



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ

DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS
FACULTAD DE CIENCIAS



RECONSTRUCCIÓN DE LA HISTORIA TERMAL EN LOS SECTORES DE
LURUACO Y CERRO CANSONA - CUENCA DEL SINÚ-SAN JACINTO Y EN EL
PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA SERRANÍA DEL PERIJÁ ENTRE
CODAZZI Y LA JAGUA DE IBIRICO - CUENCA DE CESAR-RANCHERÍA

INFORME FINAL
CUENCA CESAR - RANCHERÍA

Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia

Director

Orlando Hernández Pardo Ph.D.
Profesor Asociado

Codirector

José María Jaramillo Ph.D.
Profesor Asistente

Asesores Científicos

Mauricio Parra Ph.D. (*Trazas de Fisión/Termocronología*)

Armando Salazar Ph.D. (*Sedimentología y Estratigrafía*)

Raymond Donelick Ph.D. (*Trazas de Fisión*)

Astrid Blandón Ph.D. (*Reflectancia de Vitrinita*)

Geólogos

Daniel Gómez
Yury Abreu

Ricardo Ruiz
Diana Acero

Estudiantes de Geología. Universidad Nacional de Colombia

Alejandra Abreu
Paola Montaña

Santiago Rodríguez
Giovanny Nova

Bogotá D.C., Agosto de 2009

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	6
1 INTRODUCCIÓN.....	7
2 LOCALIZACIÓN.....	8
3 ESTRATIGRAFÍA.....	8
3.1 FORMACIÓN LA QUINTA.....	10
3.2 FORMACIÓN RÍO NEGRO.....	10
3.3 FORMACIÓN LAGUNITAS.....	14
3.4 FORMACIÓN AGUAS BLANCAS.....	14
3.5 FORMACIÓN MOLINO.....	17
4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	18
4.1 PLIEGUES.....	20
4.1.1 Sinclinal de La Loma y Anticlinal de Tucuy.....	20
4.1.2 Sinclinal de Ranchería.....	20
4.1.3 Sinclinal Los Venados, Anticlinal de la Estancia, Anticlinal de Becerril.....	20
4.1.4 Sinclinal de La Jagua.....	20
4.1.5 Anticlinal de La Jagua.....	20
4.1.6 Sinclinal de Nueva Granada.....	20
4.2 FALLAS.....	20
4.2.1 Falla de Santa Marta - Bucaramanga.....	20
4.2.2 Falla de Oca.....	20
4.2.3 Falla de Ranchería.....	21
4.2.4 Falla de Cerrejón.....	21
4.2.5 Falla de Perijá.....	21
4.2.6 Falla de Arenas Blancas.....	21
4.2.7 Falla Nueva Granada.....	21
5 EVOLUCIÓN GEOLOGICA.....	22
5.1 PALEOZOICO.....	22
5.2 TRIÁSICO - JURÁSICO.....	22
5.3 BARREMIANO - APTIANO TEMPRANO.....	22

5.4	APTIANO TARDÍO - SANTONIANO.....	24
5.5	CAMPANIANO - MAASTRICHTIANO.....	25
5.6	PALEOCENO.....	26
5.7	EOCENO - OLIGOCENO.....	27
5.8	MIOCENO - PLEISTOCENO.....	28
6	GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO.....	29
6.1	ROCA GENERADORA.....	29
6.2	ROCA ALMACENADORA.....	31
6.3	ROCA SELLO.....	31
6.4	TRAMPA.....	33
6.5	MIGRACIÓN.....	33
7	HISTORIA DE ENTERRAMIENTO.....	33
8	TOMA DE MUESTRAS.....	35
8.1	METODOLOGÍA.....	35
8.2	LOCALIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE MUESTREO.....	38
8.2.1	Formación La Quinta.....	38
8.2.2	Formación Río Negro.....	38
8.2.3	Formación Lagunitas.....	39
8.2.4	Formación Aguas Blancas.....	39
8.2.5	Formación Molino.....	40
9	ANÁLISIS DE TRAZAS DE FISIÓN.....	41
9.1	METODOLOGÍA.....	41
9.2	PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	41
9.3	MEDICIÓN DE LA EDAD POR TRAZAS DE FISIÓN.....	44
9.4	MEDICION DE LA LONGITUD DE TRAZAS CONFINADAS.....	44
10	REFLECTANCIA DE VITRINITA.....	47
10.1	METODOLOGIA.....	47
10.2	PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	47
10.3	MEDICIÓN DE LA REFLECTANCIA.....	49
11	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
11.1	TRAZAS DE FISIÓN EN APATITOS.....	49

11.2 REFLECTANCIA DE VITRINITA	49
11.3 ANÁLISIS DE MODELAMIENTO INVERSO PARA TRAZAS DE FISIÓN	52
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del área de muestreo.....	8
Figura 2. Columna estratigráfica de la Cuenca Cesar	9
Figura 3. Columna estratigráfica de la Formación La Quinta.....	11
Figura 4. Columna estratigráfica de la Formación Río Negro.	13
Figura 5. Columna estratigráfica del Grupo Cogollo, correspondiente a las formaciones Lagunitas y Aguas Blancas.	15
Figura 6. Marco Tectónico del Norte de Colombia, con la dirección de los esfuerzos principales que afectan la Cuenca Cesar – Ranchería.....	19
Figura 7. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Titoniano.	23
Figura 8. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Aptiano.....	23
Figura 9. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Albiano	24
Figura 10. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Campaniano...	25
Figura 11. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Paleoceno.	26
Figura 12. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Eoceno.....	27
Figura 13. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Mioceno.	28
Figura 14. Profundidad vs. Reflectancia de vitrinita.....	30
Figura 15. Índice de hidrógeno vs. Tmax.....	30
Figura 16. S2 vs. Carbono Orgánico Total.	31
Figura 17. Curva de enterramiento usando los espesores mínimos reportados para cada unidad.....	34
Figura 18. Curva de enterramiento usando los espesores máximos reportados para cada unidad.....	35
Figura 19. Metodología de preparación y separación de apatitos.....	42
Figura 20. Trazas Confinadas en Apatito irradiado con ²⁵² Cf.	45
Figura 21. Figuras de Corrosión (a). Figuras de corrosión previas al bombardeo con ²⁵² Cf. (b) Figuras de Corrosión después de la irradiación con ²⁵² Cf.	46
Figura 22. Metodología de preparación y concentración de materia orgánica dispersa.....	48
Figura 23. Valores de trazas de fisión y reflectancia de vitrinita (Ro) graficadas contra la posición estratigráfica en profundidad.....	51
Figura 24. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra CR-AFTA-MT-14 localizada en la base de la Formación Río Negro.	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Evidencia de hidrocarburos en la Cuenca Cesar – Ranchería.....	32
Tabla 2. Información de los pozos evaluados para la toma de muestras.....	37
Tabla 3. Trabajos de geología de superficie y número de muestras tomadas.	38
Tabla 4. Control de calidad de la población de apatitos en las muestras recolectadas.	43
Tabla 5. Resultados de los análisis de trazas de fisión en apatitos (Ns: Número de trazas espontáneas).....	50
Tabla 6. Resultados de las mediciones de reflectancia de vitrinita.	51

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación para calcular el espesor erosionado (Et)	34
Ecuación 2. Ecuación de la edad por Trazas de Fisión de una población n de apatitos.	44

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO 1.B Listado de estaciones, fase de campo.
- ANEXO 2.B Mapa geológico y columna estratigráfica
- ANEXO 3.B Historias termocronológicas.

RESUMEN

Se reconstruyó la historia termal de la sección estratigráfica de la zona exhumada entre los municipios de Codazzi y la Jagua de Ibirico, ubicada en la Cuenca Cesar - Ranchería usando análisis de trazas de fisión en apatitos y mediciones de reflectancia de vitrinita (RV), con el fin de predecir las condiciones que permitieran o no, la generación de hidrocarburos en la cuenca.

Las unidades litoestratigráficas muestreadas, pertenecen al intervalo comprendido entre el Jurásico y el Cretácico Tardío, correspondiente a las formaciones La Quinta, Río Negro, Lagunitas, Aguas Blancas y Molino.

El proceso empezó con la recopilación referente a nomenclatura, edades, ambientes de depósito, correlaciones y sistemas petrolíferos; con esta información y apoyándose en mapas foto-geológicos se realizó la fase de campo donde se tomaron muestras representativas de cada unidad litoestratigráfica para realizar los análisis de trazas de fisión en apatitos y de reflectancia de vitrinita; en el laboratorio se prepararon las muestras y se hicieron los montajes correspondientes para cada una; los análisis de los resultados obtenidos de los cristales de apatito junto con las medidas de reflectancia permitieron inferir temperaturas y edades de exhumación y enterramiento para cada una de las formaciones evaluadas, información útil para definir los estadios críticos en la generación de hidrocarburos en la cuenca.

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo y surgimiento actual de la industria petrolera en Colombia ha despertado un gran interés en la exploración de nuevas cuencas. Áreas como Cesar-Ranchería son de gran atractivo económico debido a su potencial de generación de hidrocarburos. Sin embargo, estas cuencas plantean interrogantes acerca de los elementos asociados a su sistema petrolífero tales como su historia térmica, edad de generación, procesos de migración de hidrocarburos y trampas. Elementos sin los cuales no se puede desarrollar una explotación y producción adecuada de los recursos que potencialmente ofrece cada una de ellas.

Debido a los anteriores interrogantes se realiza este trabajo de la Universidad Nacional de Colombia para la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), en el proyecto titulado “RECONSTRUCCIÓN DE LA HISTORIA TERMAL EN LOS SECTORES DE LURUACO Y CERRO CANSONA - CUENCA DEL SINÚ - SAN JACINTO Y EN EL PIEDEMORTE OCCIDENTAL DE LA SERRANÍA DEL PERIJÁ ENTRE CODAZZI Y LA JAGUA DE IBIRICO - CUENCA DE CESAR-RANCHERÍA”, el cual contiene la recopilación bibliográfica, el trabajo en campo con su respectiva interpretación fotogeológica y el tratamiento que se le realizó a las muestras para sus respectivos análisis de reflectancia de vitrinita y trazas de fisión en apatitos para la cuenca de Cesar - Ranchería.

Para la recopilación bibliografía se consultaron trabajos previos de cartografía y boletines geológicos realizados por INGEOMINAS, tesis de pregrado y de posgrado tanto de la Universidad Nacional de Colombia como de la Universidad Industrial de Santander (UIS), artículos de revistas científicas como Geología Colombiana, Journal of South American Earth Sciences y Boletín Geológico UIS; presentaciones, informes y catálogos realizados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).

El muestreo se realizó en el norte de Colombia, en los alrededores de los municipios de La Jagua de Ibirico, Codazzi y Becerril; dicho muestreo fue ubicado geográficamente y estratigráficamente sobre poligonales y columnas elaboradas en trabajos presentados con anterioridad a la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). No obstante se elaboraron columnas y poligonales donde no existía este tipo de información.

2 LOCALIZACIÓN

La Cuenca Cesar-Ranchería se encuentra ubicada al nororiente de Colombia, en los departamentos de Cesar y Guajira. Tiene una extensión de 11630km² y limita al norte con el trazo de la Falla de Oca, al oriente con la Serranía del Perijá, al occidente con la Sierra Nevada de Santa Marta y al sur con el trazo de la Falla de Bucaramanga (Barrero, y otros 2007). El área estudiada abarca aproximadamente 456km² entre el municipio de Codazzi en el extremo norte, hasta La Jagua de Ibirico en el extremo sur (Figura 1).

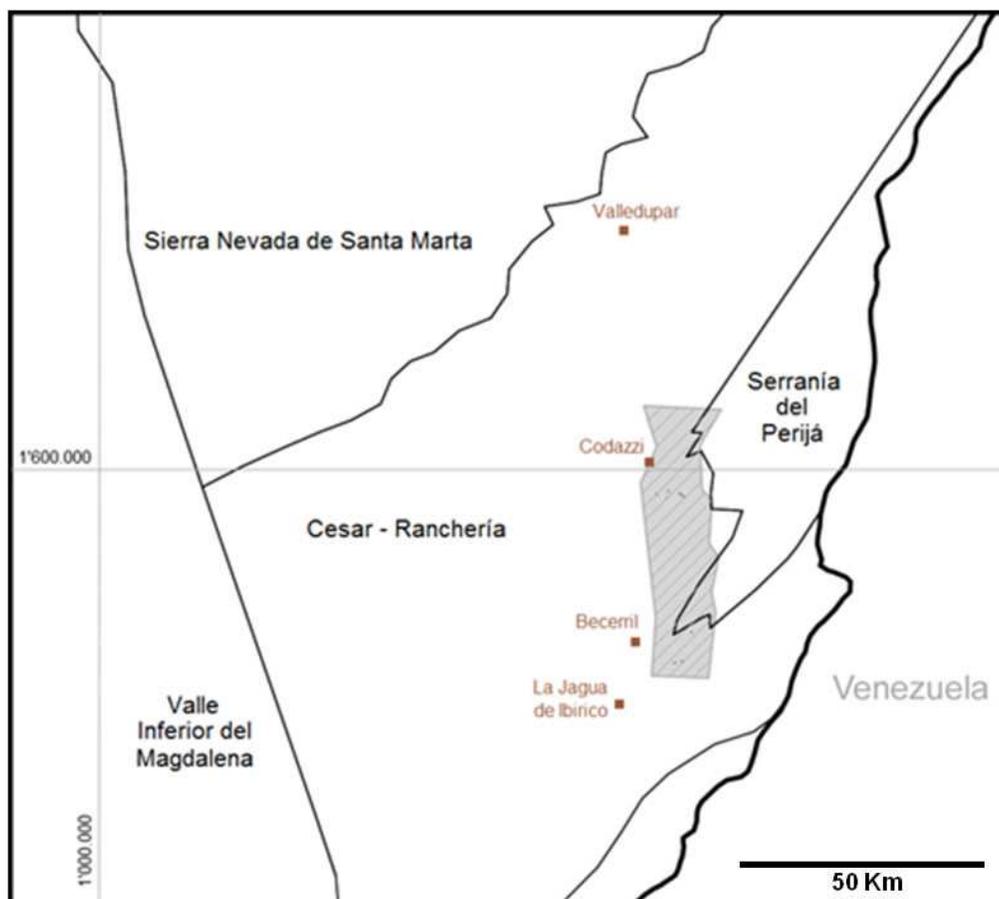


Figura 1. Mapa de localización del área de muestreo.

3 ESTRATIGRAFÍA

Para hacer la descripción estratigráfica de la Cuenca se utilizaron los trabajos e informes propuestos por Gil & Martínez, (1990), Hernández, (2003), Mora & García, (2006) y Barrero, y otros (2007). Las unidades litoestratigráficas muestreadas, pertenecen al intervalo comprendido entre el Jurásico y el Cretácico Tardío, correspondiente a las formaciones La Quinta, Río Negro, Lagunitas, Aguas Blancas y Molino (Figura 2).

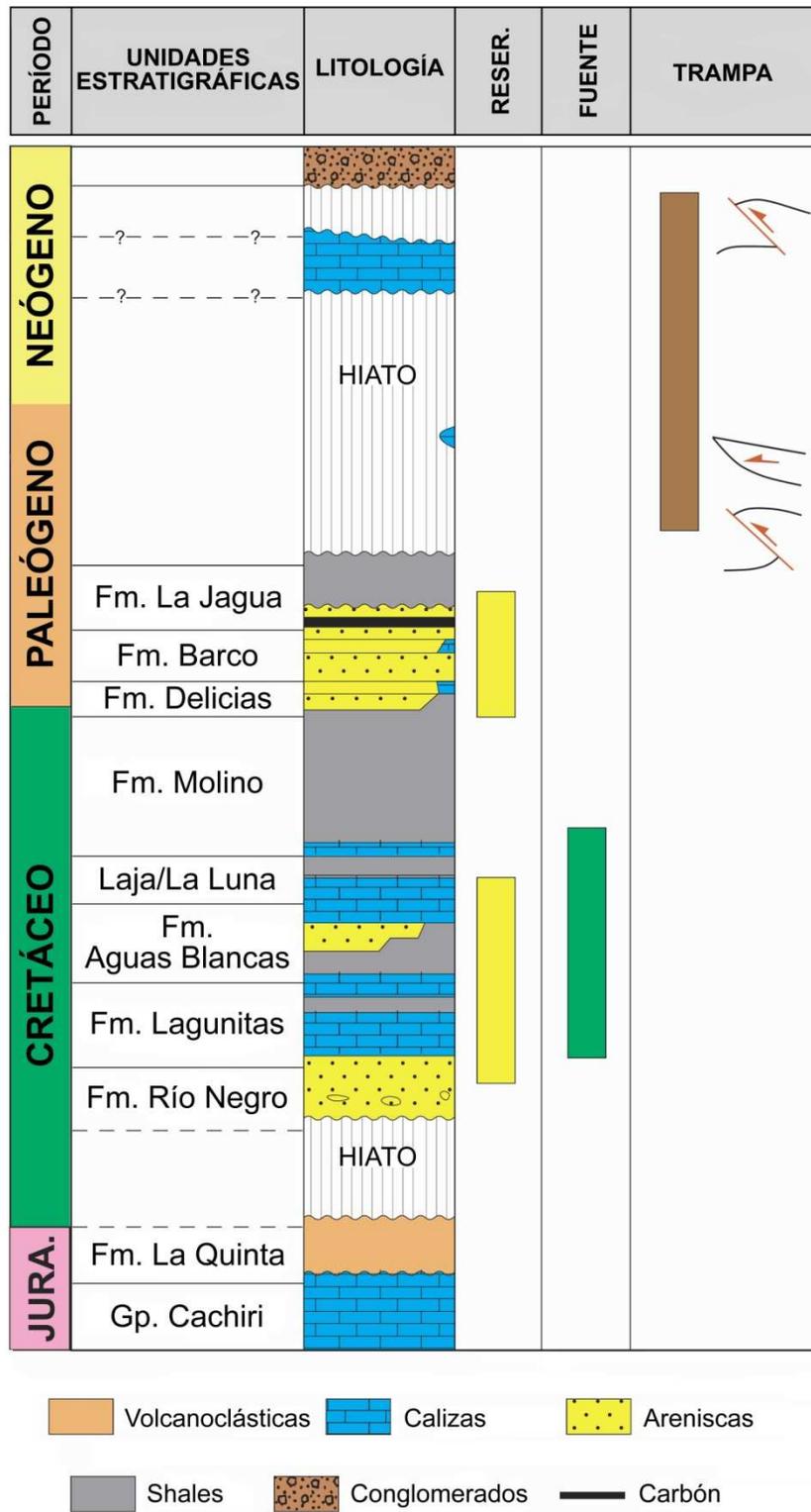


Figura 2. Columna estratigráfica de la Cuenca Cesar (Modificado de Barrero, y otros 2007).

3.1 FORMACIÓN LA QUINTA

a. Autor

Hernández (2003) indica que el nombre La Quinta fue usado por primera vez por Künding (1938) para describir las sedimentitas rojas ubicadas estratigráficamente entre el Pérmico y el Cretácico en Los Andes de Mérida, Venezuela.

b. Localidad tipo y afloramientos

Hernández (2003) reporta que la Formación la Quinta aflora a lo largo del flanco oeste de la Serranía del Perijá, al este de las poblaciones de La Jagua de Ibirico, Victoria de San Isidro y al sureste de Santa Isabel; Arias & Morales (1999) reportan que aflora cerca al Municipio de Manaure y se prolonga hacia el sur hasta la quebrada San Antonio.

c. Descripción Litológica

Hernández (2003) indica que está compuesta por una sucesión de limolitas rojas silíceas, ocasionalmente arenosas, macizas con estratificación plano paralela. Presentan laminación interna de plana paralela a ligeramente ondulada, algunas veces de arena fina, con venas de calcita y manifestaciones de malaquita. Están intercaladas con estratos medianos a gruesos de areniscas blancas, pardas y rojizas de grano fino a grueso, y niveles conglomeráticos con estratificación inclinada, cruzada y capas que se acuñan. En ocasiones, esta unidad es atravesada por ignimbritas oscuras con fragmentos volcánicos de 2 a 20cm; hacia el techo se encuentran localmente intercalaciones de tobas líticas (Figura 3).

d. Espesor y contactos

Su espesor es de 2300m en la localidad tipo. Cerca al Municipio de Manaure se calcula un espesor entre 2700m y 3000m, mientras en La Jagua de Ibirico su espesor disminuye notoriamente debido a fallas inversas locales. El contacto con la formación suprayacente (Formación Río Negro) es de tipo paraconforme según Forero (1972), pero en el filo El Avión en Sabana Rubia es discordante. El contacto inferior es discordante o fallado con rocas paleozoicas.

e. Edad

Su edad es Triásico Tardío - Jurásico Temprano, según (Forero, 1972).

f. Ambiente de Depósito

Según Cáceres y otros (1981), la depositación de la Formación La Quinta se realizó en una cuenca amplia afectada por una tectónica distensiva, donde las condiciones, primero fluviales con predominio de humedad y oxidación y luego volcánicas explosivas piroclásticas, dominaron la sedimentación.

g. Correlaciones

Ha sido correlacionada con la Formación Guatapurí (Tschanz, y otros 1969) y es equivalente con la Formación Saldaña (Cediell, y otros 1981 en Hernández, 2003).

3.2 FORMACIÓN RÍO NEGRO

a. Autor

La Formación Rio Negro fue designada por Hedberg, (1931) en Venezuela. En Colombia este nombre fue usado por Trumpy, (1949).

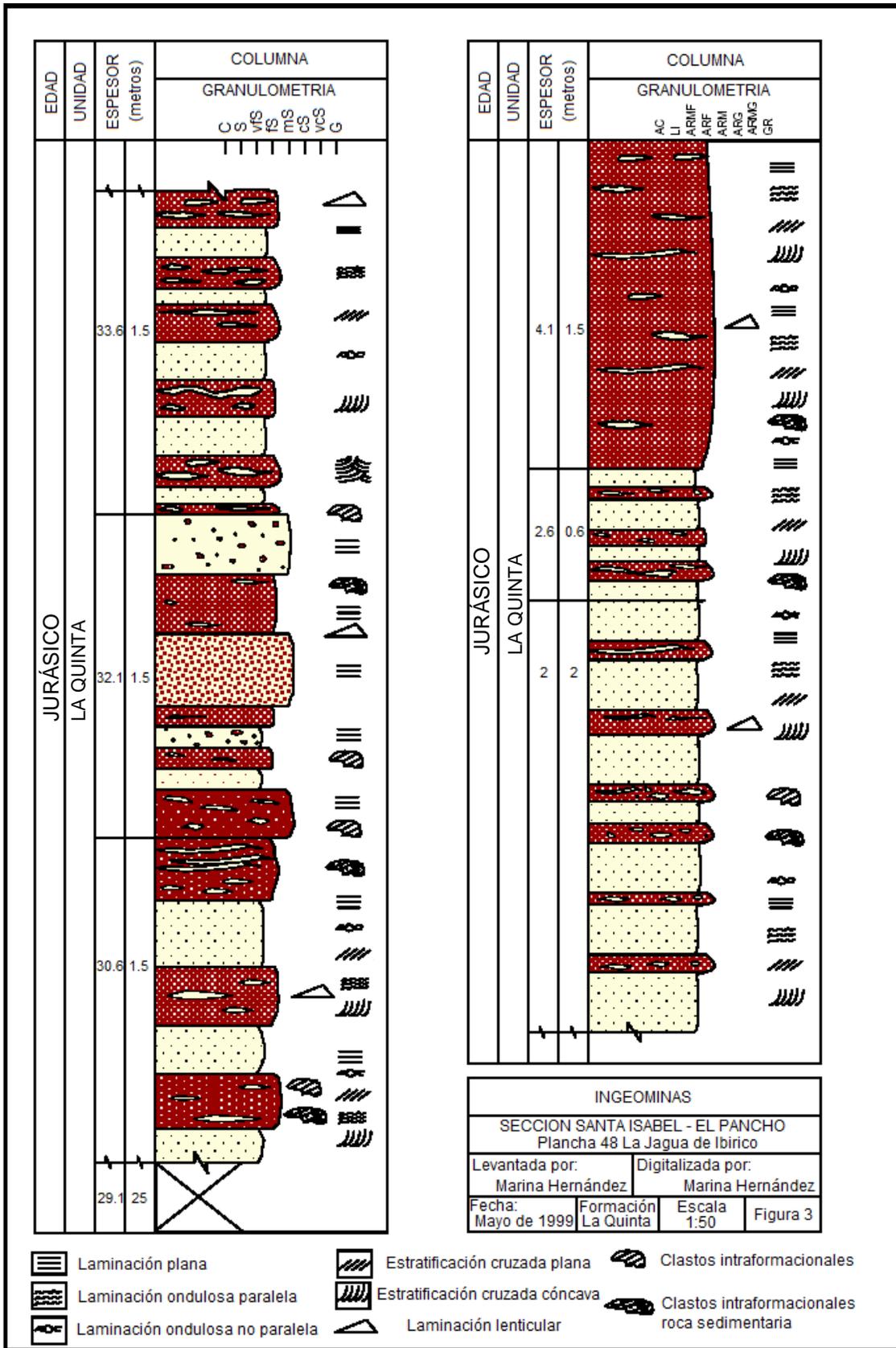


Figura 3. Columna estratigráfica de la Formación La Quinta (Hernández, 2003).

b. Localidad Tipo y Afloramientos

Hernández (2003) reporta que la Formación Río Negro aflora en las estribaciones de la Serranía del Perijá al oriente de las localidades de Poponte en el río La Mula y Rincón Hondo; en el costado suroriental de la Plancha 48, La Jagua de Ibirico, en el cerro Arenas Blancas, Cerro de San José, Cuchilla Cerro Azul y Loma La Victoria; cerca a la inspección de policía de Santa Isabel. Arias & Morales (1999) reportan que aflora al oriente de Manaure en el páramo Sabana Rubia, al suroriente de Codazzi por el Río Sicarare; al sur del Río Fernambuco entre Codazzi y Casacará; en la hacienda Carrizal, arroyo Arena, al oriente de Casacará; 4km al norte de la hacienda Betulia, al nororiente de Becerril; en los cerros Cabellera, América, La Pista y Puente Tierra, al oriente de Codazzi en el cerro Pancho, al oriente de Santa Isabel y al suroriente de Curumaní, por el curso del Río Animito y la quebrada La Esmeralda.

c. Descripción Litológica

En la Serranía del Perijá, la sucesión cretácica se inicia con esta unidad, cuyo nombre es el mismo al usado en Venezuela. La Formación Río Negro según Hernández (2003) es detrítica, de composición especialmente arcósica. En el cerro Arenas Blancas, al noroccidente de Poponte, está conformada por capas de arenisca de grano grueso, arenisca conglomerática y conglomerado; las capas son delgadas y en algunas se observa estratificación cruzada. Rivera (1998) encuentra areniscas de variada composición incluyendo cuarzoarenitas, litoarenitas y litoarenitas feldespáticas de tamaño de grano grueso a conglomerático, las litoarenitas en su mayoría son finas a gruesas.

La sucesión arenosa se prolonga hacia el sur, hasta el occidente de Santa Isabel donde forma pequeñas colinas.

d. Espesor y Contactos

Alcanza 3000m de espesor en la sección tipo en la Serranía del Perijá, Venezuela, aunque varía sustancialmente según Miller (1960). Ecopetrol en el Pozo Cesar A-1X reporta un espesor de 203 m para el área al occidente de La Jagua de Ibirico. Cáceres, y otros (1980) definen en su localidad tipo 1500m de espesor. Hernández (2003) compilando datos de campo con datos de pozo encontró un espesor de 200m a 250m. Las amplias variaciones en el espesor de la Formación Río Negro muestran el carácter transgresivo y discordante de la unidad sobre rocas más antiguas (Figura 4).

La Formación Río Negro suprayace discordantemente capas de la Formación La Quinta e infrayace de forma transicional al Grupo Cogollo.

e. Edad

Govea & Dueñas, (1975) le asignan una edad Barremiano-Aptiano Temprano, mientras que Gil & Martínez (1990) proponen una edad Aptiano Temprano.

f. Ambiente de Depósito

Por sus características litológicas Hernández (2003) ha postulado un ambiente de depósito que corresponde a abanicos aluviales, los cuales drenaban desde los altos del basamento (Formación La Quinta y rocas paleozoicas) ubicadas al oeste, este y norte de la actual

cuenca del Cesar. A medida que el mar avanzó en su proceso transgresivo, el ambiente se fue tornando marino (Cáceres, y otros 1980; García, 1990).

