



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA  
SEDE BOGOTÁ

**DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**



AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS

**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**

**INFORME FINAL  
CUENCA SINÚ - SAN JACINTO**

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 CANSONA.....	10
3.2 FORMACIÓN SAN CAYETANO.....	13
3.3 FORMACIÓN LURUACO.....	15
3.4 FORMACIÓN PENDALES.....	18
3.5 FORMACIÓN ARROYO DE PIEDRA.....	19
4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	21
4.1 PLIEGUES.....	25
4.1.1 Anticlinal De Luruaco.....	25
4.1.2 Anticlinal de Tocaguá.....	25
4.1.3 Plegamiento de San Estanislao.....	25
4.2 FALLAS.....	25
4.2.1 Sistema De Fallas El Banco–Repelón.....	25
4.2.2 Falla De Luruaco.....	26
4.2.3 Falla Villanueva – Totumo.....	26
4.2.4 Falla de Pendales.....	26
4.2.5 Zona de Fractura de Pendales.....	26
5 EVOLUCIÓN GEOLOGICA.....	26
5.1 CAMPANIANO-PALEOCENO.....	27
5.2 EOCENO MEDIO-OLIGOCENO.....	28
5.3 OLIGOCENO-MIOCENO.....	30
5.4 MIOCENO TEMPRANO A MEDIO.....	30
5.5 MIOCENO TARDÍO-PLIOCENO.....	32
5.6 PLIOCENO –PLEISTOCENO.....	33
5.7 PLEISTOCENO-HOLOCENO.....	34
6 GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO.....	34

## INFORME FINAL

6.1	ROCA GENERADORA .....	35
6.2	ROCA ALMACENADORA.....	37
6.3	ROCA SELLO .....	37
6.4	TRAMPA .....	37
6.5	MIGRACIÓN .....	38
7	HISTORIA DE ENTERRAMIENTO .....	38
8	TOMA DE MUESTRAS .....	43
8.1	METODOLOGÍA.....	43
8.2	LOCALIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE MUESTREO .....	46
8.2.1	Formación Cansona.....	46
8.2.2	Formación San Cayetano.....	46
8.2.3	Formación Luruaco .....	47
8.2.4	Formación Pendaes .....	47
8.2.5	Formación Arroyo de Piedra .....	47
9	ANÁLISIS DE TRAZAS DE FISIÓN .....	48
9.1	METODOLOGÍA.....	48
9.2	PREPARACIÓN DE MUESTRAS .....	49
9.3	MEDICIÓN DE LA EDAD POR TRAZAS DE FISIÓN.....	51
9.4	MEDICION DE LA LONGITUD DE TRAZAS CONFINADAS .....	52
10	REFLECTANCIA DE VITRINITA .....	54
10.1	METODOLOGIA.....	54
10.2	PREPARACIÓN DE MUESTRAS .....	55
10.3	MEDICIÓN DE LA REFLECTANCIA .....	55
11	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	57
11.1	TRAZAS DE FISIÓN EN APATITOS.....	57
11.2	REFLECTANCIA DE VITRINITA .....	61
11.3	ANÁLISIS DE MODELAMIENTO INVERSO PARA TRAZAS DE FISION .....	62
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	64
	BIBLIOGRAFÍA .....	65

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Mapa de localización de las áreas de muestreo..... 8

Figura 2. Carta de correlación estratigráfica..... 9

Figura 3. Columna Estratigráfica Formación Cansona. .... 12

Figura 4. Columna Estratigráfica de la Formación San Cayetano y Pendales..... 14

Figura 5. Columna estratigráfica esquemática de la Formación Luruaco..... 17

Figura 6. Marco Tectónico de Colombia.. ..... 22

Figura 7. Perfil del Cinturón Plegado Sinú - San Jacinto..... 23

Figura 8. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Campaniano..... 27

Figura 9. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Eoceno Medio.. 29

Figura 10. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Oligoceno. .... 31

Figura 11. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Mioceno Medio  
..... 32

Figura 12. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Mioceno Tardío  
..... 33

Figura 13. Profundidad vs. Ro%. .... 35

Figura 14. Índice de hidrógeno vs. Tmax..... 36

Figura 15. S2 vs. Carbono Orgánico Total. .... 36

Figura 16. Modelo de maduración para la Formación Cansona en una sección transversal del Cinturón Plegado de Sinú-San Jacinto..... 39

