad podría ser mixta; por un lado, está el aporte del Escudo de Guyana reflejado por el alto contenido de fragmentos metamórficos, así como el aporte de la Cordillera Central por el alto contenido de fragmentos volcánicos y sedimentarios.

Por otro lado, al sur del área de estudio, simultáneamente ocurre la acumulación de la Formación Bogotá, clasificada como una litoarenita (Figura 44; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), con alto contenido de cuarzo monocristalino de extinción recta y policristalino de más de tres granos, seguido de fragmentos líticos, que indican un aporte volcánico, metamórfico (de bajo grado) (Figura 45) y sedimentario.

Composicional y texturalmente estas areniscas son maduras lo que podría sugerir fuentes de sedimentos relativamente distales depositadas en un ambiente de llanuras de inundación (Bayona et al., 2010). Los componentes modales de esta formación en el diagrama de procedencia QtFL (Figura 46) sugieren que la secuencia presenta afinidad con orógenos reciclados, distribuido en el campo de cuarzoso reciclado (Figura 46b). Lo anterior implica que las fuentes de aporte podrían ser mixtas, similar a lo registrado en la Formación Areniscas de Socha: retrabajamiento de rocas sedimentarias antiguas, material ígneo de la Cordillera Central y el Escudo de Guyana. Para esta época Villamil, (1999), sugiere que la Cordillera Central junto con el cratón de Guyana son fuentes de aporte para las facies de las formaciones Socha y Bogotá.

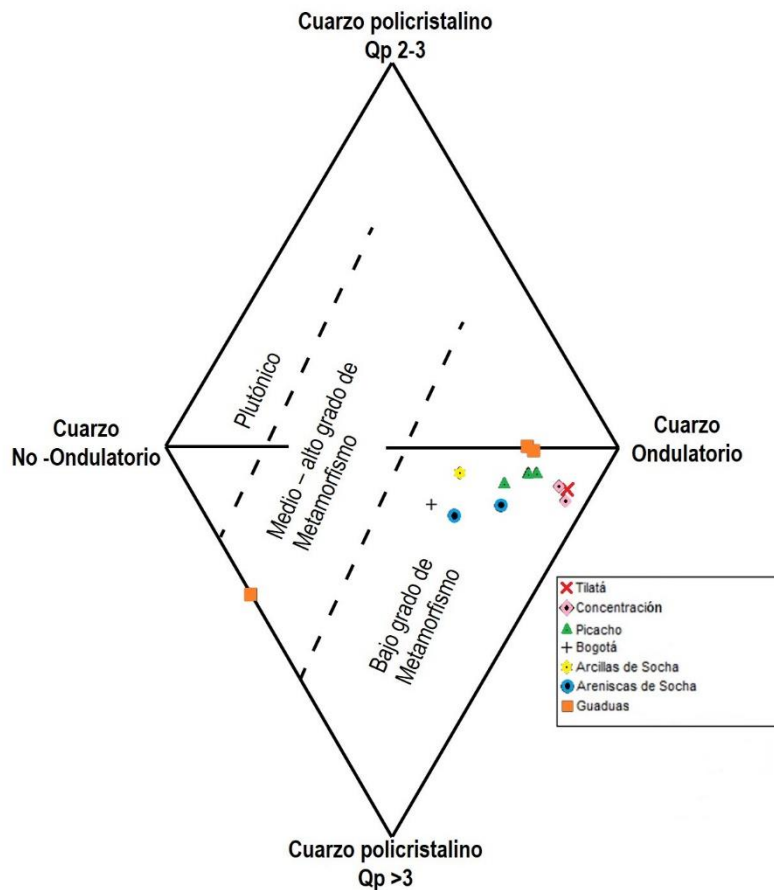


Figura 45. Diagrama de la naturaleza de los tipos de cuarzo presentes en las secuencias del Cretácico superior – Plioceno del área central de la Cordillera Oriental. (Tortosa et al., 1991, modificado de Basu et al., 1975).

Paleoceno tardío-Eoceno temprano:

A finales del Paleoceno y comienzos del Eoceno ocurre la acumulación de la Formación Arcillas de Socha. Esta formación se caracteriza por ser una litoarenita (Figura 44; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) con alto contenido de cuarzo monocristalino de extinción ondulatoria, y de fragmentos líticos, los cuales indican un mayor aporte metamórfico de bajo grado

(Figura 45), y se mantiene constante el aporte de volcánicos y sedimentarios comparado con las rocas sedimentarias del Paleoceno temprano, indicando estabilidad regional en esta época.