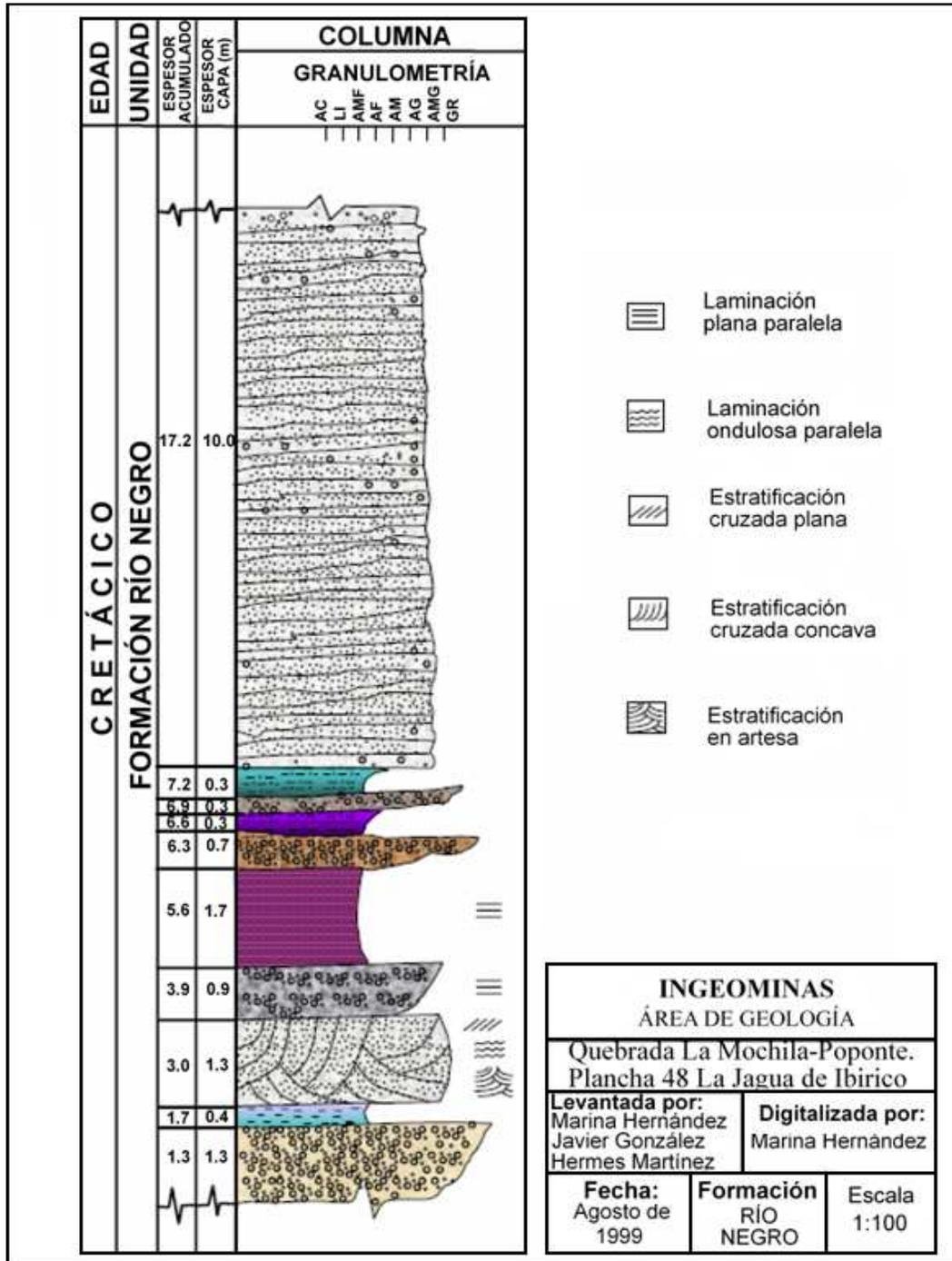


Figura 4. Columna estratigráfica de la Formación Río Negro (Hernández, 2003).

g. Correlaciones

Según Govea & Dueñas (1975) se correlaciona con la Formación Río Negro en Venezuela, con la base de la Formación Uribante en el área de Catatumbo y con la Formación Tambor en el Valle Medio del Magdalena.

3.3 FORMACIÓN LAGUNITAS

a. Autor

La Formación Lagunitas fue designada por Neelands (1922) en Lill & Nugent, (1950).

b. Localidad Tipo y Afloramientos

La localidad tipo de la Formación Lagunitas se encuentra en la Quebrada Jagüey cerca de la población de Lagunitas, en el valle del Río Ranchería. Aflora en el Arroyo Zarate, Arroyo Salatiel y la Quebrada Zumbador, al oriente del Corregimiento de la Victoria de San Isidro y en el Arroyo El Caudaloso al suroriente de La Jagua de Ibirico.

c. Descripción Litológica

Litológicamente Hernández (2003) indica que está compuesta por calizas fosilíferas (biomicritas) en capas gruesas, que generalmente son puras pero algunas llegan a ser arcillosas de color gris claro a gris oscuro, interestratificadas con lutitas y margas de color blanco a gris. Las lutitas son parcialmente calcáreas y las margas son solubles (Cáceres, y otros 1981), los fósiles en su mayoría son conchas de pelecípodos, gasterópodos, corales y amonitas (Figura 5).

d. Espesor y Contactos

La Formación Lagunitas según Hernández (2003), presenta un espesor promedio de 280m a 450m. En el pozo Compae-1 se perforaron 268,4m (Rivera, 1998), en el pozo el Molino-1X se perforaron 527m, en el pozo Molino-1 se perforaron 257m, en el pozo Papayal-1 se perforaron 290m y en el pozo El Cerrejón se perforaron 285m (Cáceres, y otros 1981). El contacto con la Formación Rio Negro es transicional en algunas ocasiones; con la Formación La Quinta es erosivo de bajo ángulo y el contacto con la suprayacente Formación Aguas Blancas es transicional.

e. Edad

Gil & Martínez (1990) y Hernández (2003) le asignan una edad Aptiano Tardío.

f. Ambiente de Depósito

La Formación Lagunitas fue depositada en unas condiciones de plataforma media a interior de un mar abierto rico en carbonatos y con relativa abundancia de materia orgánica (Cáceres, y otros 1981).

g. Correlaciones

Hernández (2003) la correlaciona con la Formación Apón en el área de Venezuela, con la Formación Tibú en el Catatumbo y con la Formación Paja en el área del Valle Medio del Magdalena. Gil & Martínez, (1990) la correlacionan con la parte basal del Miembro Tibú (Concesión Barco), con la Formación Paja y la Formación Rosablanca en el Valle Medio del Magdalena y en Venezuela con la Formación Machiques.

3.4 FORMACIÓN AGUAS BLANCAS

a. Autor

La unidad fue definida por Haught y otros (1945).

b. Localidad Tipo y Afloramientos

Hernández (2003) reporta que la localidad tipo está localizada al suroeste de Valledupar en la quebrada Aguas Blancas. Está subdividida en tres miembros: el primero es un conjunto lodolítico calcáreo a la base llamado Miembro Ánimas, el siguiente es un conjunto arenoso denominado Miembro Tucuy y por último un conjunto calcáreo superior denominado Miembro Maracas. Aflora al oriente de la falla Nueva Granada y del Corregimiento de la Victoria de San Isidro, y al noreste del Corregimiento de Estados Unidos en el Río Tucuy.

c. Descripción Litológica

El Miembro Ánimas está compuesto por shales negros carbonosos, calcáreos con abundante materia orgánica, intercalados con calizas negras micríticas, localmente fosilíferas (bivalvos), carbonosas que pueden gradar lateralmente a areniscas de grano fino compuestas por cuarzo con cemento calcáreo. También se presentan limolitas calcáreas carbonosas (Hernández, 2003).

El Miembro Tucuy está compuesto hacia la base por limolitas arenosas grises oscuras, ligeramente calcáreas, algo físciles, las cuales gradan localmente a areniscas de grano fino, subangular a subredondeado, moderadamente sorteadas, color pardo, compuestas de cuarzo, con matriz arcillosa, cemento silíceo o calcáreo. En menor proporción se encuentran arcillolitas limoarenosas, levemente calcáreas, algo físciles, de color gris pardo, carbonosas y moscovíticas (Hernández, 2003); Rivera, (1998) reporta algunos niveles de calizas muy claras con presencia de foraminíferos y moluscos con textura packstone.

El Miembro Maracas según Hernández (2003) está compuesto por calizas lumaquéllicas con conchas de pelecípodos y gasterópodos similares a las de la Formación Lagunitas. Rivera, (1998) reporta margas color gris marrón oscuras micropiriticas con textura wackestone, calizas grises oscuras con fragmentos de ostrácodos y gastrópodos, lodolíticas a limolíticas con textura wackestone, intercaladas con delgadas capas de areniscas muy finas y lutitas con foraminíferos hacia la base.

d. Espesor y Contactos

La Formación Aguas Blancas presenta un espesor promedio de 750m (Hernández, 2003), aunque en el pozo Compae-1 se perforaron 513m (Rivera, 1998), en el pozo Molino-1X se perforaron 275m, en el pozo Molino-1 se perforaron 274m y en los pozos Papayal-1 y El Cerrejón se perforaron 280m (Cáceres, y otros 1981). Gil & Martínez (1990) midieron 710m en el área de Cesar.

Está en contacto concordante con la suprayacente Formación La Luna y transicional sobre la Formación Lagunitas, en partes discordante sobre la Formación La Quinta.

e. Edad

Su edad es Aptiano según Govea & Dueñas (1975). Rinaldi y otros (2005) asignan una edad Aptiano-Albiano para todo el Grupo Cogollo en Venezuela. Cáceres y otros (1981) le asignan una edad Albiano Medio a Tardío.

f. Ambiente de Depósito

La Formación Aguas Blancas se depositó en un ambiente que se considera de plataforma interior a media, de un mar tropical transgresivo (Cáceres, y otros 1981). Hernández, (2003) interpreta que al Miembro Ánimas se le considera de un ambiente de depósito marino profundo.

Gil & Martínez (1990) interpretan que la sedimentación del Grupo Cogollo ocurrió inicialmente sobre un substrato de pendiente suave, cercano a la plataforma, con profundidades que oscilaban alrededor de los 100m, como lo evidencia la presencia de algas calcáreas marinas y de foraminíferos planctónicos. La diversidad de fauna observada, braquiópoda, equinoderma, ostrácoda, molusca, briozoo y radiolarios sugiere condiciones de baja concentración de sal, e indican buena circulación de agua.

Reading (1980) plantea el desarrollo de barras y depósitos interbarras que representan ambientes profundos que se manifiestan en la cuenca de Cesar como wackestone y mudstone.

g. Correlaciones

Hernández (2003) correlaciona la Formación Aguas Blancas en el Miembro Ánimas con la Formación Mercedes en el área del Catatumbo, con la Formación Simití en el Valle Medio del Magdalena y con la Formación Lisure en Venezuela. Correlaciona el Miembro Tucuy con la Formación Aguardiente en el Catatumbo y con la Formación Tablazo en el Valle Medio del Magdalena. Gil & Martínez (1990) correlacionan la Formación Aguas Blancas con la Formación Cogollo en el Catatumbo y los Miembros Aguardiente y Mercedes de la Formación Aguardiente, en el Valle Medio del Magdalena con las Formaciones Salto, Simití, Tablazo y Paja, y en Venezuela con las Formaciones Maracas, Lisure y Piche.

3.5 FORMACIÓN MOLINO

a. Autor

La Formación Molino fue denominada por Haugth, y otros (1945).

b. Localidad Tipo y Afloramientos

La localidad tipo se encuentra en el río Molino en el área de Ranchería. Hernández, (2003) reporta afloramientos de la Formación Molino en los alrededores de la localidad de El Molino, estribaciones de la Serranía del Perijá. Aflora en el área de la Loma de La Estancia al noroeste de La Jagua de Ibirico.

c. Descripción Litológica

Se compone de una sucesión monótona de lutitas gris azulosas y grises oliva a negras, calcáreas y con abundantes microfósiles. Salazar (2005) describe estas lutitas como shales, los cuales constituyen la mayor parte de la unidad, y añade que son de color negro a gris oscuro, ricas a muy ricas en materia orgánica, en paquetes gruesos o medios, masivas, bioturbadas, o con láminas muy finas planas paralelas a lenticulares, discontinuas a continuas. Hernández (2003) reporta que presenta delgadas intercalaciones de areniscas de grano fino, glauconíticas, limolitas y calizas grises a negras, en capas delgadas; Rivera (2003) incluye capas de arcillolitas gris claro, ligeramente calcáreas y moderadamente

duras, y describe capas de carbón bituminoso brillante con fractura concoidea en capas con espesores entre 0.3m y 1m.

d. Espesor y Contactos

Cáceres y otros (1981) reportan que en el pozo El Molino-1X se perforaron 514m, en el pozo El Molino-1 se perforaron 493m, en el pozo Cerrejón-1 se perforaron 590m, y en el pozo Papayal se perforaron 120m; por otro lado Rivera (2003) reporta 625m para la Formación Molino y Rivera (1998) reporta 515m. Hernández (2003) identifica un adelgazamiento en sentido noroccidental.

Tschanz y otros (1969) consideran los contactos superior e inferior de la Formación Molino como transicionales. Cáceres y otros (1981) indican que el contacto con la Formación la Luna es concordante y con la Formación Hato Nuevo es discordante en un ángulo bajo. Salazar (2005) indica que el contacto con la unidad suprayacente es transicional.

e. Edad

Su edad es Campaniano - Maastrichtiano según Gandolfi (1995), en Hernández (2003). García (1990) asigna una edad Campaniano y Cáceres, y otros (1981) asignan una edad Santoniano - Maastrichtiano Temprano.

f. Ambiente de Depósito

La Formación Molino se depositó en condiciones marinas de mar abierto en un ambiente batial a abisal (1000m-2000m), con circulación moderada y salinidad normal (Cáceres, y otros 1981), sin embargo Salazar (2005) interpreta su ambiente de depósito como offshore inferior a superior hasta shoreface inferior.

g. Correlaciones

En el norte de Colombia y oeste de Venezuela estratos del Campaniano a Maastrichtiano Temprano se incluyen dentro de la Formación Colón y Mito Juan en el área del Catatumbo, además es correlacionable con la Formación Umir en el Valle Medio del Magdalena (Hernández, 2003).

4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La cuenca de Cesar-Ranchería es un cuenca asimétrica cuyo mayor espesor se encuentra hacia el sureste y su geometría está definida por la conjunción de tres placas tectónicas (Nazca, Caribe y Suramerica) (Ujueta & Llinas, 1990). Como resultado de la interacción de estas tres placas se desarrollaron sistemas de fallas como el de Santa Marta-Bucaramanga y Oca y el levantamiento de la Serranía del Perijá y la Sierra Nevada de Santa Marta (Hernández, 2003).

Cáceres y otros (1981) establecieron dos series de esfuerzos compresivos, el primero con rumbo $N40^{\circ}W \pm 5^{\circ}$ y el segundo con sentido $N75^{\circ}W \pm 10^{\circ}$. Además Hernández (2003) establece un acortamiento de la Cordillera Oriental través de desplazamiento en las fallas Perijá (46km) y Boconó (50km) (Figura 6).

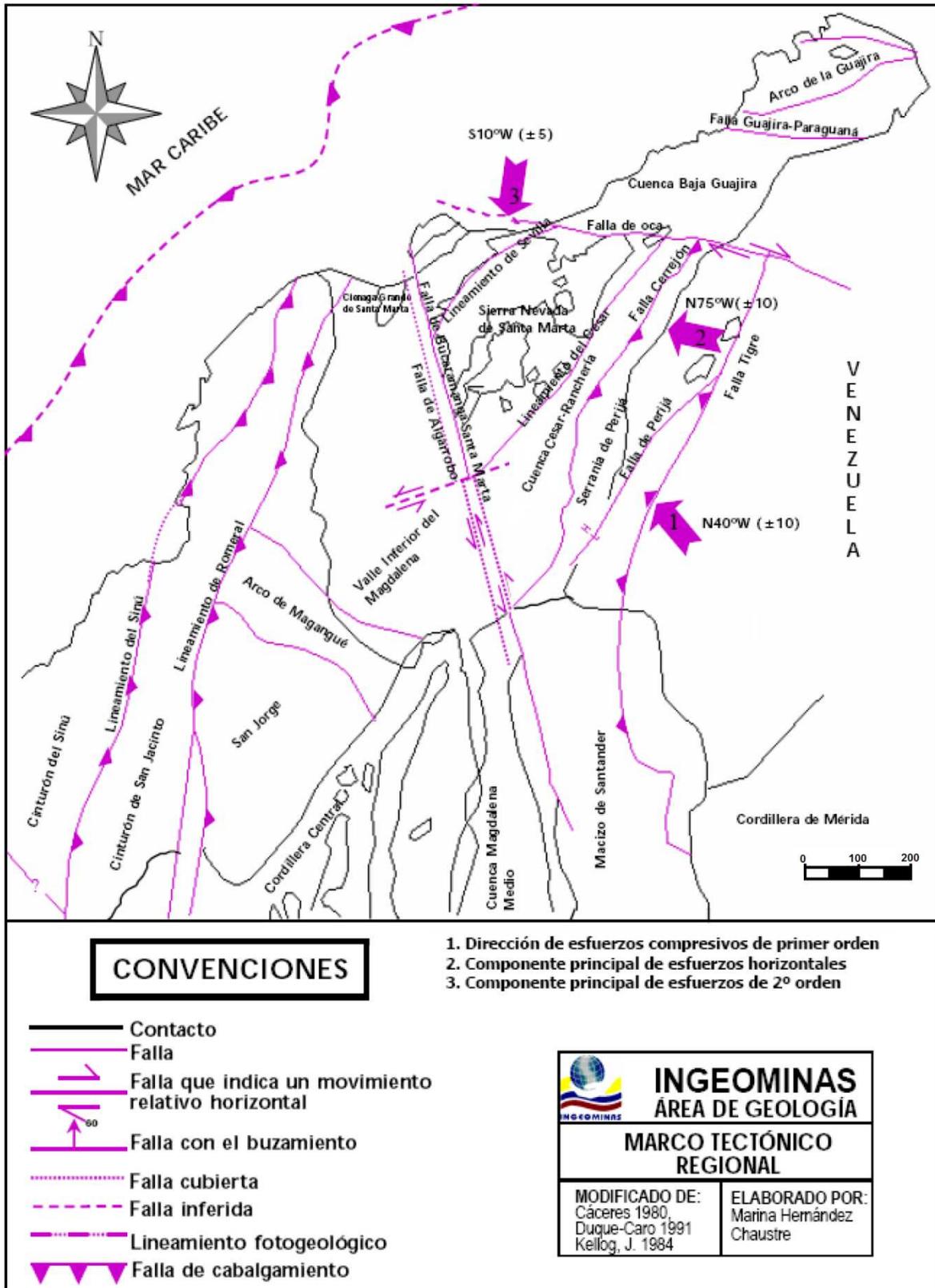


Figura 6. Marco Tectónico del Norte de Colombia, con la dirección de los esfuerzos principales que afectan la Cuenca Cesar - Ranchería (Hernández, 2003).

4.1 PLIEGUES

4.1.1 Sinclinal de La Loma y Anticlinal de Tucuy

Hernández (2003) reporta que para el área de La Jagua de Ibirico estos pliegues presentan una dirección NE-SW, y afectan la secuencia de areniscas de grano grueso y conglomerados de la Formación Cuesta y las rocas de la Formación Los Cuervos; los flancos presentan inclinaciones entre 13° y 18°, sin embargo, los buzamientos en las explotaciones alcanzan hasta los 35° en el cierre del sinclinal.

4.1.2 Sinclinal de Ranchería

Rodríguez & Londoño (2002) reportan que se encuentra al noreste del Cerro Cerrejón, con un rumbo N35°E.

4.1.3 Sinclinal Los Venados, Anticlinal de la Estancia, Anticlinal de Becerril

Hernández (2003) agrupa esta serie de pliegues como parte del costado occidental del Sinclinorio de la Jagua, y establece como rumbo principal NE-SW. El Anticlinal de Becerril se prolonga hacia el norte cerca al municipio de Becerril.

4.1.4 Sinclinal de La Jagua

Se encuentra aproximadamente 5km al nororiente del Municipio de La Jagua de Ibirico; es ligeramente asimétrico con buzamientos entre 10° y 35°, una longitud a lo largo del eje de aproximadamente 10,4Km y aproximadamente 4Km de ancho. Tiene una dirección N55°E±10°, y hacia el sur, la estructura es amplia y se cierra al norte con un cabeceo al oeste (Hernández, 2003).

4.1.5 Anticlinal de La Jagua

Es una estructura asimétrica ubicada al oriente de La Jagua de Ibirico; afecta principalmente rocas del Miembro Medio de la Formación Los Cuervos. El eje presenta una dirección de N25°E ±10° con un cabeceo de 3° hacia el norte. En el flanco oriental, las capas buzán entre 35° y 45° y en el flanco occidental entre 15° y 35°. Se encuentra fallado en su flanco oriental (Hernández, 2003).

4.1.6 Sinclinal de Nueva Granada

Localizado en el sector oriental, hacia las estribaciones de la Serranía del Perijá con una orientación N35°E-N45°E. En el flanco occidental, los buzamientos de las capas están entre 20°-30° y en el flanco oriental entre 30°-60°.

4.2 FALLAS

4.2.1 Falla de Santa Marta - Bucaramanga

Es una falla sinistral, con rumbo noroeste-sureste, tiene una longitud de 580Km y un desplazamiento lateral de 110Km a 115Km (Kellogg, 1981). Arias & Morales (1999) establecen un desplazamiento lateral de 100Km, e indican que según Tschanz y otros (1974), tuvo un desplazamiento vertical de 12Km a partir del Mioceno Medio.

4.2.2 Falla de Oca

Rodríguez & Londoño (2002) reportan que la Falla de Oca se extiende aproximadamente por 300Km desde el extremo noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, donde se

cruza con la Falla Santa Marta-Bucaramanga, hasta la isla de Toas y posiblemente, se prolonga hasta su intersección con la Falla Boconó en Venezuela, para posteriormente unirse con la Falla San Sebastián-El Pilar. Hernández, (2003) indica que es una falla de rumbo con sentido dextral, con rumbo E-W y un desplazamiento de 20Km, Ujueta & Llinás (1990) establecen una longitud de 700Km, Rodríguez & Londoño (2002) establecen que los principales movimientos de la Falla Oca están relacionados al choque de la Placa Caribe con la Placa Suramericana y a la Orogenia Andina. Las evidencias de campo indican que se dieron a partir del Paleógeno y continúan hasta hoy.

4.2.3 Falla de Ranchería

Ujueta & Llinás (1990) describen en el valle del Río Ranchería esta estructura, con una extensión aproximada de 22Km, entre el arroyo Conejo y un poco al sur de Roche, pero posiblemente tiene continuidad hacia el sur en el Departamento del Cesar. La falla se encuentra parcialmente cubierta, tiene dirección noreste y constituye el límite sureste de la Sierra Nevada de Santa Marta.

4.2.4 Falla de Cerrejón

Es una falla de cabalgamiento de bajo ángulo ($15^{\circ} \pm 10^{\circ}$) con rumbo sureste y un desplazamiento mínimo de $1,7 \pm 0,6$ Km en la vertical y $7,8 \pm 2$ Km en la horizontal; puede conectarse al sur con la Falla de Manaure, donde permite que rocas del Jurásico y del Cretácico se encuentren por encima de rocas del Terciario. Durante la Orogenia Andina en el Plioceno la parte norte de Perijá fue levantada 4,5Km y cabalgada más de 16Km hacia el NW sobre la Falla Cerrejón (Kellogg, 1981).

4.2.5 Falla de Perijá

Es una falla inversa de alto ángulo con dirección N18°E al sur y N26°E al norte; limita con la Serranía del Perijá al oriente, y se encuentra cabalgando sobre el Sinclinorio de la Jagua al occidente (Hernández, 2003).

4.2.6 Falla de Arenas Blancas

Es una falla subvertical inversa con un trazo bien definido desde el oriente de La Jagua de Ibirico, prolongándose hacia el norte hasta la frontera con Venezuela en dirección N50°E; pone en contacto rocas Paleozoicas con Jurásicas y Cretácicas, y es más reciente que la Falla de Perijá (Hernández, 2003).

4.2.7 Falla Nueva Granada

Falla con dirección N30-60°E, de alto ángulo y carácter inverso; limita al oeste con el flanco oriental del Anticlinal Nueva Granada (Hernández, 2003).

5 EVOLUCIÓN GEOLOGICA

5.1 PALEOZOICO

Para el Paleozoico Temprano (Cambro-Ordovícico) Gil & Martínez, (1990) reportan una depositación clástica. Hernández (2003) indica que dicha depositación de sedimentos pelíticos se encuentra estratificada por flujos de lava, que posteriormente en el Silúrico Temprano sufrieron procesos de metamorfismo de bajo grado y alta temperatura; formando esquistos de actinolita-clorita, cuarcitas y filitas que corresponden a la Unidad Metasedimentaria de La Virgen. En el Silúrico y Devónico Temprano ocurrieron eventos simultáneos de levantamiento, plegamiento, actividad plutónica y erosión relacionados a la Orogenia Caledoniana.

Posterior a la Orogenia Caledoniana Gil & Martínez (1990) indican que ocurre la depositación de sedimentos marinos ubicados al occidente por un proto-océano Pacífico; Hernández (2003) añade que los sedimentos son especialmente gravas, arenas, shales y shales calcáreos cubriendo áreas positivas del cratón debido a una transgresión.

Para el Paleozoico Tardío Hernández (2003) establece un segundo evento tectónico importante, la Orogenia Herciniana, que ocurre en el Devónico Tardío y que se caracteriza principalmente, por procesos de fallamiento y fuerte erosión que originan un hiato entre los sedimentos devónicos y carboníferos.

5.2 TRIÁSICO - JURÁSICO

Durante el Triásico se presentan movimientos asociados a rifting gracias a la separación de masas continentales (Figura 7); Laurasia se divide y origina mares entre Norteamérica, Suramérica y África, gracias a los cuales se produce la apertura del mar Caribe y a su vez se forman fosas tectónicas que permiten la depositación de la Formación La Quinta. Procesos de Vulcanismo de flujo y piroclástico contribuyeron con material de flujo, cenizas y detritos a la secuencia, especialmente en el Jurásico Medio, donde además ocurrió el emplazamiento de plutones (Hernández, 2003). Gil & Martínez (1990) reportan que las secuencias volcánicas están representadas por andesitas y riolitas y los cuerpos plutónicos por dioritas y cuarzodioritas.

5.3 BARREMIANO - APTIANO TEMPRANO

Durante este período se deposita la Formación Río Negro. Gil & Martínez (1990) indican que ocurre sobre paleodepresiones configurando una topografía suave que favorece la depositación de carbonatos hacia el tope de la formación. Previo a la depositación de carbonatos existe un sistema de fosas tectónicas a lo largo de Suramérica (Figura 8); durante el Cretácico Temprano, se formaron tres surcos subsidentes importantes en el área de Venezuela: el Surco Táchira, el Surco Trujillo y el Surco Machiques, este último presente en la Serranía del Perijá (Zambrano, y otros 1975).

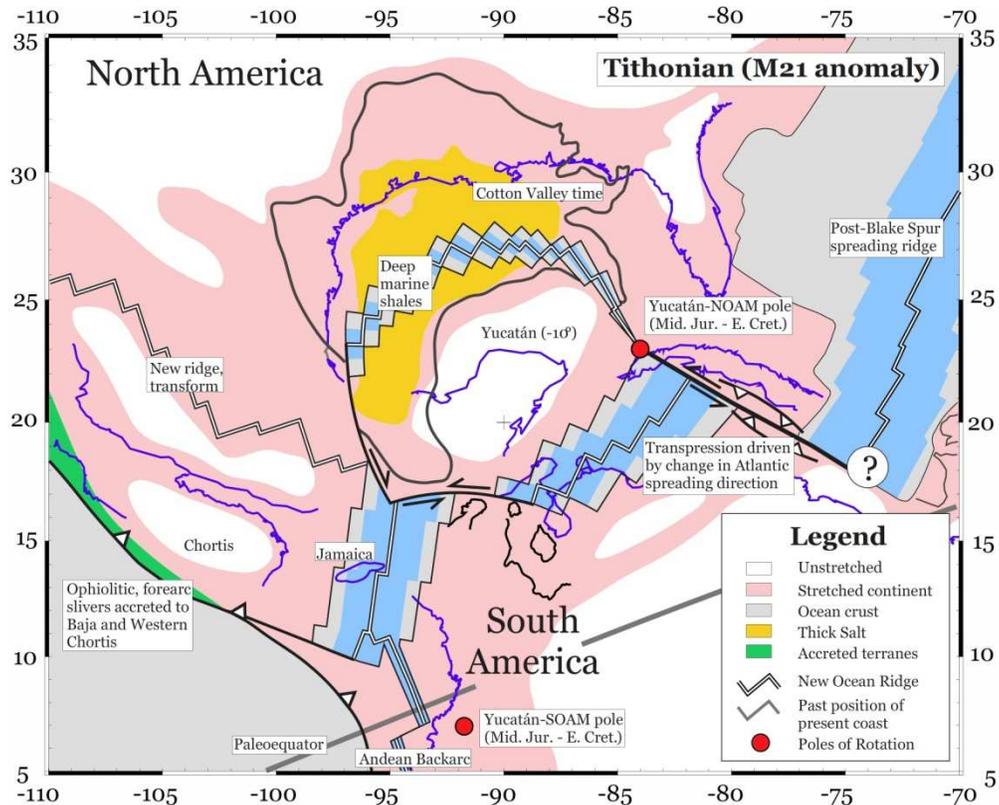


Figura 7. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Titoniano (Pindell, y otros 2001).

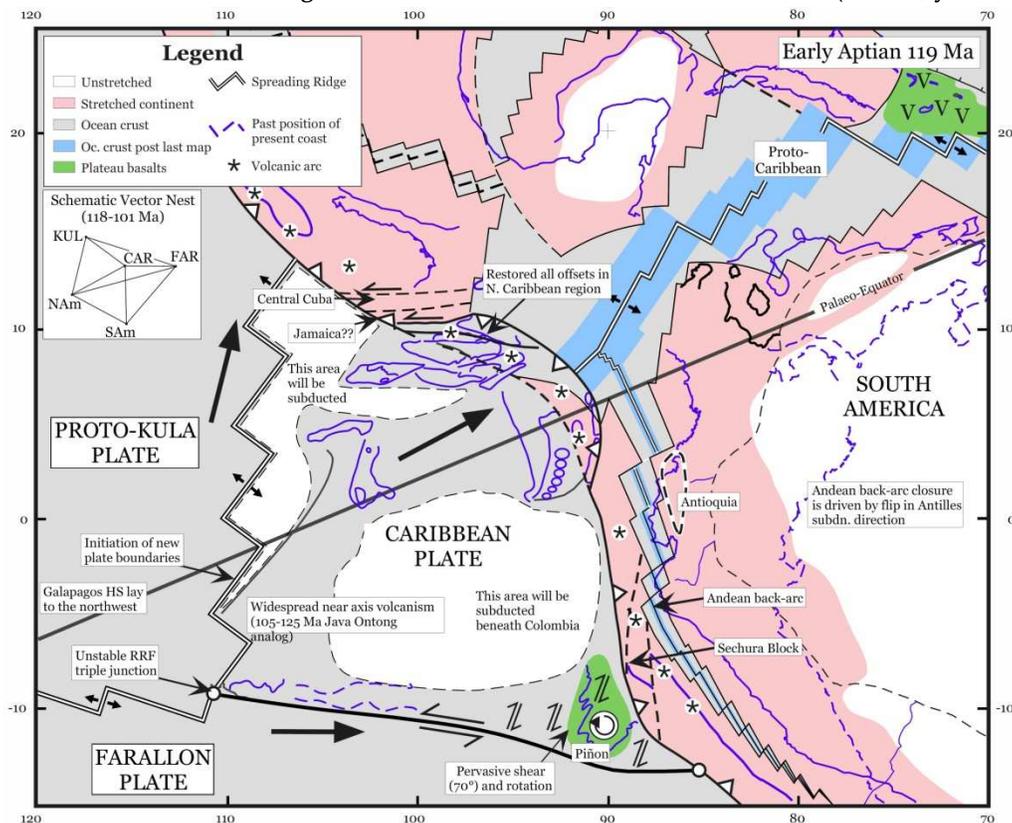


Figura 8. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Aptiano (Pindell, y otros 2001).