Figura 17. Modelo de maduración para las formaciones generadoras Cenozoicas en una sección transversal del Cinturón Plegado de Sinú-San Jacinto..... 39

Figura 18. Curva de enterramiento para el Bloque Luruaco usando los espesores mínimos reportados para cada unidad..... 40

Figura 19. Curva de enterramiento para el Bloque Luruaco, usando los espesores máximos reportados para cada unidad..... 41

Figura 20. Curva de enterramiento para el Bloque Carmen usando los espesores mínimos reportados para cada unidad..... 42

Figura 21. Curva de enterramiento para el Bloque Carmen usando los espesores máximos reportados para cada unidad..... 42

Figura 22. Metodología de preparación y separación de apatitos..... 50

Figura 23. Traza Confinada en Apatito irradiado con <sup>252</sup>Cf. .... 53

Figura 24. Figuras de Corrosión (a). Figuras de corrosión previas al bombardeo con <sup>252</sup>Cf. (b) Figuras de Corrosión después de la irradiación con <sup>252</sup>Cf. .... 54

Figura 25. Metodología de preparación y concentración de materia orgánica dispersa..... 56

Figura 26. Valores de trazas de fisión y reflectancia de vitrinita (Ro) graficadas contra la posición estratigráfica en profundidad, para la muestras del Bloque Luruaco. .... 59

Figura 27. Valores de trazas de fisión y reflectancia de vitrinita (Ro) graficadas contra la posición estratigráfica en profundidad, para la muestras del Bloque Carmen..... 60

Figura 28. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-20 localizada en la base de la Formación Cansona. .... 63

### LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información de los pozos evaluados para la toma de muestras. .... 45  
Tabla 2. Trabajos de geología de superficie y número de muestras tomadas. .... 46  
Tabla 3. Control de calidad de la población de apatitos en las muestras recolectadas. .... 51  
Tabla 4. Resultados de los análisis de trazas de fisión en apatitos (Ns: Número de trazas espontáneas)..... 58  
Tabla 5. Resultados de las mediciones de reflectancia de vitrinita. .... 61

### LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de la edad por trazas de fisión de una población  $n$  de apatitos..... 52

### LISTA DE ANEXOS

- ANEXO 1.A Listado de estaciones, fase de campo.
- ANEXO 2.A Columna estratigráfica, escala 1:1000
- ANEXO 3.A Historias termocronológicas.

## RESUMEN

Se reconstruyó la historia termal de la sección estratigráfica exhumada en los sectores de Luruaco y Cerro Cansona, ubicados en la Cuenca Sinú-San Jacinto 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.

Las unidades litoestratigráficas evaluadas, pertenecen al intervalo comprendido entre el Cretácico Tardío y el Terciario, correspondiente a las formaciones Cansona, San Cayetano, Luruaco, Pendales y Arroyo de Piedra.

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 estudio termocronológico de las unidades litoestratigráficas cretácicas y cenozoicas en la cuenca Sinú-San Jacinto es de gran interés para la industria del petróleo, debido a que trabajos previos muestran las posibilidades que estas formaciones tienen para generar hidrocarburos, basándose en pruebas de reflectancia, pirolisis y COT, que arrojan valores aceptables de carbono orgánico, además de una adecuada maduración de la materia orgánica; sin embargo las características estructurales del área plantean interrogantes acerca de las correlaciones estratigráficas que pueden ser hechas y proponen como reto aumentar la base de datos medidos disponibles en distintos lugares para poder evaluar con mayor certeza el potencial de generación de hidrocarburos.

La zona de estudio se encuentra ubicada en la parte norte del Cinturón Plegado de San Jacinto, más exactamente en el bloque Luruaco. Este bloque se encuentra entre los departamentos de Bolívar y Atlántico, y encierra a los municipios de Santa Catalina y Villa Nueva, localidades del Departamento de Bolívar. Así como los municipios de Repelón, El Arenal y Luruaco; pertenecientes al Departamento del Atlántico.

En este documento se correlacionan datos medidos de trazas de fisión en apatitos (AFTA) y reflectancia de vitrinita, para generar modelos que den cuenta de la madurez termal de los sedimentos de las formaciones en estudio en las áreas descritas.

