

**PROVENIENCIA SEDIMENTARIA DE LA CUENCA DEL CATATUMBO DURANTE
EL CENOZOICO, IMPLICACIONES PALEOGEOGRÁFICAS**

Héctor Camilo Pérez Contreras

Cristian Andrés Valencia Arias

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
MEDELLÍN
2019

**PROVENIENCIA SEDIMENTARIA DE LA CUENCA DEL CATATUMBO DURANTE
EL CENOZOICO, IMPLICACIONES PALEOGEOGRÁFICAS**

Héctor Camilo Pérez Contreras

hperezc@eafit.edu.co

Cristian Andrés Valencia Arias

cvalen47@eafit.edu.co

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de **geólogo**

DIRECTOR

Alejandro Beltrán Triviño, PhD.

aibeltrant@eafit.edu.co

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

MEDELLÍN

2019

*Cuando estés a punto de
abandonar, no olvides
porque decidiste empezar*

Anónimo

AGRADECIMIENTOS

Héctor Pérez

Quiero dar mis sinceros agradecimientos:

A Dios por su fortaleza en cada momento.

A mi madre por ser mi motor y por todo lo que ha luchado por mí.

A mi padre porque siempre ha sido mi inspiración.

A Danna Pizarro por ser esa persona especial que me ha acompañado en los momentos más difíciles y me ha dado todo su apoyo incondicionalmente.

A Alejandro Beltrán por tanta ayuda, apoyo y disposición en la realización de este proyecto.

A Leidy, Ana Lucia y Wilton por el apoyo dado en la realización de este proyecto.

A todos los profesores de la carrera, de los que aprendí mucho para la vida.

Cristian Valencia

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos:

A mi madre, padre, madrina, padrino, nona, y demás familiares por el apoyo, esfuerzo y sacrificio incondicional haciendo lo imposible para que cumpla mis metas.

A Laura Ruiz, Karoline, Oscar, Barra, Daniel, Juan Pablo y Karen por su amistad y buenas aventuras.

A Alejandro Beltrán por darme la oportunidad y su guía para realizar este proyecto, sus enseñanzas, buenos consejos, asesoría y disposición.

A Jorge y Kamila por su apoyo.

A Wilton, Leidy y Ana Lucia por su disposición, amabilidad y apoyo dado en este proceso.

A todos los profesores del pregrado por sus enseñanzas.

A todas aquellas personas, las cuales tuve oportunidad de conocer y compartir momentos gracias ... **A todos ¡GRACIAS!**



“Noble, Leal y Valerosa”

CONTENIDO

RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN.....	13
1. OBJETIVOS.....	16
1.1. Objetivo general.....	16
1.2. Objetivos específicos.....	16
2. LOCALIZACIÓN.....	16
3. METODOLOGÍA.....	17
4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	25
4.1. Geología regional.....	25
4.2. Estratigrafía.....	27
4.2.1. Formación Catatumbo.....	28
4.2.2. Formación Barco.....	28
4.2.3. Formación Los Cuervos.....	29
4.2.4. Formación Mirador.....	30
4.2.5. Formación Carbonera.....	30
4.2.6. Formación León.....	31
4.2.7. Grupo Guayabo.....	32
5. RESULTADOS.....	33
5.1. PETROGRAFÍA.....	33
5.2. ANÁLISIS DE MINERALES DENSOS.....	43
6. DISCUSIÓN.....	50
7. CONCLUSIONES.....	59
8. RECOMENDACIONES.....	60
9. BIBLIOGRAFÍA.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización de la Cuenca del Catatumbo.....	15
Figura 2. Esquema de la metodología utilizada en la presente investigación.	17
Figura 3. Mapa geológico con las estaciones de campo. Ver Anexo 1.	20
Figura 4. Montaje de tamices para separar los tamaños de granos.	24
Figura 5. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca del Catatumbo. Modificado de Barrero et al., 2007.	27
Figura 6. Diagrama ternario de clasificación de areniscas para la secuencia cenozoica en el Catatumbo; campos composicionales según Folk (1974).	34
Figura 7. Diagramas ternarios de procedencia de la secuencia del Cenozoica del Catatumbo (Dickinson, 1985).....	35
Figura 8. Diagramas de clasificación de la naturaleza de los cuarzos (Basu 1975; Tortosa et al., 1991).	37
Figura 9. En general las muestras presentan cuarzo monocristalino con extinción ondulatoria (Qmo) y extinción recta (Qmr), además de cuarzo policristalino (Qpd), líticos sedimentarios compuestos de cuarzo chert (Qc) y finalmente líticos metamórficos (Lm) A. Muestra Hc-M#2 correspondiente a la Formación Catatumbo, B. Muestra Hc-M#3 correspondiente a la Formación Barco, C. Muestra Hc-M#4 correspondiente a la Formación Los Cuervos, D. Muestra Hc-M#5 correspondiente a la Formación Mirador, E. Muestra Hc-08 correspondiente a la Formación Carbonera, F. Muestra Hc-06 correspondiente a la Formación León, G. Muestra Hc-M#1 correspondiente al Grupo Guayabo, H. Muestra Hc-07 correspondiente al Grupo Guayabo.....	42
Figura 10. Distribución de los porcentajes de minerales densos en cada una de las secciones analizadas.	46
Figura 11. A. Muestra Hc-02 y B. muestra Hc-M#2 correspondientes a la Formación Catatumbo, C. Muestra Hc-M#3 correspondiente a la Formación Barco, D. Muestra Hc-M#4 correspondiente a la Formación Los Cuervos, E. Muestra Hc-M#5 correspondientes a la Formación Mirador, F. Muestra Hc-08 correspondiente a la Formación Carbonera, G. Muestra Hc-06 correspondiente a la Formación León, H. Muestra Hc-M#1 e I. Muestra Hc-05 correspondientes al Grupo Guayabo, J. Muestra Hc-04 correspondiente al depósito Cuaternario.	49
Figura 12. Paleogeografía de las fuentes de aporte de la Cuenca del Catatumbo para el Maastrichtiano – Paleoceno Medio. Modificado de (Ayala et al., 2012), Límites de placas en Escalona y Mann., (2011), edades reportadas en 1, en Spikings et al., (2015).....	52

Figura 13. Paleogeografía de las fuentes de aporte de la Cuenca del Catatumbo para el Paleoceno tardío – Eoceno temprano. Modificado de (Ayala et al., 2012), Límites de placas en Escalona y Mann., (2011), edades reportadas en 1, en Spikings et al., (2015)..... 54

Figura 14. Paleogeografía de las fuentes de aporte de la Cuenca del Catatumbo para el Eoceno tardío – Mioceno temprano. Límites de placas en Escalona y Mann., (2011), edades reportadas (1), en Spikings et al., (2015) 56

Figura 15. Paleogeografía de las fuentes de aporte de la Cuenca del Catatumbo para el Mioceno medio - Actualidad. Límites de placas en Escalona y Mann., (2011), edades reportadas (1), en Spikings et al., (2015) 58

Lista de Tablas

Tabla 1. Muestras recolectadas en la transecta Cúcuta – Ocaña, indicando coordenadas de localización y la unidad litoestratigráfica a la que pertenecen, en paréntesis se indica la abreviatura usada en el mapa geológico del Servicio Geológico Colombiano. Ver Figura 3.	18
Tabla 2. Categorías de grano identificados en los análisis petrográficos.	22
Tabla 3. Resultados del conteo y normalización de granos de Qt, F y Lt de los análisis petrográficos.	33
Tabla 4. Resultados del conteo y normalización de la naturaleza de los cuarzos (Basu, 1975; Tortosa et al., 1991)	36
Tabla 5. Discriminación en minerales traslúcidos y minerales opacos.	44
Tabla 6. Clasificación de minerales traslucidos en minerales ultraestables, estables e inestables.	45

Lista de Anexos

Anexo 1. Mapa geológico con las estaciones de campo.....	69
---	----

RESUMEN

En este proyecto se obtuvieron nuevos resultados de análisis de minerales densos y petrografía en areniscas de las formaciones cenozoicas que afloran en la zona sur de la cuenca del Catatumbo, Norte de Santander, con el objetivo de determinar la proveniencia sedimentaria y establecer la paleogeografía durante esta era.

Las formaciones cenozoicas en la cuenca del Catatumbo corresponden a la Formación Catatumbo (Maastrichtiano - Paleoceno), Formación Barco (Paleoceno), Formación Los Cuervos (Paleoceno-Eoceno), Formación Mirador (Eoceno), Formación Carbonera (Eoceno - Oligoceno), Formación León (Oligoceno - Mioceno) y Grupo Guayabo (Mioceno), las cuales presentan una mayor inmadurez composicional hacia el tope de la secuencia, asociados a los cambios en las fuentes de aporte.

Los nuevos resultados sugieren que los sedimentos que rellenan la cuenca durante el Cenozoico provienen de dos áreas fuentes principales: (1) Basamento ígneo-metamórfico del Macizo de Santander, (2) Material sedimentario retrabajado del Escudo Guayanés acumulado en cuencas cretácicas. Esto implica que el Macizo de Santander estaba expuesto, por lo menos, desde el Cretácico tardío, y que el levantamiento diferencial de bloques de la Cordillera Oriental, la inversión de las cuencas cretácicas impidió el aporte de sedimentos primarios del cratón.

Palabras clave: Cuenca del Catatumbo, procedencia sedimentaria, Cordillera Oriental, Macizo de Santander, Escudo de Guayana, sedimentos retrabajados

INTRODUCCIÓN

La proveniencia sedimentaria involucra diferentes disciplinas tales como mineralogía, geoquímica, geocronología, sedimentología, petrología ígnea y metamórfica. Su objetivo abarca la localización y establecer la naturaleza geológica de áreas fuentes de sedimentos, los procesos de transporte del material hasta su lugar de acumulación y los factores que controlan los procesos sedimentarios, entre los cuales se destacan la tectónica, la denudación postorogénica y el clima (e.g. Haughton et al., 1991; Houg et al., 2018; Li et al., 2018).

La cuenca del Catatumbo es la extensión suroeste de la cuenca de Maracaibo, la cual es considerada como la cuenca más prolífica en hidrocarburos del hemisferio occidental Según la delimitación de cuencas sedimentarias de Colombia realizada por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH, Barrero et al., 2007), está localizada en el noreste de Colombia, en el departamento de Norte de Santander, limitada por la Serranía del Perijá en el norte, por los Andes de Mérida al sureste y el macizo de Santander al oeste (Figura 1).

El estudio de la evolución de la cuenca del Catatumbo permite establecer por lo menos tres episodios tectónicos que controlaron su geometría y arquitectura: 1) rifting jurásico, 2) margen continental pasivo cretácico, y 3) formación de cuenca tipo foreland desde el Maastrichtiano tardío y durante el Cenozoico asociada al levantamiento y erosión del cinturón orogénico Andino, incluyendo los Andes de Mérida, la serranía del Perijá y el macizo de Santander, producto de la colisión de un arco del Caribe con el cratón Sur Americano (e.g. Erlich y Barrett, 1990; Escalona y

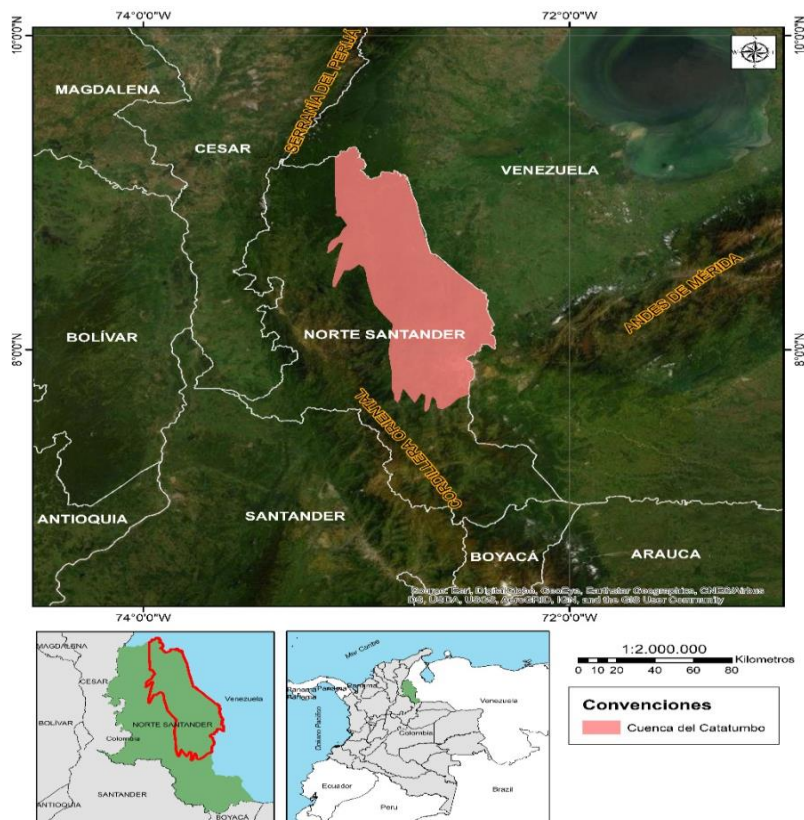
Mann, 2006; Lugo y Mann, 1995; Mann et al., 2006; Pindell y Barrett, 1990, Pedraza y Ramírez, 2011).

El basamento de esta cuenca está constituido por rocas metamórficas Proterozoicas y Paleozoicas, cubiertas por una cobertera Paleozoica con contenido de fauna marina. La sucesión estratigráfica continua con rocas sedimentarias y plutónicas de edad jurásica, rocas sedimentarias marinas, clásticas y carbonatos del Cretácico, y principalmente depósitos fluviales acumulados durante el Cenozoico (e.g. Pedraza y Ramírez, 2011).

Estudios previos (Castillo et al., 2012) interpretan dos tendencias principales en la proveniencia sedimentaria de las unidades paleógenas de la cuenca del Catatumbo. La primera asociada con las rocas maduras del Paleoceno inferior (Formación Barco) y Eoceno inferior a medio (Formación Mirador) y la segunda tendencia pertenece a las areniscas inmaduras Paleoceno superior (Formación Cuervos) y Eoceno superior (Formación Carbonera). Sin embargo, aún no se conoce información sobre la proveniencia sedimentaria de las unidades neógenas y cuaternarias, la cual permitiría entender la evolución de la cuenca a lo largo del Cenozoico. Análisis termocronológicos en apatitos reportan edades entre 3 - 0.5 Ma, que indican procesos de exhumación, y edades no reseteadas entre 247 – 140 Ma, asociadas a un enterramiento somero (Castillo et al., 2012). Estos resultados son interpretados por Castillo et al., (2012) como las edades de eventos diferenciados de levantamiento y enterramiento que delimitaron la cuenca, sin embargo, para corroborar esta hipótesis es necesario realizar estudios integrados de procedencia sedimentaria en las diferentes unidades que rellenan la cuenca con el objetivo de establecer los cambios de ambientes sedimentarios y la evolución de las fuentes de aporte de sedimentos durante el

Cenozoico, integrando completamente la evolución tectónica de la cuenca del Catatumbo.

El objetivo principal de este trabajo es reconstruir la paleogeografía de la parte sur de la cuenca del Catatumbo a partir de los cambios en los ambientes sedimentarios y la evolución geológica de las fuentes de aporte durante el Cenozoico. Utilizamos petrografía sedimentaria y análisis de las asociaciones de minerales densos en las diferentes unidades litoestratigráficas que rellenan la cuenca del Catatumbo, específicamente aquellas que afloran en la zona sur y oeste de la cuenca. Posteriormente, integramos la información obtenida para relacionarla con implicaciones tectónicas asociadas al levantamiento de la parte norte de la Cordillera Oriental, serranía de Perijá y los Andes de Mérida.