5.4 APTIANO TARDÍO - SANTONIANO

Desde el Aptiano Tardío hasta el Albiano se deposita el Grupo Cogollo. Hernández (2003) indica que la subsidencia es continua y se forma un ambiente de depósito marino, donde predomina la precipitación química de carbonato (Figura 9). Arias & Londoño (1999) indican que dicha depositación ocurre en una plataforma abierta con cambios faciales, debido a una mayor subsidencia hacia el sur. Gil & Martínez (1990), señalan que la plataforma sobre la cual se desarrolló el Grupo Cogollo tenía un delgado sustrato clástico de pendiente muy suave, que formó una rampa sobre la cual se generaron varios juegos de barras favorecidas por la alta influencia del oleaje, sin embargo, por debajo del nivel base de las olas de tormenta, se depositaron carbonatos y shales de condiciones euxínicas. Posteriormente, el oleaje fuerte inundó la plataforma y formó pequeñas cuencas intraplataforma. Gil & Martínez (1990) determinaron que la Formación La Luna se depositó durante el Cenomaniano, sin embargo Hernández, (2003) extiende su período de depositación durante el Turoniano, Coniaciano y posiblemente hasta el Santoniano, período en el que la subsidencia alcanza su máxima tasa, ocasionando una profundización del mar y con ello condiciones para la acumulación de calizas pelágicas.

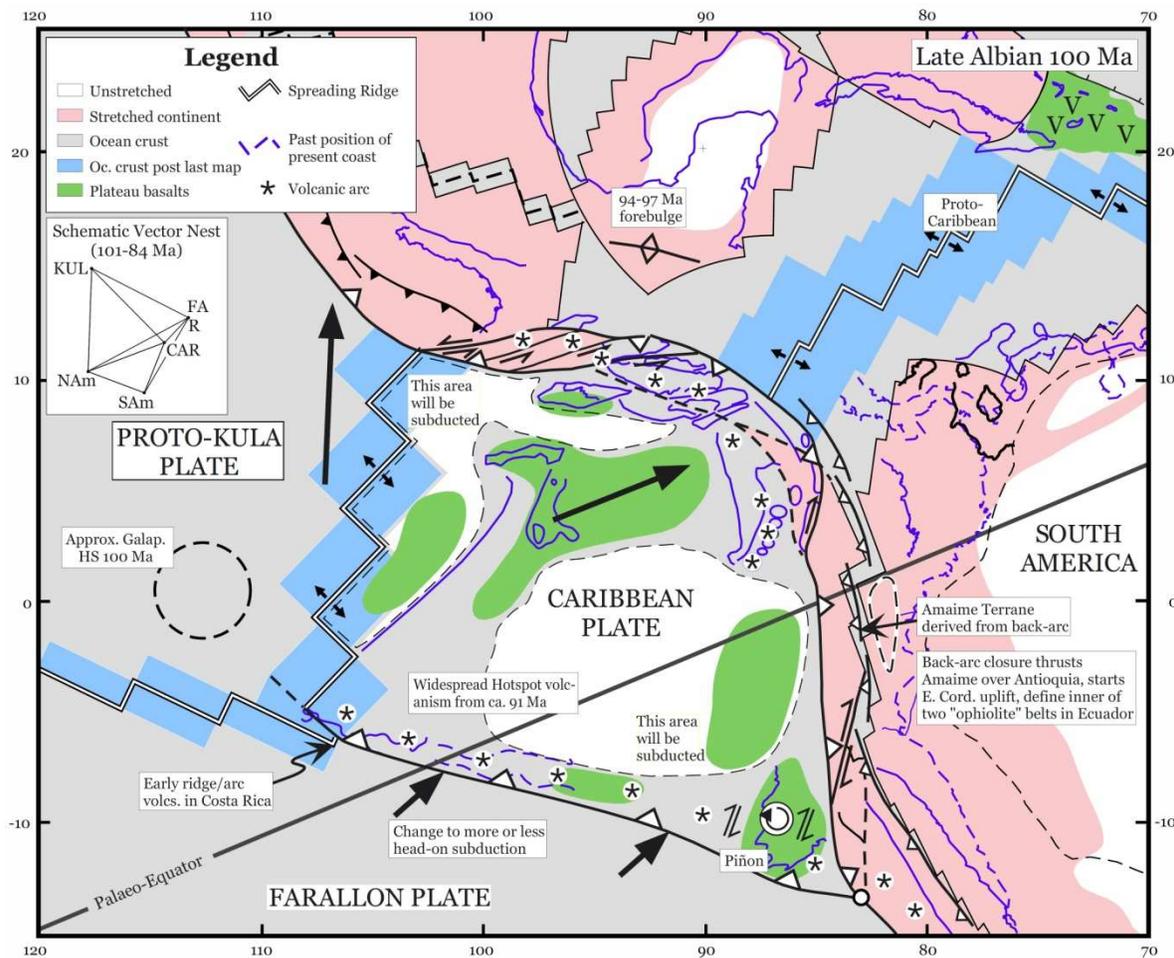


Figura 9. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Albiano (Pindell, y otros 2001).

5.5 CAMPANIANO - MAASTRICHTIANO

Durante el Campaniano y Maastrichtiano se deposita la Formación Molino, en un ambiente marino profundo que continúa hasta el Campaniano Medio (Hernández, 2003). Para el Maastrichtiano, Bayona y otros (2007) indican que en el área de Ranchería los sedimentos de la Formación Molino provienen de la denudación del sector occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta. Villamil, (1999), establece que en el área de Venezuela se deposita la Formación Tres Esquinas (con presencia de glauconita y fosfatos), cuya procedencia es el Cratón de Guyana. El mismo autor ubica un eje de depositación para el Campaniano, que se encuentra donde actualmente se ubica el piedemonte oriental de la Cordillera Central, la cual comienza a levantarse levemente al igual que la Sierra Nevada de Santa Marta y el Macizo de Santander (Figura 10).

En el área de Venezuela se depositan las Formaciones Mito Juan y Colón, de composición clástica de grano fino, producto del comienzo de la regresión generalizada para este período y el comienzo del acelerado levantamiento de la Cordillera Central (Villamil, 1999). Este evento marca la fase Pre-Orogenia Andina, generando así un desplazamiento hacia el oriente del eje de depositación en la medida en que la Cordillera Central se levanta.

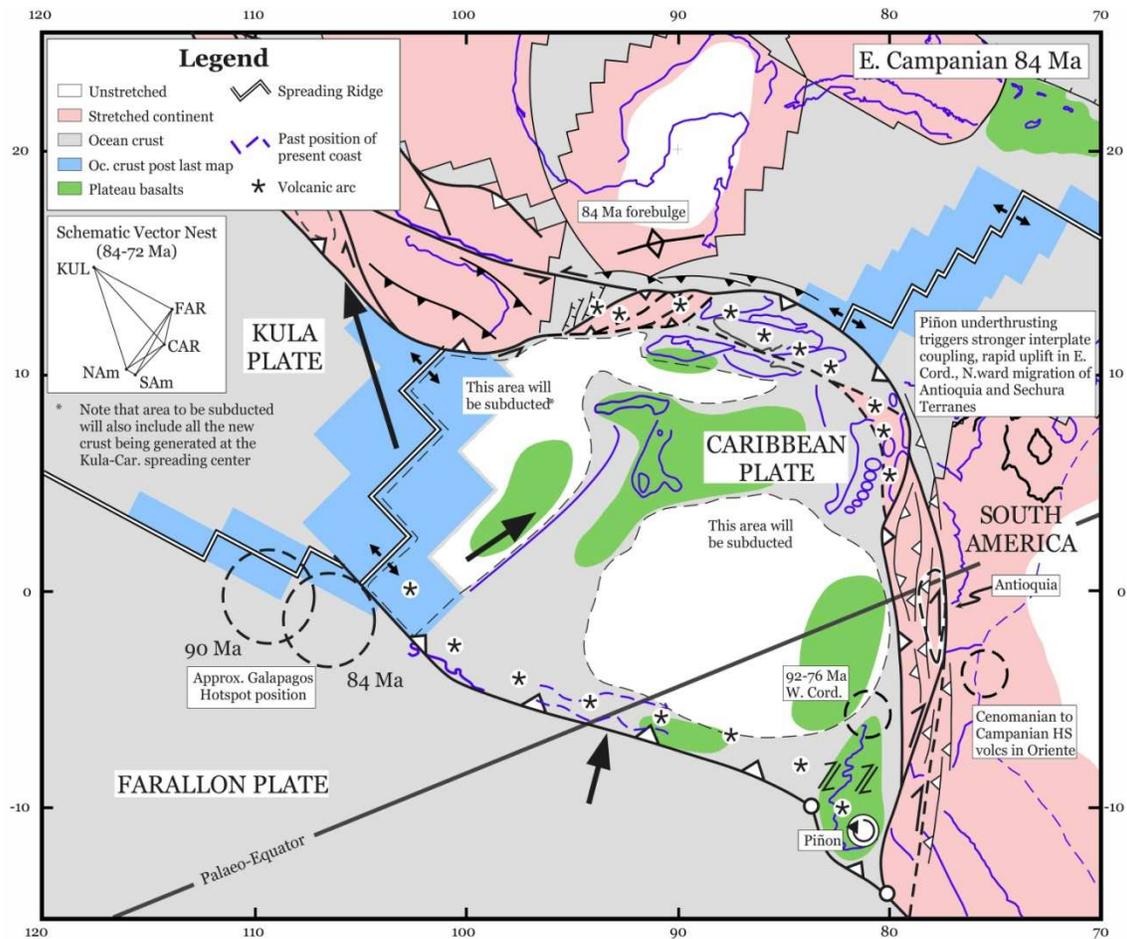


Figura 10. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Campaniano (Pindell, y otros 2001).

5.6 PALEOCENO

Hernández (2003) indica que este período inicia con la depositación de las Formaciones Barco y Los Cuervos, en un ambiente continental producto de una lenta regresión mientras que en el área de Ranchería se depositan la Formaciones Hato Nuevo y Manantial en un ambiente marino durante el Paleoceno Temprano. Villamil, (1999), reporta que la Cordillera Central continúa levantándose, y presenta una asimetría, ya que su flanco occidental tiene un mayor ángulo que el flanco oriental, lo que indica que las Cordilleras Central y Oriental fueron sometidas a esfuerzos compresivos y como consecuencia de la deformación se produjo una discordancia hacia la base de la Formación Barco, que según el mismo autor, se encuentra entre el Maastrichtiano Tardío y el Paleoceno Temprano. En el Paleoceno Tardío se deposita la Formación Cerrejón. Bayona y otros (2007), reportan que en el Paleoceno Tardío ocurre la migración de un sistema deltaico hacia el oriente y de ciénagas para la Formación Cerrejón, período en el cual se han interpretado sistemas fluviales que parten de las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, provenientes de un terreno metamórfico de medio a alto grado, con unidades magmáticas de carácter calco-alcalino y rocas volcánicas y sedimentarias que se extienden hasta el Oriente de Maracaibo (Figura 11).

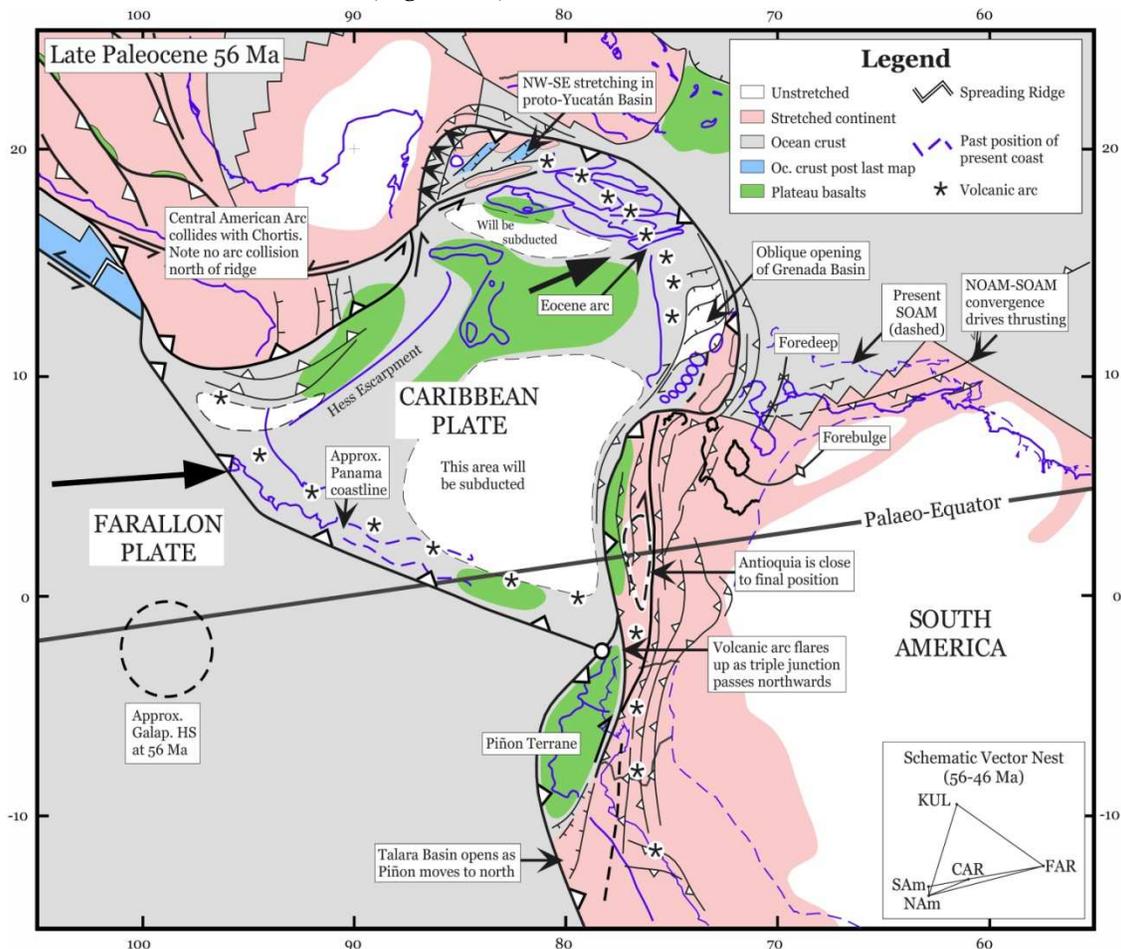


Figura 11. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Paleoceno (Pindell, y otros 2001).

5.7 EOCENO - OLIGOCENO

A causa del desarrollo de la Orogenia Pre-Andina durante el Eoceno, el espacio de acomodamiento para el norte de Suramérica, decrece significativamente y en su clímax acelera la tasa de levantamiento de la Cordillera Central (Villamil, 1999) (Figura 12). Mora & García (2006) utilizando líneas sísmicas, establecen que el Sistema de Fallas Santa Marta-Bucaramanga fue el responsable de la intensa deformación que afectó a las unidades Pre-Oligoceno, estableciendo un límite activo entre las cuencas Cesar-Ranchería y Valle Inferior del Magdalena, durante el Eoceno Tardío y el Oligoceno Temprano.

En el Oligoceno Tardío se inicia un estilo tectónico de bloques que involucra el basamento y culmina durante el Plioceno con el cabalgamiento al noroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta y Serranía del Perijá sobre las cuencas adyacentes (Hernández, 2003).

Villamil, (1999) reporta que para este período los drenajes del Río Magdalena y Orinoco toman la dirección que actualmente presentan.

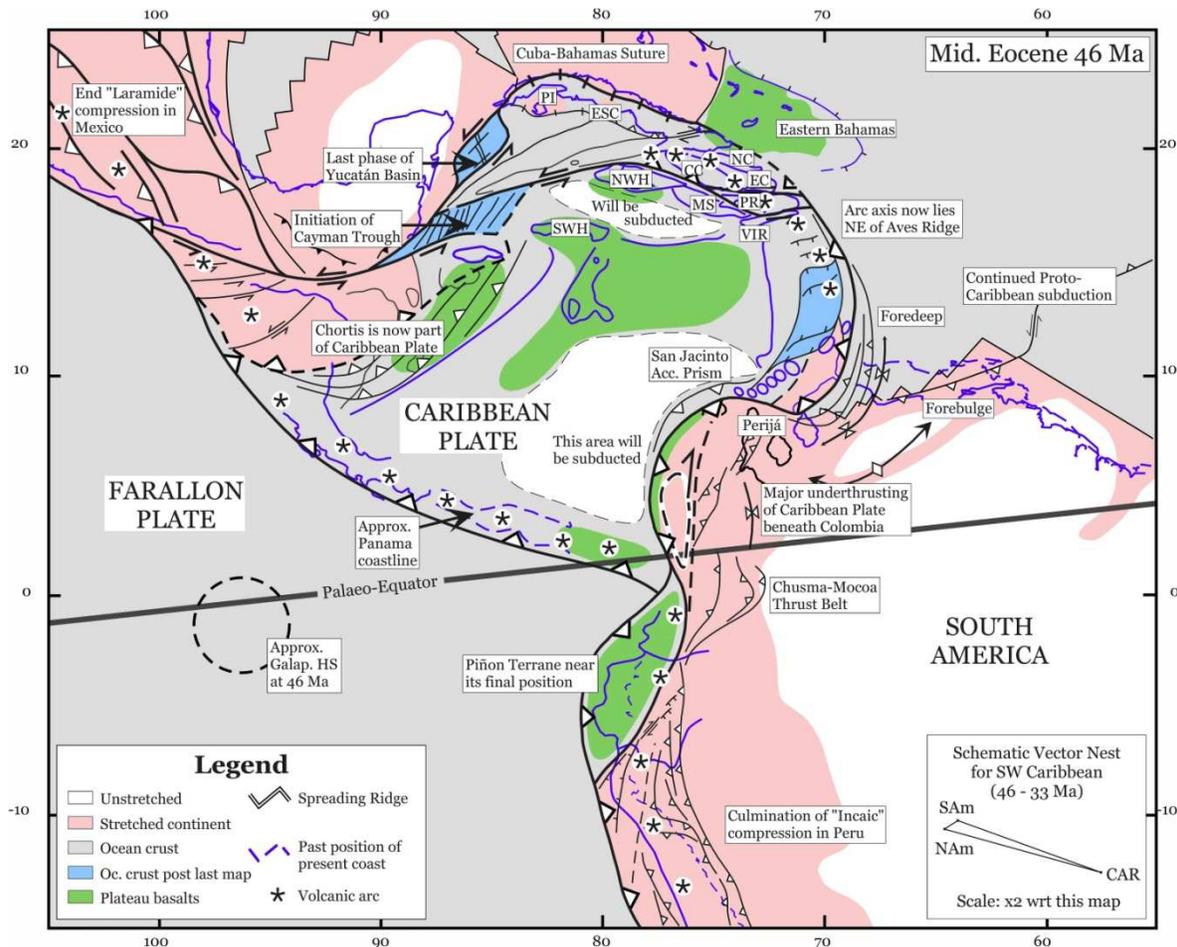


Figura 12. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Eoceno (Pindell, y otros 2001).

5.8 MIOCENO - PLEISTOCENO

El Mioceno es el período de más rápido y mayor levantamiento de cadenas montañosas en Colombia y otras regiones de Suramérica. Este levantamiento favoreció las tasas de erosión y depositación sobre los flancos de las Cordilleras Oriental y Central.

Hernández (2003) reporta que el principal levantamiento de la Serranía del Perijá ocurrió durante el Mioceno Tardío-Plioceno, en la Orogenia Andina. El levantamiento de la Serranía del Perijá y de la Sierra Nevada de Santa Marta, causado por la convergencia de las placas Caribe, Suramérica y Nazca, originó las fallas transcurrentes de Bucaramanga-Santa Marta y de Oca, bajo un campo de esfuerzos compresivos orientados $N40^{\circ}W \pm 10^{\circ}$ (Cáceres, y otros 1980) (Figura 13).

Finalmente, durante el Plioceno-Pleistoceno se formaron abanicos, terrazas y planicies aluviales que cubren el valle Cesar-Ranchería. La posición actual de estos depósitos sobre el nivel base de los ríos (200m-300m) es evidencia de un rápido levantamiento producto de la deformación andina (Hernández, 2003).

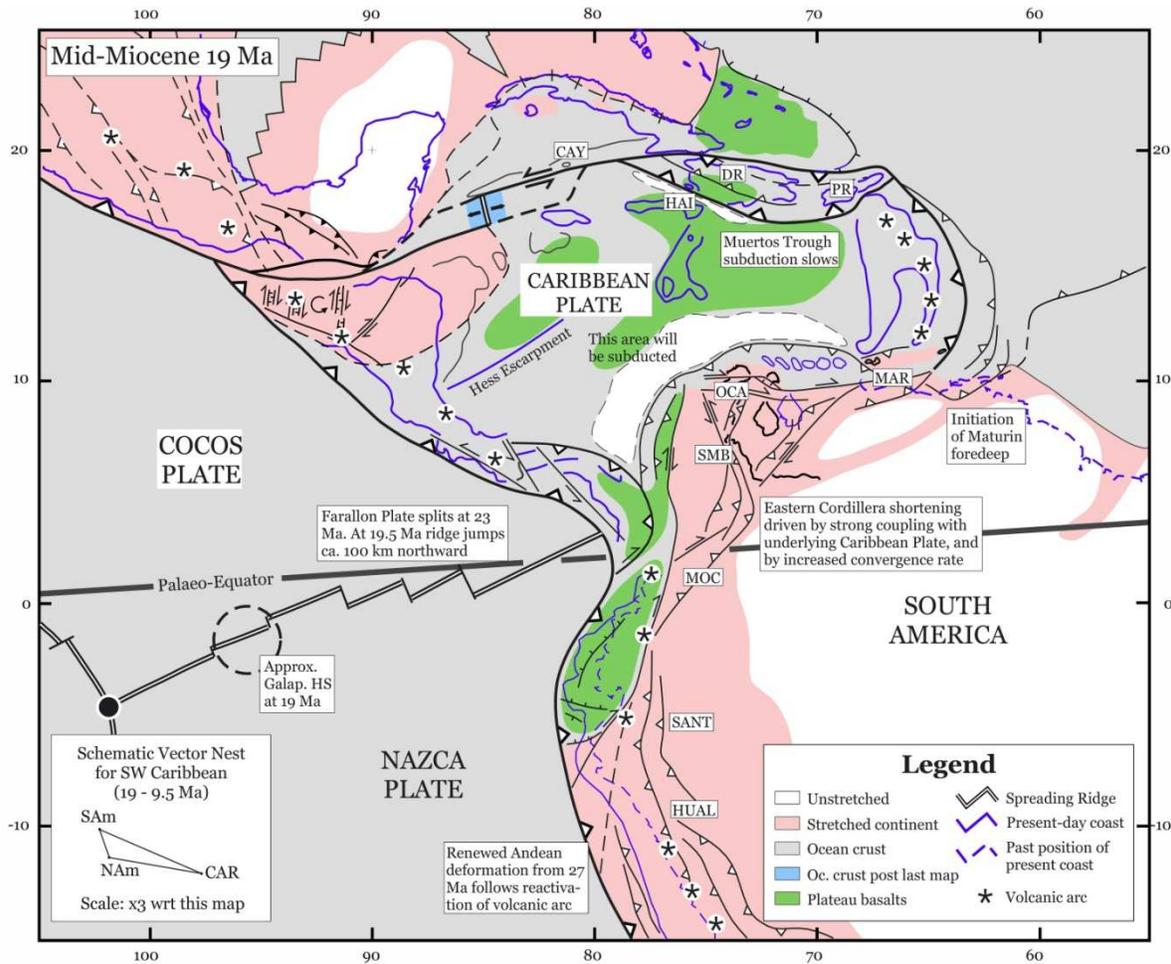


Figura 13. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Mioceno (Pindell, y otros 2001).

6 GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO

6.1 ROCA GENERADORA

Barrero y otros (2007) reporta que las Formaciones Molino, La Luna, Lagunitas y Aguas Blancas tienen materia orgánica en cantidad, calidad y madurez suficientes para ser consideradas rocas con potencial de generación de hidrocarburos. El tipo de querógeno es I y II y el promedio de Carbono Orgánico Total (COT) para la Formación Molino es 1.0%, para la Formación la Luna es 1.4% y para la Formación Aguas Blancas 1.4% (Figura 14, Figura 15 y Figura 16).

Aldershoff (1951) indica que la Formación La Luna es la unidad generadora más importante en el occidente de Venezuela, pero la falta de indicios importantes de petróleo en el Valle del Cesar en rocas cretáceas es significativa; una teoría acerca de la falta de producción de petróleo de la Formación La Luna en esta área es que la Formación La Luna no se encuentra suficientemente enterrada para generar hidrocarburos, respecto de áreas adyacentes como la Serranía del Perijá donde se encuentra cubierta por 2000 a 4000 m de rocas de edad Cenozoica. Esto se evidencia hacia el sur, donde el enterramiento se incrementa y hay producción. (Campos del Valle Medio del Magdalena, Casabe, La Cira Infantas).

Cáceres y otros (1981) reportan valores promedio de COT para la Formación Molino de 1.57%, para la Formación La Luna de 2.26%, para la Formación Aguas Blancas de 0.72% y para la Formación Lagunitas de 0.80%, teniendo así que la Formación La Luna es la unidad con mayor contenido de materia orgánica, aunque señalan que dadas las condiciones anteriores, el factor limitante para la generación de hidrocarburos es la calidad; esto se evidencia con los valores de índice de Hidrógeno, con datos promedio para la Formación Molino de 114mgHC/gC, para la Formación La Luna de 334mgHC/gC, para la Formación Aguas Blancas de 79 mgHC/gC, para la Formación Lagunitas de 145mgHC/gC, cuando el valor mínimo aceptado es 175mgHC/gC y tan solo la Formación La Luna supera este valor. En cuanto a los análisis de reflectancia de vitrinita, la Formación Molino presenta valores de 0.49%, la Formación La Luna de 0.54%, la Formación Aguas Blancas 0.34%, y la Formación Lagunitas 0.67%. De acuerdo a lo anterior la Formación Molino tendría sedimentos inmaduros y potencialmente podrían generar gas biogénico; la Formación La Luna tendría sedimentos medianamente maduros y estos se encuentran asociados a gas biogénico y aceites inmaduros; la Formación Aguas Blancas tendría sedimentos inmaduros y estos se encuentran asociados a gas biogénico y la Formación Lagunitas tendría sedimentos maduros y estos se encuentran asociados a aceites pesados inmaduros.

Olaya (1994) reporta que la Formación La Luna en los alrededores del pozo Cesar-F-1X, presenta valores altos de carbono orgánico (3.5% en promedio), la materia orgánica de esta formación es tipo II, con predominancia de alginita y exinita; la madurez de esta unidad se encuentra alrededor de 455°C de Tmax, en la ventana de generación de hidrocarburos. El Grupo Cogollo dentro de este mismo pozo presenta unos valores de COT buenos, sin

embargo, su madurez es relativamente alta, en algunos casos en la ventana de generación de gas.

La Tabla 1 muestra algunos pozos exploratorios de la Cuenca Cesar – Ranchería, junto con la profundidad total perforada, la formación final, y algunas observaciones de las formaciones generadoras de gas y/o aceite.

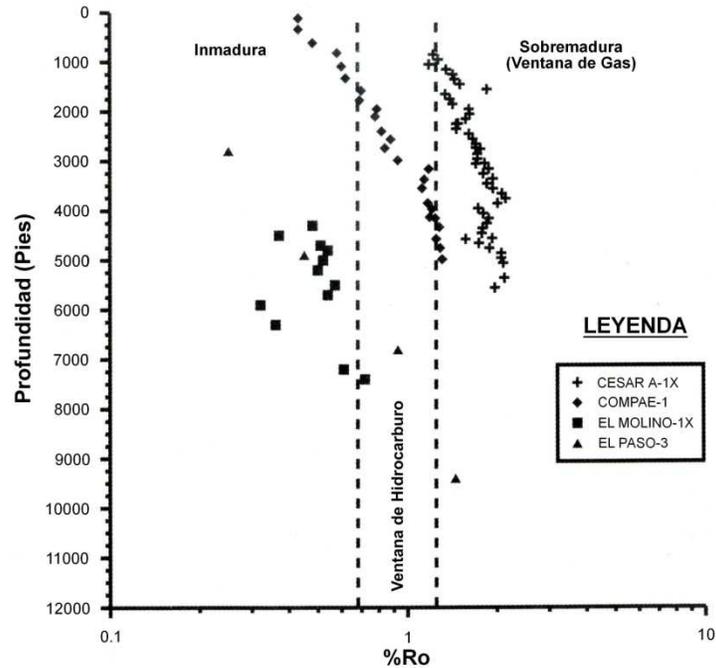


Figura 14. Profundidad vs. Reflectancia de vitrinita (ANH, y otros 2009).