## 2 LOCALIZACIÓN

La cuenca Sinú-San Jacinto está localizada en la cuenca marginal Colombo - Caribe, al noroccidente del país. Limita al norte con la actual Costa Atlántica Colombiana, al oriente con el Sistema de Fallas de Romeral, al occidente con el Sistema de Fallas de Uramita y al sur con rocas sedimentarias y volcánicas de la Cordillera Occidental (Barrero, y otros 2007).

La zona de estudio se encuentra ubicada en los departamentos de Bolívar y Atlántico, y abarca los municipios de Santa Catalina, Villa Nueva, Repelón, El Arenal, Luruaco y Carmen de Bolívar (Figura 1).

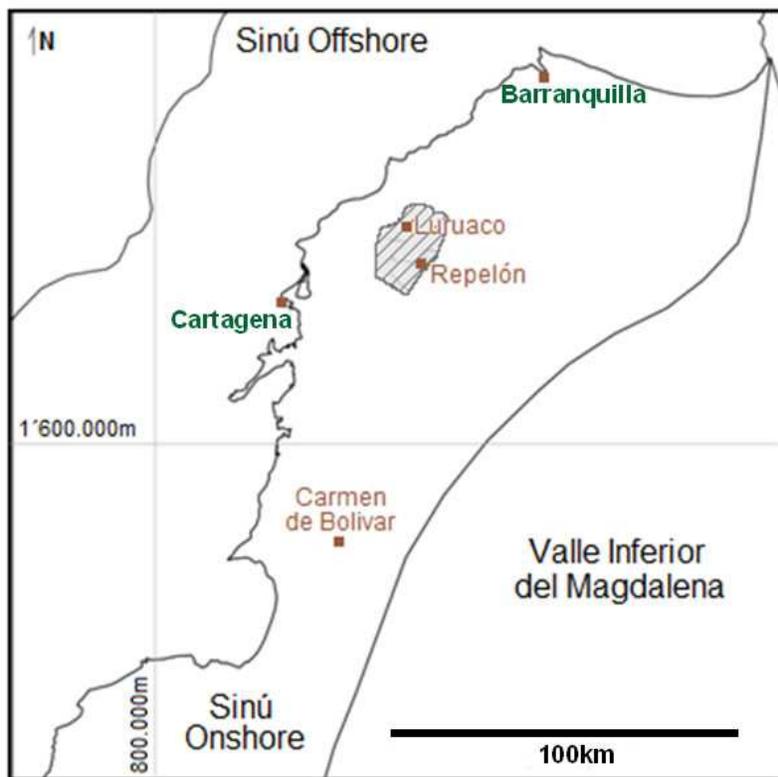


Figura 1. Mapa de localización de las áreas de muestreo.

## 3 ESTRATIGRAFÍA

Para las descripciones de las unidades se tomó como referencia el trabajo presentado por Union Temporal B&G (2006) a la Agencia Nacional de Hidrocarburos. Las unidades litoestratigráficas muestreadas en el presente estudio abarcan el intervalo Santoniano - Eoceno Tardío, y corresponden a las formaciones Cansona, San Cayetano, Luruaco, Pendales y Arroyo de Piedra (Figura 2).



### 3.1 FORMACIÓN CANSONA

#### *a. Autor*

A pesar de que las referencias iniciales de esta formación son en parte imprecisas ya que son tomadas de ciertos reportes inéditos e internos de la Texas Petroleum Company, Wood fue el primero en mencionarla dentro del reporte “Geology of Municipio San Jacinto and parts of the municipios of San Juan Nepomuceno and El Carmen, Department of Bolívar” (en Butler 1942). En este denominó Formación Cansona a 230m de una sucesión de sedimentitas dispuestas en contacto fallado con la suprayacente Formación San Cayetano, que aflora en la Serranía Cansona, Departamento de Bolívar.

El término ha tenido diferentes connotaciones como el de “Ciclo Cansona” y el de “Piso Cansona” de Duque-Caro (1972a, 1972b, 1973) quien utiliza estos nombres para referirse a unidades tiempo-roca o a las Series Cansonense (Cansonian Series en Duque - Caro, 1984) aparentemente con la misma connotación. Estas unidades tiempo-roca incluyen las formaciones Cansona y San Cayetano, pues se consideran como pertenecientes al mismo ciclo de sedimentación inicial del cinturón de San Jacinto.