1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Reconstruir la paleogeografía del área de estudio a partir de los cambios composicionales en los ambientes sedimentarios y la evolución geológica de las fuentes de aporte durante el Cenozoico.

1.2. Objetivos específicos

1.2.1. Generar un modelo de evolución geológica de la cuenca del Catatumbo para el Cenozoico.

1.2.2. Determinar la litología de las fuentes de aporte durante la evolución cenozoica de la cuenca del Catatumbo por medio del análisis de la composición de los minerales densos en las areniscas que rellenan la cuenca.

1.2.3. Definir las distintas áreas de aporte de sedimentos a la cuenca.

1.2.4. Establecer cambios composicionales a partir de la petrografía de areniscas que rellenan la cuenca y relacionarlos con cambios en el marco tectónico regional.

2. LOCALIZACIÓN

El área de estudio es la zona sur de la Cuenca del Catatumbo, la cual se encuentra en el flanco oriental de la Cordillera Oriental de Colombia, en el departamento de Norte de Santander, cerca de los municipios de Cúcuta, El Zulia, Los Patios, Sardinata y Ocaña. La cuenca del Catatumbo puede ser considerada una subcuenca ya que representa la extensión suroeste de la cuenca de Maracaibo en Venezuela, y está

limitada por la Serranía del Perijá en el norte, por los Andes de Mérida al sureste y el macizo de Santander al oeste (

Figura 1).

3. METODOLOGÍA

La metodología usada en este trabajo consistió en 4 fases, como se describe en la Figura 2.

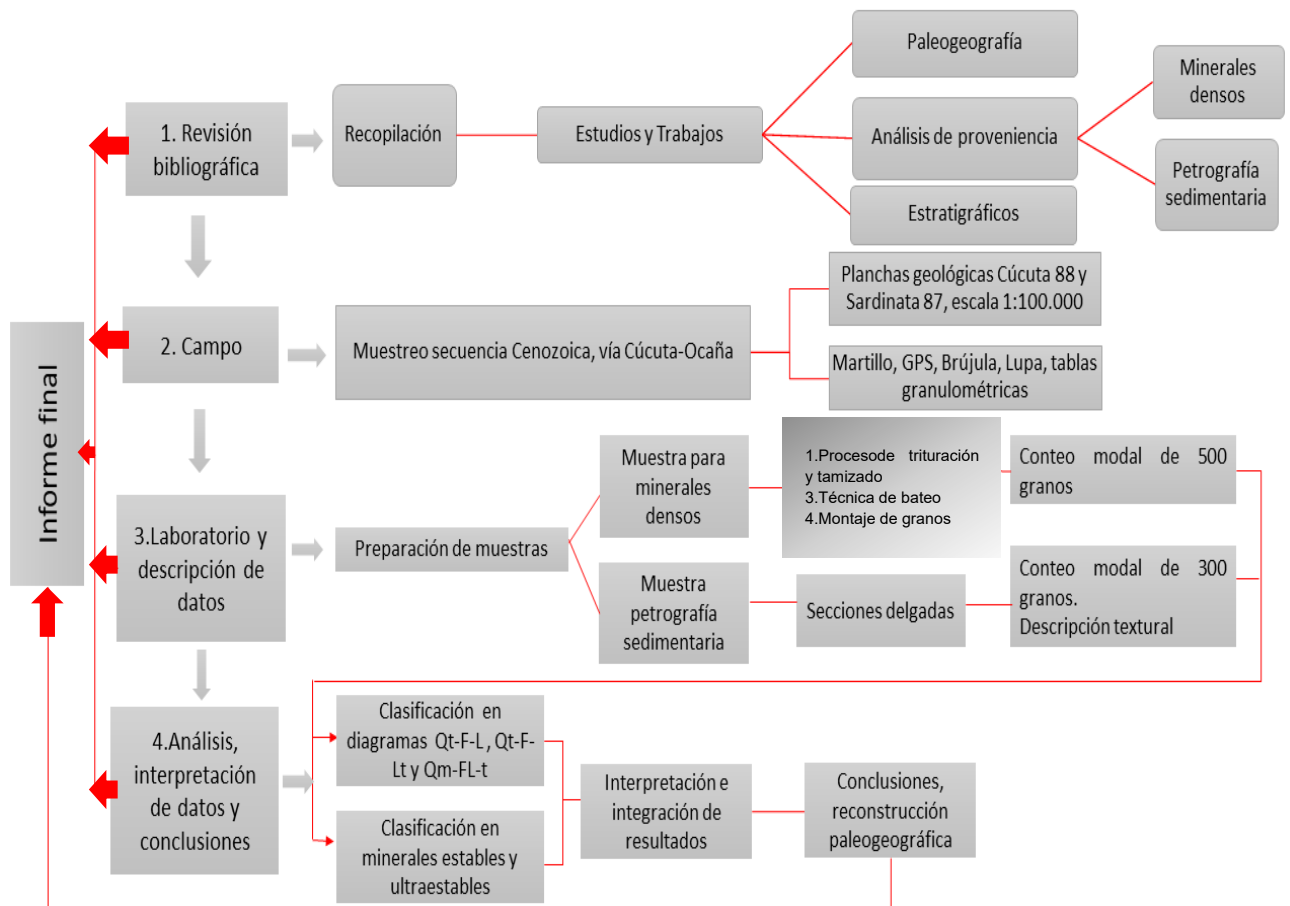


Figura 2. Esquema de la metodología utilizada en la presente investigación.

Fase 1. Recopilación

Esta fase comprendió la compilación y análisis de información y material bibliográfico, referente a trabajos estratigráficos, análisis de proveniencia de sedimentos, trabajos petrográficos y paleogeográficos realizados en la Cuenca del Catatumbo.

Fase 2. Campo

La fase de campo comprendió la identificación de la secuencia cenozoica presente en la cuenca del Catatumbo entre la vía Cúcuta-Ocaña. En la transecta se tomaron 12 muestras de areniscas pertenecientes a las unidades cenozoicas (Tabla 1). Para el reconocimiento de campo utilizamos las planchas 87- Sardinata y 88 – Cúcuta, escala 1:100.000, del Servicio Geológico Colombiano (Figura 3).

Tabla 1. Muestras recolectadas en la transecta Cúcuta – Ocaña, indicando coordenadas de localización y la unidad litoestratigráfica a la que pertenecen, en paréntesis se indica la abreviatura usada en el mapa geológico del Servicio Geológico Colombiano.

Muestra	Unidad	Edad	Coordenadas
HC-04	Cuaternario (Q2fe)		8° 5'35.50"N, 72°35'23.90"O
HC-05	Fm. Guayabo superior (N1N2g)	Mioceno medio-Plioceno	7°55'43.70"N, 72°34'45.40"O
HC-07	Fm. Guayabo (N1N2g)	Mioceno medio-Plioceno	7°57'9.13"N, 72°32'16.90"O
HC-m#01	Fm. Guayabo Inferior (N1N2g)	Mioceno medio-Plioceno	7°51'36.20"N, 72°31'41.00"O
HC-06	Fm. León (E3N1)	Oligoceno-Mioceno inferior	7°57'11.10"N, 72°28'58.40"O
HC-08	Fm. Carbonera (E2E3c)	Eoceno superior	7°51'32.37"N, 72°31'30.16"O
HC-m#05	Fm. Mirador (E2m)	Eoceno medio a superior	7°54'22.80"N, 72°39'25.00"O
HC-m#04	Fm. Los Cuervos (E1E2c)	Paleoceno superior	7°54'19.69"N, 72°39'39.60"O

HC-m#03	Fm. Barco (E1b)	Paleoceno medio	7°54'16.82"N, 72°39'52.36"O
HC-m#02	Fm. Catatumbo (K6Elct)	Maastrichtiano-Paleoceno inferior	7°54'14.40"N, 72°40'22.40"O
HC-02	Fm. Catatumbo (K6Elct)	Maastrichtiano-Paleoceno inferior	8° 6'17.90"N, 72°46'44.50"O

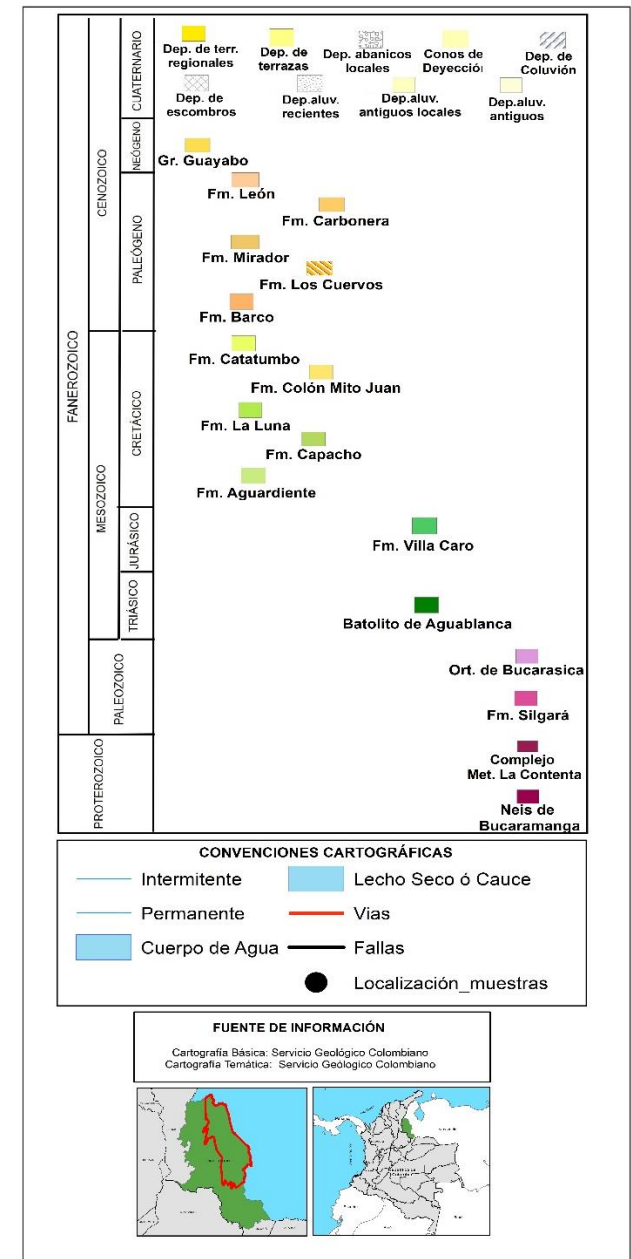
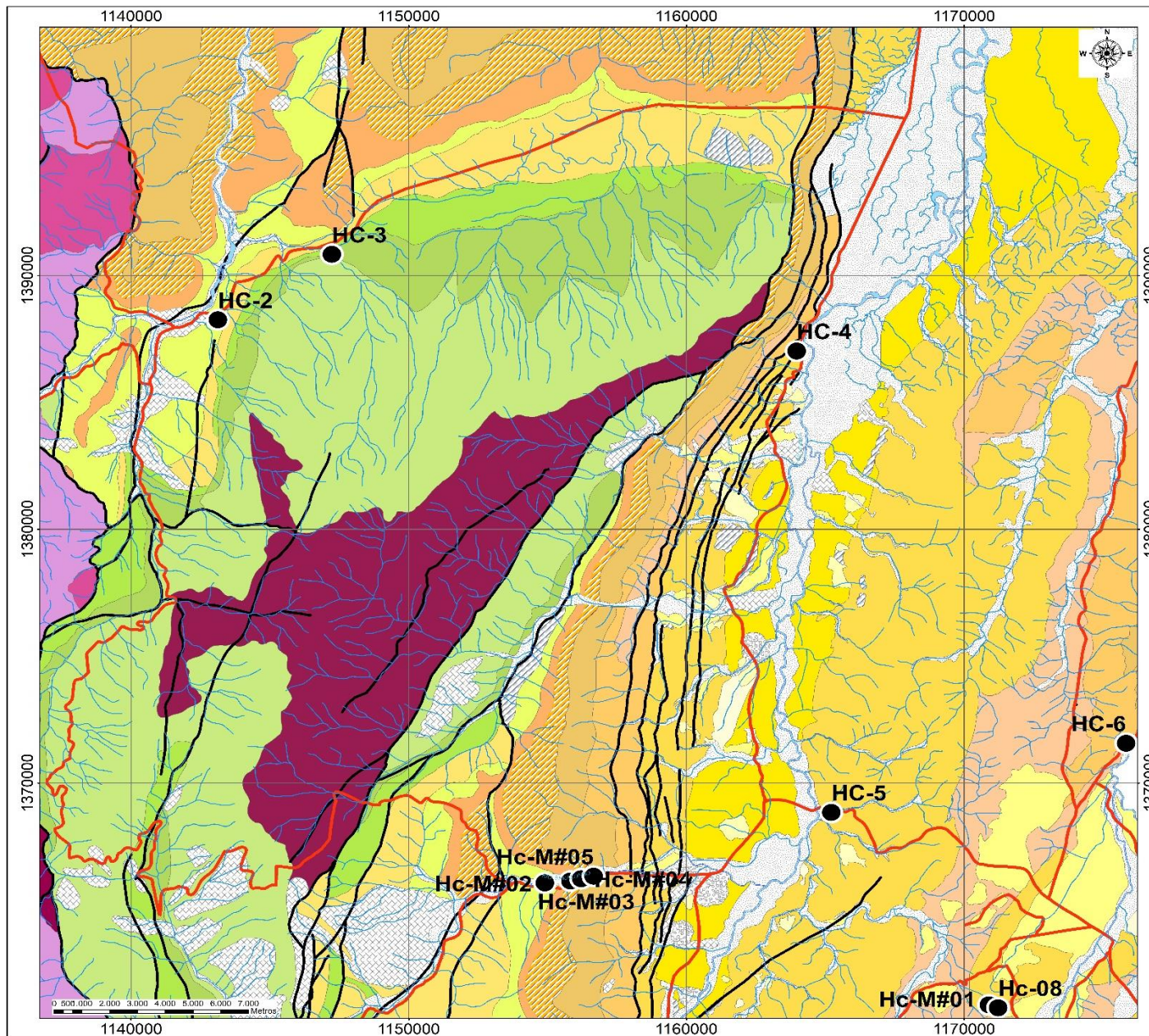


Figura 3. Mapa geológico con las estaciones de campo. Ver Anexo 1.

Fase 3. Laboratorio

- **Petrografía**

En esta fase se describieron 8 secciones delgadas en un microscopio petrográfico convencional de luz transmitida, donde se determinaron características texturales (tamaño de grano, redondez y selección), correspondientes a las formaciones Catatumbo (Maastrichtiano-Paleoceno inferior), Barco (Paleoceno medio), Los Cuervos (Paleoceno superior), Mirador (Eoceno medio a superior), Carbonera (Eoceno superior), León (Oligoceno-Mioceno inferior) y Grupo Guayabo (Mioceno medio-Plioceno) (Tabla 1).

El estudio composicional de areniscas es una herramienta útil para caracterizar el área de procedencia de los sedimentos (Dickinson et al., 1985), se determinaron 14 categorías de granos del armazón, posterior a esto se realizó un conteo de 300 puntos del armazón utilizando el método Gazzi-Dickinson para eliminar los problemas de la variación de la composición por el tamaño de grano (Ingersoll et al., 1984).

Tabla 2. Categorías de grano identificados en los análisis petrográficos.

Abrev.	Nombre	Descripción
Qm	Cuarzo Monocristalino	Granos constituidos por un solo cristal de cuarzo, que presenta extinción recta.
Qmo	Cuarzo Monocristalino ondulatorio	Granos constituidos por un solo cristal de cuarzo, que presenta extinción ondulatoria.
Qmr	Cuarzo Monocristalino recto	Granos constituidos por un solo cristal de cuarzo, que presenta extinción recta.
Qp1-2	Cuarzo Policristalino 1-2	Granos con 1-2 agregado de cristales de cuarzo.
Qp3<	Cuarzo Policristalino 3<	Granos con 3 o más agregados de cristales de cuarzo.
Qpf	Cuarzo Policristalino foliado	Granos agregados de cristales de cuarzo que se encuentran alargados y alineados.
C	Chert	Cuarzo microcristalino, en nicoles paralelos es grisáceo.
P	Plagioclasas	Grano con forma subhedral y maclas, en algunos casos presenta alteración.