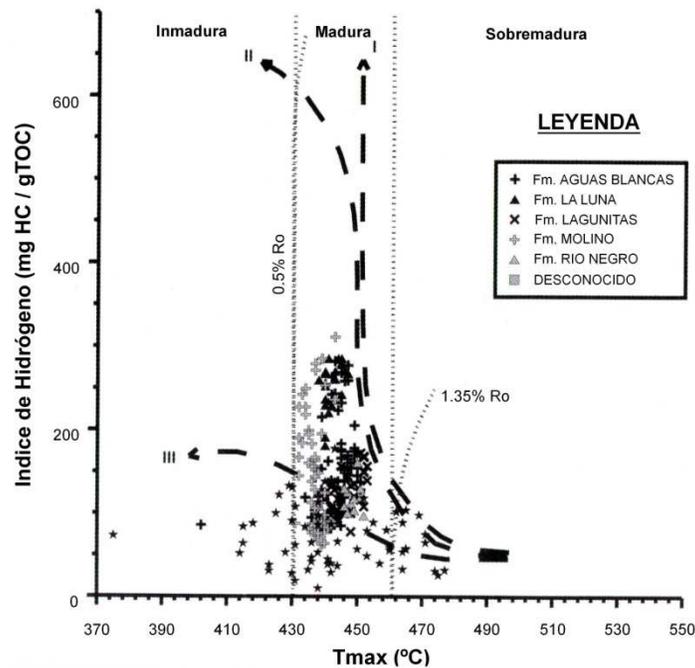


Figura 15. Índice de hidrógeno vs. Tmax (ANH, y otros 2009).

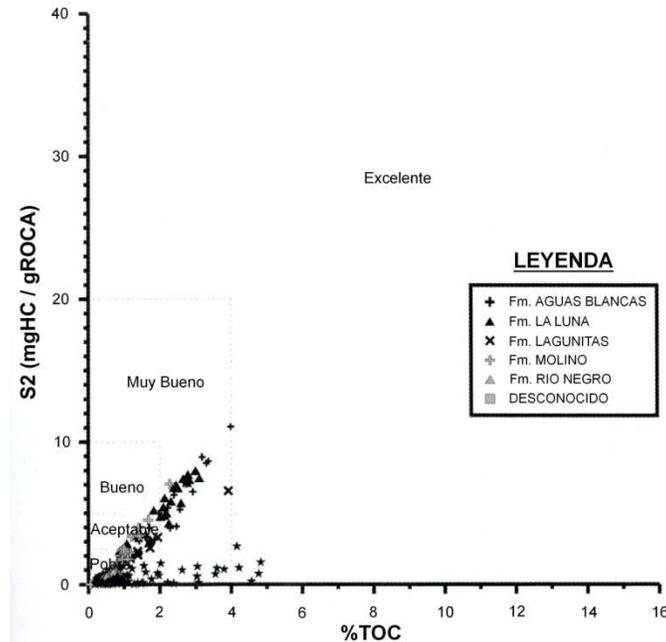


Figura 16. S2 vs. Carbono Orgánico Total (ANH, y otros 2009).

6.2 ROCA ALMACENADORA

Barrero y otros (2007) reportan que los principales reservorios son calizas fosilíferas de las formaciones Lagunitas y Aguas Blancas; el promedio de espesor es de 152.4m con una porosidad media de alrededor de 5%.

Cáceres y otros (1981) reportan que las calizas grainstone y packstone del Grupo Cogollo son excelentes reservorios. Así como el Miembro Tucuy de la Formación Aguas Blancas, la Formación Río Negro, la Formación Barco y la Formación Los Cuervos.

Lozano, (1990) establece tres tipos de roca reservorio: el primero compuesto por calizas fracturadas de la Formación la Luna las cuales tienen porosidades muy bajas, el segundo compuesto por areniscas de Cretáceo, las cuales son de baja porosidad y el tercero compuesto por areniscas de la Formación Barco.

Kochinski & Maldonado (1991) indican que la Formación La Luna puede alcanzar porosidades de 8.6% en partes fracturadas, igualmente el Miembro Tucuy presenta porosidades secundarias en areniscas que alcanzas porosidades entre 15% y 28%.

6.3 ROCA SELLO

Kochinski & Maldonado (1991) establecen que dentro del área pueden actuar como sello los shales de la Formación Molino. Además dentro del Grupo Cogollo los shales de la Formación Aguas Blancas pueden ser un buen sello. Dentro de la Formación Cerrejón existen intercalaciones arcillosas que ofrecen buen sello a una posible acumulación.

Lozano, (1990) indica que el sello regional lo constituyen las lutitas marinas de la Formación Molino y de la Formación La Luna.

INFORME FINAL

Tabla 1. Evidencia de hidrocarburos en la Cuenca Cesar - Ranchería (Tomado de www.rondacolombia2008.com).

Pozo	Bloque	Inicio de la perforación	Final de la perforación	Profundidad final	Formación final	Resultado	Observaciones
Papayal-1	Alejo	14/10/47	22/12/47	2577	La Quinta	Seco	Presencia de crudo en las formaciones La Luna y Lagunitas.
Cerrejón-1	Alejo	1949	1949	7814	La Quinta	Seco	-
Molino-1	Alejo	13/02/80	18/04/80	6060	La Quinta	Seco	Presencia de crudo en las formaciones La Luna, Molino, y el Grupo Cogollo.
Molino-1X	Alejo	05/05/80	21/09/80	8788	La Quinta	Seco	Pozo no comercial. Producción de gas de la Formación Hato Nuevo.
Mochila-1	Alejo	22/11/00	26/02/01	2353	-	Abandonado	-
Patilla-2	Alejo	15/07/97	-	3100	-	-	Poca información sobre este pozo.
El Paso-1	Las Nieves	11/10/47	16/12/47	2828	La Quinta	Seco	-
El Paso-2	Las Nieves	01/03/48	10/09/49	8783	Molino	Seco	Crudo y gas (Cenozoico y Cretácico)
Río Maracas-1	Las Nieves	11/12/51	17/06/52	10218	Aguas Blancas	Seco	Pozo seco
El Paso-3	Las Nieves	12/09/53	04/07/54	11609	Aguas Blancas	Seco	Pozo no comercial. Producción de crudo en la Formación Molino.
El Paso-4	Las Nieves	21/07/54	15/09/54	4252	Molino	Seco	-
Los Venados-1	Las Nieves	22/12/54	15/11/55	4110	Girón	Seco	-
Cesar A-1X	Las Nieves	01/07/80	02/08/80	5600	La Quinta	Seco	Crudo y gas (Cretácico).
Cesar H-1X	Las Nieves	17/09/80	05/12/80	6543	Lagunitas	Pozo de gas	Pozo no comercial. Producción de crudo en la Formación Aguas Blancas.
Cesar F-1X	Maracas	21/12/80	17/01/81	4220	La Quinta	Seco	Brea en la Formación Río Negro.
Compáe 1	Maracas	04/06/87	1987	5173	Río Negro	Crudo y gas	Gas
Diablito-1E	La Loma	13/10/04	14/12/04	2302	Molino	Abandonado	-
Los Cerezos-1E	La Loma	20/12/04	03/02/05	2131	Molino	Abandonado	-

6.4 TRAMPA

Barrero y otros (2007) establecen que las trampas estructurales están asociadas a cabalgamientos apretados en el Perijá, anticlinales en la región central y estructuras en flor asociadas al sistema de fallas de Oca en la parte más norte; identifica tres tipos de plays:

- a. Calizas del Cretácico Tardío pertenecientes a las formaciones Aguas Blancas y Lagunitas en anticlinales apretados con cabalgamiento.
- b. Areniscas del Paleógeno/Neógeno pertenecientes a las Formaciones Tabaco y Cerrejón en anticlinales apretados asociadas a las fallas transcurrentes de Oca y el Tigre.
- c. Calizas fracturadas del Cretácico Tardío pertenecientes a la Formación Lagunitas asociadas a las fallas transcurrentes de Oca y el Tigre.

Lozano (1990) reporta que las trampas estratigráficas se presentan en toda el área en zonas de disconformidad, bien sea entre sedimentos pre-Terciarios y post-Terciarios o dentro de los mismos sedimentos del Terciario.

6.5 MIGRACIÓN

Barrero y otros (2007) reportan que la migración ocurre durante eventos transpresionales que comienzan en el Eoceno Tardío hasta el presente, las vías de migración son amplios sistemas de fracturas asociados a zonas de falla.

Según esto, el momento crítico para la migración del petróleo sería en el Eoceno Tardío y por lo tanto la acumulación de hidrocarburos ocurriría en estructuras formadas antes de la orogenia Pre-Andina.

7 HISTORIA DE ENTERRAMIENTO

Usando como información base los espesores, las discordancias y las edades reportadas para cada una de las unidades estratigráficas de la Cuenca Cesar-Ranchería, se generaron dos posibles curvas de enterramiento bajo condiciones geológicas diferentes con el fin de predecir la profundidad y temperatura a la cual estuvo sometida la pila sedimentaria a través de los últimos 250 millones de años, empezando con la depositación de los sedimentos vulcanoclásticos de la Formación La Quinta.

En el primer caso se calculó la curva de enterramiento usando los espesores mínimos reportados para cada unidad (Figura 17). Para cada una de las tres discordancias propuestas (Berriasiano-Hauteriviano, Maastrichtiano, Eoceno Tardío-Mioceno Temprano) se calculó el espesor erosionado usando la fórmula propuesta por Guidish, y otros (1985) (Ecuación 1).

Se usó una temperatura de superficie de 20°C y un gradiente geotérmico de 20°C/Km calculado a partir de la temperatura de fondo del pozo Molino 1-X; si bien este gradiente representa el gradiente actual, este valor se extrapoló para toda la historia de depositación de la cuenca, que sin duda es equivocado, pero que ante la ausencia de datos es la hipótesis más simple posible, justificada según el principio de Occam.

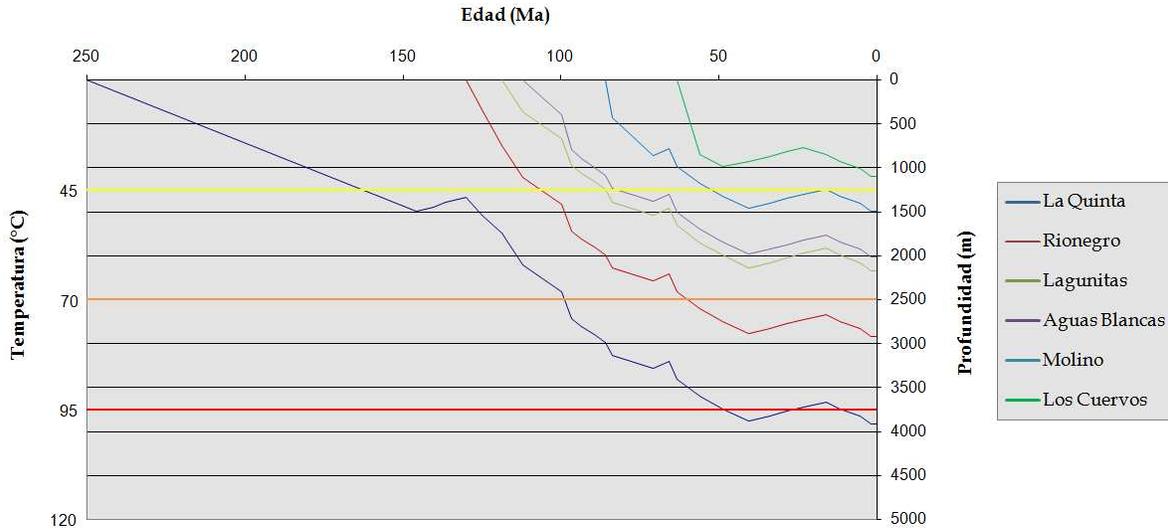


Figura 17. Curva de enterramiento usando los espesores mínimos reportados para cada unidad.

$$AGE_E = (R_1 * AGE_1 + R_2 * AGE_2) / (R_1 + R_2)$$

$$Et = R_1 * (AGE_E - AGE_1)$$

Ecuación 1. Ecuación para calcular el espesor erosionado (Et), donde: AGE_E es la edad cuando comienza la erosión; AGE₁ es la edad de la Unidad infrayacente a la inconformidad; R₁ es la tasa de sedimentación de la unidad infrayacente a la inconformidad. AGE₂ es la edad de la unidad suprayacente a la inconformidad. R₂ es la tasa de sedimentación de la unidad suprayacente a la inconformidad (Guidish, y otros 1985).

Según el trazo de la curva, las rocas fuente que constituyen las unidades cretácicas Lagunitas y Aguas Blancas, entraron en la ventana de generación de hidrocarburos líquidos aproximadamente hace 70Ma.

En el caso de la Figura 18 se usaron los espesores máximos reportados para cada unidad, asumiendo que la depositación es continua y no se presentan períodos erosivos en la secuencia estratigráfica.

El trazo de la curva de enterramiento muestra que todas las rocas fuente cretácicas ya pasaron por la ventana de generación de hidrocarburos y están sobremaduras. La Formación Los Cuervos, correlacionable con la Formación Cerrejón en la Subcuenca de Ranchería, entró a la ventana de generación de hidrocarburos líquidos hace aproximadamente 25Ma.

Es evidente entonces que la principal variable en la historia de enterramiento es la diferencia de espesores reportados para cada una de las unidades. Esto es claro en las curvas de enterramiento calculadas, de tal manera que las formaciones con potencial de generación de hidrocarburos líquidos alcanzan la ventana de generación muy tarde o muy temprano, e influye en que el hidrocarburo generado no haya encontrado trampas donde almacenarse. Resolver adecuadamente esta incertidumbre es sin duda un aporte importante para reducir el riesgo de exploración en esta cuenca.

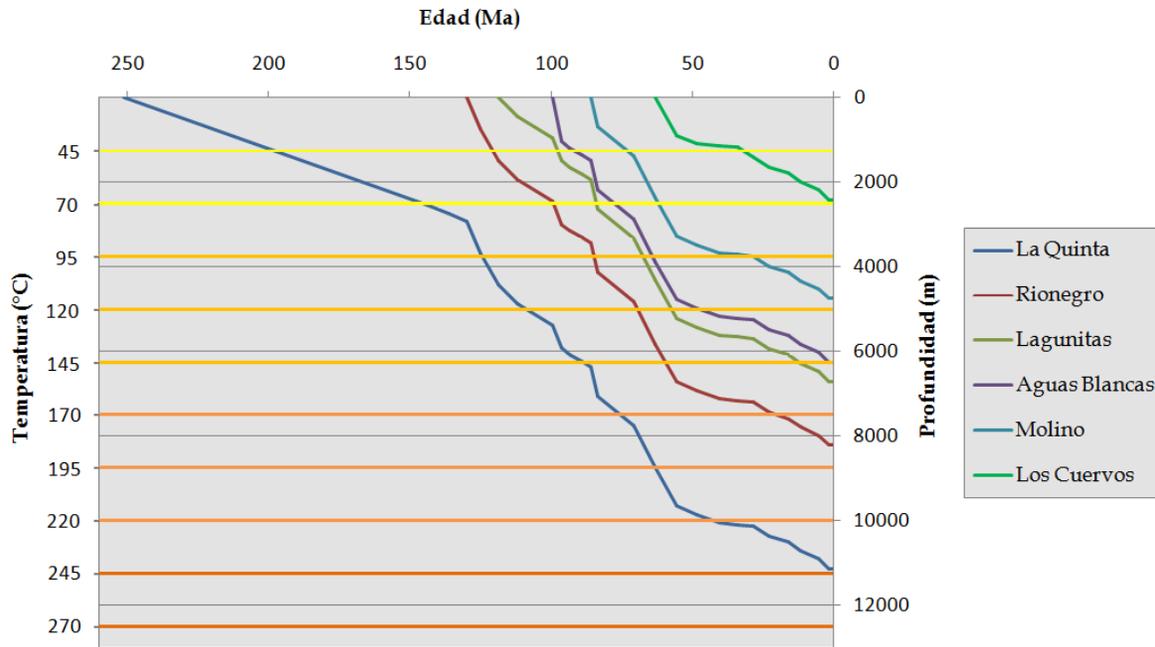


Figura 18. Curva de enterramiento usando los espesores máximos reportados para cada unidad.

8 TOMA DE MUESTRAS

8.1 METODOLOGÍA

El cronograma de campo y la selección de los afloramientos para realizar el muestreo se basó en la cartografía, poligonales y columnas realizadas para la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) por la Geoestudios (2006) en la Serranía del Perijá.

Durante los días 21 al 28 de Octubre de 2008, se realizó el muestreo de campo en los municipios de La Jagua de Ibirico, Becerril y Codazzi en el departamento del Cesar, utilizando las planchas a escala 1:25000 del IGAC: Plancha 48-II-A, Plancha 48-I-B, Plancha 48-I-D, (La Jagua de Ibirico), Plancha 41-IV-C, Plancha 41-II-A, Plancha 41-II-C, Plancha 41-IV-A, (Casacará), Plancha 34-IV-A. y Plancha 34-IV-C (Agustín Codazzi). Las formaciones geológicas muestreadas corresponden a la nomenclatura utilizada por Geoestudios (2006) y corresponden a la Formación La Quinta, Formación Río Negro, Formación Lagunitas, Formación Aguas Blancas y Formación Molino. Para el área que corresponde a la Jagua de Ibirico se tomó como base la cartografía elaborada por Hernández, (2003), plancha 48 Jagua de Ibirico a escala 1:100000. En esta área se tomaron muestras de la Formación Molino, en la zona que corresponde a Loma de la Estancia. Para las áreas que corresponden a los municipios de Becerril y Agustín Codazzi se tomó como base la cartografía elaborada por Geoestudios, (2006) a escala 1:25000, en esta área se tomaron muestras de la Formación La Quinta, Formación Río Negro, Formación Lagunitas y Formación Aguas Blancas, en las zonas de los valles de los ríos Fernambuco y Maracas. La descripción de la muestras se realizó con base en la clasificación textural y composicional propuesta por Folk (1974) para rocas siliciclasticas. La escala de tamaño de

grano es basada según Wentworth (1922) y la clasificación de rocas calcáreas se realizó de acuerdo con Dunham (1962).

Para los análisis de las historias termales y eventos de enterramiento se recolectaron dos tipos de muestras, la primera para Análisis de Trazas de Fisión en Apatitos (AFT) y la segunda para análisis de maduración de materia orgánica mediante el método de Reflectancia de Vitrinita (RV).

Las muestras para análisis de AFT son rocas sedimentarias, frescas, de tipo clástico, con un tamaño de grano mayor a 0.062mm (areniscas de grano muy fino hasta conglomeráticas, conglomerados arenosos). En cada estación se recolectaron tres muestras del mismo afloramiento a las que se les asignó la siguiente clasificación, de acuerdo con la destinación de cada muestra: la primera corresponde a la roca triturada para ser analizada, con un peso entre 7Kg y 10Kg, denominada Muestra Triturada (MT); un volumen de roca de 10cmx10cmx10cm designado como Muestra Geológica para la Litoteca Nacional (ML) y un volumen de 7cmx7cmx7cm denominada Muestra Geológica (MGG).

Las muestras para RV son de un tamaño de grano menor a 0.062mm (limolitas, lodolitas y arcillolitas) y debían presentar colores oscuros que sugirieran la presencia de materia orgánica. Cada muestra esta discriminada mediante dos siglas: una correspondiente a la Muestra Geológica para la Litoteca Nacional (ML), con un peso de 4Kg, y otra denominado Muestra Geológica (MGG) cuyo peso mínimo es de 0.5Kg. En lo posible fueron tomadas cerca a las muestras para AFT y en el caso de tener una formación potencialmente generadora el muestreo se realizó cada 10m en los sectores que el afloramiento así lo permitió.

Cada muestra se empacó en una bolsa plástica, debidamente sellada y marcada con su sigla y consecutivo distintivo (ej.: CR-AFTA MT 01 ó CR- RV ML 01), georreferenciadas y orientadas de base a tope.

Se tenía presupuestado recolectar por formación 10 muestras para análisis de Reflectancia de Vitrinita (RV) y 4 muestras para análisis de trazas de fisión en Apatitos (AFT), sin embargo no se pudo cumplir con la cantidad de muestras presupuestadas debido a que no se encontraron afloramientos suficientes, la roca se encontraba muy meteorizada o porque el tipo de litología requerido no estaba presente en las secciones aflorantes. En las zonas donde no se encontraron muestras de roca con la litología necesaria, se tomaron testigos georreferenciados para corroborar que la litología observada en el campo no era la apropiada para realizar los análisis de AFT o RV.

Para completar el numero requerido de muestras, se tomaron ripios de perforación de la Litoteca Nacional "Bernardo Taborda" en Piedecuesta, Santander.

Las muestras fueron tomadas a partir de los siguientes criterios de selección:

- Solo sirven aquellos ripios que se denominan Zanja Húmeda; el secado al horno al cual son sometidos los de Zanja Seca los hacen inservibles para análisis de reflectancia.
- Se prefirieron los pozos perforados con lodo base agua. El proceso de lavado al cual deben ser sometidas las muestras impregnadas con lodo base aceite, afecta la

materia orgánica que luego va a ser concentrada para las mediciones de reflectancia.

- Se prefirieron los pozos que no contenían lignosulfonato como aditivo de perforación; el lignosulfonato tiene propiedades físicas similares a la materia orgánica, que dificultan el proceso de separación y medición de la reflectancia.

Con ayuda de los registros gráficos compuestos de cada pozo, se identificaron las profundidades de interés y los intervalos lodosos y/o carbonosos; con esta información se discriminaron los pozos aptos para el muestreo. Se recolectaron además muestras de trabajos previos de geología de superficie de las formaciones de interés que no tenían núcleos o ripios (Tabla 2 y Tabla 3).

Todas las muestras recolectadas cumplían con la norma de la litoteca, según la cual la cantidad máxima permitida para análisis de reflectancia es de 50g (En los ripios este valor incluye el lodo de perforación).

Tabla 2. Información de los pozos evaluados para la toma de muestras.

Cuenca	Pozo	Núcleos	Ripios	Registro Grafico Compuesto (RGC)	Observaciones
Cesar-Ranchería	Cesar A 1X	No	Si	No	No hay información disponible en la base de datos de la Litoteca acerca de las unidades que atraviesa el pozo.
Cesar-Ranchería	Compae 1	Si	Si	Si	Los ripios son aptos para el muestreo. Los núcleos tienen 1/3 o menos de muestra.
Cesar-Ranchería	Compae 2	Si	Si	No	Los núcleos tienen 1/3 o menos de muestra. Los ripios disponibles corresponden a Zanja Seca (ZS).
Cesar-Ranchería	Diablito-1E	Si	No	No	El núcleo es apto para el muestreo (Según descripción estratigráfica del pozo: Salazar, 2003).
Cesar-Ranchería	Mochila 1	No	Si	No	No hay información disponible en la base de datos de la Litoteca acerca de las formaciones que atraviesa el pozo.
Cesar-Ranchería	Molino 1	Si	Si	Si	El núcleo es apto para el muestreo. Los ripios no se muestrearon porque el lodo de perforación contiene Lignosulfonato.
Cesar-Ranchería	Molino 1X	Si	Si	Si	No hay información disponible del estado de los núcleos, el RGC está incompleto. Los ripios no se muestrearon porque el lodo de perforación contiene Lignosulfonato.
Cesar-Ranchería	Papayal	No	No	No	No hay información disponible en la base de datos de la Litoteca.

Tabla 3. Trabajos de geología de superficie y número de muestras tomadas.

Nombre del proyecto	ID Proyecto	Numero de Muestras
LEVANTAMIENTO DE SECCIONES ESTRATIGRAFICAS EN LA SUBCUENCA DE RANCHERIA. BLOQUE ALEJO	ALEJ0097	9
CARTOGRAFÍA GEOLOGICA CUENCA CESAR-RANCHERÍA	GEOESTUDIOS CONTRATO 084	6

8.2 LOCALIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE MUESTREO

8.2.1 Formación La Quinta

Para esta unidad se tomó como referencia la columna levantada en el Arroyo Alberto por Geostudios (2006) a escala 1:200. Para llegar a este arroyo se toma la carretera que del municipio de Codazzi conduce a Becerril y aproximadamente a 6.5Km se desvía al sureste por el carretable que pasa por las haciendas El Paraíso y Nueva Granada, paralelo al Río Fernambuco. A 4Km, donde el río hace una inflexión hacia el norte, el carretable sigue aguas arriba, paralelo a su cauce, pasando la escuela abandonada Jorge Eliécer Gaitán, hasta la intersección con el Arroyo Alberto.

La unidad está compuesta por rocas volcano-sedimentarias de grano muy fino, en capas gruesas a muy gruesas; hacia el tope se observa estratificación cruzada, incremento en el contenido de carbonatos, y numerosos gránulos de cuarzo de color blanco lechoso embebidos dentro de la matriz. De esta unidad se tomaron cuatro muestras para trazas de fisión en apatitos correspondientes a los depósitos volcano-sedimentarios con un peso promedio de 7Kg por muestra; para el análisis de reflectancia de vitrinita se tomaron tres muestras con un peso promedio de 0.8Kg.

8.2.2 Formación Río Negro

Para esta unidad se tomó como referencia la columna levantada por Geostudios (2006) en el Arroyo Alberto a escala 1:200.

La unidad está compuesta de capas gruesas a muy gruesas de conglomerados polimícticos de cantos y guijos, arenitas conglomeráticas y arenitas de grano grueso a muy grueso, de composición variable entre litoarenitas y litoarenitas feldespáticas hacia la base, dispuestas en sucesiones generalmente granodecrecientes, intercaladas con capas delgadas a medias de lodolitas de negras a rojizas. En la parte media y hacia el tope, las intercalaciones de lodolitas rojizas se hacen más gruesas y frecuentes, llegando a tamaño limo. Las arenitas disminuyen su tamaño de grano hasta medio, son más rojizas que hacia la base y composicionalmente aumenta el porcentaje de cuarzo. Las capas son medias a gruesas. En esta sección se recolectaron tres muestras para trazas de fisión en apatitos correspondientes a arenitas de grano medio hasta conglomeráticas y dos muestras para análisis de reflectancia de vitrinita de lodolitas negras que corresponden a las estaciones.

Se levantó una columna adicional a lo largo del Río Fernambuco y la carretera paralela a éste. En esta sección se recolectó una muestra para AFT correspondiente a una arenisca de grano medio y ocho muestras para RV correspondientes a limolitas rojas.

8.2.3 Formación Lagunitas

Para la sección inferior de esta formación se tomó como referencia la columna levantada por Geoestudios (2006) en escala 1:200 en el Río Maracas y la Quebrada Roncón. A este lugar se accede a partir del municipio de Becerril, tomando el carreteable en dirección NE, por una distancia aproximada de 13Km hasta llegar al sitio llamado La Estación, donde confluyen el Río Maracas y la Quebrada El Roncón; la sección empieza 200m aguas arriba, sobre el margen norte del río. Se recolectaron dos muestras para análisis de trazas de fisión, con litología de bioesparitas wackestone y tres muestras para reflectancia de vitrinita, con litología de biomicritas mudstone y lodolitas negras calcáreas.

La unidad en general se encuentra compuesta por capas gruesas a muy gruesas de bioesparitas con textura wackestone a packstone, con fósiles de conchas, en su mayoría desarticuladas, reemplazadas en calcita y con un diámetro entre 2cm y 6cm, con intercalaciones menores de lodolitas, en una proporción dentro del afloramiento entre 10% y 5%, y en menor proporción se encuentran biomicritas mudstone con conchas desarticuladas y reemplazamiento de piritita.

Para la sección superior se tomó como referencia la columna elaborada por Geoestudios (2006) en la columna a escala 1:200 en el Río Fernambuco. Para llegar al lugar se toma la carretera que del municipio de Codazzi conduce a Becerril, y aproximadamente a 6.5Km se desvía 4Km al SE por el carreteable que pasa por las haciendas El Paraíso y Nueva Granada, paralelo al Río Fernambuco. Luego de que el río hace la inflexión hacia el norte, se continúa 2.3 km por el mismo carreteable. Allí se continúa a pie, pasando al margen derecho del cauce y empezando a subir por una trocha en dirección NW aproximadamente 650 m, hasta el inicio de la columna. Se recolectaron dos muestras para trazas de fisión correspondientes a bioesparitas packstone, y cuatro muestras de lodolitas negras para los análisis de reflectancia de vitrinita.

Para completar el número de muestras se toma una sección auxiliar ubicada sobre el Río Fernambuco en las coordenadas N= 1'094 944 y E= 1'594 997. Se toman tres muestras de lodolitas negras y bioesparitas wackestone a packstone para reflectancia de vitrinita.

8.2.4 Formación Aguas Blancas

Para esta unidad se tomó como referencia la sección levantada por Geoestudios, (2006), denominada Casa Roja. Partiendo del municipio de Becerril, tomando el carreteable en dirección NE, por una distancia aproximada de 9.3Km, 3.7Km antes de llegar al sitio llamado La Estación, donde confluyen el Río Maracas y la Quebrada El Roncón. Se toma una muestra de arenitas finas calcáreas para trazas de fisión, y cuatro muestras de biomicritas negras y lodolitas calcáreas para reflectancia de vitrinita, correspondiente a los miembros Tucuy y Maracas.

La unidad se encuentra compuesta hacia la base (correspondiente al Miembro Ánimas), por bioesparitas wackestone a packstone, dentro de capas gruesas a muy gruesas, con fósiles de bivalvos reemplazados en calcita, intercaladas con lodolitas calcáreas en capas delgadas a medias. Para los miembros Tucuy y Maracas, la litología predominante son biomicritas mudstone negras, con intercalaciones de lodolitas calcáreas y esporádicamente bioesparitas wackestone a packstone y arenitas de grano muy fino a fino calcáreas.

La segunda sección de referencia corresponde a la columna a escala 1:200 levantada por Geoestudios, (2006) en la Quebrada Azufrada. Se accede a partir del municipio de Becerril, tomando el carretable en dirección NE, que conduce al Río Maracas Roncón, por una distancia aproximada de 8.7Km, desde donde se continúa a pie en dirección SE por 150m, pasando al margen izquierdo del Río Maracas hasta encontrar la base de la columna. Se recolectaron dos muestras de bioesparitas impuras para trazas de fisión, y cuatro para reflectancia de vitrinita.