Composicional y texturalmente la Formación Arcillas de Socha es inmadura, se acumula en un ambiente de llanuras de inundación (Rodríguez & Solano, 2000) y, con el periodo de relajación de la corteza documentado por Villamil, (1999) en esta época, se propone que las fuentes de aporte se mantienen constantes pero hay una disminución en la fuerza de transporte al momento de la depositación. Los componentes modales de esta Formación en el diagrama de procedencia QtFL (Figura 46), sugieren que la secuencia presenta afinidad con orógenos reciclados, distribuido en el campo de transicional reciclado (Figura 46b). Estos resultados corroboran que el aporte de sedimentos se mantiene constante y podría ser mixta. Por un lado, tendríamos aporte de sedimentos del Escudo de Guyana, así como el retrabajamiento de fuentes sedimentarias y volcánicas posiblemente de la Cordillera Central.

Eoceno medio:

En el Eoceno medio se deposita la Formación Picacho al norte del área central de la Cordillera Oriental. Esta formación se caracteriza por ser una sublitoarenita (Figura 44; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) con altos contenidos de cuarzo monocristalino de extinción ondulatoria y líticos de origen volcánicos principalmente, seguidos de aportes metamórficos y sedimentarios. Los resultados indican fuentes de sedimentos volcánicas, sedimentarias y metamórficas de bajo grado (Figura 45).

Composicional y texturalmente esta formación es madura, lo que indica fuentes de sedimentos relativamente distales, depositadas en un ambiente de ríos trenzados (Rodríguez & Solano, 2000). Los componentes modales de esta formación en el diagrama de procedencia QtFL (Figura 46) sugieren que la secuencia presenta afinidad con orógenos reciclados, distribuido en el campo de transicional cuarzoso reciclado (Figura 46b) lo que indica pocos cambios en el aporte de fuentes sedimentarias, manteniéndose en aportes mixtos asociados a la Cordillera Central y el Escudo de Guyana.

Oligoceno temprano:

La Formación Concentración se caracteriza por presentar dos petrofacies: sublitoarenita y litoarenita feldespática (Figura 44; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), con alto contenido de cuarzo monocristalino de extinción ondulatoria, cuarzo policristalino de más de tres granos y contenido de fragmentos líticos principalmente volcánico, conservando líticos metamórficos y sedimentarios, donde se evidencia un aporte mayor de la fuente volcánica y disminuye el aporte de la fuente sedimentaria y metamórfica (de bajo grado) (Figura 45), indicando un cambio en la configuración regional de las fuentes de sedimentos de esta cuenca.

Composicionalmente la muestra es madura y texturalmente es inmadura, lo que podría sugerir aportes de fuentes ígneas, sedimentarias y metamórficas relativamente proximales. Los componentes modales de esta formación en el diagrama de procedencia QtFL (Figura 46) sugieren que la secuencia presenta afinidad con orógenos reciclados, distribuido en el campo de cuarzoso reciclado (Figura 46b). Con base en esta composición sugerimos que el aporte de sedimentos de la Fm. Concentración podría ser mixta, asociada al igual que las formaciones anteriores al Escudo de Guyana y la Cordillera Central.