#### *b. Localidad Tipo y afloramientos*

La localidad tipo de la Formación Cansona se encuentra en la Serranía Cansona, localizada a 17km al oeste del Municipio de Carmen de Bolívar, Departamento de Bolívar. Limita con las fallas Las Bongas al noroeste y Páramo al sureste, y su sección se encuentra ubicada en la plancha 37-IV-D (Unión Temporal B&G, 2006).

Sus principales afloramientos son los de arroyos Ojo de Agua y Columbita al suroeste de la población de Chalán (Clavijo & Barrera, 2001). También aflora en cercanías al Cerro Maco (Chenevart, 1963), en donde se encuentra su máximo espesor (422m) y es denotada como Formación San Cayetano Inferior. En la Cantera El Purgatorio, ubicada a 5km por la vía que conduce de Montería a Planeta Rica (GEOTEC, 1981), se determina el mínimo espesor para esta formación (7m). En el núcleo del Anticlinal de Chalán, sobre el Arroyo Chalán, esta formación es considerada como Complejo Chalán por Kassem y otros (1967) y posteriormente como Grupo Cansona por Ávila & Monroy (1973). Por último, en la región del Valle Alto del Río Sinú, localizada en la parte más sureste estudiada de la Plancha 80, se pueden observar varios afloramientos, ya sea en carretables, caminos de herradura o en las márgenes del Río Sinú, allí su rumbo estructural es casi paralelo al curso del río (GEOTEC LTDA, 2003).

#### *c. Descripción Estratigráfica*

De acuerdo con la columna estratigráfica de Clavijo & Barrera (2001), presentada en las memorias de la Plancha Sincelejo y Sahagún, la unidad está constituida principalmente hacia la base por alternancia de limolitas silíceas y cherts en capas delgadas. Suprayaciendo se encuentran areniscas que van desde finas hasta conglomeráticas e inclusive llegando a conglomerados de guijos, con fragmentos volcánicos en un 90%. El tope de la formación se encuentra dominado por limolitas silíceas y calcáreas (Figura 3).

En el reporte de Unión Temporal B&G (2006) esta formación es dividida en 3 intervalos. El primero de ellos de base a tope está constituido hacia la base por capas medias a delgadas, levemente plegadas de chert con venillas milimétricas de calcita, de color gris claro a gris oscuro, suprayacidas en contacto transicional rápido, por capas masivas de arenisca de grano fino, lodosas, silíceas y calcáreas, con intercalaciones de capas delgadas de lodolita arenosa. El segundo intervalo son intercalaciones de lodolitas silíceas y areniscas arcósicas y líticas de grano fino hacia la base, seguidas por rocas de origen volcánico y areniscas de grano fino a grueso con líticos volcánicos, fragmentos de calcita y materia orgánica. Por último, el tercer intervalo consiste de una secuencia de capas medias tabulares de limolitas silíceas, de color gris claro y blanco, interestratificadas con lodolitas arenosas de color rojizo. Este último intervalo está separado por rocas basálticas epidotizadas y por calizas.

### *d. Espesor y contactos*

Su exposición en forma aislada impide estimar el espesor de esta unidad, no obstante puede variar en promedio entre los 200m y 250m. Clavijo & Barrera (2001) presentan una columna estratigráfica de esta formación levantada por Clavijo y Guzmán, quienes le dan un espesor exacto de 230m, sin embargo la Unión Temporal B&G, (2006) le asigna un espesor de 655m en la Serranía Cansona.

La base no se encuentra bien establecida, aunque autores como Dueñas & Duque-Caro, (1981) mencionan que descansa discordantemente sobre las peridotitas de Planeta Rica. Por otro lado el contacto superior es una discontinuidad estratigráfica con las suprayacentes Formación San Cayetano (¿paraconformidad?) y Formación Maco (discordancia angular). En algunos casos el contacto superior es considerado como un contacto fallado o con una falla muy cerca al mismo.

### *e. Edad*

Con base en la fauna descrita, principalmente de foraminíferos, se le asigna a la Formación Cansona una edad Santoniano - Maastrichtiano (abundancia de *Heterohelix globulosa*, *Globotruncana sp*, *Bulimina sp*, *Globigerinoides sp*. Edad Santoniano - Campaniano y *Siphogenerinoides cretacea*. Edad Campaniano - Maastrichtiano).