La última sección muestreada corresponde a la columna elaborada por Geoestudios (2006), denominada Fernambuco Occidental. Se toma la carretera que del municipio de Codazzi conduce a Becerril hasta la Hacienda Fernambuco aproximadamente a 3.7Km. Allí se desvía hacia el oriente 400m hasta llegar al carretable que bordea toda la Sierra Fernambuco. Este carretable continúa 3km más hasta llegar al sitio donde fue levantada la columna. Se recolectaron dos muestras para reflectancia de vitrinita y una muestra para trazas de fisión.

8.2.5 Formación Molino

Para esta formación se realizó una sección nueva con base en el mapa geológico de la Plancha 48 -La Jagua de Ibirico- (Hernández, 2003), sobre la estructura denominada Anticlinal de la Estancia, con coordenadas en la base de la columna N=1'558135 y E=1'080973 y al tope N=1'558268 y E=1'080775, sobre el Caño Tucucito; para llegar a él se toma la carretera que conduce desde La Jagua de Ibirico a Becerril, y aproximadamente a 7.5Km se desvía al noroeste por el carretable que pasa por la Vereda Buena Vista. A los 5,5Km, se toma el carretable abandonado y se camina durante 600m hacia el NW hasta la base de la columna, sobre el Caño Tucucito. Se tomaron diez muestras de limolitas negras, lodolitas calcáreas y micritas para los análisis de reflectancia de vitrinita, y cuatro muestras para trazas de fisión.

La unidad se encuentra compuesta por limolitas negras, en capas delgadas a medias, laminación plano paralela continua, intercaladas con lodolitas calcáreas, y en menor proporción micritas y margas; En algunos sectores las limolitas presentan concreciones con tamaños entre 10cm y 15cm; hacia el tope las lodolitas calcáreas presentan contenido fósil de amonitas y ostreidos.

9 ANALISIS DE TRAZAS DE FISIÓN

9.1 METODOLOGÍA

Los procedimientos de laboratorio para llevar a cabo los análisis de trazas de fisión en apatitos (AFT) fueron desarrollados en tres etapas. La primera es la preparación de las muestras, donde los fragmentos de roca fueron triturados hasta obtener un tamaño de grano específico (menor a $425\mu\text{m}$) para posteriormente separar los apatitos. Esta etapa fue realizada en las instalaciones del Laboratorio GMAS Ltda., bajo la supervisión del Dr. José María Jaramillo. En la segunda etapa se realizó la obtención de edades por trazas de fisión en apatitos, la medición de longitud de trazas confinadas y la clasificación por parámetros cinéticos de borrado de los granos de apatito, procesos efectuados en el laboratorio Apatite to Zircon Inc., ubicado en Viola, Idaho (USA) por los Doctores Raymond A., Margaret B. Donelick y Paul O'Sullivan.

La fracción procesada de cada muestra corresponde a las bolsas con la referencia "MT" (Muestra Triturada) cuyo peso aproximado es de 7Kg, especificado en la metodología establecida para la fase de la recolección de las muestras en campo.

9.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

De todas las muestras que fueron recolectadas en la fase de campo, se seleccionaron 17, teniendo en cuenta el grado de alteración, el tamaño de grano y su posición estratigráfica.

El procesamiento inició con la fragmentación de la roca mediante una trituradora de mandíbulas DENVER® que reduce el tamaño de la muestra hasta diámetros menores a 3cm. Posteriormente los fragmentos de roca se pasaron por una trituradora de rodillos, en la que se redujeron los granos hasta un tamaño máximo de 5mm; aunque el tamaño de grano promedio obtenido con esta máquina sigue siendo bastante grueso, no se usaron otras máquinas que produjeran tamaños de grano menores para prevenir el fracturamiento los cristales de apatito presentes en la muestra (Figura 19).

Posteriormente la fracción obtenida fue separada granulométricamente, utilizando los tamices malla 30 (apertura de $600\mu\text{m}$), malla 40 (apertura de $425\mu\text{m}$) y malla 80 (apertura de $180\mu\text{m}$), en un SHAKER o agitador. A partir de esto la muestra triturada se dividió en tres partes: los granos con diámetro menor a $180\mu\text{m}$ se denominaron FRACCION FINA, los granos entre 180 y $425\mu\text{m}$ se nombraron FRACCION MEDIA y los granos con tamaños superiores a $425\mu\text{m}$ se denominaron FRACCION GRUESA.

Después de tamizar la muestra, se tomaron las Fracciones FINA y MEDIA y se pasaron por una mesa WILFLEY®, en la cual se separan los minerales por gravedad con ayuda de un flujo de agua en la dirección de la inclinación de la mesa y al mismo tiempo esta se agita en dirección perpendicular al flujo, realizando un movimiento similar al de una batea.

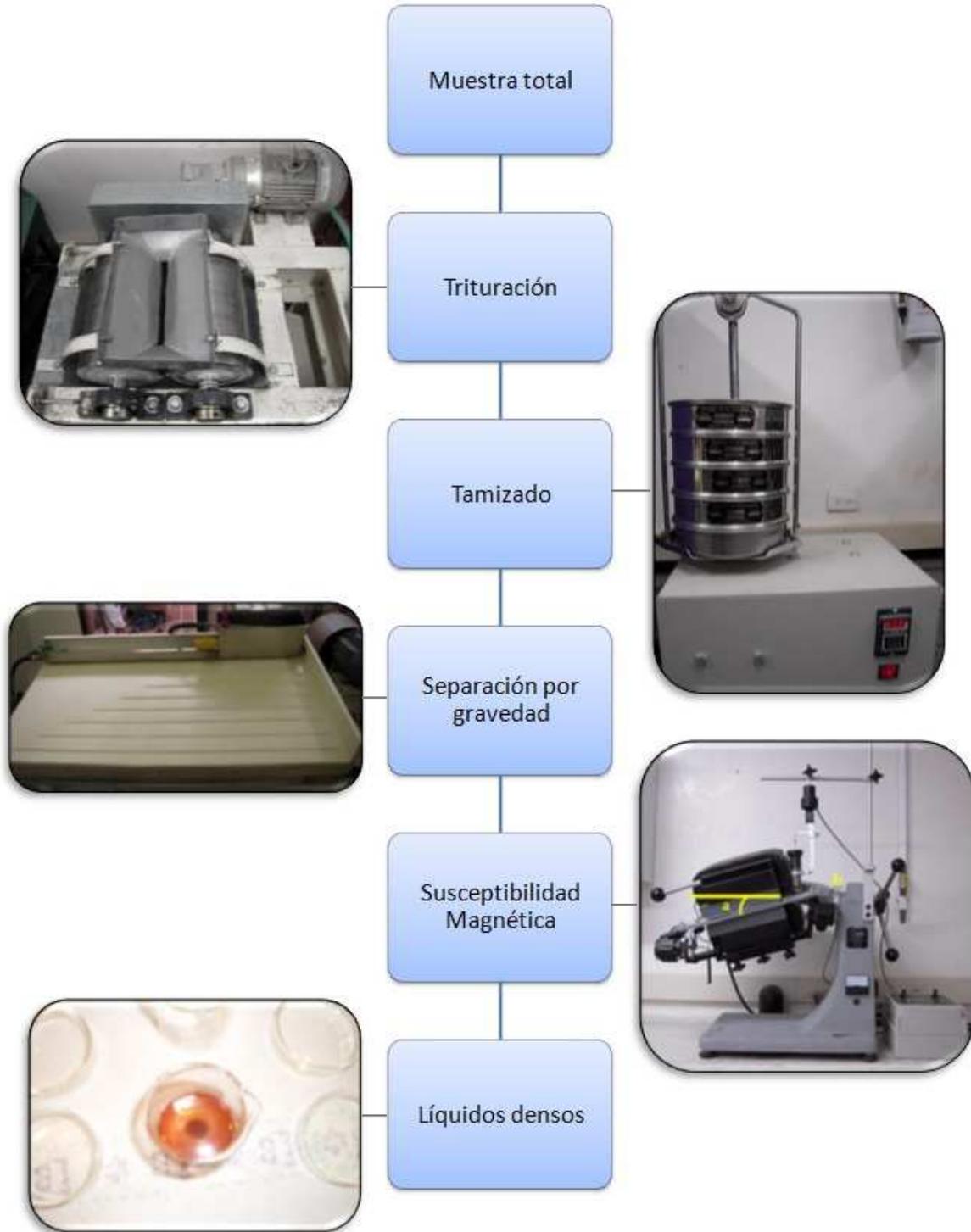


Figura 19. Metodología de preparación y separación de apatitos.

El siguiente paso es separar los minerales de acuerdo con la susceptibilidad magnética. Para optimizar la separación por susceptibilidad magnética, se usó antes una solución de metatungstato de litio con una densidad aproximada de 2.95g/cm^3 . Primero se usa un imán que atrapa la magnetita y la ilmenita, y posteriormente se pasa la muestra restante

por un separador magnético FRANTZ® dos veces a diferentes intensidades. La primera vez se trabaja a una intensidad de 0.5A y la fracción no magnética de esta primera separación se vuelve a pasar a una intensidad de 1.0A. De esta manera se obtienen los apatitos en la fracción no - magnética de 1.0A separados de los principales óxidos, sulfuros y silicatos ferromagnesianos, que tienen una susceptibilidad magnética mayor.

La separación mineral finaliza cuando la fracción no magnética, separada a 1.0A se dispone en un recipiente con yoduro de metileno, el cual es un líquido denso orgánico, con una viscosidad baja y una densidad de 3.3g/cm³. En este caso se separan los circones (densidad de 4.5g/cm³) de los apatitos (densidad de 3.15 - 3.2g/cm³) y estos a su vez de los minerales más livianos que aun estén presentes en esta fracción.

En pequeños beakers se vierten la muestras, se les agrega yoduro de metileno y se homogenizan moviendo el recipiente en círculos. Este movimiento hace que los minerales con densidad mayor a 3.3 g/cm³ se hundan rápidamente y los minerales con densidad menor floten. Manteniendo el gotero suavemente oprimido se introduce en el líquido de tal manera que los minerales livianos no entren en el mismo. Una vez ha tocado fondo se permite la absorción de la fracción pesada que allí yace y se pasa a un plato de petri. A continuación se lava el gotero, el beaker y la fracción liviana de esta primera separación con acetona, la cual disminuye la densidad del líquido a aproximadamente 3.0 g/cm³ y se procede de la misma forma que en el paso anterior. En esta ocasión los minerales que se hunden son los apatitos, ya que su densidad es mayor a la del líquido diluido.

Finalmente la muestra es sometida a un control de calidad con una lupa binocular de 1X y 4X aumentos, en donde se evalúa la presencia de apatitos (Tabla 4).

Tabla 4. Control de calidad de la población de apatitos en las muestras recolectadas.

Muestra ID	Procesada	Presencia de Apatitos				Formación	Litología
		Abundante	Moderada	Pobre	Muy Pobre		
CR-AFTA-MT-01	X			X		Molino	Arenita Calcárea
CR-AFTA-MT-03	X				X	Molino	Limolita Calcárea
CR-AFTA-MT-05	X		X			Lagunitas	Caliza
CR-AFTA-MT-06	X				X	Lagunitas	Caliza
CR-AFTA-MT-07	X	X				Aguas Blancas	Caliza
CR-AFTA-MT-07A	X			X		Aguas Blancas	Caliza impura
CR-AFTA-MT-08	X	X				Aguas Blancas	Limolita Calcárea
CR-AFTA-MT-09	X				X	Aguas Blancas	Arenita Calcárea
CR-AFTA-MT-10	X				X	La Quinta	Toba
CR-AFTA-MT-11	X			X		La Quinta	Toba
CR-AFTA-MT-12	X		X			La Quinta	Toba
CR-AFTA-MT-13	X			X		La Quinta	Toba
CR-AFTA-MT-14	X	X				Rionegro	Litoarenita calcárea
CR-AFTA-MT-15	X	X				Rionegro	Arenita Conglomerática
CR-AFTA-MT-16	X	X				Rionegro	Arenisca grano grueso
CR-AFTA-MT-17	X	X				Rionegro	Arenisca grano medio
CR-AFTA-MT-18	X			X		Lagunitas	Caliza

9.3 MEDICIÓN DE LA EDAD POR TRAZAS DE FISIÓN

De la fisión nuclear natural del isótopo ^{238}U , que se encuentra dentro de la estructura cristalina de los apatitos como elemento traza, se producen dos partículas con carga positiva, las cuales se repelen viajando en direcciones opuestas desde el sitio de la reacción. En un material dieléctrico como el de los apatitos, esta reacción produce un trazo dañado dentro de su estructura cristalina, a lo largo de la trayectoria de las dos partículas, denominada Trazo de Fisión Espontánea (Tagami & O'Sullivan, 2005).

La edad por Trazas de Fisión (FT) de un apatito se obtiene utilizando una versión modificada de la ecuación de decaimiento radioactivo, en la que se calcula la relación existente entre el número de trazas de fisión contenidas en un grano de apatito y el contenido restante de ^{238}U en el mismo que aún no se ha fisionado (Ecuación 2). Esta relación se obtiene contando la trazas de fisión espontáneas contenidas un grano de apatito, con la ayuda de un microscopio óptico, y midiendo el contenido restante de ^{238}U por medio de un LA - ICP - MS (Laser Ablation - Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry).

$$t_{pooled} = \frac{1}{\lambda_d} \ln \left[1 + \lambda_d \zeta_{MS} g \frac{\sum N_{s,i}}{\sum p_i \Omega_i} \right]$$

Ecuación 2. Ecuación de la edad por Trazas de Fisión de una población n de apatitos. λ_d = constante de decaimiento total de ^{238}U . ζ_{MS} = factor de calibración ζ basado en ajuste hecho durante la sesión de LA-ICP-MS con una edad FT Standard. g = factor geométrico que afecta el registro de las trazas de fisión. $N_{s,i}$ = número de trazas espontáneas contadas en el área Ω . p_i = ($^{238}\text{U}/^{43}\text{Ca}$) para el apatito i (Donelick, y otros 2005).

Cabe aclarar que las trazas de fisión tienen una longitud menor a $20\mu\text{m}$ y un ancho entre 3 y 14nm aproximadamente (Donelick, y otros 2005), para lograr contarlas con la ayuda de un microscopio Nikon a 1562.5X y una mesa digitalizadora, se pule el apatito con un abrasivo alúmina de $3.0\mu\text{m}$ y $0.3\mu\text{m}$, hasta obtener una superficie interna paralela al eje cristalográfico c y se corroe usando ácido nítrico 5.5 M, durante 20seg, a una temperatura de 21°C .

9.4 MEDICION DE LA LONGITUD DE TRAZAS CONFINADAS

Las trazas de fisión confinadas corresponden a aquellas cuyos extremos se encuentran dentro del volumen de cristal después de pulido y corroído. Estas trazas se hacen visibles por medio de la corrosión de otras características del cristal (fracturas, clivaje u otras trazas) que interceptan tanto la superficie del mineral como estas trazas. De acuerdo al tipo de rasgo que las corta, las trazas confinadas se dividen en (Donelick, y otros 2005):

- TINT (Track in Track): Hace referencia a las trazas confinadas que están cortadas por otras trazas.
- TINCLE (Track in Cleavage): Son aquellas trazas que se encuentran cortadas por planos de clivaje característicos del mineral.

- TINDEF (Track in Defect): En este caso las trazas son cortadas por inclusiones fluidas, fracturas u otros defectos presentes en el apatito.

Para obtener la mayor precisión en el valor de la longitud de las trazas confinadas en un grano de apatito, estas deben tener sus puntas bien definidas, ser horizontales (trazas que se encuentren a 10° con respecto a la horizontal son aceptables para una medición adecuada de su longitud) y deben estar contenidas en planos paralelos al eje cristalográfico c. Cabe aclarar que usando los modelos propuestos por Donelick, y otros (1999) y Ketcham (2003) se puede convertir cualquier longitud medida en trazas con diferentes ángulos con respecto al eje cristalográfico c a una longitud equivalente si éstas estuvieran en posición paralela al mismo.

Se miden trazas TINT, debido a que las TINCLE algunas veces son anormalmente resistentes al borrado, posiblemente por corrosión natural y/o infiltración química. Por otro lado las trazas de tipo TINDEF suelen ser más largas debido a que las partículas repelidas viajan a través de un fluido manteniendo por un tiempo mayor esta energía repulsiva, pues las moléculas se encuentran más espaciadas y por lo tanto el choque con las mismas es menor (Donelick, y otros 2005).

Ya que la densidad de trazas con estas características es muy baja se induce la presencia de trazas TINT utilizando ^{252}Cf , lo que eleva la calidad y precisión de los datos recolectados (Figura 20). Esto se realiza una vez se han contado las trazas espontáneas para la determinación de la edad y se han localizado digitalmente los apatitos en las cuales se han contado.

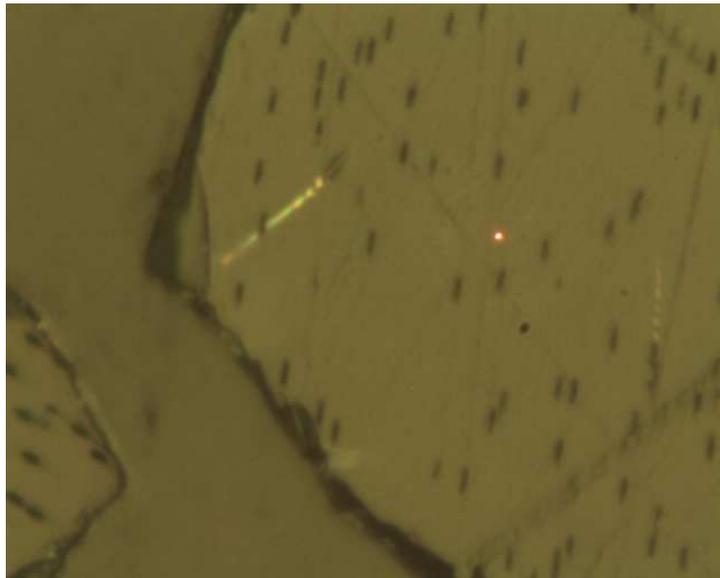


Figura 20. Traza Confinada en Apatito irradiado con ^{252}Cf .

Debido a que el borrado de las trazas de fisión en un apatito no solo depende del aumento de la temperatura y de la orientación cristalográfica, sino también de la composición

química del apatito en el que las trazas se encuentran, las características de corrosión del cristal y en menor grado, la presión de confinamiento, se han establecido 5 parámetros cinéticos de borrado de trazas de fisión en apatitos así (Donelick, y otros 2005):

- D_{Par} .
- El contenido de Cl^- : En wt% y átomos por unidad de fórmula (apfu).
- El contenido de iones OH en apfu.
- Microespectroscopía de infrarrojo, en función del contenido de F y Cl en el apatito analizado.
- Daño causado por partículas α debido al decaimiento de isótopos de U y Th

Determinar el valor de alguno de estos parámetros es de suma importancia debido a que cada apatito responde de diferente manera de acuerdo con este valor promedio y por lo tanto se puede llegar a una mejor interpretación de la historia termocronológica sufrida y evidenciada en cada uno de ellos.

En este caso se eligió medir el parámetro cinético D_{Par} . Este parámetro se refiere al diámetro máximo de la figura formada por la intersección de una traza con la superficie pulida, denominada figura de corrosión. Este se observa mejor una vez la muestra ha sido bombardeada con neutrones provenientes del decaimiento espontáneo del ^{252}Cf , el cual produce trazas perpendiculares a dicha superficie.

Generalmente en el caso de tener valores bajos de D_{Par} ($\leq 1.75\mu m$) el borrado de las trazas de fisión es rápido, mientras que en el caso contrario (valores $\geq 1.75\mu m$) el borrado de las trazas es lento. Este parámetro también se indica la orientación del eje cristalográfico c en el cristal de apatito en el que está siendo medido, lo cual permite determinar el ángulo entre una traza de fisión confinada y el eje (Figura 21).

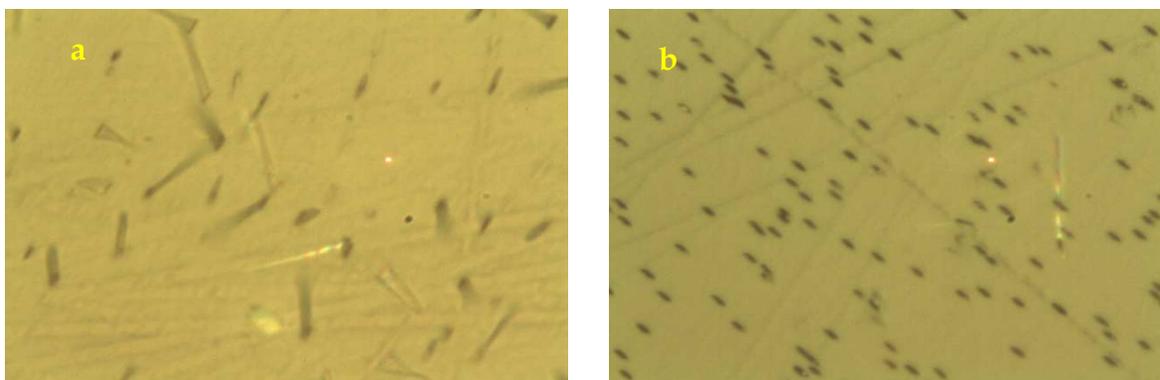


Figura 21. Figuras de Corrosión (a). Figuras de corrosión previas al bombardeo con ^{252}Cf . (b) Figuras de Corrosión después de la irradiación con ^{252}Cf .

10 REFLECTANCIA DE VITRINITA

10.1 METODOLOGIA

Las muestras recolectadas en la fase de campo con referencia CR-RV siguieron un procedimiento que constó de tres etapas, las cuales se desarrollaron en su totalidad en los laboratorios de GMAS Ltda., bajo la supervisión del Dr. José María Jaramillo.

La primera fase correspondió a la selección, pulverización, concentración, lavado y pulido; la segunda fue la medición en un microscopio petrográfico con un micro fotómetro acoplado y la tercera fue el análisis de los resultados.

10.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

De las muestras recolectadas fueron seleccionadas 52 teniendo como criterios de clasificación el grado de alteración, el color y la posición estratigráfica.

Luego cada muestra fue secada a temperatura ambiente, para ser posteriormente molida en una pulverizadora de anillos de carburo de tungsteno TM/STLX®. El tiempo y la masa inicial procesada dependían de las características reológicas de la muestra: Para litologías arcillosas o lodosas se utilizó una masa inicial de 80g y el tiempo de pulverización es de 3s, mientras que para litologías calcáreas o limosas se utilizó una masa inicial de 60g y el tiempo de pulverización es de 5s (Figura 22).

Luego se tamizó durante 10 minutos y se dividió la muestra en tres fracciones. Se denominó FRACCIÓN GRUESA a la que está por encima de 830 μ m, FRACCIÓN MEDIA a la que se encuentra entre 830 μ m y 415 μ m, y FRACCIÓN FINA a la que está por debajo de 430 μ m.

Para aumentar la relación materia orgánica/materia mineral, en cada una de las muestras se procedió a atacar con ácido clorhídrico a una concentración del 10%, una cantidad igual a 100g de la FRACCIÓN MEDIA mezclada con 50g de FRACCIÓN FINA en un beaker plástico. Después de la digestión la cantidad de muestra no disuelta fue en promedio del 2%, razón por la cual se procedió a secarla a temperatura ambiente para después observarla bajo la lupa; el residuo era una pasta homogénea de color negro, donde solo se distinguían cristales cúbicos de pirita; el tamaño de las demás partículas era muy fino como para poder caracterizar o montar la muestra en resina.

Para el siguiente ensayo se dispusieron 30g de muestra junto con aproximadamente 25ml de solución de cloruro de zinc en tubos de centrifuga de 50ml. Se agito hasta que la muestra quedó homogéneamente mezclada y luego se centrifugó por 10 minutos a 8000RPM. Luego con ayuda de un gotero se separó la fracción liviana, se lavó con abundante agua hasta retirar el exceso de cloruro y se secó a temperatura ambiente; se montó junto con aproximadamente 0.5g de resina epóxica en un agujero de 0.8cm de diámetro, que se ha perforado previamente en un cilindro de resina de 1cm de alto x 2.5cm de diámetro. Después de que la resina seca, se pule con una sucesión de abrasivos, empezando con una lija 1200 y terminando con alúmina de 0.03 μ m. Los montajes pulidos

se almacenan en un desecador hasta que vayan a ser medidos, para evitar que la materia orgánica se oxide, o que se forme una película sobre la superficie.

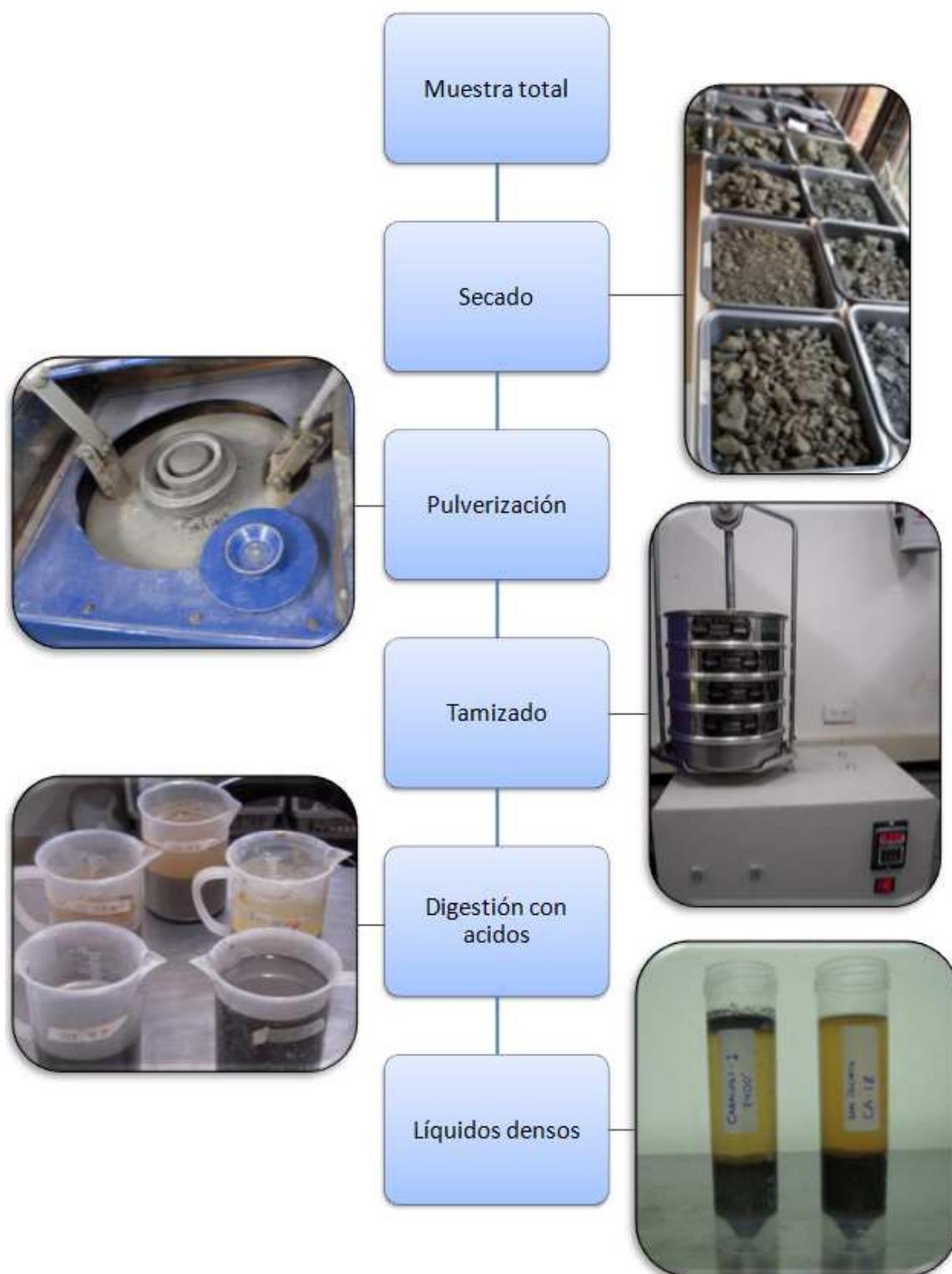


Figura 22. Metodología de preparación y concentración de materia orgánica dispersa.

10.3 MEDICIÓN DE LA REFLECTANCIA

Para realizar las mediciones se usó un espectrofotómetro acoplado a un microscopio Leitz Wetzlar Orthoplan™, calibrándolo con un patrón de reflectancia conocida, en este caso 0.517%. Todas las mediciones se realizaron con un objetivo de 40X y con aceite de inmersión tipo A (nd=1.515). Para todas las muestras se hicieron 30 medidas como mínimo, después de las cuales se verificaba la reflectancia del patrón; si la diferencia era mayor a 0.010, las medidas eran descartadas.

Todas las mediciones se realizaron sobre granos limpios y homogéneos de colotelinita, con un tamaño mayor al del spot del espectrofotómetro, siguiendo las recomendaciones de la norma "Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite (ISO7404-5, 2nd edition)".

11 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

11.1 TRAZAS DE FISIÓN EN APATITOS

De las 18 muestras procesadas, únicamente de 7 se pudieron obtener edades confiables, es decir, tienen suficientes granos de apatito, trazas espontáneas y trazas medidas (Tabla 5). Todas las edades obtenidas a partir de las trazas de fisión son más jóvenes que las edades estratigráficas, lo que indica que las rocas sufrieron temperaturas por encima de la zona de borrado parcial, entre 60°C y 110°C, borrando así las trazas heredadas y reiniciando el reloj termocronológico. La Figura 23 relaciona la edad estratigráfica, la edad de trazas de fisión, los valores de reflectancia de vitrinita, el Dpar y la longitud de las trazas, versus la profundidad.