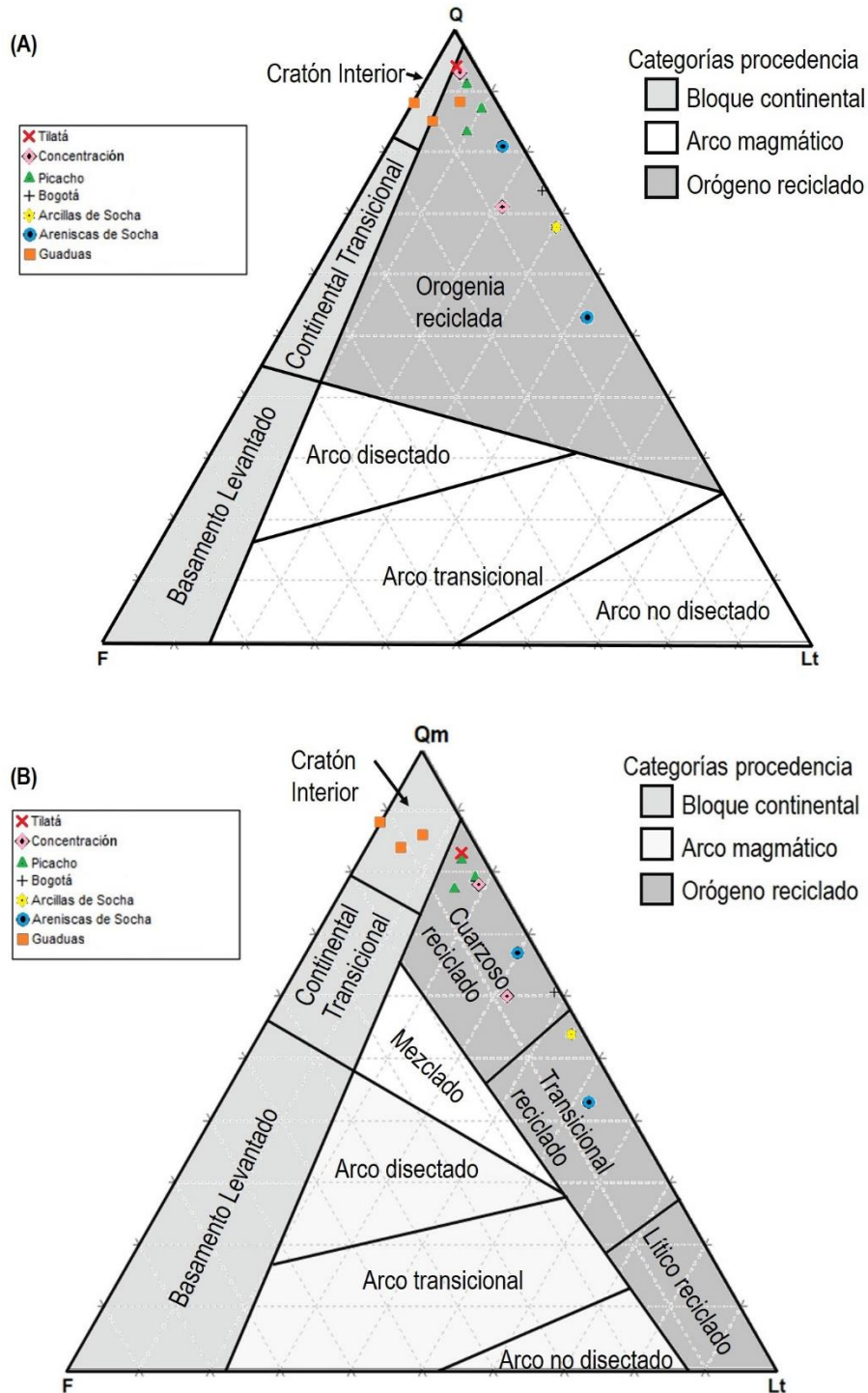


Figura 46. Diagrama ternario de procedencia de las secuencias del Cretácico superior – Plioceno (Dickinson, 1985).

Oligoceno tardío – Mioceno temprano:

Entre el Oligoceno tardío y el Mioceno temprano no hay depositación en esta cuenca debido al levantamiento de la Cordillera Oriental según lo reportado por Horton et al., (2010). Con base en los

resultados obtenidos en el presente trabajo se respalda lo reportado por Villamil, (1999) sobre los estados iniciales de levantamiento de la Cordillera Oriental y el levantamiento intenso de la Cordillera Central lo cual se traduce a mayores tasas de erosión y registro sedimentario casi nulo en la Cordillera Oriental en esta época.

Mioceno tardío – Plioceno:

La sedimentación se reanuda a finales del Mioceno y comienzos del Plioceno con el registro de la Formación Tilatá, la cual se clasifica como sublitoarcosa a sublitoarenita (Figura 44; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), caracterizada por altos contenidos de cuarzo de extinción ondulatoria y fragmentos líticos sedimentarios, lo que indica un cambio drástico en la fuente de aporte a la cuenca, puesto que en estas épocas el aporte es netamente de sedimentario.

Composicionalmente la muestra es madura y texturalmente es submadura, lo que podría sugerir aportes de fuentes sedimentarias relativamente proximales, depositadas en un ambiente lacustre y fluvial (Álvarez, 1998). Los componentes modales de esta formación en el diagrama de procedencia QtFL (Figura 46) sugieren que la secuencia presenta afinidad con orógenos reciclados, distribuido en el campo de cuarzoso reciclado (Figura 46b), por ende, se puede deducir que el aporte de sedimentos de la formación Tilatá proviene posiblemente de las rocas sedimentarias levantadas de la Cordillera Oriental.

Sedimentación durante el periodo Cretácico superior – Neógeno:

El diagrama de procedencia y ambiente tectónico de arenitas (Figura 46) sugiere un cambio entre las areniscas más maduras con alto contenido de cuarzo y afinidad a cratón interior en el maastrichtiano provenientes del Escudo de Guyana (Figura 47) a las areniscas con afinidad a orógeno cuarzoso y transicional reciclado depositadas entre el Paleoceno – Oligoceno temprano asociadas a una configuración tectónica con disponibilidad de relieve donde se sugiere fuentes de sedimentos mixtas relacionadas a la Cordillera Central y el Escudo de Guyana (Figura 48).