### *f. Ambiente de depósito*

Según Clavijo & Barrera (2001), el ambiente de depositación es batial profundo a pelágico, pero Hincapié y otros (2008) afirman que es somero, posiblemente fluvial o de frente de playa.

### *g. Correlación*

La Formación Cansona es correlacionable con las unidades: Formación Arroyo Seco (Cáceres & Porta, 1972), formaciones Cansona y Venados Inferior (Haffer & Beattie, 1960), formaciones Cansona y Venados (Fonville, 1956), Formación Cansona facies turbidíticas (Duque-Caro, 1972), formaciones Cispatá y Venados (Bueno, 1970). Según Unión Temporal B&G (2006) se correlaciona con el segmento Inferior de la Formación San Cayetano para Chevron (1986) e INGEOMINAS (1983) en el área de San Jacinto.

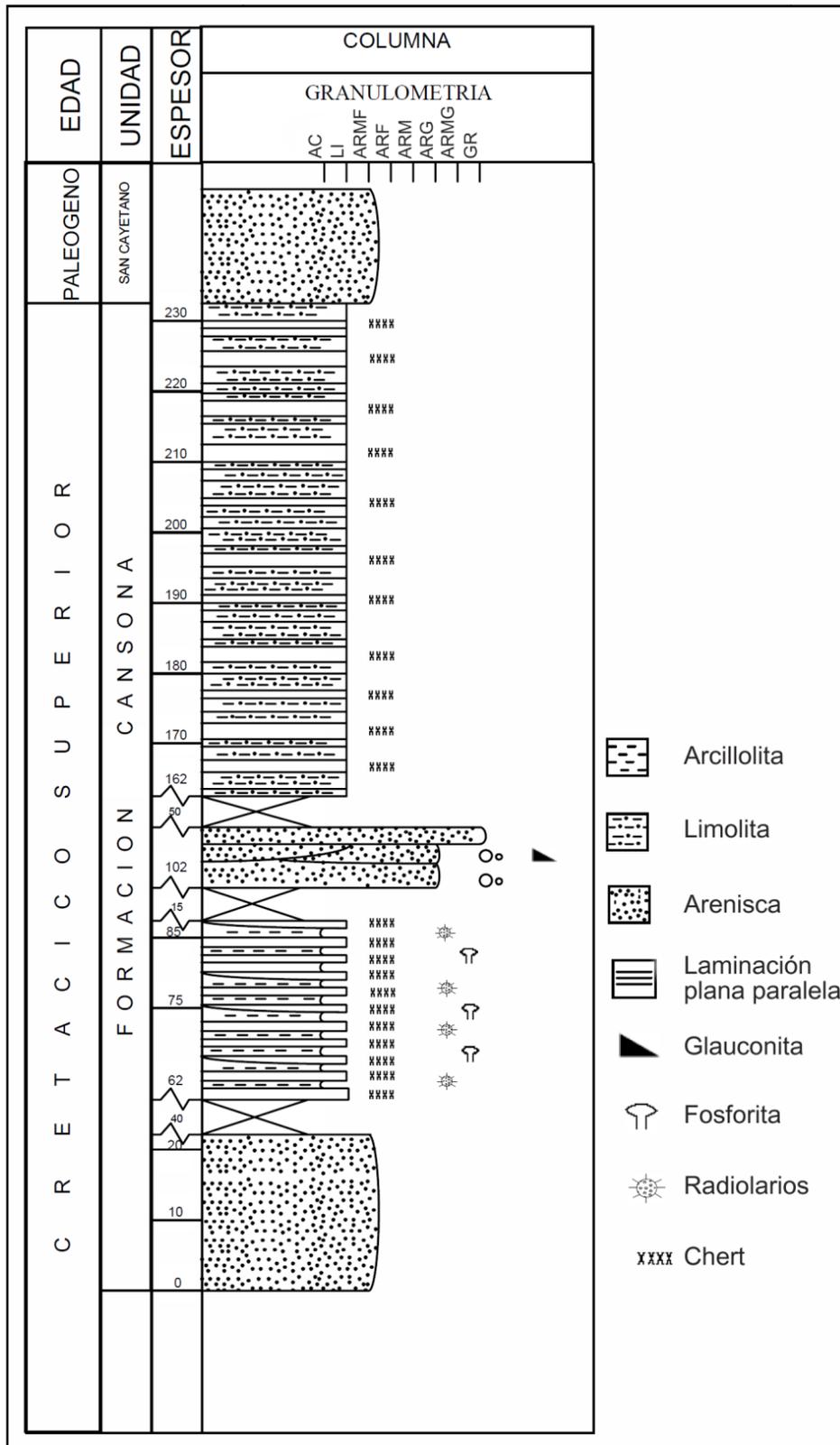


Figura 3. Columna Estratigráfica Formación Cansona, Sección Arroyo Ojo de Agua - Chalán (Clavijo & Barrera, 2001).