11.2 REFLECTANCIA DE VITRINITA

De las 52 muestras procesadas, únicamente 3 del pozo Compae-1, y 4 del pozo Diablito-1E, tienen medidas de reflectancia (Tabla 6). Los datos indican temperaturas dentro de la PAZ, entre 43°C y 111°C, correspondientes a valores de reflectancia entre 0.32% y 0.74%. Según estos datos la materia orgánica de las muestras más profundas estaría en plena ventana de generación de hidrocarburos, contradiciendo los datos de trazas de fisión que indican que las muestras alcanzaron temperaturas mayores, que borraron antiguas trazas y reiniciaron el reloj termocronológico; esta diferencia en los resultados se puede explicar teniendo en cuenta que las muestras que se usaron para trazas de fisión y para reflectancia de vitrinita provienen de lugares diferentes que no comparten la misma historia de enterramiento y exhumación. Debido a esto, para los modelos en Hefty® no se usaron los datos de vitrinita medidos, y se deshabilitó la restricción de alta temperatura.

INFORME FINAL

Tabla 5. Resultados de los análisis de trazas de fisión en apatitos (Ns: Número de trazas espontáneas).

ID de la Muestra	Coordenadas Magnas-Sirgas		Elevación (msnm)	Formación	Edad Estratigráfica	Granos (dmnls)	Ns (Trazas)	Edad de Trazas (Ma)	Dpar (μm)	Longitud (μm)	Trazas Medidas
CR-AFTA-01	1558268	1080775	81	Molino	74±10	19	29	3.15 ± 0.59	2.21±0.48	13.80±1.6	9
CR-AFTA-03	1558135	1080973	82	Molino	74±10	1	1	2.82 ± 2.82	1.51±0.0	-	0
CR-AFTA-05	1569287	1099117	512	Lagunitas	118±7	26	4	9.92 ± 4.97	1.60±0.19	-	0
CR-AFTA-06	1569260	1098856	505	Lagunitas	118±7	2	1	5.42 ± 5.42	1.69±0.14	-	0
CR-AFTA-07	1567857	1097573	472	Aguas Blancas	106±7	40	16	3.76 ± 0.95	1.67±0.18	13.95±2.45	3
CR-AFTA-07A	1567852	1097465	480	Aguas Blancas	106±7	19	50	7.79 ± 1.13	1.56±0.16	14.47±1.42	10
CR-AFTA-08	1567449	1096171	300	Aguas Blancas	106±7	40	108	7.60 ± 0.76	1.67±0.16	13.24±1.53	32
CR-AFTA-09	1595675	1093217	210	Aguas Blancas	106±7	5	4	5.55 ± 2.78	1.58±0.48	-	0
CR-AFTA-10	1595229	1097458	390	La Quinta	201±30	3	0	0.00 ± 10.23	1.85±0.14	-	0
CR-AFTA-11	1595130	1097516	400	La Quinta	201±30	no grain ages	-	-	-	-	0
CR-AFTA-12	1595463	1097291	340	La Quinta	201±30	20	60	21.8 ± 2.9	1.74±0.40	13.77±0.98	8
CR-AFTA-13	1595509	1097152	325	La Quinta	201±30	13	6	5.69 ± 2.33	1.62±0.19	14.70±1.62	6
CR-AFTA-14	1595544	1097115	330	Rio Negro	125±6	40	154	9.26 ± 0.79	1.72±0.19	13.88±1.29	39
CR-AFTA-15	1595572	1097016	312	Rio Negro	125±6	40	284	9.36 ± 0.61	1.74±0.19	14.29±1.28	88
CR-AFTA-16	1595841	1096814	225	Rio Negro	125±6	40	164	8.40 ± 0.70	1.72±0.21	14.08±1.14	45
CR-AFTA-17	1596096	1096272	180	Rio Negro	125±6	39	90	6.76 ± 0.74	1.68±0.22	14.18±1.10	36
CR-AFTA-18	1596085	1095069	450	Lagunitas	118±7	no grain ages	-	-	-	-	0
CR-AFTA-19	1596139	1095091	448	Lagunitas	118±7	no grain ages	-	-	-	-	0

INFORME FINAL

Tabla 6. Resultados de las mediciones de reflectancia de vitrinita.

Muestra ID	Reflectancia Random (%)	Desviación Estándar	Temperatura máxima (Barker & Pawlevicz 1986)	Unidad Litoestratigráfica
Compáe 2360	0.52	0.029	83	Fm. Aguas Blancas
Compáe 5080	0.73	0.034	111	Fm. Rio Negro
Compáe 5110	0.74	0.032	112	Fm. Rio Negro
Diablito 1547	0.50	0.024	79	Fm. Molino
Diablito 1647	0.44	0.026	70	Fm. Molino
Diablito 1772	0.32	0.014	//	Fm. Molino
Diablito 1969	0.51	0.023	81	Fm. Molino

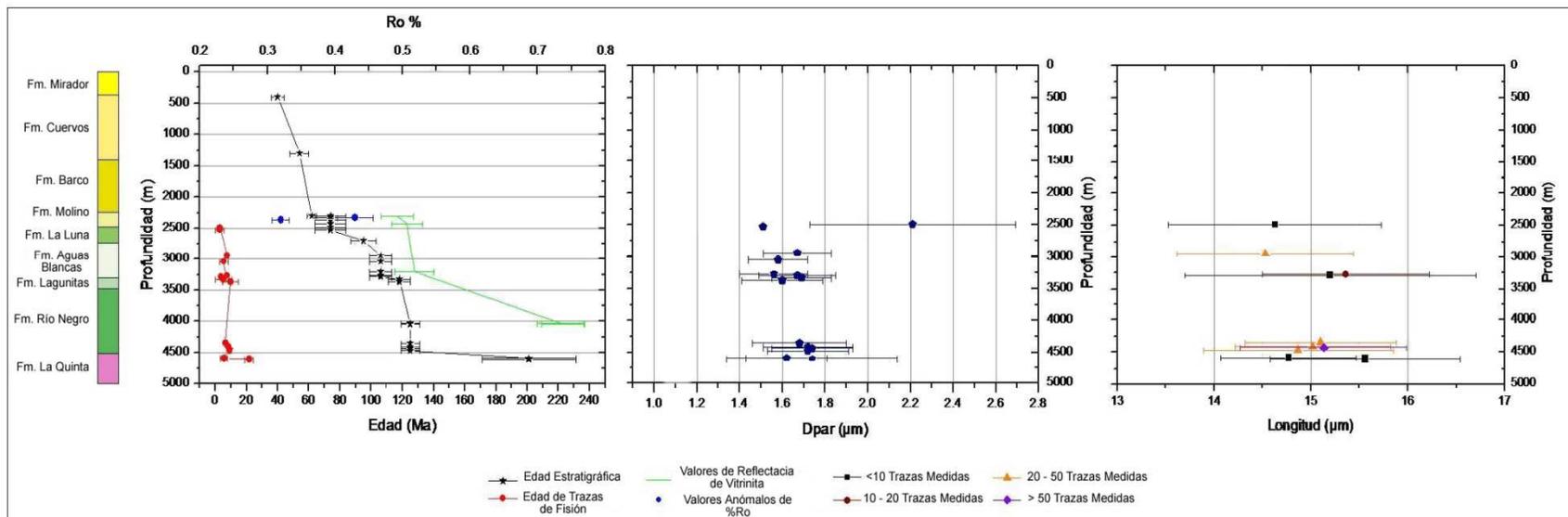


Figura 23. Valores de trazas de fisión y reflectancia de vitrinita (Ro) graficadas contra la posición estratigráfica en profundidad.

11.3 ANALISIS DE MODELAMIENTO INVERSO PARA TRAZAS DE FISION

Para realizar los modelos inversos se utilizó el programa Hefty®, en el cual se introducen los datos obtenidos a partir de los análisis de trazas de fisión, y se añaden ajustes y restricciones de acuerdo al conocimiento previo de la cuenca, como datos de proveniencia, máximas paleo-temperaturas obtenidas de los análisis de reflectancia, etc. (Para ver más detalles sobre el funcionamiento del software, ejemplos de aplicación y sus calibraciones se recomienda revisar el manual publicado por Ketcham, (2008)).

Usando la información recopilada, y en base a las curvas de enterramiento realizadas, se propuso un enterramiento lento de la pila sedimentaria, y una exhumación rápida definida por las recientes edades de trazas de fisión. Al no obtener materia orgánica de las muestras de superficie, la cual se pudiera correlacionar con los datos de trazas de fisión, los modelos inversos no incluyeron este parámetro, haciendo imposible determinar con precisión la máxima temperatura alcanzada.

La Figura 24 muestra un ejemplo del modelamiento inverso realizado con el software Hefty ® para una muestra localizada en la base de la Formación Río Negro.

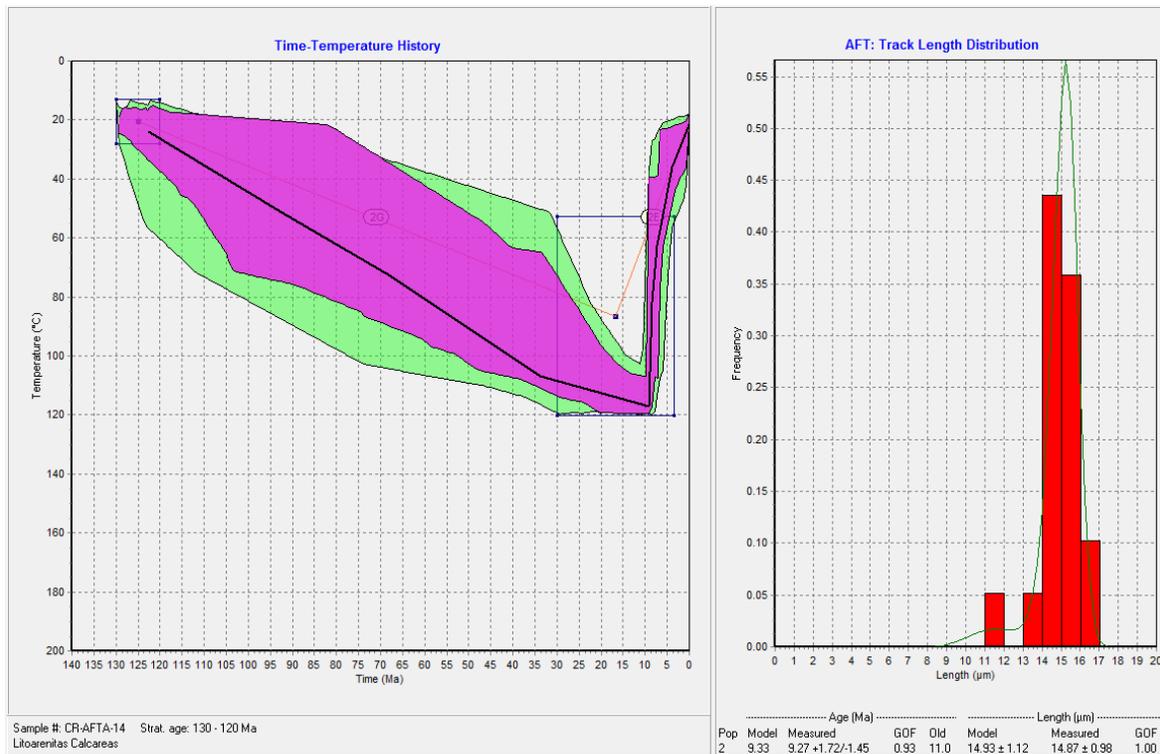


Figura 24. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra CR-AFTA-MT-14 localizada en la base de la Formación Río Negro.

Las historias termales muestran una rápida exhumación, evidenciada por las longitudes largas de las trazas y registrada en los cristales de apatito desde hace 21Ma, en el caso de la

Formación La Quinta. Esta edad coincidiría con el surgimiento de las principales cadenas montañosas en el Mioceno, durante la Orogenia Andina.

La sección muestreada, que corresponde a la zona exhumada de la Cuenca Cesar-Ranchería, estuvo enterrada lo suficiente como para alcanzar temperaturas iguales o superiores al límite de la zona de borrado parcial, es decir, 110°C; la historia térmica antes del Mioceno, no se puede deducir a partir de los datos obtenidos a partir de las trazas de fisión.

Únicamente 7 de las 15 edades obtenidas a partir de los análisis de trazas de fisión son confiables en base al número de granos y trazas espontaneas. La tendencia general de estos datos indica que las unidades estratigráficas en la base de la sección estudiada se enfriaron antes que las unidades al tope, lo cual contradice los procesos comunes de exhumación y enfriamiento; en un proceso de exhumación normal las unidades rocosas al tope de la pila sedimentaria se enfriarían primero, generando edades de trazas de fisión mayores que las unidades infrayacentes; hay al menos 3 posibles factores que causen este comportamiento anómalo:

- Diferencias composicionales entre los apatitos de las unidades muestreadas, lo cual influiría en la cinética de borrado de las trazas, y por consiguiente en la edad estimada a partir de estas.
- Muestras tomadas en diferentes bloques estructurales, con incomparables historias de exhumación.
- Infiltración de agua superficial al sistema, disminuyendo la temperatura en zonas profundas, antes del inicio de la exhumación de las unidades al tope de la sección.

Asumiendo que no hay errores instrumentales o en la toma de las muestras, la primera opción es descartada debido a la similitud entre los valores de Dpar. El Dpar es una medida indirecta del contenido de Cl y F en los cristales de apatito, y una diferencia significativa de este valor evidenciaría composiciones disímiles, y por lo tanto, diferentes cinéticas de borrado de las trazas.

La segunda opción implicaría que las muestras se tomaron en diferentes cuñas de cabalgamiento, con despegues ubicados en cada uno de los contactos entre las formaciones; dicho escenario es descartado al observar las relaciones de campo entre las muestras tomadas; las zonas de muestreo están separadas únicamente por la Falla del Sicarare, una falla sinistral de alto ángulo, que afecta a toda la secuencia por igual.

La más probable es entonces la tercera opción donde el agua superficial se infiltra hasta la base de la pila sedimentaria aprovechando la porosidad primaria y secundaria, y el despegue de las fallas de cabalgamiento que se formaron durante la Orogenia Andina y que generarían la Serranía del Perijá; de esta manera se enfriaron primero las unidades más profundas, en este caso las formaciones La Quinta y Río Negro, lo cual explicaría las edades invertidas obtenidas a partir de los análisis de trazas de fisión.

En cuanto a las mediciones de reflectancia de vitrinita de las muestras de los pozos exploratorios Compae-1 y Diablito-1E, ubicados al occidente de la zona donde se tomaron las muestras de superficie y perforados en la zona no exhumada de la cuenca, indican que

las formaciones Río Negro, Aguas Blancas y Molino a profundidades actuales, entre 5110' (Fm. Río Negro, $R_o=0.74\%$) y 1547' (Fm. Molino, $R_o=0.50\%$) están en la ventana de generación de hidrocarburos líquidos. En comparación, las temperaturas estimadas alcanzadas por las muestras tomadas en superficie son mayores, indicando mayores espesores al oriente de la Falla del Perijá, y por lo tanto mayor enterramiento y temperatura.

La historia térmica de la parte no exhumada de la cuenca Cesar Ranchería no se puede deducir de los datos obtenidos en este estudio. Se requiere sin duda hacer un muestreo cuidadoso de los pozos exploratorios y realizar sobre estos un análisis de trazas de fisión en apatitos con el fin de obtener la información requerida para calibrar el modelo térmico de la porción no exhumada de la cuenca.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los modelos generados a partir de la información de trazas de fisión indican que las formaciones del Jurásico Superior al Cretácico Medio (desde la Formación La Quinta hasta la Formación Aguas Blancas) alcanzaron en la Serranía del Perijá la ventana de generación de hidrocarburos líquidos, es decir temperaturas entre 50 y 110°C.

El enterramiento para las rocas estudiadas de la Serranía de Perijá fue mucho mayor que el estimado usando la información estratigráfica disponible para las unidades sedimentarias del Terciario (Formación Barco y Formación Los Cuervos), unidades que no afloran en la zona de estudio por efecto de la denudación que ha sufrido esta parte de la cuenca debido a la exhumación de la Serranía del Perijá. Este resultado indica que la cuenca se profundiza, al menos durante el Paleógeno, hacia el Oriente.

Según los valores de reflectancia medidos en las muestras de los pozos Compae-1 y Diablito-1E, las formaciones del Cretáceo Inferior y Medio en la cuenca Cesar- Ranchería tienen un potencial significativo de generación de hidrocarburos líquidos. Dichos valores indican que las rocas del Cretácico no han sufrido un enterramiento tan grande como las rocas de formaciones equivalentes en la Serranía de Perijá.

Todas las unidades analizadas alcanzaron una profundidad lo suficientemente alta para borrar las trazas heredadas; la diferencia entre trazas de fisión y los datos de R_o se debe a que las muestras destinadas para cada análisis provienen de lugares que no comparten una única historia de enterramiento.

La sección estudiada se exhumó rápidamente entre el Mioceno Tardío (12Ma) y el presente; con los datos obtenidos es imposible modelar con precisión la historia térmica antes de ese periodo.

Se sugiere que los datos obtenidos en este estudio sean publicados como una contribución al conocimiento de la Cuenca Cesar - Ranchería y de la historia de exhumación de la Serranía de Perijá.

Hacer un análisis de trazas de fisión en circones de las muestras recolectadas en este estudio, para establecer el pico máximo de temperatura que pudo haber alcanzado cada una de las unidades.

Hacer un análisis estructural detallado del área, para poder establecer las estructuras dominantes, y así tener un mejor conocimiento de los mecanismos de deformación y subsidencia de la cuenca.

Extender el área de investigación a toda la Cuenca de Cesar-Ranchería utilizando muestras de pozos exploratorios y eventualmente perforar un pozo estratigráfico en la parte más profunda de la cuenca para determinar la historia térmica en la zona subyacente del la Falla de Perijá.

Ampliar el alcance del proyecto al estudio de unidades estratigráficas del Cenozoico y al estudio de proveniencia de los sedimentos, lo cual permitirá un conocimiento mas preciso de la paleogeografía y al mismo tiempo servirá como una herramienta para predecir las calidades de los reservorios.

Evaluar la zona subyacente de la Falla de Perijá, como zona potencialmente generadora de hidrocarburos líquidos a partir de sedimentos del Paleógeno.

Estudios previos de carbono orgánico total podrían servir para discriminar y seleccionar mejor las unidades a muestrear, que contengan suficiente materia orgánica dispersa para optimizar el proceso de separación y preparación de muestras para análisis de reflectancia de vitrinita.

BIBLIOGRAFÍA

- ALDERSHOOF, W. Geochemical Source Rock Investigation In Colombia. Ecopetrol S.A. Bogotá, 1951.
- ANH; UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA; RA GEOLOGIA E.U. y GEMS LTDA. Organic Geochemistry Atlas of Colombia. Earth Sciences Research Journal. Vol. 13, Special Edition. 2009.
- BARKER, C.E., y M.J. PAWLEWICZ. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter, in G. Buntebarth and L. Stegena, eds., Paleogeothermics: Springer-Verlag, Lecture Notes in Earth Sciences 5, pp. 79-93. 1986.
- BARRERO, D., PARDO, A., VARGAS, C.A. y MARTINEZ, J. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a new proposal. ANH. Bogotá. 2007.
- BAYONA, G.; LAMUS-OCHOA, F.; CARDONA, A; JARAMILLO, C; MONTES, C; TCHEGLIAKOVA, N.. Procesos orogénicos del Paleoceno para la cuenca de Ranchería (Guajira, Colombia) y áreas adyacentes definidos por análisis de procedencia. En: Geología Colombiana No.32, pp. 21-46. 2007.
- CÁCERES, C.; MOLINA, J. y BERNAL, J. Informe Geológico Final, Pozo El Molino 1X. En: Reporte interno de ECOPEPETROL S.A. Bogotá, 1981.
- DONELICK, R.A., O'SULLIVAN, P.B. & KETCHAM, R.A. Apatite Fission - Track Analysis. Rev. Mineral. Geochem., Vol. 58, pp. 49 - 94. 2005.
- DUNHAM, R, J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham (ed) Classification of Carbonate Rocks. Memoir 1, American Association of Petroleum Geologists, p. 108-121. 1962.
- FOLK, R. Petrology of sedimentary rocks. Austin Texas, Hells phills. 1974.
- FORERO, A. Estratigrafía del Pre cretácico en el flanco occidental de la Serranía de Perijá. Universidad Nacional, Geología Colombiana. Vol. 7, pp. 7-78. Bogotá, 1972.
- GARCÍA, C. Proyecto Cesar Ranchería. pp. 1-144. ECOPEPETROL - ICP. Piedecuesta. Santander, 1990.
- GEOESTUDIOS, LTDA. Cartografía Geológica Cuenca Cesar - Ranchería, Informe Final. p. 95. 2006
- GIL, A. y MARTINEZ H. Análisis micro facial del Grupo Cogollo, y Formación La Luna, cuenca Cesar Ranchería, Guajira, Colombia. Trabajo de grado (Geólogo). Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias. Bogotá, 1990.
- GOVEA, C. y DUEÑAS, E. Informe geológico preliminar de la Cuenca del Cesar. Informe 390, pp. 37. Ecopetrol. Bogotá, 1975.
- GUIDISH, T. M.; KENDALL, C. G. ST. C.; LERCHE; D. J. TOTH, I, Y YARZAB, R. F. Basin Evaluation Using Burial History Calculation: an Overview. Bulletin American Association of Petroleum Geologists. pp. 92-105, 1985.
- HAUGHT, L.; COLLEY, B. and BELDING, H. Geology of the Cesar-Rancheria Valley and commissary of Guajira. En: Tropical Oil Company, Geologic Report, No. 449, 45 p. Bogotá, 1945.
- HEDBERG, H.D. Cretaceous Limestone as Petroleum Source Rock in Northwestern Venezuela. En: Bulletin American Association of Petroleum Geology. Vol. 15, No. 3, pp. 229-244. Tulsa, Oklahoma, 1931.

- HERNANDEZ, M. Memoria Explicativa Geología Plancha 48, Jagua de Ibirico. Escala 1:100.000, INGEOMINAS. Bogotá, 2003.
- KELLOGG, J.N. The Cenozoic Basement Tectonics of the Sierra de Perijá, Venezuela and Colombia. Tesis PhD, Princeton University, 241 p. Princeton, NJ, 1981.
- KETCHAM, R.A. y APATITE TO ZIRCON INC. Hefty Version 1.5.1, Manual, Austin, 2008.
- _____. Observations on the Relationship between Crystallographic Orientation and biasing in apatite Fission-track Measurements. *Am Mineral* 88:817-829. 2003.
- KOCHINSKI, D. y MALDONADO, A. Interpretación Geológica de la información sísmica de la subcuenca de Ranchería. Ecopetrol S.A. Bogotá, 1991.
- LILL, R. y NUGENT, J. Geology of the East Cesar Valley. Tropical Oil Company. Geologic Report 1009. 55 p. Bogotá, 1950.
- LOZANO, C. Informe Técnico Anual 1989. Contrato de asociación Bosconia - Esso - Colombiana Limited. Bogotá, 1990.
- MILLER, J. Directrices Tectónicas en La Sierra de Perijá y Partes Adyacentes de Venezuela y Colombia. En: Boletín Geológico Ministerio de Minas, Publicación Especial, Vol. 3, Mem. 3 Congr. Geol. 2, pp. 685-718. Caracas, 1960.
- MORA, A. y GARCÍA, A. Cenozoic Tectono-Stratigraphic, Relationships between the Cesar Sub-Basin and the Southeastern Lower Magdalena Valley Basin of Northern Colombia. En: Libro de resúmenes, convención anual de la AAPG, pp. 74-75. Houston, USA, 2006.
- OLAYA I.D. Proyecto Cuencas fronteras informe de recopilación de información: Cesar Ranchería. En: Informe interno 3886. Ecopetrol. Piedecuesta, Santander, 1994.
- PINDELL, J. y KENNAN, L. Kinematic Evolution of Gulf of Mexico and Caribbean. 51 pags. <http://www.redciencia.cu/cdorigen/arca/paper/pindel.pdf>. 2001.
- READING, H. Sedimentary Environments and Facies. Elsevier. New York. 1980.
- RIVERA, F.G.. Informe Geológico Final Pozo Compae-4. Geexplorer Ltda. 23p. Bogotá, 2003.
- _____. Informe Geológico Final Pozo Compae-1. Geocast Ltda. 110p. Bogotá, 1998.
- RINALDI, A.; BELLIZI, L.; TRUSKOWSKI, I., y ZAPATA, E. Estudio Bioestratigrafico del Grupo Cogollo en la Cuenca de Maracaibo, Occidente de Venezuela. En: Memorias del X Congreso Colombiano de Geología. p 1-11. Bogotá, 2005.
- RODRÍGUEZ, G. y LONDOÑO, A.C. Memoria Explicativa Mapa Geológico Generalizado del Departamento de la Guajira. Versión 2. INGEOMINAS. 259p. Medellín, 2002.
- SALAZAR, A. Estudio Sedimentológico del pozo Diablito-1. Drummond L.T.D.A. Bogotá, 2005.
- TAGAMI, T. & O'SULLIVAN, P.B. Fundamentals of Fission-Track Thermochronology. *Rev. Mineral. Geochem.*, Vol. 58, pp. 19-47. 2005
- TRUMPY, D. Geology of Colombian. En: GA Report No. 23323. Bogotá, 1949.
- TSCHANZ, C.; JIMENO, A. y CRUZ, J. Mapa geológico de reconocimiento de la Sierra Nevada de Santa Marta. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Bogotá, 1969.
- UJUETA, G. y LLINAS, R. Reconocimiento Geológico de la parte más septentrional de la Sierra de Perijá. *Geología Colombiana* No. 17. pp. 197-209. Bogotá, 1990.
- VILLAMIL, T. Campanian-Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Vol. 153, pp 239-275. Bogotá, 1999.

WENTWORTH, C.K. A scale of grade and class terms for clastic sediments: *The Journal of Geology*, v. 30, p. 377-392. 1922.

ZAMBRANO, E.; VÁSQUEZ, E.; DUVAL, B.; LATREILLE, M., y COFFINIERS B. Síntesis Paleogeográfica y Petrolera del Occidente de Venezuela. IV Congreso Geológico Venezolano. Caracas, 1975.

ANEXO 1.B
LISTADO DE ESTACIONES DE CAMPO
SECTOR CODAZZI - LA JAGUA DE IBIRICO

FORMACIÓN LA QUINTA

CR-20

Toma de la muestra CR-AFTA10 (MT-ML-MGG), CR-RV24 (ML-MGG), CR-RV25 (ML-MGG).

Coordenadas: N: 1' 595 229 E: 1' 097 458

Datos Estructurales: N12E/22NW

Litología: Tobas soldadas muy fracturadas, con cristales de cuarzo de 1cm a 1,5cm rosados y lechosos (Figura 1).



Figura 1. Capas de tobas soldadas, sobre el Arroyo Alberto, de la Fm. La Quinta.

CR-21

Toma de la muestra CR-AFTA11 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 130 E: 1'097 516

Datos Estructurales: N3E/32NW

Litología: Tobas soldadas, con cristales de cuarzo de 1cm a 2cm, rosados y lechosos.

CR-22

Toma de la muestra CR-AFTA12 (MT-ML-MGG), CR-RV26 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 463 E: 1'097 291

Datos Estructurales: N8E/31NW

Litología: Rocas volcano-sedimentarias con carbonato como cemento, estratificación cruzada en artesa ligeramente ondulosa, dentro de capas gruesas a muy gruesas (Figura 2 y Figura 3).

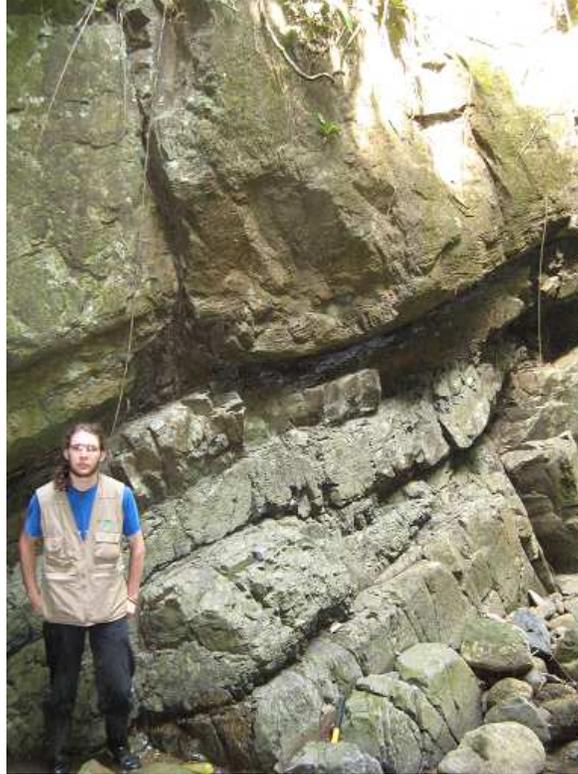


Figura 2. Rocas volcano-sedimentarias con cemento calcáreo, con N8E/31NW, sobre el Arroyo Alberto, Formación La Quinta.



Figura 3. Estratificación cruzada en artesa de las tobas, sobre el Arroyo Alberto, Fm. La Quinta.

CR-23

Toma de la muestra CR-AFTA13 (MT-ML-MGG), CR-RV27 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 509 E: 1'097 152

Datos Estructurales: N56E/38NW

Litología: Rocas volcano-sedimentarias con cemento calcáreo (Figura 4).

FORMACION RÍO NEGRO

CR-23

Toma de la muestra CR-AFTA13 (MT-ML-MGG), CR-RV27 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 509 E: 1'097 152

Datos Estructurales: N56E/38NW

Litología: Lodolitas negras, calcáreas con abundante materia orgánica (Figura 4).