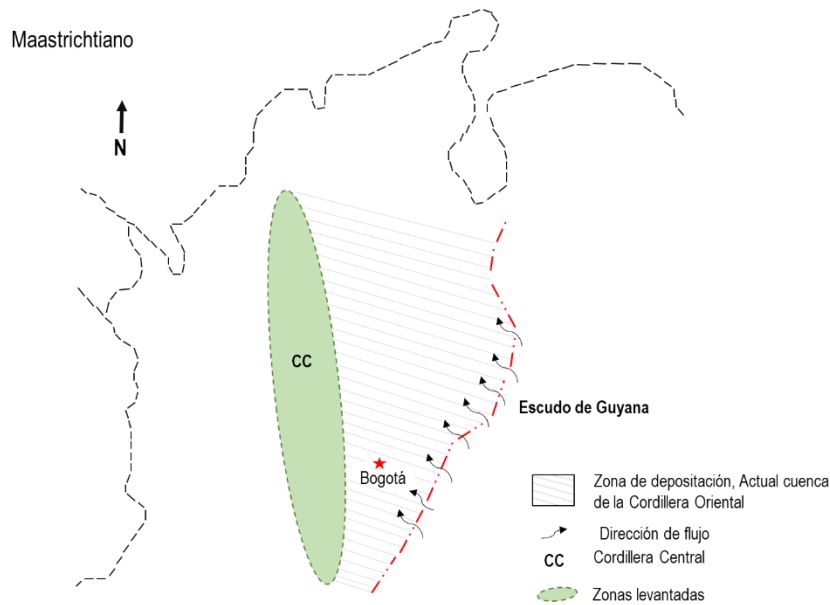


Figura 47. Mapa de relación de áreas de aporte y depósito para el Maastrichtiano en la zona de la actual cuenca de la Cordillera Oriental. Diagrama no escala.

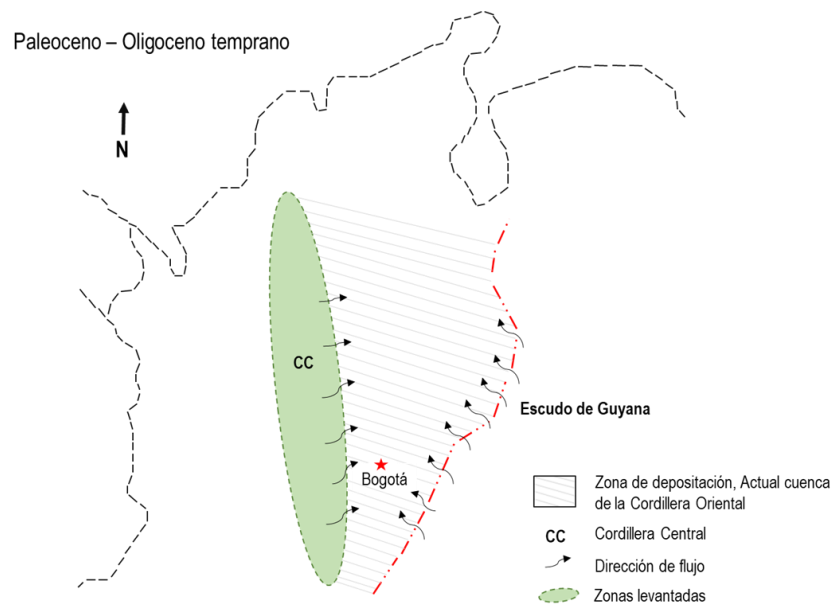


Figura 48. Mapa de relación de áreas de aporte y depósito para el Paleoceno – Oligoceno temprano en la zona de la actual cuenca de la Cordillera Oriental. Diagrama no escala.

Para el Oligoceno temprano y finales del Mioceno, la configuración tectónica de la zona cambia completamente, lo que indicaría la generación de relieve y la posible exhumación de la cordillera Oriental como lo sugiere Horton et al., (2010), generando cero deposición en la actual cuenca de la Cordillera Oriental (Figura 49).

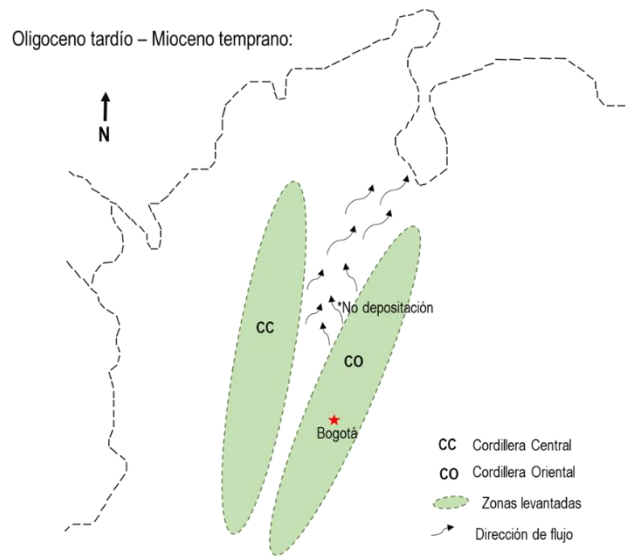


Figura 49. Mapa de relación de áreas de aporte y depósito para el Oligoceno tardío - Mioceno temprano en la zona de la actual cuenca de la Cordillera Oriental. Diagrama no escala.