## 3.2 FORMACIÓN SAN CAYETANO

### *a. Autor*

La Formación San Cayetano fue definida informalmente por Chenevart (1963) como una sucesión arenosa aflorante en los Montes de María y Serranía de San Jacinto, pero sin precisar las características estratigráficas ni su sección tipo. Posteriormente Duque-Caro, (1973), Dueñas & Duque-Caro, (1981) utilizan el término Formación San Cayetano Inferior y Superior en el área de Ciénaga de Oro; sin embargo las revisiones cartográficas posteriores como las de Guzmán, y otros (1994), Duque-Caro, y otros (1996), GEOTEC (1997), Barrera, (1999), Reyes y otros (2001), Clavijo & Barrera, (2001), entre otros, permiten establecer a la Formación San Cayetano Inferior como Formación Cansona dejando el segmento Superior referido únicamente como Formación San Cayetano.

### *b. Localidad tipo y afloramientos*

Aparentemente su nombre tiene origen en el corregimiento de San Cayetano, Departamento de Bolívar, sin embargo Guzmán, y otros (2004) recomienda como sección tipo la carretera San Cayetano-Carreto.

Dentro de los principales afloramientos de la Formación San Cayetano se encuentra la sección del Arroyo Hénequen (Reyes & Zapata, 2001), en la carretera Momil-Tuchín (Clavijo & Barrera, 2001) donde aflora su máximo espesor registrado (1457m). En el Arroyo Salvador Media Luna (Dúque - Caro, y otros 1996) presenta su mínimo espesor de 12m. También es importante la sección del Arroyo Las Palmas presentada en la plancha 38 - Carmen de Bolívar, donde constituye el núcleo del Anticlinal de Toluviejo y hace parte de otros pliegues afectados por fallamientos (al oriente de Macajan, Chinulito y Aguacate).

### *c. Descripción estratigráfica*

De acuerdo con la plancha - 23 Cartagena (Reyes y otros 2001) la Formación San Cayetano está constituida hacia la base por litoarenitas finas a gruesas en capas medias, intercalada con lodolitas grises físciles; en la parte media presenta lodolitas cafés y micritas intercaladas con litoarenitas finas a gruesas y algunos cherts amarillos en capas medias; hacia el tope de la unidad se encuentran cuarzoarenitas finas blancas en capas planas delgadas a medias (Figura 4).

### *d. Espesor y Contactos*

De acuerdo con Reyes y otros (2001) debido a los contactos fallados con las unidades suprayacentes no se ha podido establecer un espesor real de esta unidad. Por otro lado Guzmán, y otros (2004) le da a la unidad un espesor promedio de 240m. En Reyes & Zapata, (2001) el espesor de la Formación San Cayetano calculado a partir de cortes geológicos es de por lo menos 500m.

Reyes y otros (2001) define que el límite Inferior de la Formación San Cayetano, dentro del área de la Plancha-23 Cartagena, no es reconocido y se establece que el contacto superior con la Formación Pendales es discordante.