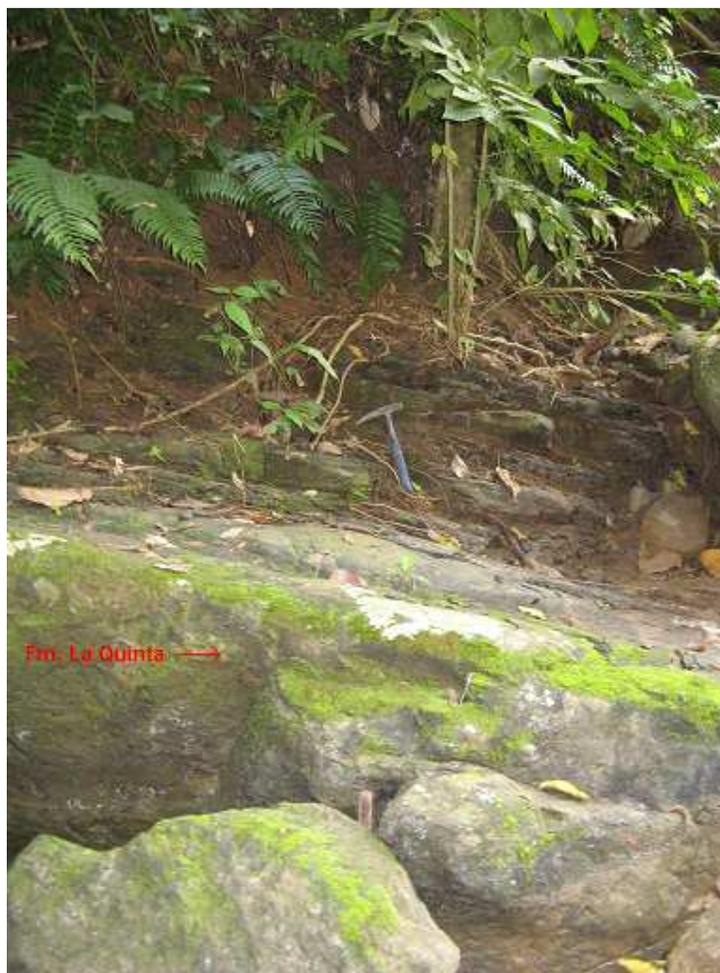


Figura 4. Contacto paraconforme de la Formación La Quinta con la Formación Río Negro.

CR-24

Toma de la muestra CR-AFTA14 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 544 E: 1'097 115

Litología: Litoarenitas feldespáticas, de grano medio a muy grueso, dentro de capas gruesas (Figura 5).

CR-25

Toma de la muestra CR-RV28 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 573 E: 1'097 085

Litología: Lodolitas negras, calcáreas.

CR-26

Toma de la muestra CR-AFTA15 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 572 E: 1'097 016

Datos Estructurales: N20E/40NW

Litología: Hacia la base conglomerados polimícticos de cantos a guijos, y hacia el tope areniscas de grano grueso a conglomeráticas.



Figura 5. Litoarenitas feldespáticas, pertenecientes a la Formación Rio Negro, sobre el Arroyo Alberto.

CR-27

Toma de la muestra CR-AFTA16 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 841 E: 1'096 814

Litología: Areniscas gruesas a conglomeráticas, dentro de capas gruesas.

CR-28

Toma de la muestra CR-AFTA17 (MT-ML-MGG), CR-RV29 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'59 6096 E: 1'096 272

Datos Estructurales: N52E/48NW

Litología: Areniscas de grano medio rojizas, con abundante cuarzo, dentro de capas gruesas. (Figura 6).



Figura 6. Arenitas de grano grueso, Fm. Rio Negro, sobre el Río Fernambuco.

CR-29

Toma de la muestra CR-RV30 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 992 E: 1'096 216

Datos Estructurales: N40E/58NW

Litología: Limolitas rojizas en capas medias.

CR-30

Toma de la muestra CR-RV31 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'596 192 E: 1'095 415

Litología: Limolitas rojas.

CR-31

Toma de la muestra CR-RV32 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'596 310 E: 1'096 775

Litología: Limolitas rojas y areniscas muy finas con presencia de pirolusita, en capas medias a gruesas.

CR-32

Toma de la muestra CR-RV33 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'596 220 E: 1'096 540

Litología: Limolitas rojas con cemento silíceo.

CR-36

Toma de la muestra CR-RV37 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 975 E: 1'095 253

Litología: Limolitas rojas.

CR-37

Toma de la muestra CR-RV38 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 698 E: 1'094 718

Litología: Limolitas rojas fisiles.

CR-38

Toma de la muestra CR-RV39 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 530 E: 1'094 640

Litología: Limolitas rojas.

FORMACIÓN LAGUNITAS

CR-11

Toma de la muestra CR-AFTA05 (MT-ML-MGG), CR-RV11 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'569 287 E: 1'099 117

Dato Estructural: N30E/10NW.

Litología: Bioesparitas wackestone a packstone con conchas desarticuladas, en capas gruesas a muy gruesas con intercalaciones de lodolitas negras calcáreas (Figura 7 y Figura 8).

CR-12

Toma de la muestra CR-AFTA06 (MT-ML-MGG), CR-RV12 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'569 260 E: 1'098 856

Dato Estructural: N55W/15SW

Litología: Bioesparitas wackestone en capas gruesas y muy gruesas, con fósiles de conchas desarticuladas de 2cm a 6cm, intercaladas con lodolitas calcáreas en un 10 % a 5%, dentro del afloramiento.

CR-13

Toma de la muestra CR-RV13 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'569 242 E: 1'098 745

Datos Estructurales: N55W/15SW.

Litología: Lodolitas calcáreas negras finamente laminadas.



Figura 7. Bioesparitas wackestone a packstone, Formación Lagunitas, Quebrada Roncón.



Figura 8. Afloramiento de bioesparitas intercaladas con lodolitas negras, en capas gruesas a muy gruesas, Quebrada Roncón.

CR-34

Toma de la muestra CR-AFTA18 (MT-ML-MGG), CR-RV35 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'596 086 E: 1'095 069

Datos estructurales: N25W/35NE

Litología: Bioesparitas packstone, en capas gruesas a muy gruesas, e intercalaciones de lodolitas calcáreas (Figura 9).



Figura 9. Bioesparitas packstone, con intercalaciones de lodolitas, pertenecientes a la Formación Lagunitas, Sierra de Fernambuco.

CR-35

Toma de la muestra CR-AFTA19 (MT-ML-MGG), CR-RV36 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'596 139 E: 1'095 091

Litología: Bioesparitas packstone en capas gruesas a muy gruesas. (Figura 10).

CR-39

Toma de la muestra CR-RV40 (ML-MGG) y CR-RV41 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'596 134 E: 1'095 088

Litología: Lodolitas negras con alto contenido de materia orgánica.

CR-40

Toma de la muestra CR-RV42 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'594 997 E: 1'094 944

Litología: Bioesparitas wackestone en capas medias a gruesas.

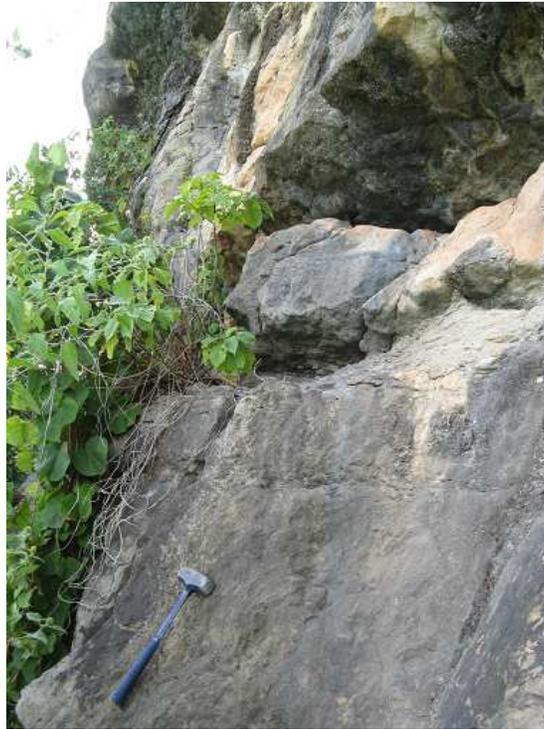


Figura 10. Bioesparitas packstone, en capas gruesas y muy gruesas, de la Fm. Lagunita, Sierra de Fernambuco.

CR-41

Toma de la muestra CR-RV43 (ML-MGG) y CR-RV43 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'594 911 E: 1'094 911

Litología: Lodolitas negras con alto contenido de materia orgánica.

FORMACIÓN AGUAS BLANCAS

CR-14

Toma de la muestra CR-RV14 (M -MGG)

Coordenadas: N: 1'567 585 E: 1'096 504

Litología: Biomicritas negras en capas gruesas a muy gruesas, con intercalaciones de lodolitas calcáreas en capas medias a gruesas en un 20%.

CR-15

Toma de la muestra CR-RV15 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'567 418 E: 1'096 137

Litología: Biomicritas mudstone y Bioesparitas wackestone a packstone, con intercalaciones de lodolitas en menor proporción.

CR-16

Toma de la muestra CR-AFTA07 (MT-ML-MGG), CR-RV16 (ML-MGG) y CR-RV17 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'567 857 E: 1'097 573

Datos Estructurales: N11E/12NW

Litología: Bioesparitas wackestone a packstone, en capas gruesas y muy gruesas, con intercalaciones de lodolitas calcáreas, en capas delgadas y medias en un 15%, en el afloramiento (Figura 11).



Figura 11. Bioesparitas wackestone a packstone, dentro de capas gruesas y muy gruesas, intercaladas con lodolitas, de la Formación Aguas Blancas, Miembro Ánimas, Quebrada Azufrada.

CR-17

Toma de la muestra CR-AFTA07A (M -ML - MGG), CR-RV18 (ML-MGG) y CR-RV19 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'567 852 E: 1'097 465

Datos Estructurales: N22E/12NW

Litología: Bioesparitas wackestone a packstone, y bioesparitas impuras arenosas, con intercalaciones de lodolitas calcáreas, en capas gruesas a muy gruesas (Figura 12).



Figura 12. Capas Gruesas de bioesparitas wackestone, con intercalaciones delgadas de lodolitas, de la Formación Aguas Blancas, Miembro Ánimas, Quebrada Azufrada.

CR-18

Toma de la muestra CR-AFTA08 (MT-ML-MGG), CR-RV20 (ML-MGG) y CR-RV21 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'567 449 E: 1'096 171

Litología: Biomicritas muy laminadas intercaladas con lodolitas calcáreas, se encuentra una capa de arenita calcárea de grano fino a medio.

CR-19

Toma de la muestra CR-AFTA09 (MT-ML-MGG), CR-RV22 (ML-MGG) y CR-RV23 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'595 675 E: 1'093 217

Datos Estructurales: N60E/41SE

Litología: Bioesparitas wackestone en capas gruesas masivas (Figura 13).

FORMACIÓN MOLINO

CR-01

Toma de la muestra CR-AFTA03 (MT-ML-MGG), CR-RV01 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'558 135 E: 1'080 973

Dato Estructural: N26E/20NW y N40E/11NW

Litología: Limolitas calcáreas, laminación plano paralela, en capas delgadas (Figura 14).



Figura 13. Bioesparitas wackestone de la Formación Aguas Blancas, Occidente Sierra de Fernambuco.



Figura 14. Limolitas negras calcáreas con laminación plano paralela pertenecientes a la Formación Molino, Caño Tucuycito.

CR-02

Toma de la muestra CR - RV02 (ML - MGG)

Coordenadas: N: 1'558 205 E: 1'082 902

Datos Estructurales: N30E/12NW y NS/8W

Litología: Limolitas calcáreas, con abundante materia orgánica, presenta laminación plano paralela continua, hay concreciones desde 8cm hasta 20cm (Figura 15).



Figura 15. Limolitas calcáreas con laminación planoparalela, Caño Tucuycito.

CR-03

Toma de la muestra CR-RV03 (ML-MGG), CR-RV04 (ML-MGG) y CR-RV05 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'558 229 E: 1'080 867

Datos Estructurales: N40E/14NW

Litología: Lodolitas ligeramente calcáreas, a margas con laminación plano paralela discontinua, junto con limolitas calcáreas con laminación plano paralela continua, con abundante materia orgánica con concreciones de 2cm a 20 cm, predominando las de tamaño entre 4 cm y 6 cm (Figura 16 y Figura 17).

CR-04

Toma de la muestra CR-RV06 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'558 279 E: 1'080 837

Datos Estructurales: N38E/9NW

Litología: Micritas negras en capas delgadas.



Figura 16. Limolitas calcáreas de la Formación Molino, Caño Tucucito.



Figura 17. Lodolitas calcáreas de la Formación Molino, Caño Tucucito.

CR-05

Toma de la muestra CR-RV07 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'558 284 E: 1'080 826

Datos Estructurales: N28E/12NW

Litología: Micritas muy laminadas, con laminación plano paralela continua (Figura 18).



Figura 18. Micritas muy laminadas pertenecientes a la Formación Molino, Caño Tucucyito.

CR-06

Toma de la muestra CR-RV08 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'558 292 E: 1'080 808

Litología: Micritas muy laminadas, con laminación ondulosa y continua.

CR-07

Toma de la muestra CR-RV09 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'558 290 E: 1'080 792

Litología: Lodolitas calcáreas con laminación plano paralela discontinua.

CR-08

Toma de la muestra CR-AFTA01 (MT-ML-MGG), CR-RV10 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'558 268 E: 1'080 775

Datos Estructurales: N45E/22NW

Litología: Limolitas negras a areniscas de grano muy fina calcáreas, con alto contenido de materia orgánica, laminación plano paralela continua, presenta concreciones de 10 cm a 15 cm, predominando las de 12 cm, y ostrácodos de 3cm a 7cm. (Figura 19 y Figura 20).

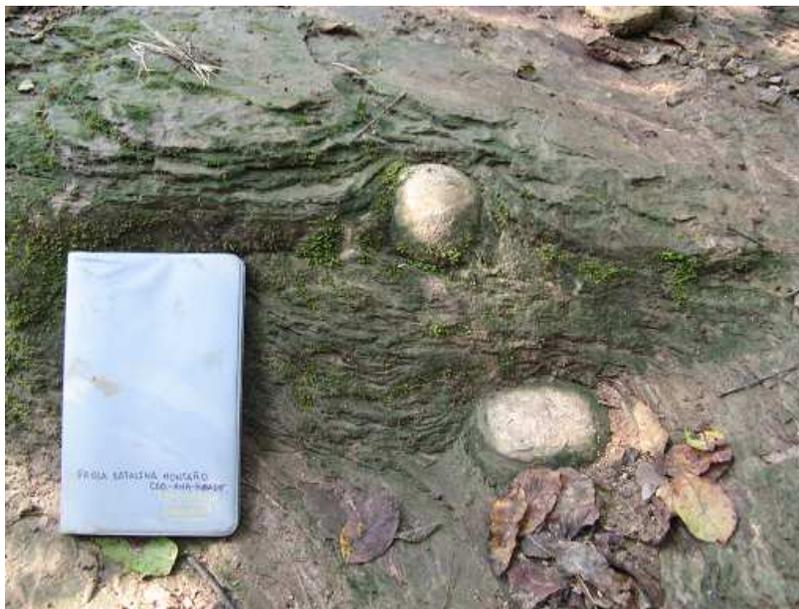


Figura 19. Areniscas muy finas, presencia de concreciones, de la Formación Molino, Caño Tucucito.



Figura 20. Laminación planoparalela continua dentro de las arenitas y limolitas calcáreas pertenecientes a la Formación Molino, Caño Tucucito.

CR-09

Toma de la muestra CR-AFTA02 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'558 242 E: 1'080 863

Litología: Limolitas negras calcáreas compactas.

CR-10

Toma de la muestra CR-AFTA04 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1'558 203 E: 1'080 834

Litología: Lodolitas a limolitas calcáreas, en capas muy delgadas a delgadas, con laminación plano paralela continua, presenta contenido fósil de amonitas y ostrácodos.

ANEXO 1.B. LISTADO DE ESTACIONES DE CAMPO

LISTADO DE ESTACIONES

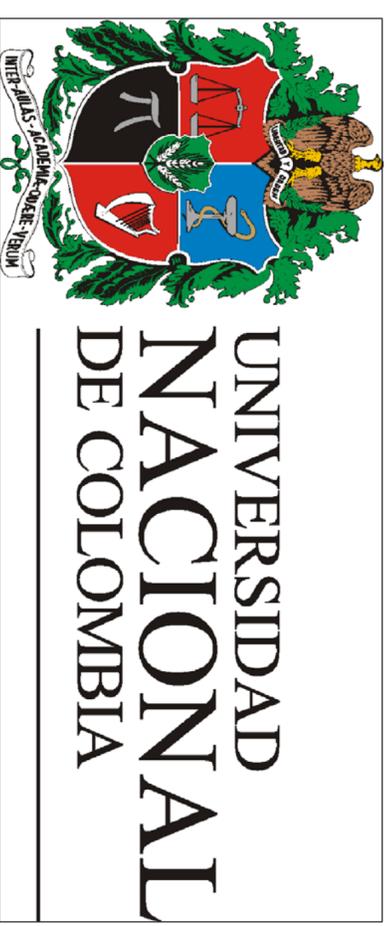
ESTACIÓN	ID MUESTRA	COORDENADAS PLANAS			COORDENADAS MAGNAS - SIRGAS			RUMBO/BUZAMIENTO	LITOLOGÍA	PLANCHA	FORMACIÓN
		N	E	ORIGEN	N	E	ORIGEN				
CR-01	CR-RV01	1558135	1080973	BOGOTÁ	1558130,3	1080981,1	BOGOTÁ	N26E/20NW	Limolitas	48-I-B	Molino
CR-01	CR-AFTA03	1558135	1080973	BOGOTÁ	1558130,3	1080981,1	BOGOTÁ	N40E/11NW	Limolitas	48-I-B	Molino
CR-02	CR-RV02	1558205	1082902	BOGOTÁ	1558200,3	1082910	BOGOTÁ	NE/8NW	Limolitas	48-I-B	Molino
CR-03	CR-RV03	1558229	1080867	BOGOTÁ	1558224,3	1080875,1	BOGOTÁ	N40E/14NW	Margas	48-I-B	Molino
CR-03	CR-RV04	1558229	1080867	BOGOTÁ	1558224,3	1080875,1	BOGOTÁ	N40E/14NW	Lodolitas	48-I-B	Molino
CR-03	CR-RV05	1558235	1080861	BOGOTÁ	1558230,3	1080869,1	BOGOTÁ	N34E/12NW	Limolitas	48-I-B	Molino
CR-04	CR-RV06	1558277	1080837	BOGOTÁ	1558272,3	1080845,1	BOGOTÁ	N38E/9NW	Micritas	48-I-B	Molino
CR-05	CR-RV07	1558284	1080826	BOGOTÁ	1558279,3	1080834,1	BOGOTÁ	N28E/12NW	Micritas	48-I-B	Molino
CR-06	CR-RV08	1558292	1080808	BOGOTÁ	1558287,3	1080816,1	BOGOTÁ	N19E/8NW	Micritas	48-I-B	Molino
CR-07	CR-RV09	1558290	1080792	BOGOTÁ	1558285,3	1080800,1	BOGOTÁ	///	Lodolitas	48-I-B	Molino
CR-08	CR - RV10	1558268	1080775	BOGOTÁ	1558263,3	1080783,1	BOGOTÁ	N45E/22NW	Limolitas	48-I-B	Molino
CR-08	CR - AFTA01	1558268	1080775	BOGOTÁ	1558263,3	1080783,1	BOGOTÁ	N45E/22NW	Arenitas	48-I-B	Molino
CR-09	CR - AFTA02	1558242	1080863	BOGOTÁ	1558237,3	1080871,1	BOGOTÁ	///	Limolitas	48-I-B	Molino
CR-10	CR - AFTA04	1558203	1080834	BOGOTÁ	1558198,3	1080842,1	BOGOTÁ	///	Limolitas	48-I-B	Molino
CR-11	CR - RV11	1569287	1099117	BOGOTÁ	1569292,6	1099117,8	BOGOTÁ	N30E/10NW	Lodolitas	41-IV-C	Lagunitas
CR-11	CR - AFTA05	1569287	1099117	BOGOTÁ	1569292,6	1099117,8	BOGOTÁ	N30E/10NW	Calizas	41-IV-C	Lagunitas
CR-12	CR - RV12	1569260	1098856	BOGOTÁ	1569265,6	1098856,8	BOGOTÁ	N55W/15SW	Calizas	41-IV-C	Lagunitas
CR-12	CR - AFTA06	1569260	1098856	BOGOTÁ	1569265,6	1098856,8	BOGOTÁ	N55W/15SW	Calizas	41-IV-C	Lagunitas
CR-13	CR - RV13	1569242	1098743	BOGOTÁ	1569247,6	1098743,8	BOGOTÁ	///	Lodolitas	41-IV-C	Lagunitas
CR-14	CR - RV14	1567585	1096504	BOGOTÁ	1567590,6	1096504,9	BOGOTÁ	///	Calizas	41-IV-C	Aguas Blancas
CR-15	CR - RV15	1567418	1096137	BOGOTÁ	1567423,6	1096137,9	BOGOTÁ	///	Calizas	41-IV-C	Aguas Blancas
CR-16	CR -RV16	1567857	1097573	BOGOTÁ	1567862,6	1097573,8	BOGOTÁ	N11E/12NW	Lodolitas	41-IV-C	Aguas Blancas
CR-16	CR - AFTA07	1567857	1097573	BOGOTÁ	1567862,6	1097573,8	BOGOTÁ	N11E/12NW	Calizas	41-IV-C	Aguas Blancas
CR-16	CR - RV17	1567857	1097573	BOGOTÁ	1567862,6	1097573,8	BOGOTÁ	N11E/12NW	Lodolitas	41-IV-C	Aguas Blancas

ANEXO 1.B. LISTADO DE ESTACIONES DE CAMPO

ESTACIÓN	ID MUESTRA	COORDENADAS PLANAS			COORDENADAS MAGNÁS - SIRGAS			RUMBO/BUZAMIENTO	LITOLOGÍA	PLANCHA	FORMACIÓN
		N	E	ORIGEN	N	E	ORIGEN				
CR-17	CR - RV18	1567852	1097465	BOGOTÁ	1567857,6	1097465,8	BOGOTÁ	N22E/12NW	Lodolitas	41-IV-C	Aguas Blancas
CR-17	CR-AFTA07A	1567852	1097465	BOGOTÁ	1567857,6	1097465,8	BOGOTÁ	N22E/12NW	Calizas	41-IV-C	Aguas Blancas
CR-17	CR - RV19	1567852	1097465	BOGOTÁ	1567857,6	1097465,8	BOGOTÁ	N22E/12NW	Lodolitas	41-IV-C	Aguas Blancas
CR-18	CR - RV20	1567449	1096171	BOGOTÁ	1567454,6	1096171,9	BOGOTÁ	N28E/13NW	Calizas	41-IV-C	Aguas Blancas
CR-18	CR - AFTA08	1567449	1096171	BOGOTÁ	1567454,6	1096171,9	BOGOTÁ	N28E/13NW	Arenitas	41-IV-C	Aguas Blancas
CR-18	CR - RV21	1567449	1096171	BOGOTÁ	1567454,6	1096171,9	BOGOTÁ	N28E/13NW	Calizas	41-IV-C	Aguas Blancas
CR-19	CR - RV22	1595675	1093217	BOGOTÁ	1595680,1	1093217,3	BOGOTÁ	N66E/41SE	Calizas	41-II-A	Aguas Blancas
CR-19	CR - AFTA09	1595675	1093217	BOGOTÁ	1595680,1	1093217,3	BOGOTÁ	N66E/41SE	Calizas	41-II-A	Aguas Blancas
CR-19	CR - RV23	1595575	1093217	BOGOTÁ	1595680,1	1093217,3	BOGOTÁ	N66E/41SE	Calizas	41-II-A	Aguas Blancas
CR-20	CR - RV24	1595229	1097458	BOGOTÁ	1595234,2	1097458,3	BOGOTÁ	N12E/22NW	Tobas	41-II-A	La Quinta
CR-20	CR - AFTA10	1595229	1097458	BOGOTÁ	1595234,2	1097458,3	BOGOTÁ	N12E/22NW	Tobas	41-II-A	La Quinta
CR-20	CR - RV25	1595229	1097458	BOGOTÁ	1595234,2	1097458,3	BOGOTÁ	N12E/22NW	Tobas	41-II-A	La Quinta
CR-21	CR - AFTA11	1595130	1097516	BOGOTÁ	1595135,2	1097516,3	BOGOTÁ	N3E/32NW	Tobas	41-II-A	La Quinta
CR-22	CR - RV26	1595463	1097291	BOGOTÁ	1595468,2	1097291,3	BOGOTÁ	N8E/31NW	Tobas	41-II-A	La Quinta
CR-22	CR - AFTA12	1595463	1097291	BOGOTÁ	1595468,2	1097291,3	BOGOTÁ	N8E/31NW	Tobas	41-II-A	La Quinta
CR-23	CR - RV27	1595509	1097152	BOGOTÁ	1595514,2	1097152,3	BOGOTÁ	N56E/38NW	Lodolitas	41-II-A	Río Negro
CR-23	CR - AFTA13	1595509	1097152	BOGOTÁ	1595514,2	1097152,3	BOGOTÁ	N56E/38NW	Tobas	41-II-A	La Quinta
CR-24	CR - AFTA14	1595544	1097115	BOGOTÁ	1595549,2	1097115,3	BOGOTÁ	///	Litoarenitas	41-II-A	Río Negro
CR-25	CR - RV28	1595573	1097085	BOGOTÁ	1595578,2	1097085,3	BOGOTÁ	///	Lodolitas	41-II-A	Río Negro
CR-26	CR - AFTA15	1595572	1097016	BOGOTÁ	1595577,2	1097016,3	BOGOTÁ	N20E/40NW	Arenitas	41-II-A	Río Negro
CR-27	CR - AFTA16	1595841	1096814	BOGOTÁ	1595846,2	1096814,3	BOGOTÁ	///	Arenitas	41-II-A	Río Negro
CR-28	CR - RV29	1596096	1096272	BOGOTÁ	1596101,2	1096272,3	BOGOTÁ	N52E/48NW	Limolitas	41-II-A	Río Negro
CR-28	CR - AFTA17	1596096	1096272	BOGOTÁ	1596101,2	1096272,3	BOGOTÁ	N52E/48NW	Arenitas	41-II-A	Río Negro
CR-29	CR - RV30	1595992	1096216	BOGOTÁ	1595997,2	1096216,3	BOGOTÁ	N40E/58NW	Limolitas	41-II-A	Río Negro
CR-30	CR - RV31	1596192	1096415	BOGOTÁ	1596197,2	1095415,3	BOGOTÁ	///	Limolitas	41-II-A	Río Negro
CR-31	CR - RV32	1596310	1096775	BOGOTÁ	1596315,2	1095775,3	BOGOTÁ	///	Limolitas	41-II-A	Río Negro

ANEXO 1.B. LISTADO DE ESTACIONES DE CAMPO

ESTACIÓN	ID MUESTRA	COORDENADAS PLANAS			COORDENADAS MAGNAS - SIRGAS			RUMBO/BUZAMIENTO	LITOLOGÍA	PLANCHA	FORMACIÓN
		N	E	ORIGEN	N	E	ORIGEN				
CR-32	CR - RV33	1596220	1096540	BOGOTÁ	1596225,2	1095540,3	BOGOTÁ	///	Limolitas	41-II-A	Río Negro
CR-34	CR - RV35	1596085	1095069	BOGOTÁ	1596090,2	1095069,3	BOGOTÁ	N25W/35NE	Calizas	41-II-A	Lagunitas
CR-34	CR - AFTA18	1596085	1095069	BOGOTÁ	1596090,2	1095069,3	BOGOTÁ	N25W/35NE	Calizas	41-II-A	Lagunitas
CR-35	CR - RV36	1596139	1095091	BOGOTÁ	1596144,2	1095091,3	BOGOTÁ	///	Calizas	41-II-A	Lagunitas
CR-35	CR - AFTA19	1596139	1095091	BOGOTÁ	1596144,2	1095091,3	BOGOTÁ	///	Calizas	41-II-A	Lagunitas
CR-36	CR - RV37	1595975	1096253	BOGOTÁ	1595980,2	1095253,3	BOGOTÁ	///	Limolitas	41-II-A	Río Negro
CR-37	CR - RV38	1595698	1095718	BOGOTÁ	1595703,2	1094718,3	BOGOTÁ	///	Limolitas	41-II-A	Río Negro
CR-38	CR - RV39	1595530	1094640	BOGOTÁ	1595535,2	1094640,3	BOGOTÁ	///	Limolitas	41-II-A	Río Negro
CR-39	CR - RV40	1596134	1095088	BOGOTÁ	1596139,2	1095088,3	BOGOTÁ	///	Lodolitas	41-II-A	Lagunitas
CR-39	CR - RV41	1596134	1095088	BOGOTÁ	1596139,2	1095088,3	BOGOTÁ	///	Lodolitas	41-II-A	Lagunitas
CR-40	CR - RV42	1596134	1094944	BOGOTÁ	1596139,2	1094944,3	BOGOTÁ	N10E/40NW	Calizas	41-II-A	Lagunitas
CR-41	CR - RV43	1594997	1094911	BOGOTÁ	1595002,2	1094911,3	BOGOTÁ	///	Lodolitas	41-II-A	Lagunitas
CR-41	CR - RV44	1594997	1094911	BOGOTÁ	1595002,2	1094911,3	BOGOTÁ	///	Calizas	41-II-A	Lagunitas



AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS ANH

Proyecto:
RECONSTRUCCIÓN DE LA HISTORIA TERMAL EN LOS SECTORES DE LURUACO Y CERRO CANSONA – CUENCA DEL SINÚ-SAN JACINTO Y EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA SERRANÍA DEL PERLÚA ENTRE CODAZZI Y LA JAGUA DE IBIRICO – CUENCA DE CESAR-RANCHERÍA

COLUMNA ESTRATIGRAFICA FORMACION MOLINO

Localidad/Sección:
CAÑO TUCUCITO

Coordenadas:
DATUM BOGOTÁ
BASE N 1'558.135 TOPE N 1'558.268 BASE N 1'558.130,3 TOPE N 1'558.263,3
E 1'080.973 E 1'080.775 E 1'080.981,1 E 1'080.783,1