Lo anterior se refleja en la afinidad de orogenia cuarzosa reciclada y el aporte de líticos netamente sedimentarios acumulados en el Plioceno, originarios posiblemente en la Cordillera Oriental (Figura 50).

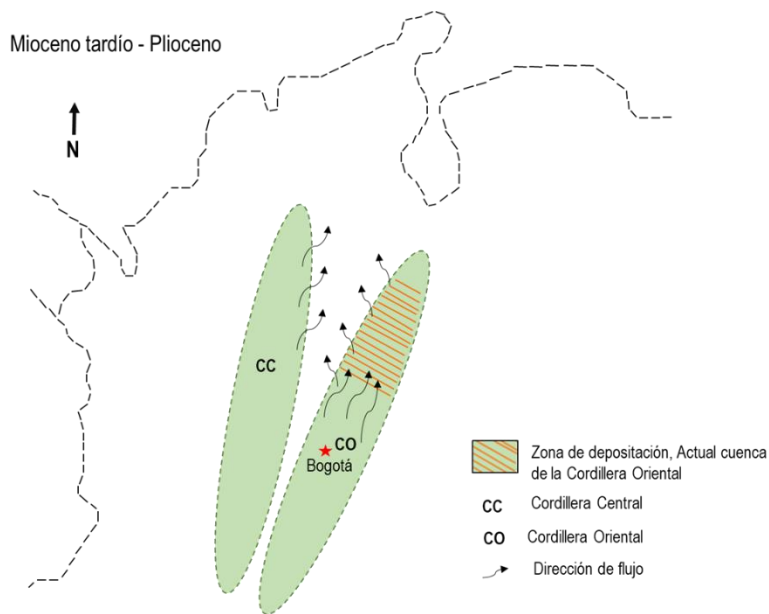


Figura 50. Mapa de relación de áreas de aporte y depósito para el Mioceno tardío - Plioceno en la zona de la actual cuenca de la Cordillera Oriental. Diagrama no escala.

CONCLUSIONES

El análisis petrográfico como técnica para el estudio de procedencia, permite documentar variaciones texturales y composicionales que dan una primera aproximación a las fuentes de aporte sedimentario.

Las areniscas del Cretácico – Superior – Oligoceno presentan características similares en torno a la madurez textural y composicional, el contenido de líticos volcánicos, sedimentarios y metamórficos, lo que sugiere que estas formaciones presentan la misma fuente de sedimentos correspondiente al Escudo de Guyana y la Cordillera Central, aunque durante el Maastrichtiano la única fuente de aportes es el Escudo de Guyana y no hay evidencia de aportes de la Cordillera Central.

No existe registro entre el Oligoceno tardío – Mioceno temprano lo que sugiere un evento de exhumación de la Cordillera Oriental traducida a mayores tasas de erosión en la zona y no depositación.

Finalmente, la contribución de líticos sedimentarios a la Formación Tilatá en el Mioceno tardío – Plioceno señala como principal fuente de sedimentos a la Cordillera Oriental, lo que confirma la conclusión anterior.

RECOMENDACIONES

Para una mayor precisión al establecer las fuentes de aporte sedimentario, se recomienda:

1. La aplicación de otras técnicas enfocadas al estudio de procedencia como: minerales densos, análisis de catadoluminiscencia, análisis de paleocorrientes, retrabajamiento de polen y glauconita, entre otros.
2. Realizar geocronología U-Pb en circones detríticos, para reconocer de forma más precisa las fuentes de aporte sedimentario.
3. Estudiar más en detalle el aporte de líticos volcánicos a la Formación Guaduas.
4. Adquirir más muestras representativas de cada formación.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, A. (1998). Acuíferos de la Formación Tiltatá (Mioceno-Plioceno) en Dos Pozos del Suroeste de la Sabana de Bogotá. *Geología Colombiana*, (23), 79–95.
- Amaya, Erika; Mariño, Jorge; Jaramillo, C. (2010). Litofacies Y Ambientes De Acumulación De La Formación Guaduas En La Parte Central De La Cordillera Oriental – Implicaciones Paleogeográficas. *Boletín de Geología*, 32, numero(enero-junio 2010), 13–25.
- Basu, A., Young, S., Suttner, L., James, C., & Mack, G. (1975). Re-evaluation of the undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 45(4), 873–882.
- Bayona, G., Montenegro, O., Cardona, A., Jaramillo, C., Lamus, F., Morón, S., ... Stockli, D. (2010). Estratigrafía , procedencia , subsidencia y exhumación de las unidades Paleógenas en el Sinclinal de Usme , sur de la zona axial de la Cordillera Oriental. *Geología Colombiana*, 35, 5–35.
- Butler, K., & Schamel, S. (1988). Structure along the eastern margin of the Central, 1(I), 109–120.
- Caballero, V., Parra, M., & Mora, A. (2010). Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno tardío-Oligoceno temprano Proveniencia sedimentarioa en el Sinclinal de Nuevo Mundo Cuenca Valle Medio del Magdalena. *Boletín de Geología*, 32(1), 45–77.
- Cooper, M. a, Addison, F. T., Alvares, R., Hayward, a B., Howe, S., Pulham, a J., & Taborda, a. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Colombia. *Petroleum Basins of South America. AAPG. Memoir No. 62*, 10(10), 659–666.
<https://doi.org/10.1306/7834D9F4-1721-11D7-8645000102C1865D>
- Correa, R., & Valbuena, J. (2007). *Estudio Petrografico muestras de Afloramiento Cuenca Soapaga*. Bogotá D.C.: Agencia Nacional de Hidrocarburos.
- Cortés, M., Angelier, J., & Colletta, B. (2005). Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region. *Tectonics*, 24(1), 1–27. <https://doi.org/10.1029/2003TC001551>
- Dickinson, W. R. (1985). Interpreting Provenance Relations from Detrital Modes of Sandstones. *Provenance of Arenites*. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2809-6_15