K	Feldespato potásico	Grano que en nicoles paralelos es de tono amarillo terroso, presenta figura de interferencia biáxica.
Lv	Lítico volcánico	Cristales muy finos embebidos en matriz cristalina.
Ls	Lítico sedimentario	Fragmentos finogranulares, en nicoles paralelos se observan colores oscuros o pardos
Lm	Lítico metamórfico	Fragmentos con cierta foliación cuarzomicáceos
M	Micas	Granos tabulares, con extinción tipo ojo de pájaro.
Acc	Accesorios	Minerales densos como zircón, rutilo, turmalina, además minerales opacos.

- **Análisis de minerales densos**

Los minerales densos son aquellos componentes accesorios, caracterizados por presentar densidades por encima de 2.82 gr/cm^3 . Estos minerales son de gran utilidad en los estudios de sedimentación relacionados con el levantamiento tectónico ya que ayudan a determinar la procedencia de sedimentos para determinar y reconstruir la naturaleza y el carácter de las áreas fuente (Mange y Maurer, 1992). Se analizaron 12 muestras (Tabla 1), que fueron procesadas en los laboratorios de la universidad EAFIT. Las muestras de roca fueron fragmentadas en partículas pequeñas ($5\text{mm}>$) por medio de una trituradora de mandíbulas obteniendo aproximadamente 500g de muestra, posteriormente fueron tamizadas entre 400 y $63 \mu\text{m}$, y usamos el método de

batea para separar minerales densos de los minerales livianos en esta fracción (Figura 4). Finalmente, el montaje de granos se realiza en un portaobjetos con una solución de recubrimiento con índice de refracción $n_x = 1.539$.



Figura 4. Montaje de tamices para separar los tamaños de granos.

Para el conteo de minerales densos se utilizó un microscopio petrográfico convencional de luz transmitida. Se realiza un conteo de 500 puntos, usando el método de cinta (Mange y Maurer., 1992), el cual consiste en seleccionar una banda al azar en el portaobjetos y hacer un barrido en el microscopio registrando y clasificando los minerales presentes en este rango.

Fase 4. Interpretación y conclusiones

Finalmente, después de obtener los resultados de conteos modales y características texturales de las muestras analizadas, se normalizaron los porcentajes de los componentes del armazón y se establecieron 3 categorías: Cuarzo total (Qt), feldespatos (F) y líticos totales (Lt) (Tabla 3). Posteriormente, se procedió a clasificarlas en los diagramas ternarios QtFL propuesto por Folk (1974), QtFLt y QmFLt propuestos por Dickinson (1985). Adicionalmente, se integran los datos obtenidos por el conteo de minerales densos identificando las variaciones de los porcentajes de estos minerales a través del registro estratigráfico.

Por último, al integrar los resultados de los conteos de minerales densos y conteos modales en los diagramas ternarios anteriormente descritos, se procedió a la interpretación de estos y se concluyó sobre la evolución de la procedencia sedimentaria de la secuencia cenozoica de la cuenca del Catatumbo y su relación con la evolución tectónica regional. Dichas interpretaciones son plasmadas en modelos paleogeográficos regionales del área de estudio.

4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

4.1. Geología regional

Los Andes del Norte de Colombia se dividen en el Escudo Guyanés (GSR), Subplaca Central Continental (CCSP), Tectónico Occidental (WTR) y Subplaca Maracaibo (MSP). Este capítulo se centra en el bloque tectónico MSP, el cual es un segmento de la parte más Noroeste del Escudo de Guyana (GSR), compuesto de provincias lito-tectónicas y morfoestructurales que incluye la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), Sierra de Mérida (ME), Serranía del Perijá (SP) y Macizo de Santander (MS), además de las cuencas Cesar-Ranchería (CR) y cuenca Maracaibo (incluyendo la subcuenca del Catatumbo). Las provincias mencionadas anteriormente (SNSM, ME, SP), comenzaron su levantamiento en el Cretácico tardío, debido al desplazamiento y migración del Bloque Maracaibo hacia el NO, asociado a los sistemas de fallas Santa Marta- Bucaramanga y Oca-El pilar (Cediel & Shaw, 2018).

La cuenca del Catatumbo presenta un basamento ígneo-metamórfico correspondiente al Macizo de Santander, el cual está compuesto por el Neis de Bucaramanga, Esquistos de Silgará y Ortoneis de Berlín de edades precámbricas y paleozoicas, además del Batolito de Agua Clara de edad Jurásica (Amaya, 2016;

Pedraza y Ramírez., 2011). La evolución geológica de la cuenca se puede dividir en cuatro etapas, 1) una fase de rifting durante el Triásico-Jurásico que separó Norteamérica y Sudamérica, asociado a la ruptura de Pangea (Pindell et al., 1988; Sarmiento Rojas, 2001; Pedraza y Ramírez.,2011), en donde se acumularon los sedimentos de las formaciones La Quinta y Girón. 2) En el Cretácico, relacionado a un evento de subsidencia térmica, la margen occidental de Sudamérica sufrió eventos marinos transgresivos (Macellari, 1988; Caballero et al., 2010), donde se acumularon de las formaciones Río Negro, Tibú, Mercedes, Aguardiente, Capacho, La luna, Colón, Mito-Juan y el miembro inferior de la Formación Catatumbo (Pedraza y Ramírez., 2011). 3) En el límite Maastrichtiano-Paleoceno se da el inicio de una fase transicional, relacionada a la colisión de la placa Pacífica y la margen occidental de la placa de Sudamérica originando un sistema de cuencas foreland permitiendo la acumulación de las formaciones Catatumbo (miembro superior), Barco, Los Cuervos, Mirador, Carbonera y León (Ward et al., 1973; Pindell et al., 1988; Pedraza y Ramírez., 2011). 4) Durante el Neógeno ocurre la inversión tectónica en la cuenca originando el levantamiento de los Andes de Mérida, Cordillera Oriental y Serranía del Perijá, asociado a la colisión oblicua y deformación de la placa Caribe y del Arco de Panamá a lo largo del margen pasivo del norte de Suramérica (e.g. Pedraza y Ramírez., 2011). Esta fase es dominada por subsidencia flexural y se deposita el Grupo Guayabo (Pedraza y Ramírez., 2011).

4.2. Estratigrafía

La cuenca del Catatumbo está constituida por una sucesión de unidades litológicas que comprende un basamento cristalino proterozoico y paleozoico, rocas ígneas y sedimentarias jurásicas, y depósitos fluviales acumulados durante el Cenozoico (Barrero et al., 2007) (Figura 5).

PERIODO	EPOCA	EDAD	Ma	ESPESOR	UNIDADES	LITOLOGÍA				MUESTRAS	
						Arcilla	Limo	Arena			Gr
						MF	F	M	G	Mg	
CUATERN.	PLEIST.		0.01		Depósitos Cuat.					Hc-04	
	PLIOCE.		2.9	>160	Fm. Necesidad						
NEOGENO	MIOCENO	L	5.3	1500-8500	Grupo Guayabo					Hc-M#1, Hc-05, Hc-07	
		M	11.6								
		E	16.0								
PALEOGENO	OLIGOC.	L	23.0	1135-1718	Fm. León					Hc-06	
		E	28.4								
	EOCENO	L	33.9	1309-2210	Fm. Carbonera					Hc-08	
		M	40.4	426-1485	Fm. Mirador					Hc-M#5	
		E	48.6								
		L	55.8	718-1136	Fm. Los Cuervos					Hc-M#4	
		M	58.7	288-897	Fm. Barco					Hc-M#3	
	E	61.7									
	PALEOC.	E	65.5	480-1362	Fm. Catatumbo					Hc-02, Hc-M#2	

Figura 5. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca del Catatumbo. Modificado de Barrero et al., 2007.

Este estudio se centra en la secuencia depositada durante el Cenozoico en el Catatumbo, las cuales corresponden a las formaciones Catatumbo, Barco, Los Cuervos, Mirador, Carbonera, León y el Grupo Guayabo.

4.2.1. Formación Catatumbo

La Formación Catatumbo está constituida por capas medias a gruesas de lodolitas grises oscuras a negras con presencia de niveles calcáreos, micáceos, fosilíferos, con laminación plano-paralela y presencia de nódulos ferruginosos paralelos a la estratificación. En algunos sitios es posible observar una sucesión de areniscas cuarzosas de grano medio que varían de espesor entre los 106 m y 208 m (Notestein et al., 1944 y Sutton, 1946). Las Formaciones Colón y Mito-Juan infrayacen a la Formación Catatumbo en un contacto neto concordante. La Formación Barco suprayace a la misma en un contacto transicional concordante (SGC, 2016).

4.2.2. Formación Barco

La Formación Barco se encuentra en un rango entre 150 a 278 metros de espesor (Notestein et al., 1944; Sutton, 1946). Está constituida por litoarenitas y arenitas cuarzosas de grano fino intercaladas con lodolitas arenosas y lodolitas de coloración gris. Presenta ocasionalmente nódulos ferruginosos (SGC, 2016).

Esta unidad infrayace a la Formación Los Cuervos con la cual presenta un contacto concordante transicional. Así mismo, suprayace la Formación Catatumbo con la cual se caracteriza igual tipo de contacto (SGC, 2016).

Notestein et al., (1944), asigna a la Formación Barco edades del Eoceno Temprano basado en datos palinológicos. En contraste, Van Der Hammen (1958) a través de resultados palinológicos establece edades del Paleoceno temprano para la Formación Barco.

4.2.3. Formación Los Cuervos

Litológicamente, esta unidad presenta arenitas de grano fino a medio, bioturbadas, cuarzo arenitas, lodolitas calcáreas con presencia de concreciones, lodolitas arenosas y ocurrencia de mantos de carbón de hasta 80 cm de espesor (SGC, 2016). Notestein et al. (1944) y Sutton (1946) proponen que el espesor de esta Formación varía en un rango entre 345 a 490 metros.

La Formación Los Cuervos se encuentra en contacto concordante transicional con la Formación Barco, la cual suprayace. Igualmente, exhibe un contacto concordante con la Formación Mirador, la cual infrayace (SGC, 2016).

Esta unidad litoestratigráfica reporta la presencia de polen en capas carbonáceas, con base en esto Trump y Salvador (1964) reportan una edad del Paleoceno, sin embargo, Van Der Hammen (1958) sugiere un intervalo de edad que va del Paleoceno medio al Eoceno temprano.

4.2.4. Formación Mirador

La Formación Mirador exhibe cuarzo arenitas de grano fino a medio, dispuestas en capas tabulares con presencia de niveles conglomeráticos (SGC, 2016), cuyo espesor varía entre 160 a 400 metros (Notestein et al., 1944).

Según Notestein et al. (1944), la Formación Mirador presenta una inconformidad angular con la Formación Los Cuervos, la cual se encuentra suprayaciendo. En contraste, Rodríguez et al., (2006) proponen un contacto neto y erosivo. La Formación Mirador infrayace la Formación Carbonera con la cual presenta contacto concordante transicional.

A través de evidencias palinológicas, Van Der Hammen (1958) sugiere una edad del Eoceno temprano y Eoceno medio para la Formación Mirador.

4.2.5. Formación Carbonera

Esta unidad comprende lodolitas y arcillolitas de coloración gris intercaladas con capas de cuarzo arenita de grano fino a medio, con ocurrencia de capas de carbón de hasta 15 cm de espesor (SGC, 2016). El espesor de la Formación Carbonera se encuentra en un promedio de 500 metros, pero en algunos sectores como en Río Nuevo, al occidente de Sardinata, alcanza los 720 metros (Notestein et al., 1944).

La Formación Carbonera infrayace la Formación León, con un contacto concordante transicional. También suprayace la Formación Mirador con la cual se establece contacto concordante transicional (SGC, 2016).

Usando datos palinológicos, Notestein et al. (1944), establece una edad de Eoceno tardío a Oligoceno medio para la Formación Carbonera. Sin embargo, Van Der Hammen (1958), sugiere edad de Eoceno tardío para la parte inferior y Oligoceno temprano para la parte superior de esta Formación.

4.2.6. Formación León

La Formación León está constituida por shales con tonalidades grisáceas y verdosas, arcillolitas ocasionalmente con presencia de planos de oxidación y lentes de yeso (SGC, 2016). El espesor de esta unidad litoestratigráfica varía entre 510 a 785 metros (Notestein et al., 1944).

La Formación Carbonera infrayace a la Formación León, con la cual se encuentra en contacto concordante transicional, según González et al. (1980). Igualmente, la Formación León infrayace a el Grupo Guayabo con el que presenta un contacto similar que con la Formación Carbonera.

Van Der Hammen (1957), propone para la Formación León una edad de Oligoceno tardío, mientras que González et al., (1980), en general describe que el intervalo de lutitas que caracteriza la Formación León contiene niveles con foraminíferos de aguas salobres, formas redepositadas en su parte inferior e intervalos con moluscos marinos que permiten sugerir edad Mioceno.

4.2.7. Grupo Guayabo

El Grupo Guayabo se compone de arenitas lodosas de granos muy finos a finos con bioturbación, lodolitas arenosas, lodolitas y arcillolitas varicoloreadas; intercaladas con cuarzo arenitas de granos finos a medios, arenitas lodosas y arenitas conglomeráticas (SGC, 2016). Se reportan espesores para esta unidad litoestratigráfica en los sectores de la quebrada León con 803 metros, en sectores al SE de Cúcuta en las quebradas Juan Paula y Juan Frio se midió una sección con un espesor de aproximadamente 2640 metros (Notestein et al., 1944).

El Grupo Guayabo suprayace la Formación León con la cual presenta un contacto concordante transicional. Así mismo, el Grupo Guayabo infrayace los diferentes depósitos cuaternarios caracterizados en la zona con los cuales exhibe contacto discordante neto (SGC, 2016).

De acuerdo con fósiles recolectados por geólogos de la Compañía de Petróleos de Texas (Texas Petroleum Company) en el NW de Cúcuta, Notestein et al. (1944), considera edades de Mioceno inferior u Oligoceno superior en la parte basal del Grupo Guayabo. Posteriormente, James (1977), con base en el estudio de foraminíferos considera edades del Oligoceno tardío – Mioceno.

5. RESULTADOS

5.1. PETROGRAFÍA

El análisis petrográfico de areniscas consistió en un total de 8 secciones delgadas pertenecientes a la secuencia cenozoica de la Cuenca del Catatumbo. Siguiendo la metodología Gazzi – Dickinson (Ingersoll et al., 1984), se realizó un conteo de 300 puntos en cada sección delgada.

Tabla 3. Resultados del conteo y normalización de granos de Qt, F y Lt de los análisis petrográficos.

Muestra	Edad	Armazón (%)			Clasificación composicional
		Qt	F	Lt	
Gr. Guayabo (HC-07)	Mioceno medio-Plioceno	88	7	5	Subarcosa
Gr. Guayabo (HC-m#01)	Mioceno medio-Plioceno	82	8	10	Sublitoarenita
Fm. León (HC-06)	Oligoceno-Mioceno inferior	79	9	12	Sublitoarenita
Fm. Carbonera (HC-08)	Eoceno superior	89	6	5	Subarcosa
Fm. Mirador (HC-m#05)	Eoceno medio a superior	79	4	17	Sublitoarenita
Fm. Los Cuervos (HC-m#04)	Paleoceno superior	78	4	18	Sublitoarenita
Fm. Barco (HC-m#03)	Paleoceno medio	80	6	14	Sublitoarenita
Fm. Catatumbo (HC-m#02)	Maastrichtiano-Paleoceno inferior	92	2	6	Sublitoarenita

Petrográficamente, las muestras analizadas se clasificaron en 2 petrofacies, corresponden a subarcosas y sublitoarenitas (Figura 6).