Escala:
1:100 Fecha: **NOVIEMBRE/2008** Anexo: **B.3.E.**

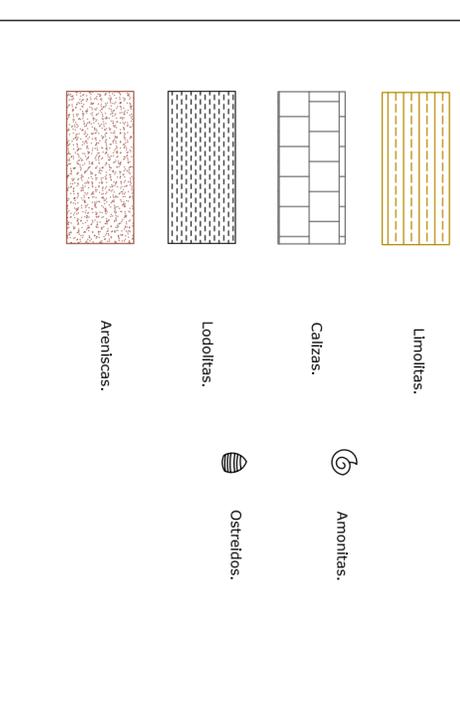
Elaborado por:
**PAOLA CATALINA MONTAÑO
EDUER GIOVANNY NOVA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

Digitalizado por:
EDUER GIOVANNY NOVA

CAMPANIANO - MASTRICHTIANO FORMACION MOLINO

Muestra	Estación	Et	Ar	Md	Li	Am	Os	Ag	Ac	Cg	Descripción
CR-AFTA01	CR-08										Limolitas negras calcáreas, laminación plano paralela continua, con concreciones y ostreidos, hacia el tope son areniscas muy finas. N45E/22NW.
CR-RV10	CR-07										Lodolitas calcáreas, en capas delgadas, con laminación plano paralela ligeramente discontinua.
CR-RV09	CR-06										Micritas negras en capas delgadas, bien laminadas.
CR-RV08	CR-05										Micritas negras en capas delgadas, bien laminadas. N28E/12NW.
CR-RV07	CR-04										Micritas negras en capas delgadas. N38E/9NW.
CR-RV06	CR-03										Cubierto
CR-AFTA04	CR-10										Limolitas negras calcáreas en capas delgadas a muy delgadas, intercaladas con lodolitas negras calcáreas, con amonitas y ostreidos.
CR-RV05	CR-03										Lodolitas negras ligeramente calcáreas a margas, con laminación plano paralela discontinua, intercaladas con limolitas calcáreas con concreciones y lodolitas silíceas. N40E/14NW.
CR-RV04	CR-09										Limolitas negras calcáreas en capas delgadas compactas.
CR-RV03	CR-02										Limolitas negras calcáreas en capas delgadas, laminación plano paralela. N30E/12NW.
CR-AFTA02											
CR-RV02											
CR-RV01	CR-01										Limolitas negras calcáreas en capas delgadas, laminación plano paralela, abundante contenido de materia orgánica. N26E/20NW.
CR-AFTA03											

CONVENCIONES



ANEXO 3.B

HISTORIAS TERMOCRONOLÓGICAS

SECTOR CODAZZI - LA JAGUA DE IBIRICO

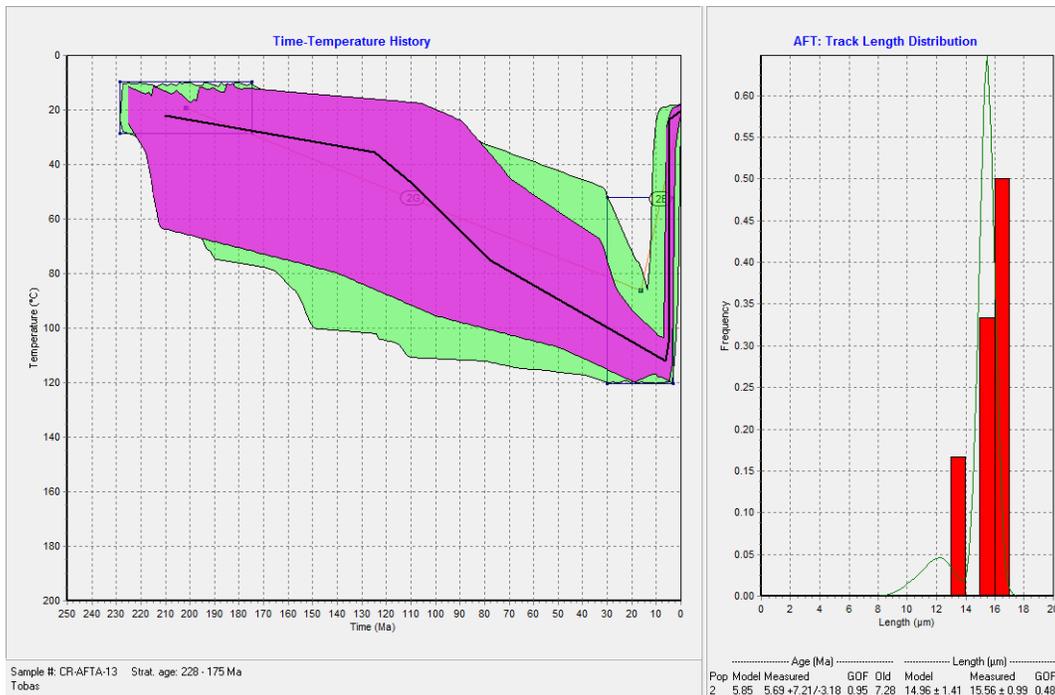


Figura 1. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra CR-AFTA-MT-13 ubicada en el tope de la Formación La Quinta.

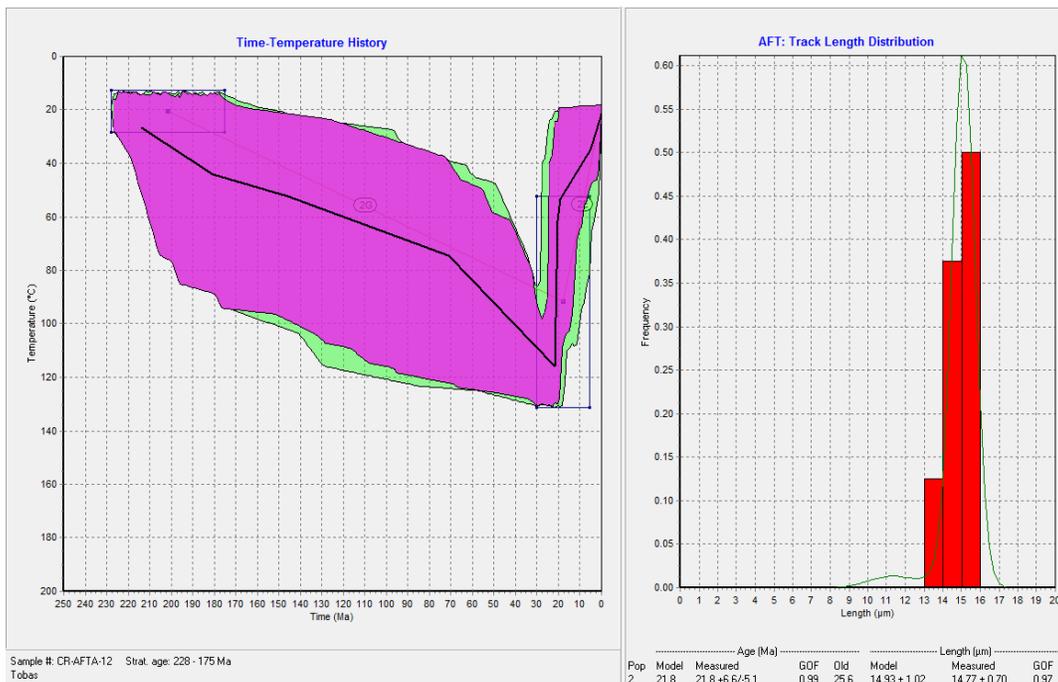


Figura 2. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra CR-AFTA-MT-12 ubicada en el tope de la Formación La Quinta.

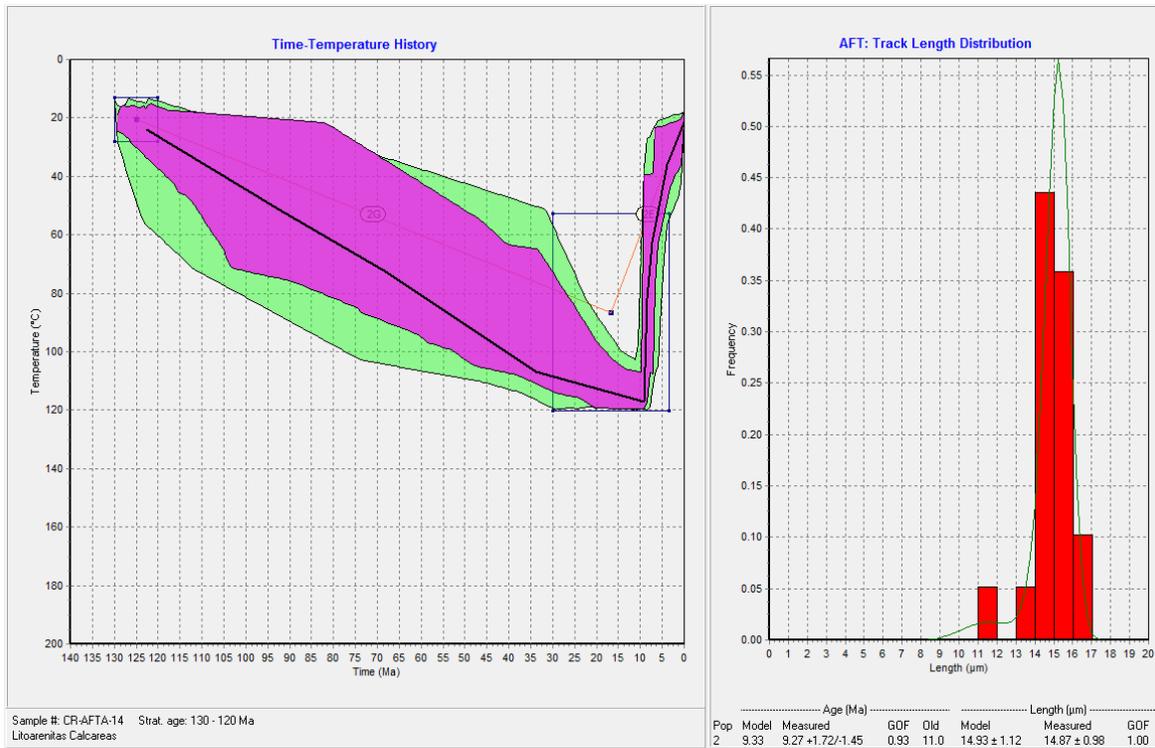


Figura 3. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra CR-AFTA-MT-14 ubicada en la base de la Formación Río Negro.

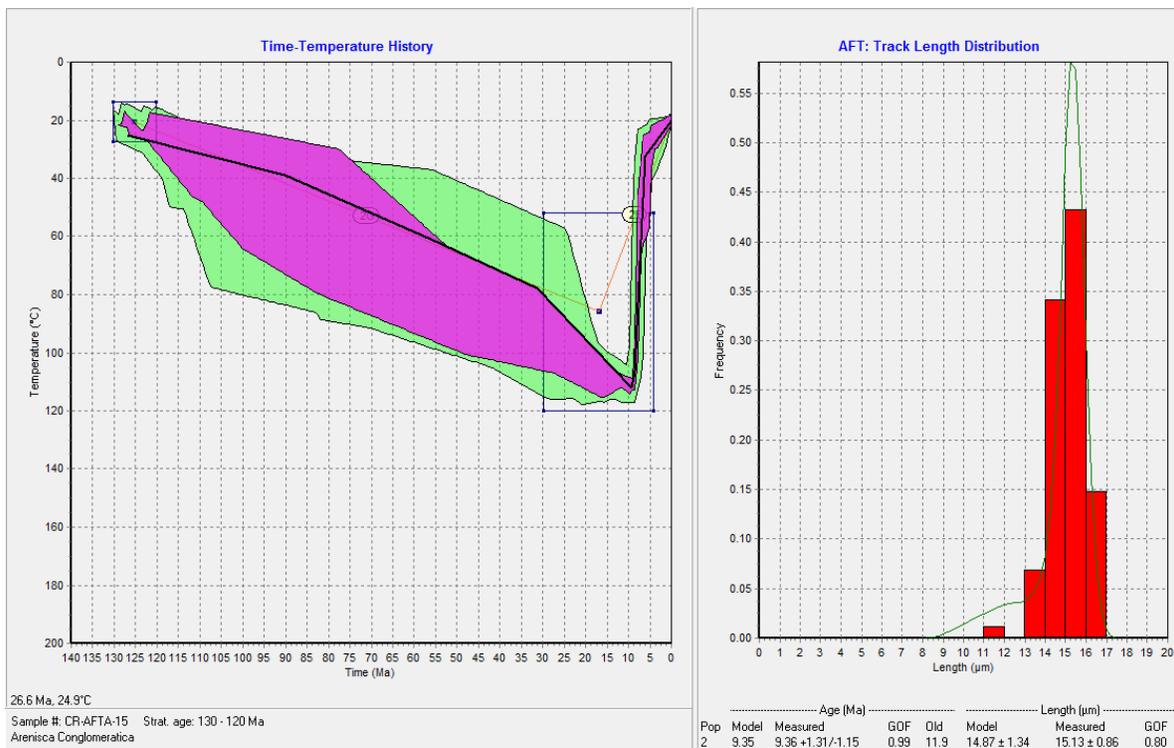


Figura 4. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra CR-AFTA-MT-15 ubicada en la base de la Formación Río Negro.

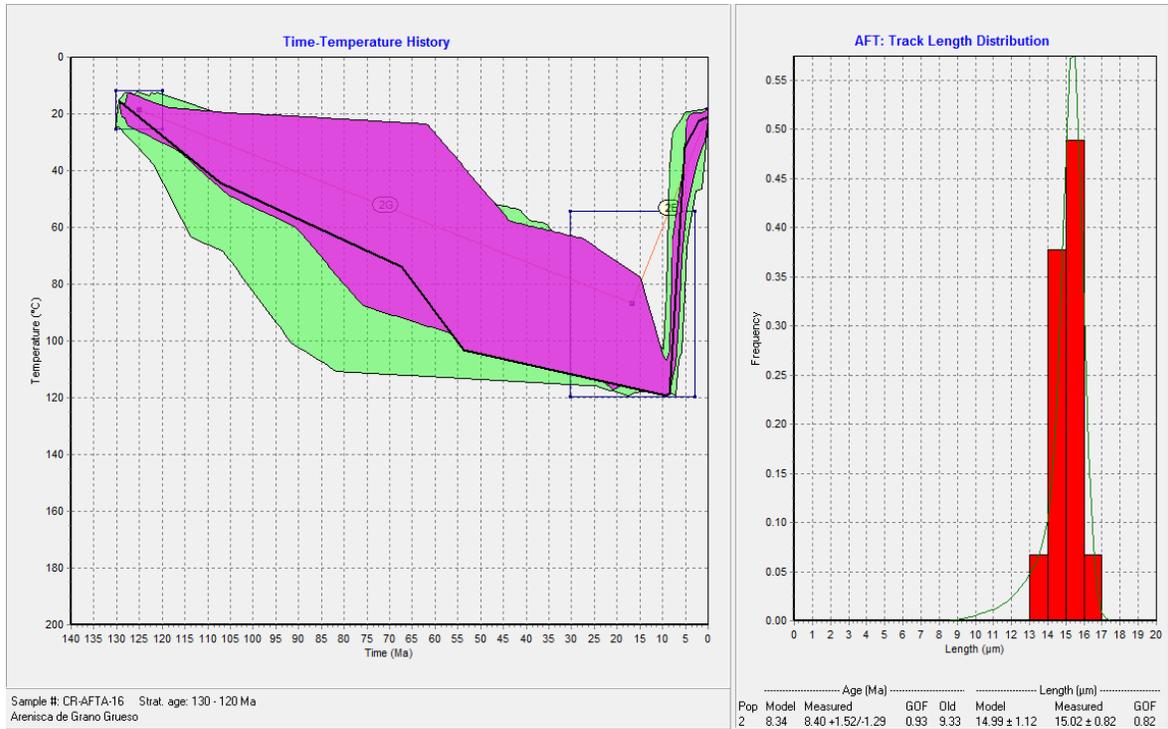


Figura 5. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra CR-AFTA-MT-16 ubicada en la base de la Formación Río Negro.

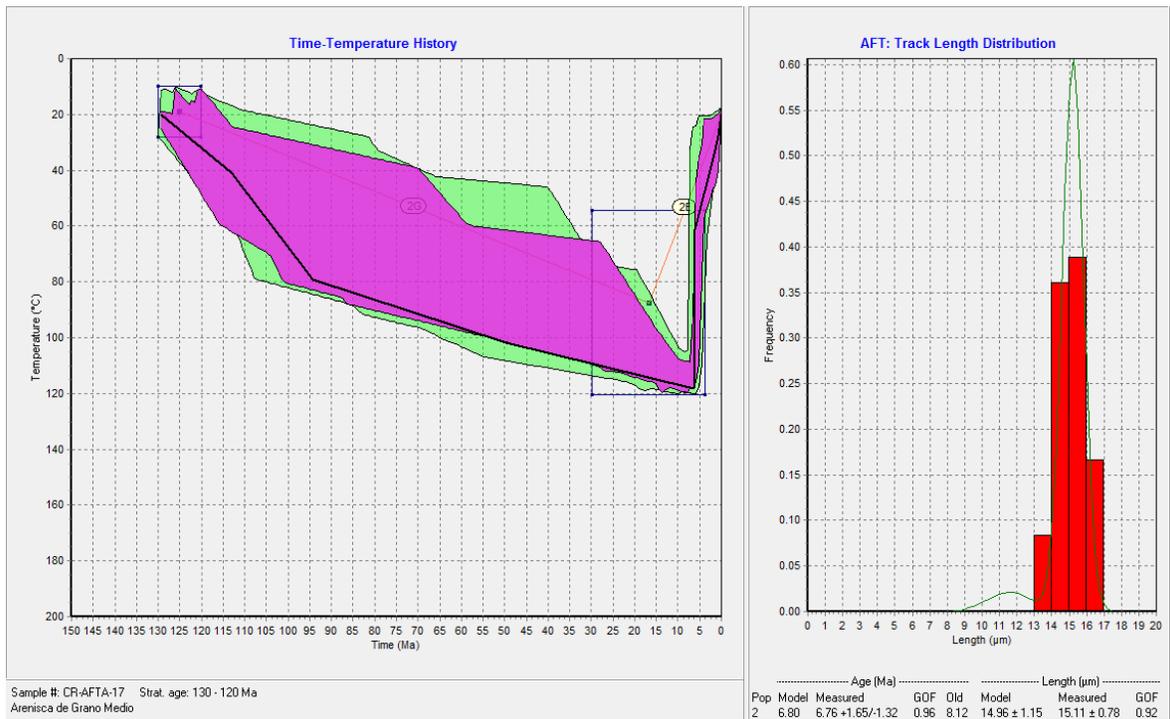


Figura 6. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra CR-AFTA-MT-17 ubicada en la base de la Formación Río Negro.

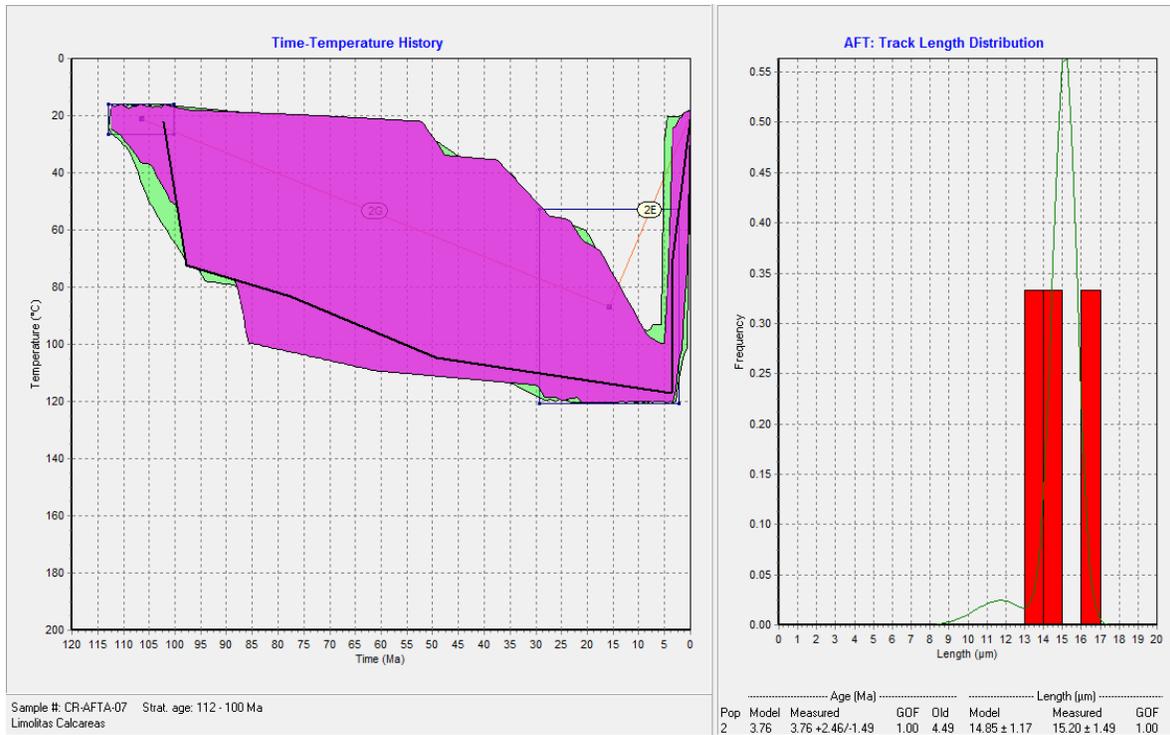


Figura 7. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra CR-AFTA-MT-07 ubicada en la base de la Formación Aguas Blancas.

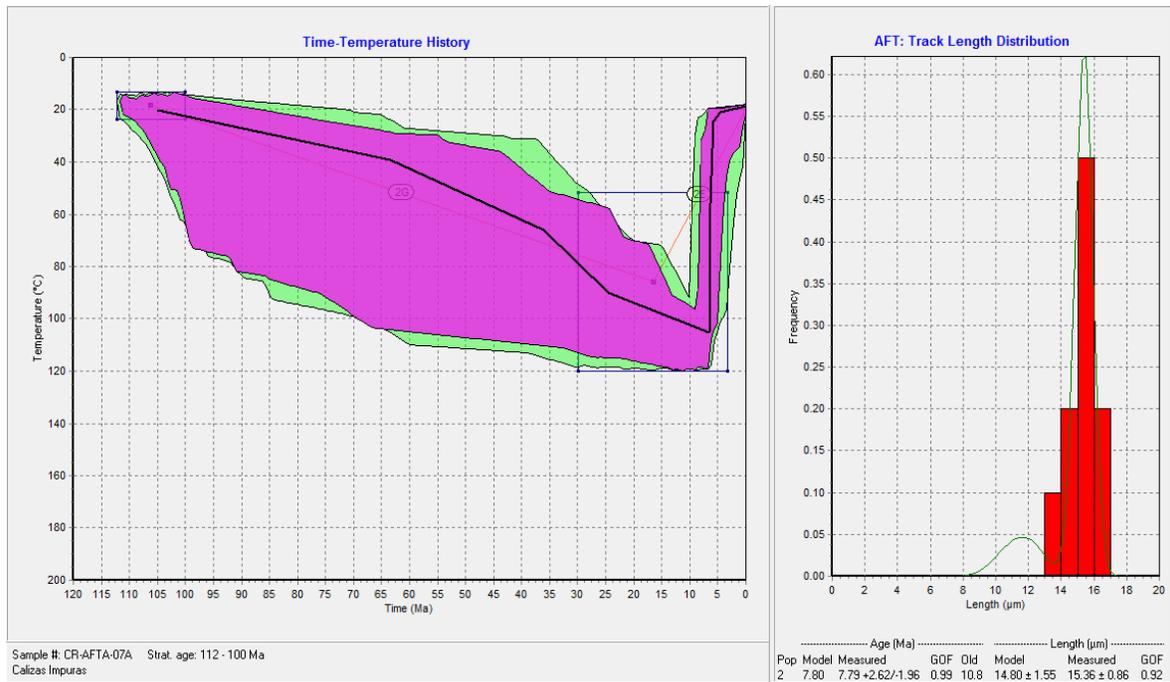


Figura 8. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra CR-AFTA-MT-07A ubicada en la base de la Formación Aguas Blancas.

HISTORIAS TERMOCRONOLÓGICAS –SECTOR CODAZZI-LA JAGUA DE IBIRICO-

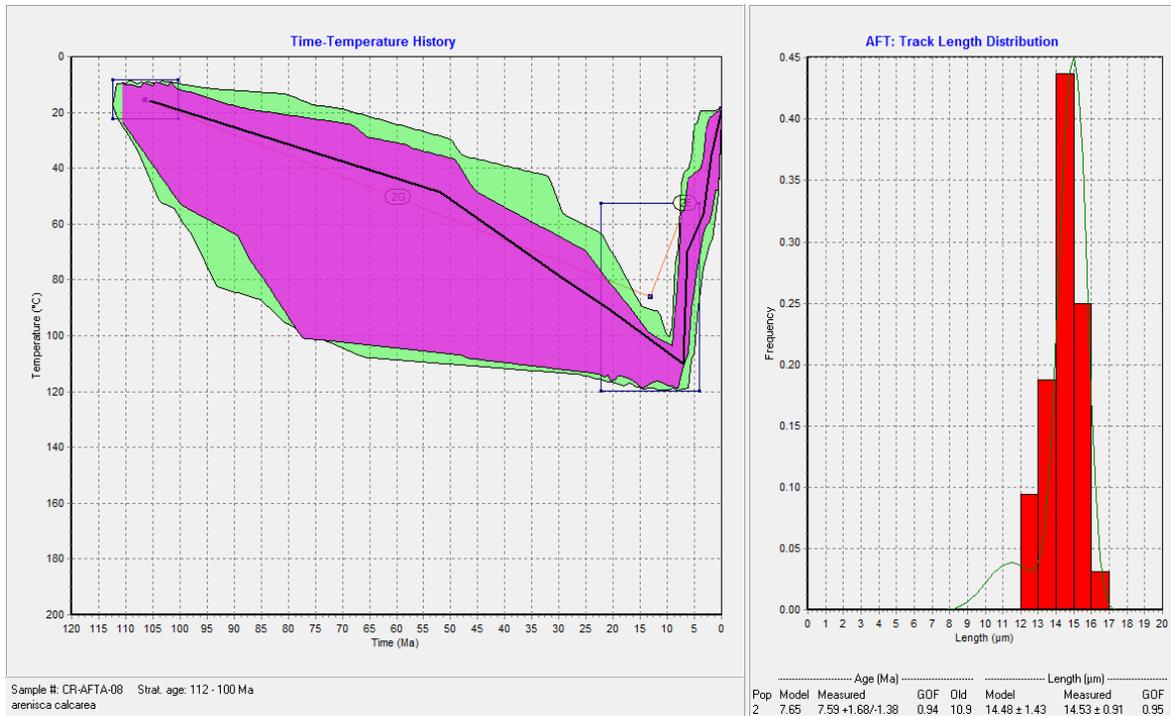


Figura 9. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra CR-AFTA-MT-08 ubicada en la base de la Formación Aguas Blancas.

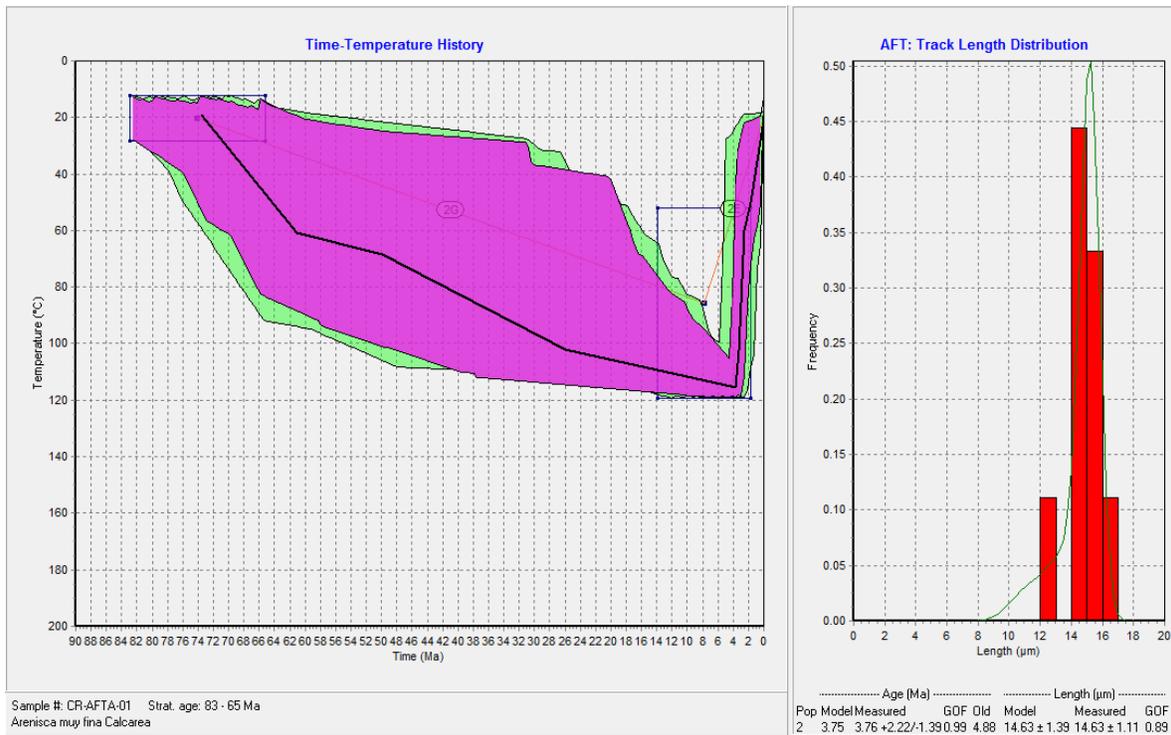


Figura 10. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra CR-AFTA-MT-01 ubicada en el tope de la Formación Molino.