- Folk, R. L. (1974). *Petrology of the Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company (Vol. 2). Austin, Texas. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(91\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0169-555X(91)90027-8)
- Forero Suarez, A. (1990). The basement of the Eastern Cordillera, Colombia: An allochthonous terrane in northwestern South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(2–3), 141–151. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(90\)90026-W](https://doi.org/10.1016/0895-9811(90)90026-W)
- Gómez, E., Jordan, T. E., Allmendinger, R. W., Hegarty, K., & Kelley, S. (2005). Syntectonic Cenozoic sedimentation in the northern middle Magdalena Valley Basin of Colombia and implications for exhumation of the Northern Andes. *Bulletin of the Geological Society of America*, 117(5–6), 547–569. <https://doi.org/10.1130/B25454.1>
- González, H., Nuñez, A., & Paris, G. (1988). *Mapa Geológico de Colombia: Memoria Explicativa*. Colombia: INGEOMINAS.
- Guerrero, J., & Sarmiento, G. (1996). Estratigrafía física, palinológica, sedimentológica y secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en exploración petrolera. *Geología Colombiana*, 5(20), 3–66.
- Horton, B. K., Saylor, J. E., Nie, J., Mora, A., Parra, M., Reyes-Harker, A., & Stockli, D. F. (2010). Linking sedimentation in the northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon U-Pb ages, Eastern Cordillera, Colombia. *Bulletin of the Geological Society of America*, 122(9–10), 1423–1442. <https://doi.org/10.1130/B30118.1>
- Ingersoll, R. V., Bullard, T. F., Ford, R. L., Pickle, J. D., Grimm, J. P., & Sares, S. W. (1984). The effect of grain size on detrital modes; a test of the Gazzi-Dickinson point-counting method; discussion and reply. *Journal of Sedimentary Research*, 55(4), 618–621. <https://doi.org/10.1306/212F878D-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Lobo-Guerrero Uscátegui, A. (1992). *Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana*. Santafé de Bogotá D.C.
- Manosalva, S., Naranjo, W., Ríos, C., Amorocho, R., & Castellanos, O. (2017). Estudio Petrogenético de las rocas metamórficas del Macizo de Floresta, Cordillera Oriental, Andes Colombianos. *Boletín de Geología*, 39(1). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18273/revbol.v39n1-2017004>
- Mendez, S. C. (2017). *Análisis de procedencia de rocas siliciclásticas de las formaciones Girón y*

Tibasosa en el macizo de Floresta. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Geociencias. Bogotá. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/59405/>

Mojica, J., & Villarroel, C. (1984). Contribución al conocimiento de las Unidades Paleozoicas del área de Floresta (Cordillera Oriental Colombiana, Departamento de Boyacá) y en especial al de la Formación Cucho. *Geología Colombiana*, (13), 55–79.

Montoya, D. M., & Reyes Torres, G. A. (2005). *Geología de la sabana de Bogotá. INGEOMINAS* (Vol. 1).

Mora, A., Parra, M., Strecker, M. R., Kammer, A., Dimaté, C., & Rodríguez, F. (2006). Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia. *Tectonics*, 25(2), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2005TC001854>

Renzoni, G., & Rosas, H. (2008). Geología de la Plancha 171: Duitama. Escala: 1:100.000. *INGEOMINAS*, 1.

Renzoni, G., Rosas, H., & Etayo, F. (2008). Geología de la Plancha 191: Tunja. Escala 1:100.000. *INGEOMINAS*, 192.

Rodríguez, A., & Solano, O. (2000). Mapa geológico del departamento de Boyacá. Memoria explicativa. *Boletín de Geología (Bucaramanga)*, 20(35), 53–63.

Sarmiento Rojas, L. F. (2001). Mesozoic Rifting and Cenozoic basin inversion history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Ecopetrol*.