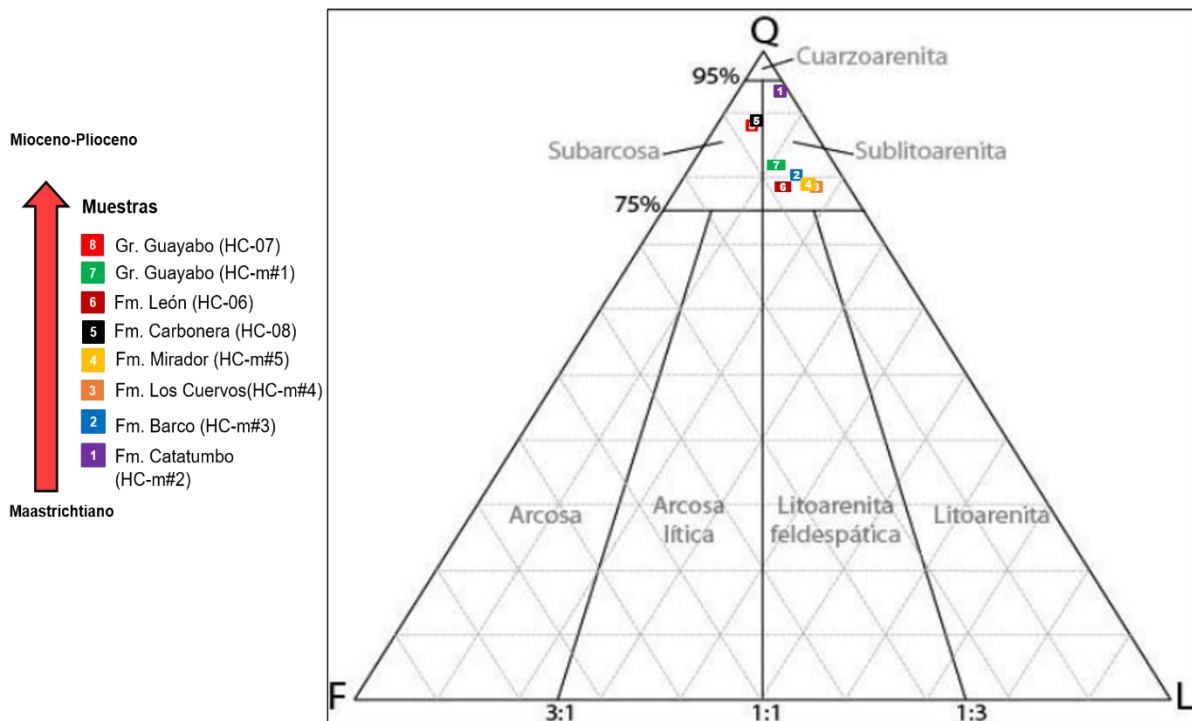


Figura 6. Diagrama ternario de clasificación de areniscas para la secuencia cenozoica en el Catatumbo; campos composicionales según Folk (1974).

Las muestras se clasificaron según su procedencia usando los diagramas ternarios propuestos por Dickinson (1985) en orógeno reciclado, distribuyéndose entre cuarzoso reciclado y cratón interior (Figura 7).

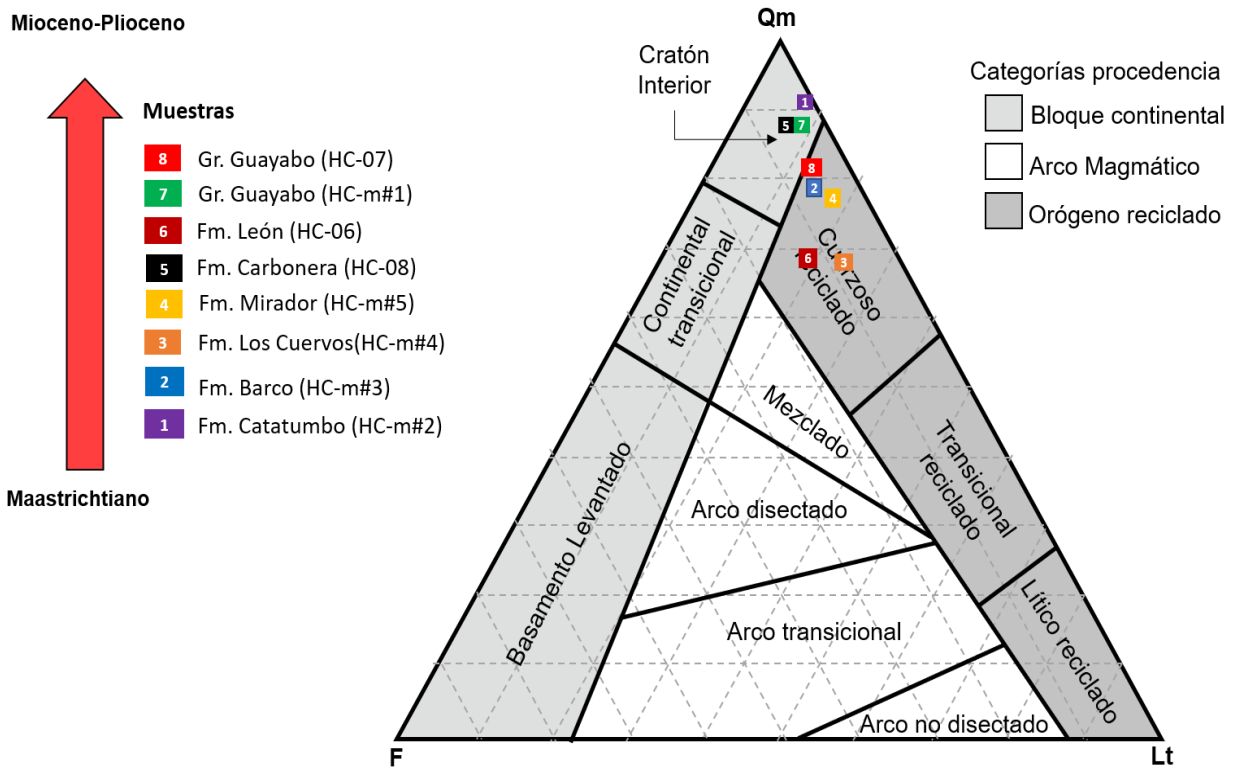
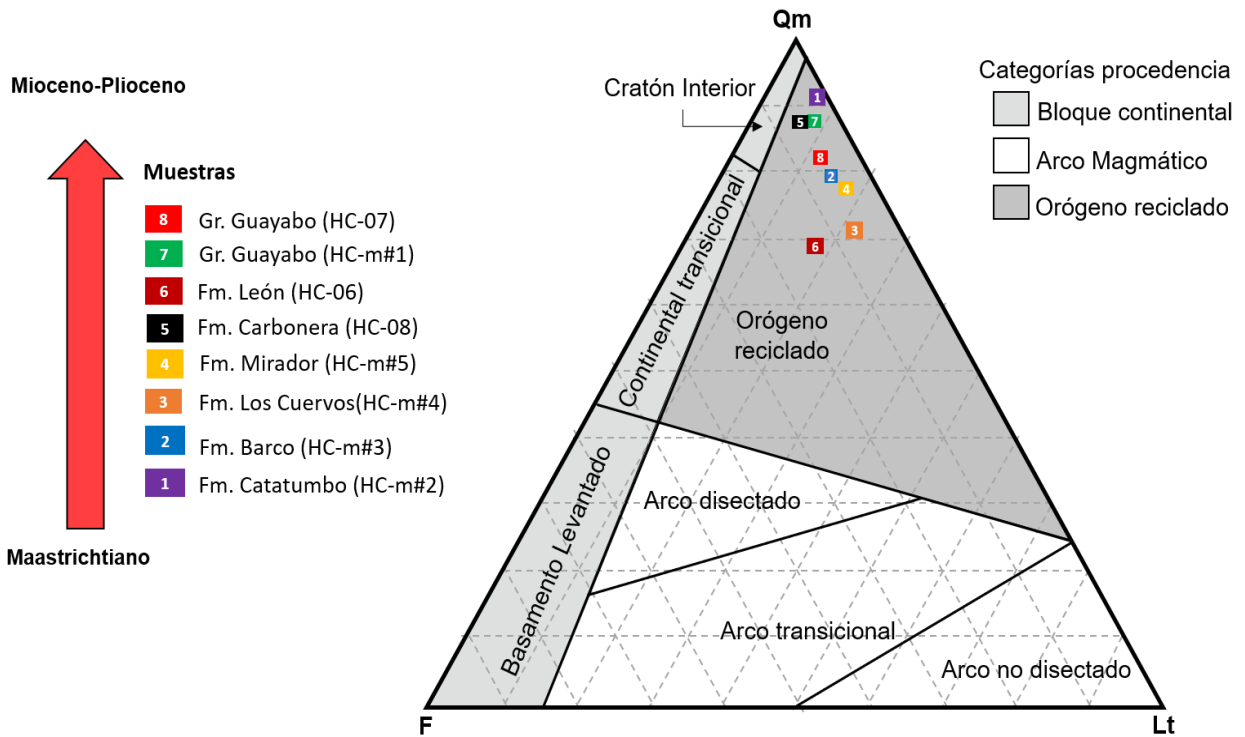


Figura 7. Diagramas ternarios de procedencia de la secuencia del Cenozoica del Catatumbo (Dickinson, 1985).

Los resultados del conteo de la naturaleza de los cuarzos (Basu, 1975; Tortosa et al., 1991) se presenta en la Tabla 4. Se evidencia el predominio de granos de cuarzo monocristalino con extinción ondulatoria, seguido de cuarzo monocristalino con extinción recta y finalmente cuarzo policristalino con más de tres granos.

Tabla 4. Resultados del conteo y normalización de la naturaleza de los cuarzos (Basu, 1975; Tortosa et al., 1991)

Muestra	Edad	Tipos de cuarzo (%)			
		Qp 2 - 3	Qp +3	Qm (recto)	Qm (ondulatorio)
Gr. Guayabo (HC-07)	Mioceno medio-Plioceno	0	8	17	75
Gr. Guayabo (HC-m#01)	Mioceno medio-Plioceno	0	7	23	70
Fm. León (HC-06)	Oligoceno-Mioceno inferior	0	28	29	43
Fm. Carbonera (HC-08)	Eoceno superior	0	3	35	62
Fm. Mirador (HC-m#05)	Eoceno medio a superior	0	4	26	70
Fm. Los Cuervos (HC-m#04)	Paleoceno superior	0	24	29	47
Fm. Barco (HC-m#03)	Paleoceno medio	0	5	39	56
Fm. Catatumbo (HC-m#02)	Maastrichtiano-Paleoceno inferior	0	17	36	47

La clasificación de la naturaleza de los cuarzos muestra un predominio de bajo grado de metamorfismo en toda la secuencia, como se puede observar en la Figura 8.

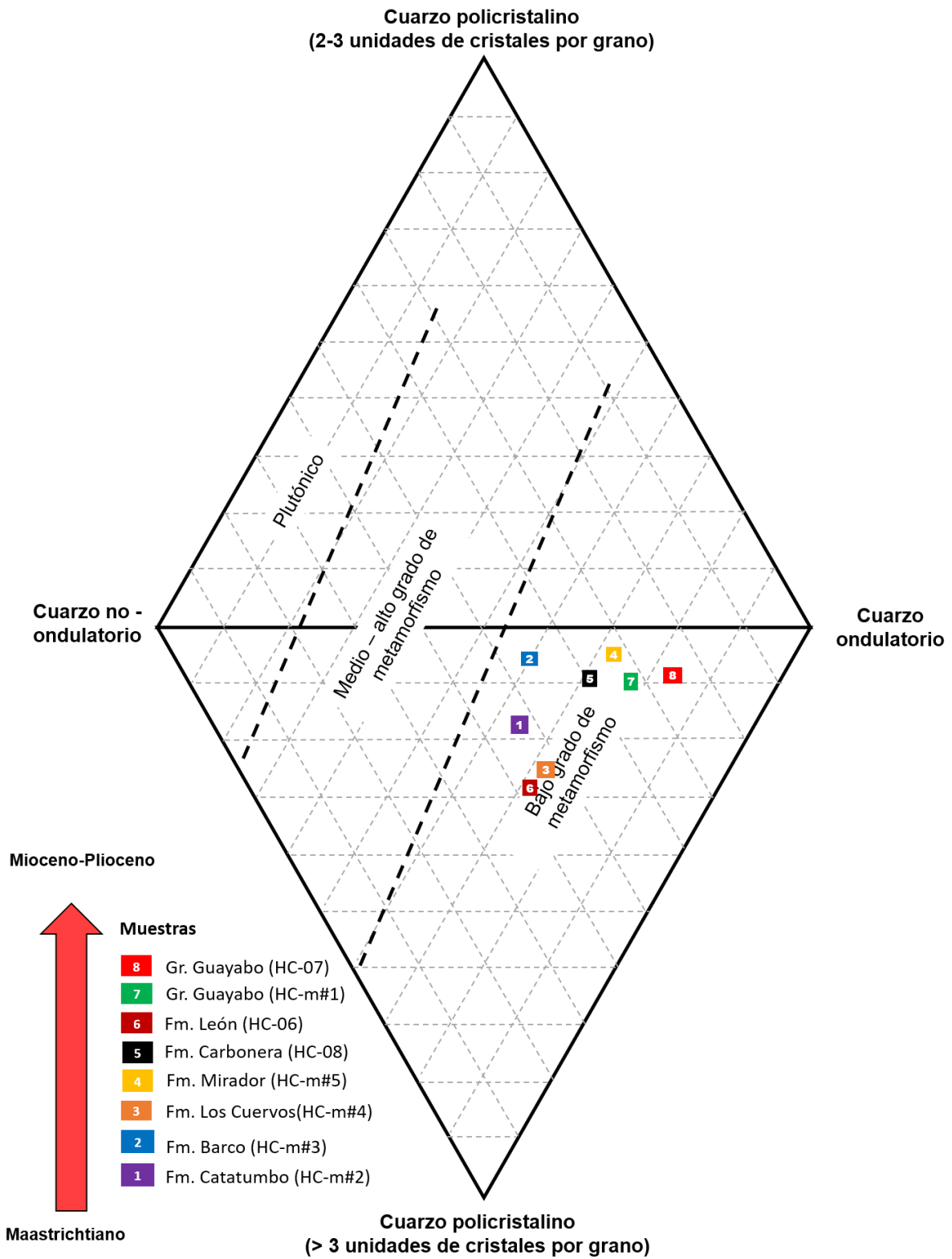


Figura 8. Diagramas de clasificación de la naturaleza de los cuarzos (Basu 1975; Tortosa et al., 1991).

5.1.1. Formación Catatumbo

El análisis de la Formación Catatumbo se realizó a través de la muestra representativa Hc-M#2 (Tabla 1). La muestra presenta un tamaño de grano que varía en general de fino a medio (0,1 mm – 1 mm), con forma subangular a subredondeada y mediana a alta esfericidad. La muestra es granosoportada (95% granos) y con muy buena selección.

Se clasificó como una sublitoarenita (Figura 9.A.), texturalmente la muestra presenta contactos completos (90%) y saturados (10%), en términos composicionales el cuarzo (92%) es el más abundante, seguido por los líticos (6%), en su mayoría son metamórficos y por último el feldespato (2%). Los cuarzos más abundantes son del tipo monocristalino con extinción ondulatoria (47%), los de menor abundancia son los policristalinos con más de 3 cristales (17%).

5.1.2. Formación Barco

Para el análisis de esta formación se utilizó la muestra representativa Hc-M#3 (Tabla 1). Se presenta un tamaño de grano que varía en general de fino a grueso (0,3 mm – 1 mm), con forma subangular a subredondeada y baja esfericidad. La muestra es granosoportada (90% granos) y con buena selección.

Se clasificó en la petrofacie sublitoarenita (Figura 9.B.) y texturalmente la muestra presenta contactos completos (85%) y saturados (15%). En cuanto a la composición, el mineral más abundante es el cuarzo (80%), seguido de los fragmentos líticos (14%), en su mayoría de líticos metamórficos y algunos líticos sedimentarios, finalmente el

feldespato potásico (6%). Los cuarzos más abundantes son del tipo monocristalino (95%), los de menor abundancia son los policristalinos (5%).

5.1.3. Formación Los Cuervos

El análisis de la Formación los Cuervos se realizó a través de la muestra Hc-M#4 (Tabla 1). Presenta un tamaño de grano que varía en general de fino a medio (0,1 mm – mm), con forma subangular a subredondeada y baja-media esfericidad. La muestra es granosoportada (88% granos) y con selección moderada.

Se clasificó como sublitoarenita (Figura 9.C.), la muestra presenta contactos puntuales (85%) y tangentes (15%), en términos composicionales la distribución es feldespato (4%), líticos (18%) con respecto a estos, se observan líticos metamórficos y un aumento en los líticos sedimentarios, el porcentaje de cuarzo es 78%, donde los más abundantes son del tipo monocristalino con extinción ondulatoria (47%), seguido por monocristalino con extinción recta (29%) y, por último, los de menor abundancia son los policristalinos con más de 3 cristales (24%). También se observan micas con cristales sub-euhedrales, en ocasiones deformados, además minerales accesorios como circón.

5.1.4. Formación Mirador

El análisis de la Formación Mirador se realizó a través de la muestra representativa Hc-M#5 (Tabla 1). El tamaño de grano en general que varía de fino a grueso (0,1 mm

– 1 mm), con forma subangular a subredondeada. La muestra es granosoportada (70% granos), con baja esfericidad y con buena selección.

Composicionalmente se clasifico como sublitoarenita (Figura 9.D.), presenta contactos puntuales (91%) y tangentes (9%). Además, el mineral más abundante es el cuarzo (79%), seguido de los fragmentos líticos (17%) y finalmente el feldespato potásico (4%).

Los líticos presentes en la formación se componen en su mayoría de líticos sedimentarios, en los cuales la mayoría corresponden a cuarzo chert. También se presentan líticos metamórficos. La abundancia del feldespato potásico es baja

5.1.5. Formación Carbonera

Para el análisis de esta formación se utilizó la muestra representativa Hc-08 (Tabla 1). El tamaño de grano en general que varía de grueso a muy grueso (1 mm – 2 mm), con forma subangular. La muestra es granosoportada (85% granos), con baja esfericidad y con buena selección.

Se clasificó como subarcosa (Figura 9.E.), y texturalmente se presentan contactos puntuales (84%) y tangentes (16%). El mineral más abundante es el cuarzo (89%), seguido del feldespato potásico (6%) y finalmente los fragmentos líticos (5%). Se aprecia un aumento en el contenido de feldespato potásico en comparación a las formaciones anteriores.

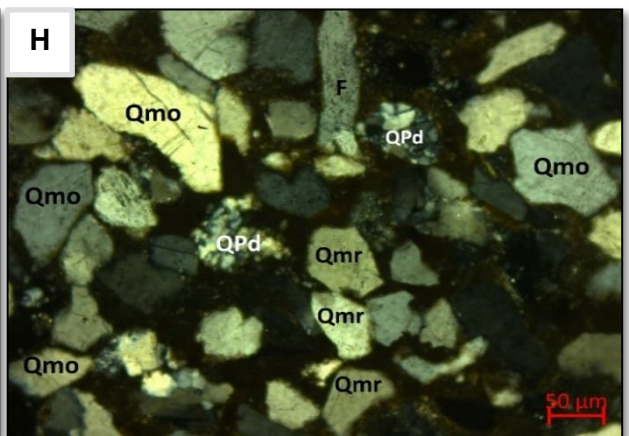
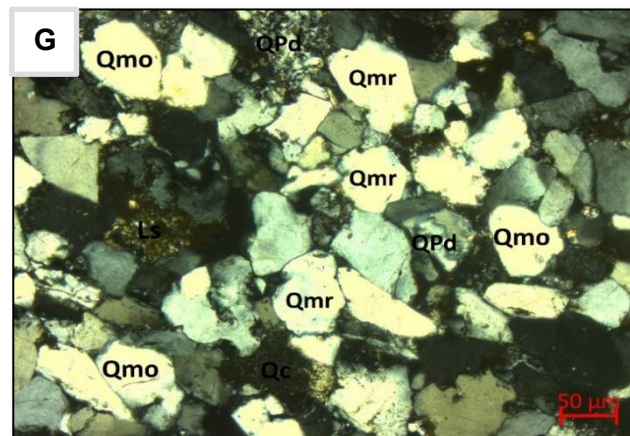
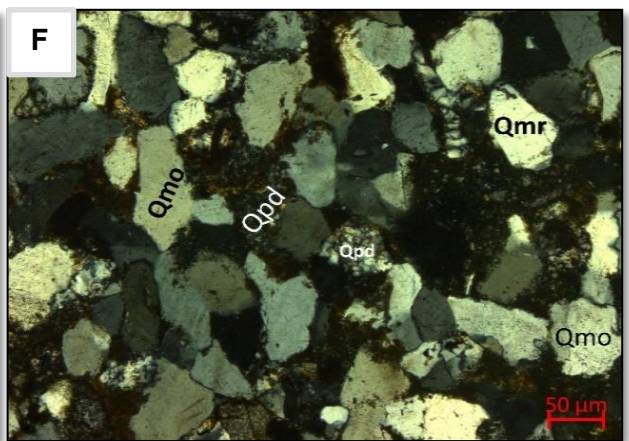
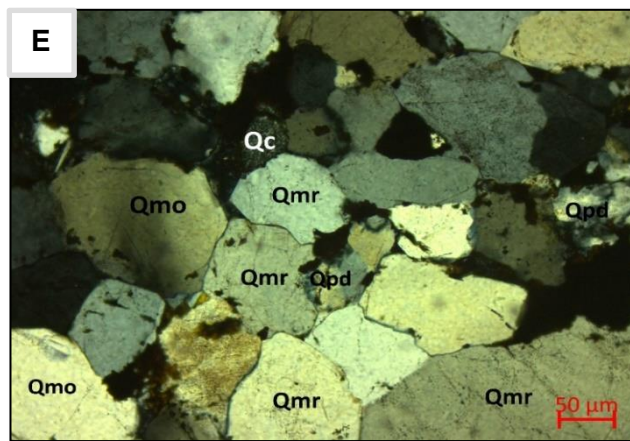
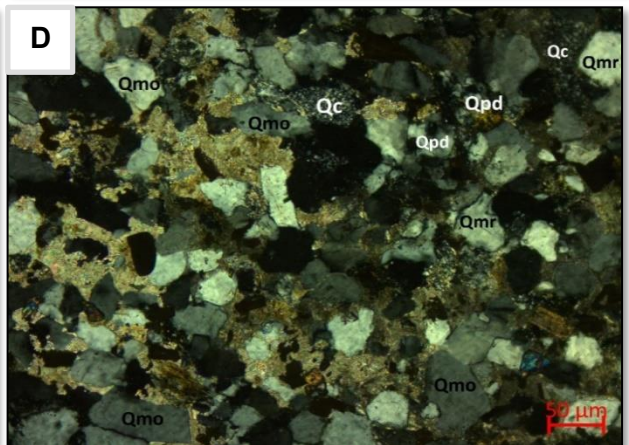
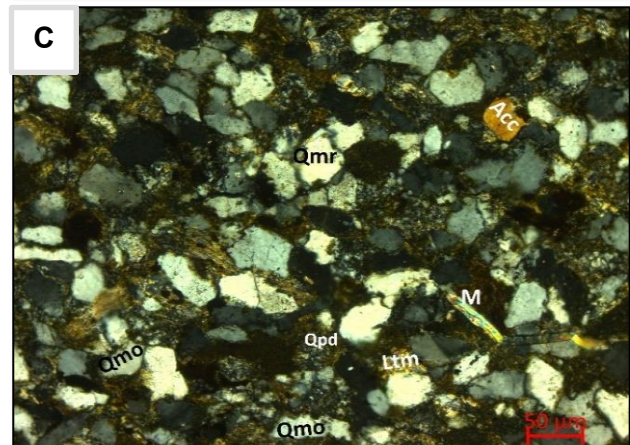
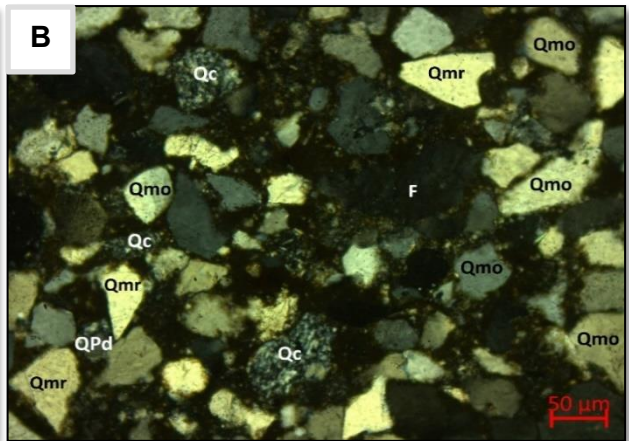
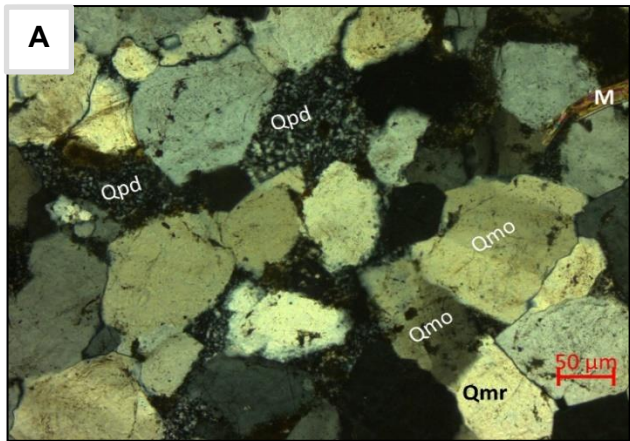


Figura 9. En general las muestras presentan cuarzo monocristalino con extinción ondulatoria (Qmo) y extinción recta (Qmr), además de cuarzo policristalino (Qpd), líticos sedimentarios compuestos de cuarzo chert (Qc) y finalmente líticos metamórficos (Lm) **A.** Muestra Hc-M#2 correspondiente a la Formación Catatumbo, **B.** Muestra Hc-M#3 correspondiente a la Formación Barco, **C.** Muestra Hc-M#4 correspondiente a la Formación Los Cuervos, **D.** Muestra Hc-M#5 correspondiente a la Formación Mirador, **E.** Muestra Hc-08 correspondiente a la Formación Carbonera, **F.** Muestra Hc-06 correspondiente a la Formación León, **G.** Muestra Hc-M#1 correspondiente al Grupo Guayabo, **H.** Muestra Hc-07 correspondiente al Grupo Guayabo.

5.1.6. Formación León

Para el análisis de esta formación se utilizó la muestra representativa Hc-06 (Tabla 1). Se observó en la muestra un tamaño de grano que varía en general de fino a medio (0,1 mm – 1 mm), con forma subangular a subredondeada y mediana a alta esfericidad. La muestra es granosoportada (85% granos) y con selección moderada. La muestra presenta contactos puntuales (80%) y tangentes (20%).

Se clasificó como sublitoarenita (Figura 9.F.), la distribución es feldespato (9%), cuarzo (79%), y líticos (12%) en su mayoría metamórficos. También se observan moscovitas en ocasiones deformadas, además minerales accesorios como turmalina, circón.

5.1.7. Grupo Guayabo

Para el análisis de este grupo se utilizaron las muestras representativas Hc-M#1 y Hc-07 (Tabla 1). El tamaño de grano en general que varía de fino a grueso (0,5 mm – 1 mm), con forma subangular a subredondeada. La muestra es granosoportada (82% granos), con baja esfericidad y con buena selección.

El tipo de cuarzo más abundante es el monocristalino (70-75%), seguido por el cuarzo con extinción recta (17-23%) y policristalino difuso (7-8%). Las muestras se clasificaron como sublitoarenita (Hc-M#1) (Figura 9.G.) con contactos puntuales (80%) y tangentes (20%) y subarcosa (Hc-07) (Figura 9.H.) con contactos puntuales (82%) y tangentes (18%). El mineral más abundante es el cuarzo (82-88%), seguido de los fragmentos líticos (5-10%) y finalmente el feldespato potásico (7-8%). Los líticos presentes en la formación se componen en su mayoría de líticos sedimentarios. Los líticos metamórficos se encuentran con menor abundancia.

5.2 ANÁLISIS DE MINERALES DENSOS

En este capítulo se describen y analizan los minerales densos presentes en las muestras recolectadas a lo largo de la secuencia cenozoica de la cuenca de estudio. Se analizaron 11 montajes de grano bajo el microscopio de luz polarizada.

El análisis de las muestras denota una baja variabilidad en las especies minerales presentes en las diferentes formaciones del área de estudio, en los cuales hay un predominio de circones, apatitos, opacos, turmalinas, granates, estaurolitas, rutilos y en menor proporción epidotas.

Se realizó la discriminación de los minerales encontrados en traslucidos y opacos (Tabla 5). Posteriormente, se clasificaron los minerales traslucidos en ultraestables (rutilo, circón y turmalina), estables (apatito, granate y estaurolita) e inestables (epidota) (Tabla 6).

Tabla 5. Discriminación en minerales traslúcidos y minerales opacos.

Muestra	Formación	%Traslucidos	%Opacos	Total
Hc-04	Cuaternario	88,93	11,07	100
Hc-07	Guayabo	90,79	9,21	100
Hc-05	Guayabo	97,72	2,28	100
Hc-M#1	Guayabo	96,23	3,77	100
Hc-06	León	86,49	13,51	100
Hc-08	Mirador	87,54	12,46	100
Hc-M#5	Carbonera	87,16	12,84	100
Hc-M#4	Los Cuervos	98,08	1,92	100
Hc-M#3	Barco	89,69	10,31	100
Hc-M#2	Catatumbo	85,33	14,67	100
Hc-02	Catatumbo	87,50	12,50	100

Tabla 6. Clasificación de minerales traslucidos en minerales ultraestables, estables e inestables.

Muestra	Formación	%Ultraestables			%Estables			%Inestables	Total
		Rutilo	Circón	Turmalina	Apatito	Granate	Estauroлита	Epidota	
Hc-04	Cuaternario	2,15	39,48	0,21	45,92	0,64	9,23	2,36	100
Hc-07	Guayabo	2,90	68,36	2,05	6,76	10,51	3,38	6,04	100
Hc-05	Guayabo	1,97	64,54	2,09	23,17	1,04	3,13	4,06	100
Hc-M#1	Guayabo	3,25	64,05	2,35	18,48	3,92	3,81	4,14	100
Hc-06	León	6,59	58,38	0,94	10,17	12,05	4,71	7,16	100
Hc-08	Mirador	5,26	66,41	1,24	7,12	10,99	2,32	6,66	100
Hc-M#5	Carbonera	6,47	80,15	3,91	4,21	2,41	2,86	0,00	100
Hc-M#4	Los Cuervos	11,98	82,89	0,98	1,83	1,59	0,73	0,00	100
Hc-M#3	Barco	7,16	70,72	1,52	19,09	0,00	1,52	0,00	100
Hc-M#2	Catatumbo	6,30	72,39	3,26	11,74	0,00	6,30	0,00	100
Hc-02	Catatumbo	5,22	71,66	2,72	14,06	0,00	6,35	0,00	100

Para casi toda la secuencia cenozoica de la cuenca se observa un predominio de minerales ultraestables, debido a la abundancia de circones que se presenta, pero existen variaciones importantes entre los minerales estables e inestables (Figura 10).