Saylor, J. E., Horton, B. K., Nie, J., Corredor, J., & Mora, A. (2011). Evaluating foreland basin partitioning in the northern Andes using Cenozoic fill of the Floresta basin, Eastern Cordillera, Colombia. *Basin Research*, 23(4), 377–402. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2010.00493.x>

Servicio geológico Colombiano. (1998a). Plancha 172 Paz del Río, 172.

Servicio geológico Colombiano. (1998b). Plancha 191 Tunja, 1085000.

Toussaint, J. François. (1996). *Evolución Geológica de Colombia*. Medellín - Colombia: Universidad Nacional.

Ulloa, C. E., Rodríguez, E., Fuquen, J. A., & Acosta, J. E. (2001). *Memoria explicativa Plancha 192 - Laguna de Tota*. Bogotá D.C.

Ulloa, C., Rodríguez, E., & Renzi, G. (1981). Geología de las planchas 171 Duitama, 191 Tunja, 211

Tauramena y 230 Monterrey. Cuadrángulos J-12 y K-13. *Boletín Geológico*, 24(1976), 55.

Retrieved from

<http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024364/documento/pdf/0101243641101000.pdf>

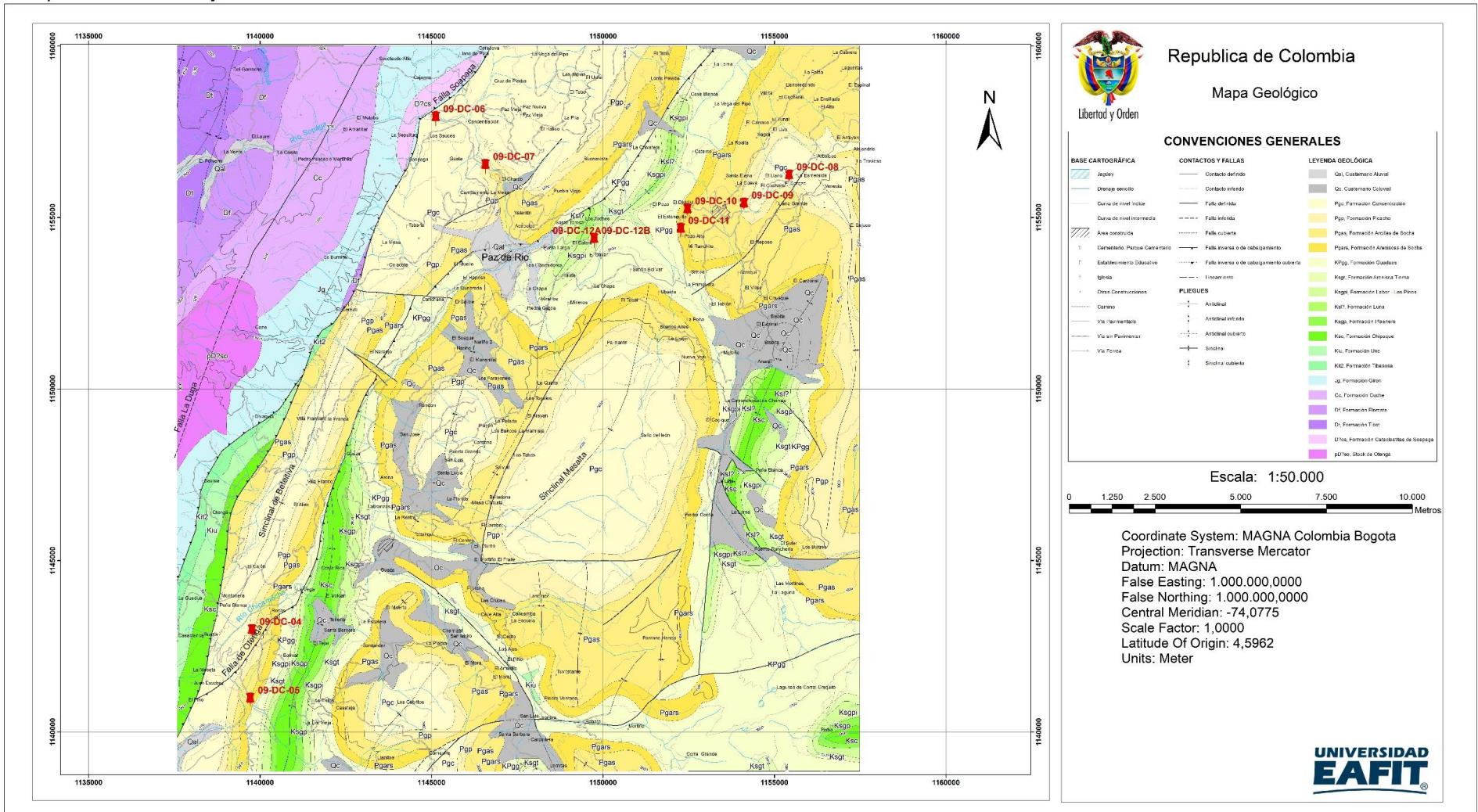
Ulloa, C., Rodríguez, E., & Rodríguez, G. (2003). Geología de la Plancha 172 Paz De Rio. Memoria Explicativa. *INGEOMINAS*, 111.

Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., & Beltrán, A. (2011).

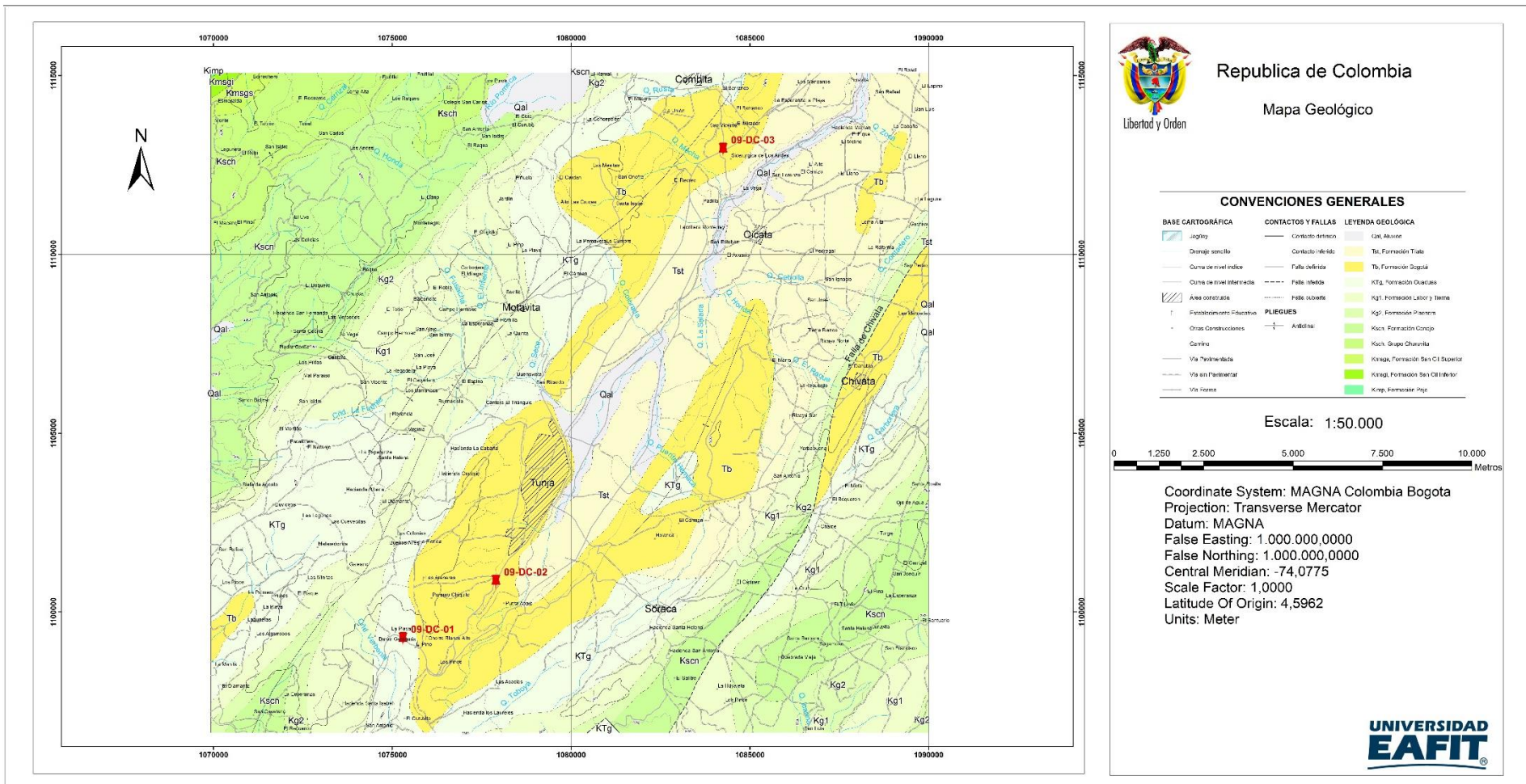
Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3–4), 875–896. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.003>

Villamil, T. (1999). Campanian-Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 153(1–4), 239–275. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00075-9](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00075-9)

ANEXOS



Anexo 1. Mapa geológico zona norte del área de estudio (Base cartográfica plancha 172 Paz del Río. Servicio geológico Colombiano, 1998).



Anexo 2. Mapa geológico zona sur del área de estudio (Base cartográfica plancha 172 Paz del Rio. Servicio geológico Colombiano, 1998).