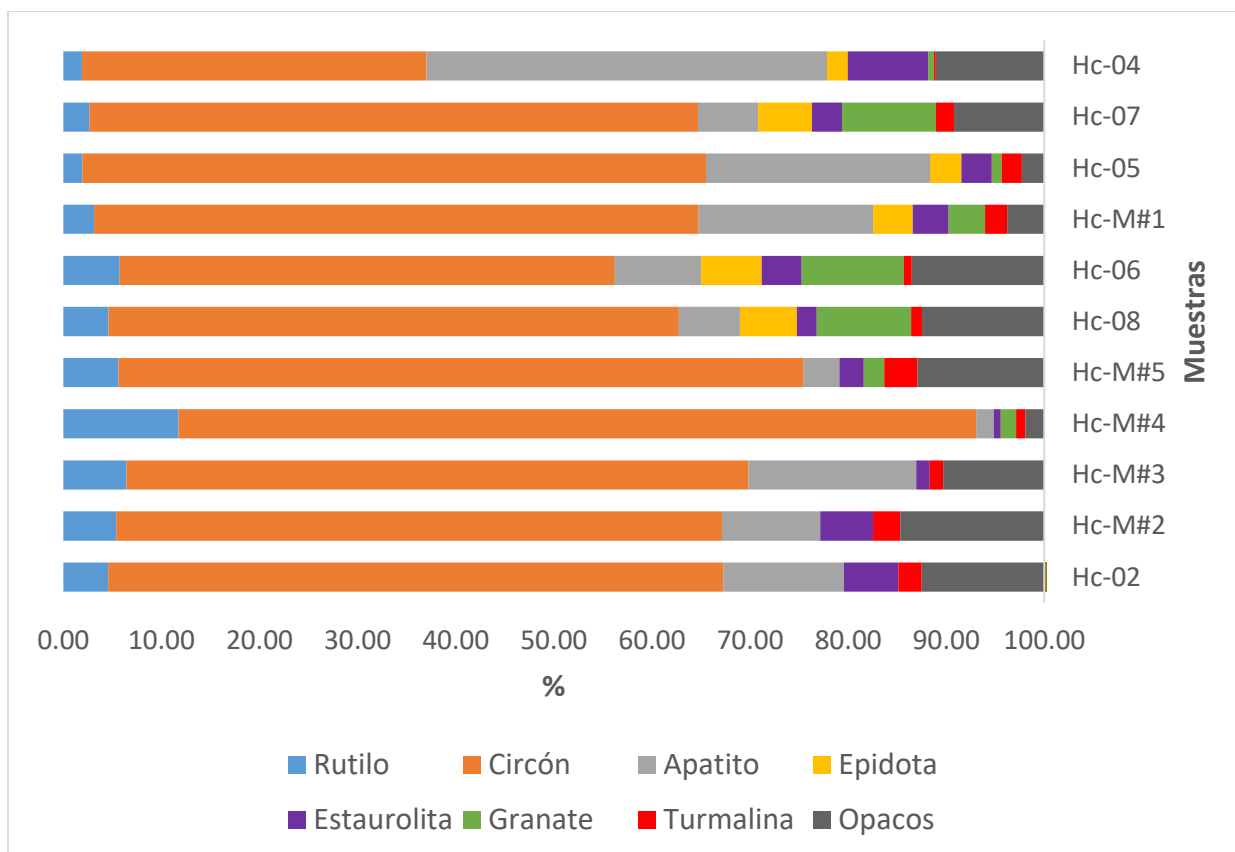


Figura 10. Distribución de los porcentajes de minerales densos en cada una de las secciones analizadas.

El contenido de circones es abundante en toda la secuencia, y se logran determinar cristales subeuhedrales, fracturados, redondeados, subangulares y subredondeados.

Para la Formación Catatumbo (HC-02 y HC-m#2), existe mayor predominio de minerales estables que de inestables y es importante denotar que en esta formación no se observaron ni granates ni epidotas (Figura 11.A. y Figura 11.B.).

La Formación Barco (HC-M#3) presenta porcentajes de minerales similares a la Formación Catatumbo, pero en esta se observa una mayor abundancia de minerales estables debido al aumento en el contenido de apatitos (Figura 11.C.).

A partir de la Formación Los Cuervos (HC-m#4), se empieza a observar la presencia de granate en las secciones (Figura 11.D.).

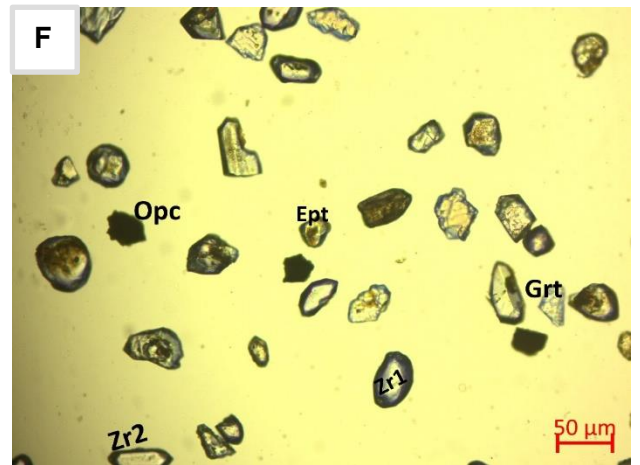
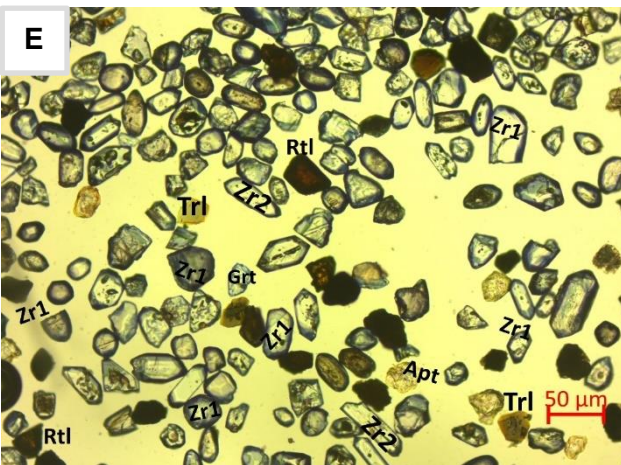
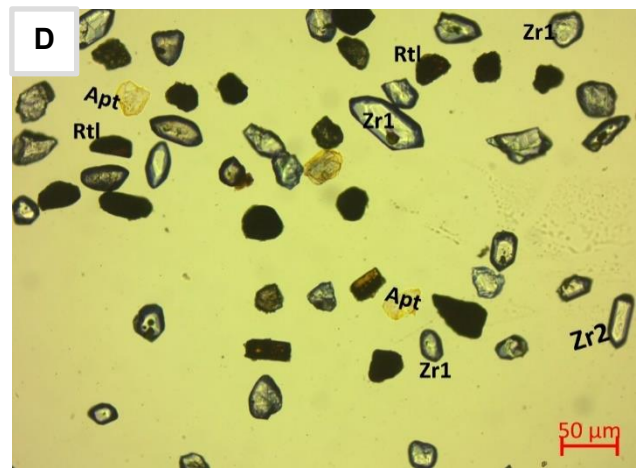
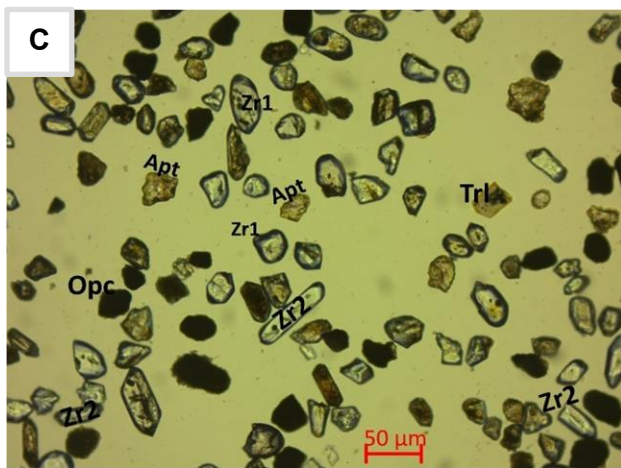
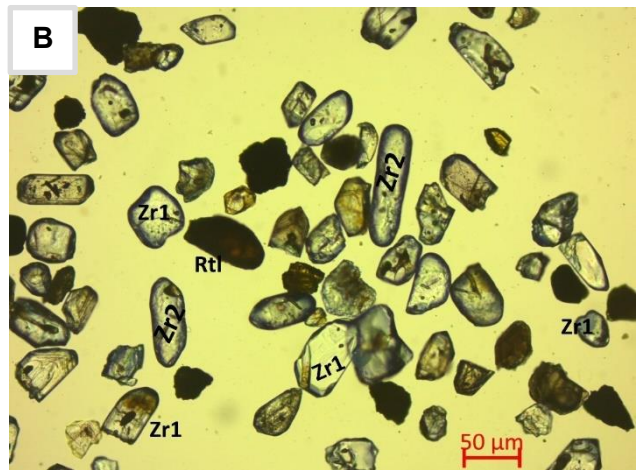
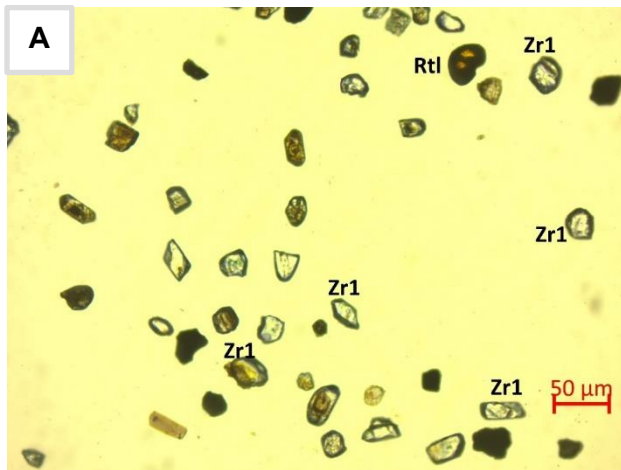
En general, en la Formación Mirador (HC-M#5), el contenido de minerales estables aumenta en comparación con las formaciones que se depositaron anteriormente (Figura 11.E.).

La muestra HC-08 correspondiente a la Formación Carbonera, tiene un importante cambio comparado con las formaciones anteriores debido a la aparición de epidota y una mayor abundancia de granates (Figura 11.F.).

La Formación León (HC-06) presenta un aumento de los porcentajes de minerales estables e inestables en comparación con las formaciones que se depositaron anteriormente (Figura 11.G.).

En general, el Grupo Guayabo (HC-m#1, HC-05, HC-07) contiene un aumento significativo en la proporción de apatitos, sobre todo en la muestra Hc-05 (Figura 11.H. y Figura 11.I.).

En el depósito cuaternario (HC-04) hay un cambio importante en la abundancia de los minerales estables, ya que el apatito es el mineral representativo de esta muestra, y a su vez el porcentaje de minerales ultraestables decrece (Figura 11.J.).



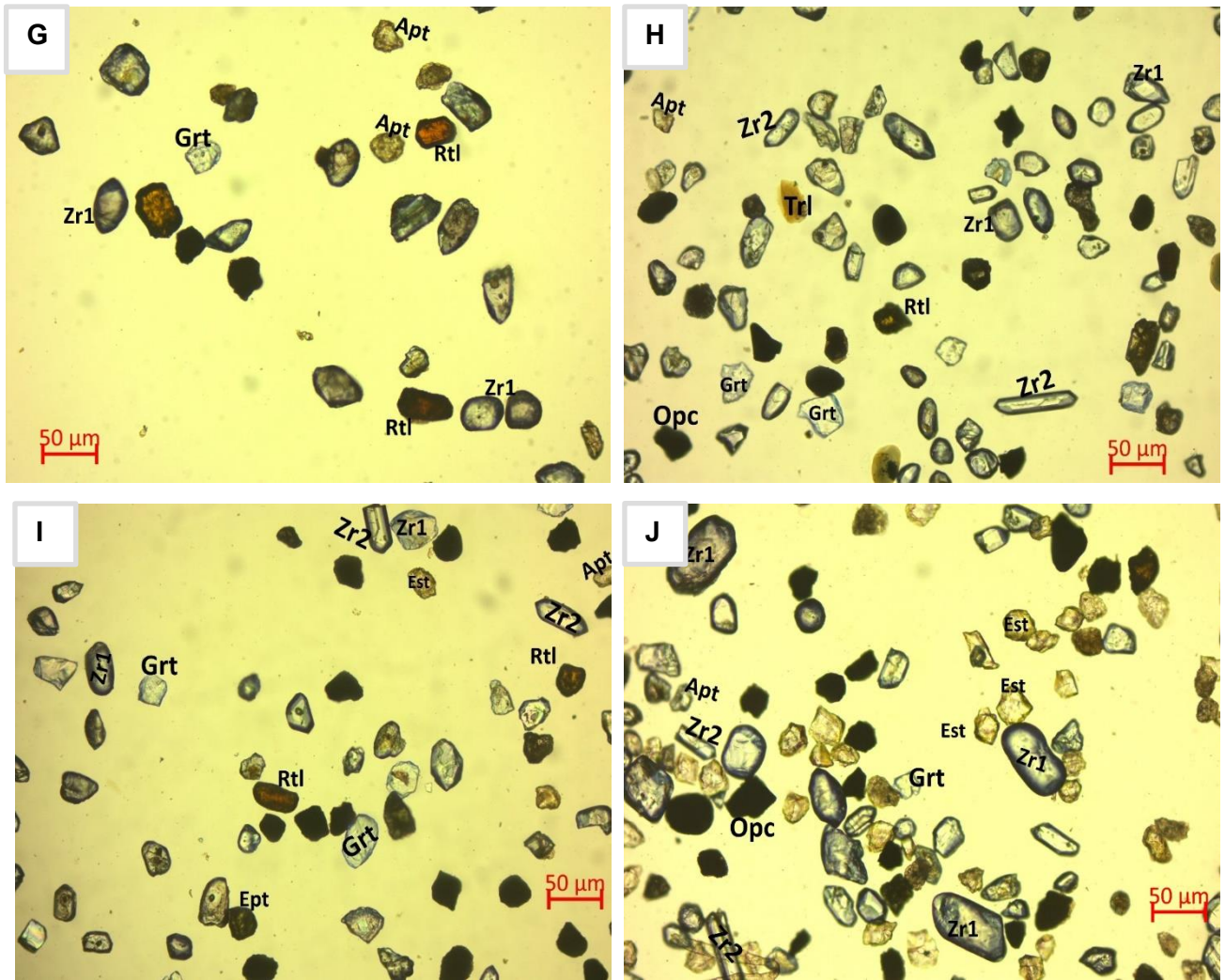


Figura 11. A. Muestra Hc-02 y B. muestra Hc-M#2 correspondientes a la Formación Catatumbo, C. Muestra Hc-M#3 correspondiente a la Formación Barco, D. Muestra Hc-M#4 correspondiente a la Formación Los Cuervos, E. Muestra Hc-M#5 correspondientes a la Formación Mirador, F. Muestra Hc-08 correspondiente a la Formación Carbonera, G. Muestra Hc-06 correspondiente a la Formación León, H. Muestra Hc-M#1 e I. Muestra Hc-05 correspondientes al Grupo Guayabo, J. Muestra Hc-04 correspondiente al depósito Cuaternario.

6. DISCUSIÓN

Según trabajos anteriores, para las áreas de aporte de sedimentos de las formaciones Barco, Los Cuervos y Mirador se reporta mezcla de material procedente de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), Cordillera Central (CC), además del reabajamiento de la cobertera sedimentaria del Macizo de Santander (MS) y la parte más norte de la Cordillera Oriental (CO), y para la Formación Carbonera se sugiere rocas cristalinas del MS (Ayala et al., 2012; Castillo et al., 2012). En este capítulo integramos nuestros datos de petrografía de areniscas y análisis de minerales densos, incluyendo datos U-Pb en circones detríticos para la secuencia paleógena obtenidos por Ayala et al., (2012), edades de cristalización U-Pb y termocronología de unidades geológicas que potencialmente aportaron sedimentos a la cuenca del Catatumbo durante el Cenozoico.

En general, las petrofacies en la secuencia cenozoica de la cuenca del Catatumbo varían entre sublitoarenita y subarcosa (Figura 6). La procedencia está relacionada a un orógeno reciclado, distribuido en cuarzoso reciclado y cratón interior (Figura 7). Según la clasificación de los cuarzos (Tabla 4), los sedimentos se asocian a rocas con metamorfismo de bajo grado (Figura 8), lo que puede interpretarse como el aporte del MS y del Cratón Amazónico. El análisis de minerales densos presenta un gran contenido de minerales ultraestables en toda la secuencia, con variaciones importantes de minerales estables y minerales inestables hacia el tope de la secuencia (Figura 10).

Maastrichtiano – Paleoceno medio

Para las formaciones que se acumularon en este periodo (Catatumbo y Barco) se identificaron petrofacies de sublitoarenita. En la Formación Catatumbo hay un porcentaje mayor de cuarzo (92%) indicando cierta madurez composicional, este porcentaje disminuye en la Formación Barco, y aumenta el contenido de líticos en el mismo orden, lo cual sugiere una fuente de aporte distante y sigue lo sugerido por Zambrano et al., 1971, que indica la presencia de una provincia deltaica en el norte de Suramérica, correspondiente al Proto-Orinoco, evidenciando un ambiente de depositación más salobre para la Formación Catatumbo, con mayor transporte y una progradación del frente deltaico del Proto-Orinoco que propició la acumulación de la Formación Barco.

El diagrama de procedencia QtFL para estas formaciones presenta una afinidad de orógeno reciclado distribuido entre cratón interior y cuarzoso reciclado (Figura 7), lo que indica una fuente de aporte mixta relacionada con sedimentos asociados al retrabajamiento de formaciones sedimentarias pre-maastrichtianas con aporte del escudo de Guayana, ubicadas al este de la cuenca (Figura 12); esto es consistente con los datos U-Pb en zircones detríticos obtenidos por Ayala et al., (2012), que señalan edades de 1.300 Ma, 1.500 Ma y 1.800 Ma, sin embargo, la morfología de estos varia de subredondeados a redondeados, indicando que han sufrido alto transporte.

El Macizo de Santander presenta diferentes edades de exhumación, una de ellas se da entre 75-70 Ma asociada a movimientos del sistema de fallas Bucaramanga

(Amaya, 2016), lo que causa que se aporte solo cobertura sedimentaria de este macizo a la cuenca del Catatumbo. Lo anterior se interpreta debido a la ausencia de minerales estables como el granate e inestables como la epidota, que se encuentran en las formaciones suprayacentes. La ausencia de líticos volcánicos en las secciones petrográficas permite inferir que el aporte de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) y cordillera Central (CC) es nulo o muy bajo, pero no se descarta por los circones de edades cretácicas reportados en Ayala et al., (2012).

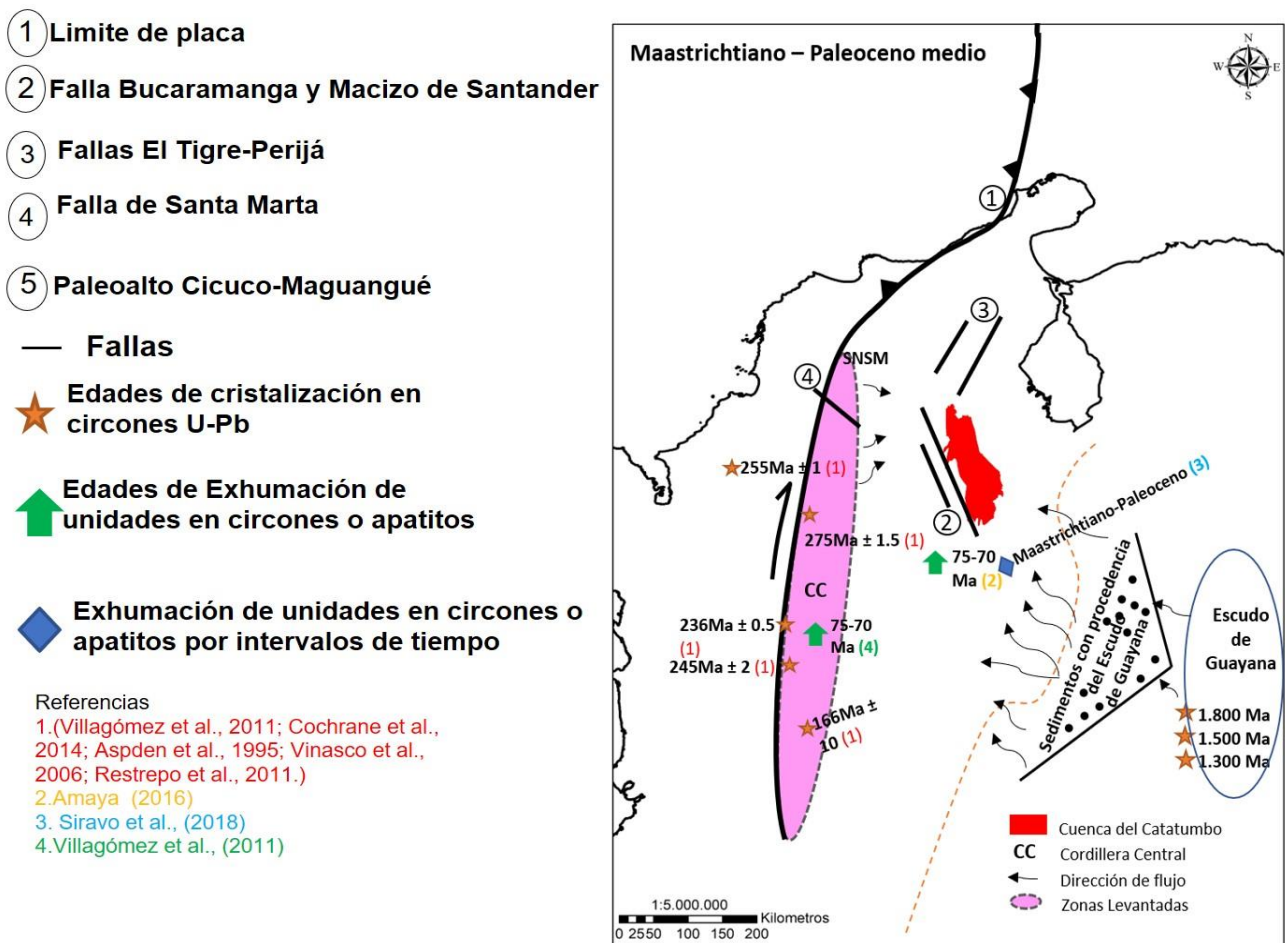


Figura 12. Paleogeografía de las fuentes de aporte de la Cuenca del Catatumbo para el Maastrichtiano – Paleoceno Medio. Modificado de (Ayala et al., 2012), Limites de placas en Escalona y Mann., (2011), edades reportadas (1) en Spikings et al., (2014)

Paleoceno tardío- Eoceno temprano

Las formaciones Los Cuervos y Mirador se clasificaron como sublitoarenitas, pero con un mayor contenido de líticos, son más inmaduras con respecto a las formaciones Catatumbo y Barco, acumulándose en un ambiente de pantanos (Fm. Los Cuervos), que transicionalmente pasó a ambientes fluviales de ríos trezados y de llanura deltaica (Fm. Mirador) (González et al., 1980).

Datos U-Pb en circones detríticos señalan edades precámbricas de 1.800Ma, 1.500Ma, 1.300Ma similares a la procedencia del periodo Maastrichtiano-Paleoceno, además presentan edades jurásicas entre 195 – 162 Ma, paleozoicas 547-430 Ma (Ayala et al., 2012), indicando una nueva fuente de aporte, ya que los diagramas de QtFL muestran una asociación con orógeno reciclado que se distribuye en cuarzoso reciclado, sugiriendo que unidades ígneo-metamórficas ricas en cuarzo estarían aportando sedimentos. Esta nueva fuente probablemente es el Macizo de Santander, principalmente las rocas plutónicas de edad Jurásica y unidades paleozoicas de bajo grado de metamorfismo. Esta interpretación está respaldada por edades de episodios de exhumación Maastrichtiano-Paleoceno en el basamento ígneo-metamórfico en las regiones aledañas a la ciudad de Bucaramanga y la región Tablazo-Cocuy, al sur de la cuenca (Amaya, 2016; Siravo et al., 2018). Estos episodios de exhumación permitieron la exposición de rocas cristalinas paleozoicas y jurásicas cuya erosión generó aporte sedimentario a la parte sur de la cuenca del Catatumbo, evidenciado en la aparición de granate en los minerales densos y el aumento de fragmentos líticos (Figura 10). Esta interpretación es corroborada por la aparición de circones detríticos

de edades paleozoicas y jurásicas presentes en las areniscas de las formaciones del Paleoceno superior-Eoceno inferior (Ayala et al., 2012., Castillo et al., 2012) (Figura 13).

- ① Limite de placa
 - ② Falla Bucaramanga y Macizo de Santander
 - ③ Fallas El Tigre-Perijá
 - ④ Falla de Santa Marta
 - ⑤ Paleoalto Cicuco-Maguangué
 - Fallas
 - ★ Edades de cristalización en circones U-Pb
 - ↑ Edades de Exhumación de unidades en circones o apatitos
 - ◆ Exhumación de unidades en circones o apatitos por intervalos de tiempo
- Referencias
1. (Villagómez et al., 2011; Cochrane et al., 2014; Aspden et al., 1995; Vinasco et al., 2006; Restrepo et al., 2011.)
 2. Amaya (2016)
 3. Van der Leij et al., (2016).

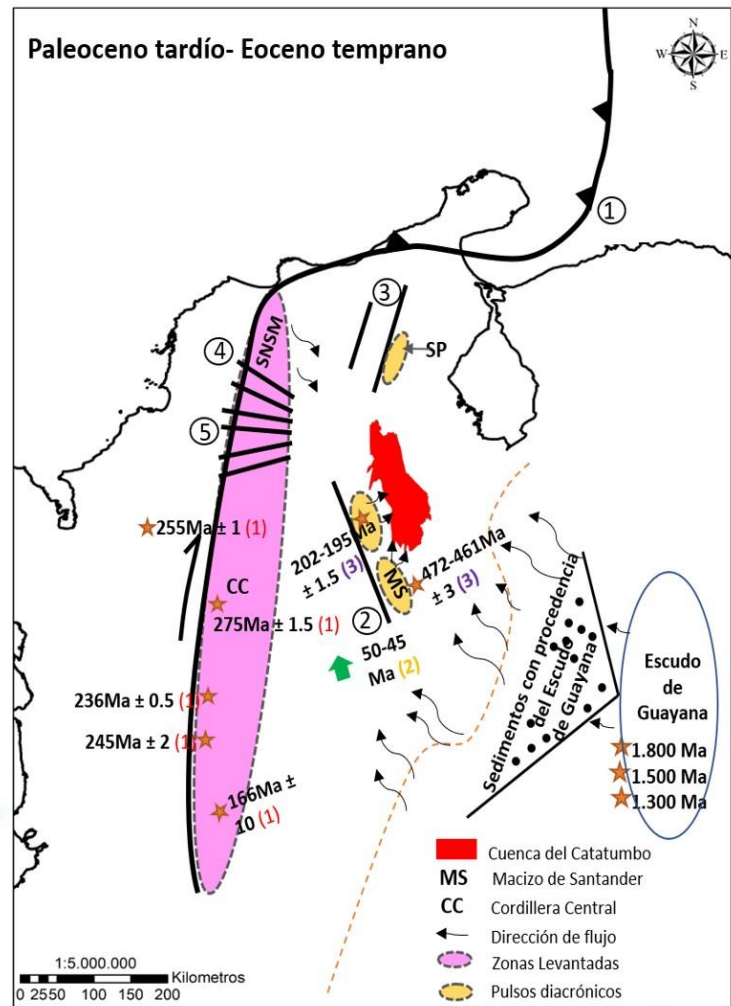


Figura 13. Paleogeografía de las fuentes de aporte de la Cuenca del Catatumbo para el Paleoceno tardío – Eoceno temprano. Modificado de (Ayala et al., 2012), Límites de placas en Escalona y Mann., (2011), edades reportadas (1), en Spikings et al., (2014)

Eoceno tardío-Mioceno temprano

Durante este periodo de tiempo se acumularon las formaciones Carbonera y León, las cuales presentan petrofacies entre subarcosa y sublitoarenita, denotando un aumento en la inmadurez composicional debido al aumento en el contenido de feldespatos.

En el Eoceno superior (Fm. Carbonera) se reporta un dominio de edades jurásicas en circones detríticos (Ayala et al., 2012., Castillo et al., 2012). Nuestros resultados documentan el aumento en el contenido de minerales estables e inestables como los granates y la aparición de epidota, indicando que el Macizo de Santander continúa aportando sedimentos y es potencialmente la principal fuente de aporte para este periodo. Castillo et al., (2012) propone que las rocas plutónicas del Macizo de Santander, cercanas a la Cuenca del Catatumbo, pueden ser la fuente principal de sedimentos (Figura 14).

En el Oligoceno tardío un incremento en el nivel eustático del mar provocó una incursión marina que conectó el Lago de Maracaibo, con los Llanos Orientales y el Amazonas. La CO experimenta episodios importantes de levantamiento durante este mismo periodo de tiempo (Cooper et al., 1995), siendo este relieve positivo la potencial fuente de aporte de la Formación León. Nuestra interpretación se basa en la inmadurez composicional y textural de las rocas de esta formación, observado en la subangularidad de los granos y líticos sedimentarios.

- ① Limite de placa
- ② Falla Bucaramanga y Macizo de Santander
- ③ Fallas El Tigre-Perijá
- ④ Falla de Santa Marta
- ⑤ Paleoalto Cicuco-Maguangué
- Fallas

- ★ Edades de cristalización en circones U-Pb
- ↑ Edades de Exhumación de unidades en circones o apatitos

- ◆ Exhumación de unidades en circones o apatitos por intervalos de tiempo

Referencias

- 1. (Villagómez et al., 2011; Cochrane et al., 2014; Aspden et al., 1995; Vinasco et al., 2006; Restrepo et al., 2011.)
- 2. Van der leij et al., (2016).

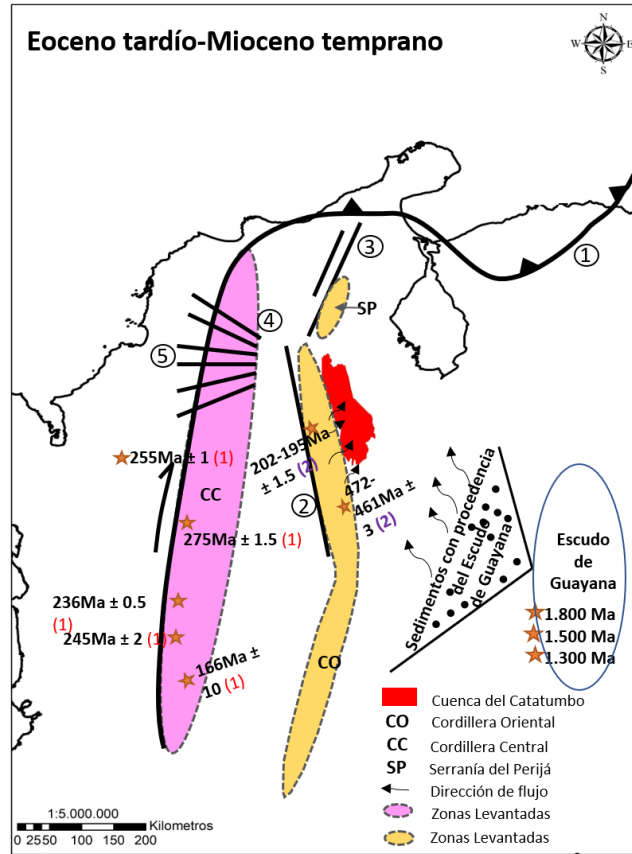


Figura 14. Paleogeografía de las fuentes de aporte de la Cuenca del Catatumbo para el Eoceno tardío – Mioceno temprano. Límites de placas en Escalona y Mann., (2011), edades reportadas (1), en Spikings et al., (2014)

Mioceno medio – Actualidad

En el Mioceno se conformó la configuración tectónica actual de la Cordillera Oriental (Sarmiento, 2001). La topografía actual conocida para el Magdalena y los Llanos Orientales, así como la exhumación de los Andes de Mérida tuvo lugar a los 20 Ma (Bermudez-Cella et al., 2008). Las altas tasas de levantamiento favorecieron consecuentemente un aumento en las tasas de erosión, representadas en la acumulación de molasas en los flancos de las cordilleras Central y Oriental (Villamil, 1999) (Figura 15). Estas molasas se reflejan dentro de la cuenca del Catatumbo en el

Grupo Guayabo (Figura 11.H. y Figura 11.I.), en el cual se evidencia un aumento de minerales densos estables e inestables y en la variedad de las morfologías de los circones, el aumento en el tamaño de grano (0.5 mm-1.3mm). Las petrofacies definidas para el Grupo Guayabo son de sublitoarenita y subarcosa, donde se observa un aumento en el contenido de líticos sedimentarios, metamórficos y feldespatos.

Finalmente, en el Cuaternario se observa un aumento significativo de apatitos y una disminución importante en el porcentaje de minerales ultraestables (Figura 11.J.), indicando un cambio en la dinámica de aporte que sufrió la cuenca y el mayor aumento en la inmadurez composicional y textural de toda la secuencia. Esto se debe posiblemente a que la Cordillera Oriental, y menor medida los Andes de Mérida, son las principales fuentes de aporte de la cuenca desde el Mioceno hasta la actualidad, permitiendo que los sedimentos sufran poco transporte y una alta tasa de reciclaje sedimentario (Figura 15).

- ① Limite de placa
 - ② Falla Bucaramanga y Macizo de Santander
 - ③ Fallas El Tigre-Perijá
 - ④ Falla de Santa Marta
 - ⑤ Paleoalto Cicuco-Maguangué
- Fallas
- ★ Edades de cristalización en circones U-Pb
- ↑ Edades de Exhumación de unidades en circones o apatitos
- ◆ Exhumación de unidades en circones o apatitos por intervalos de tiempo

Referencias

- 1. (Villagómez et al., 2011; Cochrane et al., 2014; Aspden et al., 1995; Vinasco et al., 2006; Restrepo et al., 2011)
- 2. Van der leij et al., (2016).
- 3. Bermúdez-Cella et al., (2008).

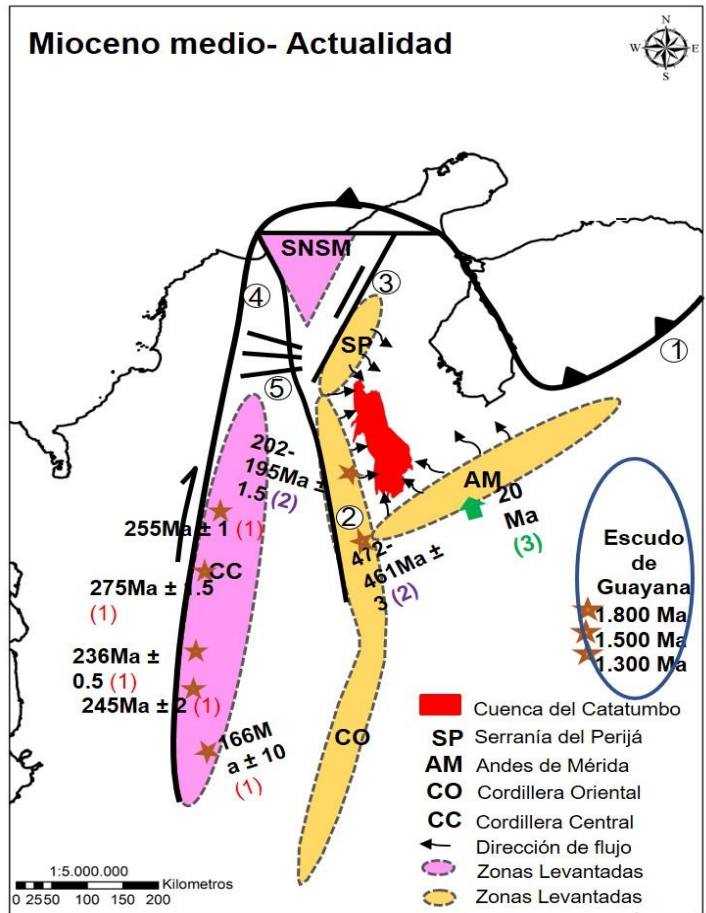


Figura 15. Paleogeografía de las fuentes de aporte de la Cuenca del Catatumbo para el Mioceno medio - Actualidad. Límites de placas en Escalona y Mann., (2011), edades reportadas (1), en Spikings et al., (2014)

7. CONCLUSIONES.

- En la secuencia Cenozoica de la cuenca del Catatumbo se observa un aumento en la inmadurez composicional debido al contenido de fragmentos líticos y feldespatos desde el Paleoceno hasta el Cuaternario, indicando cambios en las fuentes de aporte y levantamientos regionales.
- Los análisis petrográficos y de minerales densos permitieron identificar que las principales litologías que aportaron a la cuenca son sedimentos pre-cretácicos retrabajados, y el basamento ígneo-metamórfico del Macizo de Santander.
- La cuenca presenta varios cambios en las fuentes de aporte de sedimentos. En el periodo Maastrichtiano-Paleoceno medio, el aporte es principalmente el retrabajamiento de sedimentos pre-maastrichtianos con material procedente del Escudo Guayanés. Durante el Paleoceno tardío - Eoceno temprano, continúa el retrabajamiento de sedimentos pre-maastrichtianos del escudo, pero la presencia de granate sugiere que el basamento del Macizo de Santander empieza a aportar sedimentos a la cuenca. En el Eoceno tardío-Mioceno temprano, el aumento de minerales estables e inestables se asocia a que el Macizo de Santander es la fuente principal de aporte sedimentario durante este periodo. Finalmente, desde el Mioceno temprano se establece la configuración actual de la cuenca, debido a esto el aporte sedimentario procede de la Cordillera Oriental y de los Andes de Mérida.

8. RECOMENDACIONES

- Hacer análisis de microespectroscopia Raman en los granates encontrados en las formaciones Cuervos, Mirador, Carbonera, León y Guayabo para determinar a qué profundidad de la corteza se formaron y así confirmar su origen.
- Realizar análisis de geocronología U-Pb en circones detríticos en las formaciones León y Grupo Guayabo, para complementar los datos ya obtenidos por (Ojeda, 2012) y complementar la identificación de las fuentes de aporte sedimentario de la secuencia Cenozoica.
- Realizar estudios de Termocronología de baja y alta temperatura para conocer la historia termal de la cuenca y entender su relación con el levantamiento de la Cordillera Oriental. Adicionalmente, estos estudios pueden ayudar a determinar zonas termalmente interesantes para la prospección de hidrocarburos.
- Efectuar un muestreo en la zona norte de la zona de la cuenca del Catatumbo y realizarle análisis de proveniencia para comparar los datos con la zona sur de la cuenca.

9. BIBLIOGRAFÍA

Amaya, S. 2016. Termocronología y geocronología del basamento metamórfico del Macizo de Santander, Departamento de Santander. Doctorado thesis, Universidad Nacional de Colombia–Sede Bogotá. 174pp.

Andersen, T., 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chem. Geol.* 216, 249–270.

Ayala, R. C., Bayona, G., Cardona, A., Ojeda, C., Montenegro, O. C., Montes, C., ... & Jaramillo, C. (2012). The paleogene synorogenic succession in the northwestern Maracaibo block: Tracking intraplate uplifts and changes in sediment delivery systems. *Journal of South American Earth Sciences*, 39, 93-111.

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., & Martínez, J., 2007. Colombian Sedimentary Basin: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Bogotá: Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) and B&M Exploration Ltda.

Bermúdez-Cella, M., Van der Beek, P., & Bernet, M. (2008, September). Spatial and temporal patterns of exhumation across the Venezuelan Andes from in-situ and detrital apatite fission-track analysis: Implications for Cenozoic tectonics. In *Proceedings from the 11th International Conference on Thermochronometry*, Anchorage, Alaska (pp. 25-27).

Castillo, O. C. M., Bayona, G., Ojeda, C., Ayala, C., Cardona, A., Restrepo, S., Valencia, V., 2012. Procedencia de las unidades Paleógenas de la cuenca del Catatumbo y su comparación con las cuencas adyacentes: relación con la convergencia de la placa Caribe. *Geología Colombiana* 37, 123-151.

Cediel, F., Shaw, R., Cáceres, C., 2003. Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. *AAPG Memoir* 79, 815-848.

Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Ulianov, A., Mora, A., Villagómez, D., Putlitz, B., Chiaradia, M., 2014a. Permo-Triassic anatexis, continental rifting and the disassembly of western Pangaea. *Lithos* 190–191, 383–402.

Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J. And Taborda, A., 1995. Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, *A.A.P.G. Bull.*, 79 (10): 1421-1443.

Dickinson, W.R., Gehrels, G.E., 2003. U–Pb ages of detrital zircons from Permian and Jurassic eolian sandstones of the Colorado Plateau, USA: paleogeographic implications. *Sediment. Geol.* 163, 29–66.

Erlich, R., Barrett, S., 1990. Cenozoic plate tectonic history of the northern Venezuela –Trinidad área. *Tectonics* 9, 161–184.

Escalona, A., Mann, P., 2006. Tectonic controls of the right lateral Burro Negro tear fault on Paleogene structure and stratigraphy, northeastern Maracaibo Basin. AAPG Bulletin 90, 479–504.

Dickinson, W., 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones- Zuffa. Nato Science Series C 148, 333-361.

Fedo, C.M., Sircombe, K.N., Rainbird, R.H., 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record. Rev. Mineral Geochemical 53, 277–303.

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)

Gehrels, G. E., Valencia, V. A., Ruiz, J., 2008. Enhanced precision, accuracy, efficiency, and spatial resolution of U-Pb ages by laser ablation–multicollector–inductively coupled plasma–mass spectrometry. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 9 (3),1-13.

Gehrels, G., 2014. Detrital zircon U-Pb geochronology applied to tectonics. *Annual Rev. Earth Planet Science* 42, 127–149.

Gonzalez, C., Iturralde, J., Picard, X., 1980. Geología de Venezuela y de sus cuencas petrográficas. Ediciones Foninves, Caracas.

Haughton, P. D. W., Todd, S. P., Morton, A. C., 1991. Sedimentary provenance studies. Geological Society London Special Publications 57, 1-11.

Huang, B., Fu, D., Kusky, T., Ruan, K., Zhou, W., Zhang, X., 2018. Sedimentary provenance in response to Carboniferous arc-basin evolution of East Junggar and North Tianshan belts in the southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Tectonophysics* 722, 324-341.

Ireland, T.R., Flöttmann, T., Fanning, C.M., Gibson, G.M., Preiss, W.V., 1998. Development of the early Paleozoic Pacific margin of Gondwana from detrital-zircon ages across the Delamerian orogen. *Geology* 26, 243–246.

James, H. E. 1977. Sedimentology of the iron-oxide-bearing upper Miocene (?) Guayabo Group in the vicinity of Cúcuta, Colombia. Princeton University. New Jersey.

Li, Y., He, D., Li, D., Lu, R., Fan, C., Sun, Y., Huang, H., 2018. Sedimentary provenance constraints on the Jurassic to Cretaceous paleogeography of Sichuan Basin, SW China. *Gondwana Research* 60, 15-33.

Lugo, J., Mann, P., 1995. Jurassic –Eocene tectonic evolution of Maracaibo Basin, Venezuela, in A. Tankard, S. Suarez, and H. Welsink, eds., *Petroleum basins of South America*. AAPG Memoir 62, 699–725.

Mange, M. A., & Maurer, H., 2012. Heavy minerals in colour. Springer Science & Business Media.

Mann, P., Escalona, A., Catillo, V., 2006. Regional geologic and tectonic setting of the Maracaibo supergiant basin, western Venezuela. AAPG Bulletin 90, 445-477.

Notestein, F.B., Hubman, C.W., Bowler, J.W., 1944. Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia- South America. Am. Assoc. Petrol. Geol., Bull. 55 (10), 1165-1216.

Pedraza, P., Ramírez, Y., 2011. Catatumbo Basin. Petroleum Geology of Colombia 5, 1-135.

Pindell, J., Barrett, S., 1990. Geological evolution of the Caribbean region: A plate tectonic perspective, in G. Dengo and J. Case, eds., The Caribbean región. Geological Society of America, The geology of North America, 405–4.

Rodriguez, G., Molinares, C., Brenac, P., Jaramillo, P., Contreras, L., 2006. ¿Es el contacto Los Cuervos – Mirador discordante en el Catatumbo? IX Simposio Bolivariano de exploración en las Cuencas Subandinas. Capitulo Memoria, Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, 6 Pág.

Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2016. Cartografía Geológica de la Plancha 87 – Sardinata. Departamento de Norte de Santander. Dirección de Geociencias Básicas.

Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., and Beate, B., 2014 The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma). Gondwana Research

Sutton, F.A., 1946. Geology of Maracaibo Basin. Am. Assoc. Petrol. Geol., Bull. 30, 1621 - 1681.

Trump, G. W. y Salvador, A. 1964. Guidebook to the geology of western Táchira. Asociación Venezolana de Geología, Minería y Petróleo.

Van Der Hammen, T. 1957 Estratigrafía Palinológica de la Sabana de Bogotá (Cordillera Oriental de Colombia). Servicio Geológico Nacional Boletín Geológico, Tomo V, No. 2, Bogotá. Colombia.

Van Der Hammen, T. 1958. Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiano continentales y tectogenesis de los Andes Colombianos - Un Estudio Basado en Correlaciones Palinológicas. Servicio Geológico Nacional. Colombia.

Van Der Lelij, R., Spikings, R., Ulianov, A., Chiaradia, M., & Mora, A. (2016). Palaeozoic to Early Jurassic history of the northwestern corner of Gondwana, and implications for the evolution of the Iapetus, Rheic and Pacific Oceans. *Gondwana Research*, 31, 271-294.

Villagómez, D., Spikings, R., 2013. Thermochronology and tectonics of the Central and Western Cordilleras of Colombia: Early Cretaceous–Tertiary evolution of the Northern Andes. *Lithos* 168, 228–249.

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, 875–896.

Villamil, T., 1999. Campanian–Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western

ANEXOS