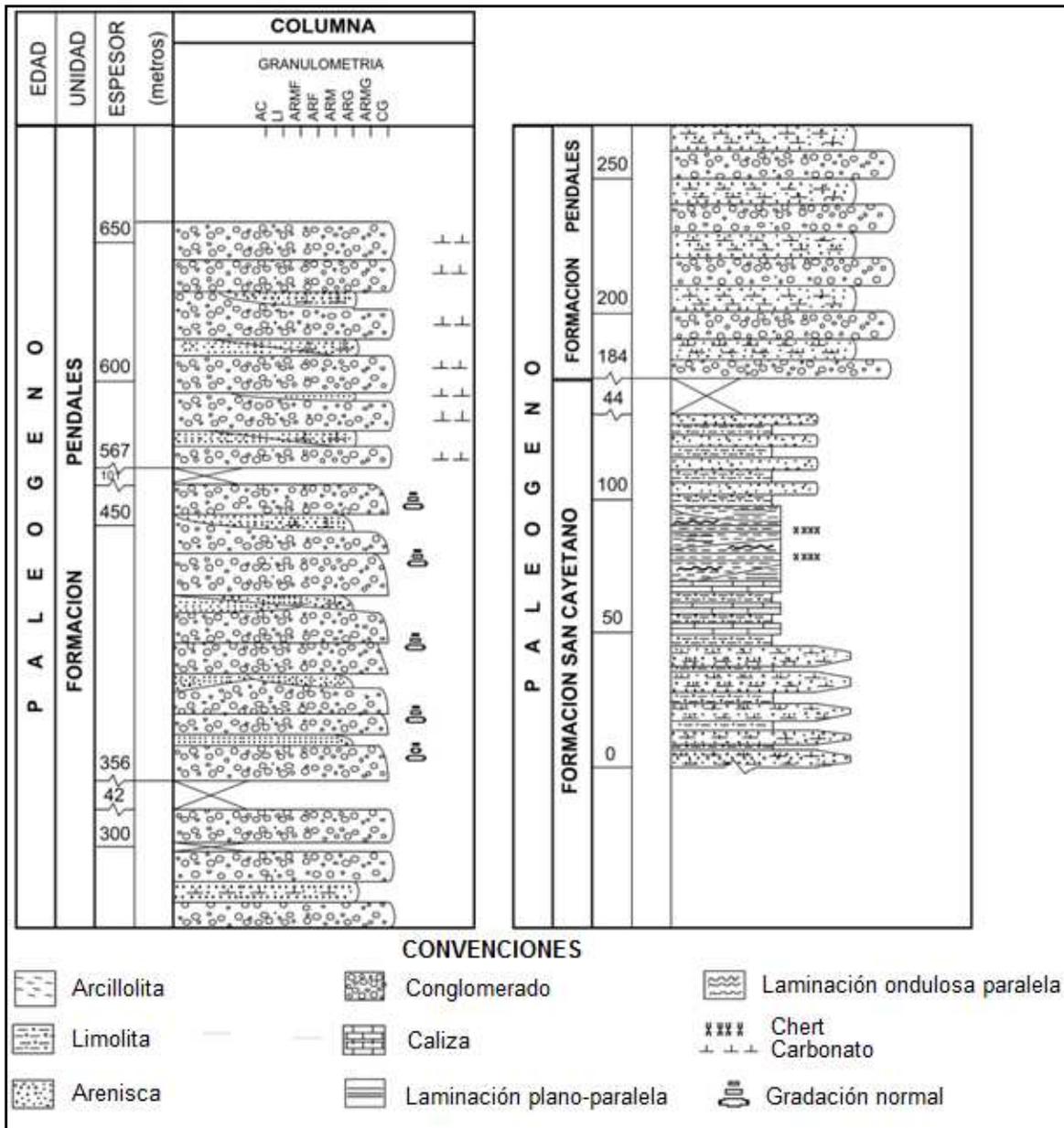


Figura 4. Columna Estratigráfica de la Formación San Cayetano y Pendales, Sección Arroyo Henequén (Reyes, y otros 2001).

e. Edad

La edad de la Formación San Cayetano, establecida con base en la microfauna, es Paleoceno Temprano- Eoceno Medio. Guzmán, y otros (2004) reporta una edad Paleoceno Tardío y Eoceno Temprano a partir de la fauna reportada por Duque-Caro, (1973) *Spiroplectamina grzybowski*, *Bathysiphon sp.*, *Globorotalia aff. Aequa*.

f. Ambiente de Depósito

Su ambiente de depósito ha sido interpretado como característico de un abanico submarino en su parte media a distal (Reyes & Zapata, 2001), aunque ha sido considerada por diversos autores, como Zimmerle, (1968) y Duque-Caro, (1973), de origen turbidítico, debido a la presencia de series de Bouman, aunque Hincapié y otros (2008) afirman que

dichas secuencias turbidíticas son de frente deltaico, con areniscas y conglomerados fluviales y de frente costero.

*g. Correlación*

La Formación San Cayetano es correlacionable con la Formación Luruaco de Raasveldt (1953), quien es el único que la extiende a lo largo de todo el Cinturón de San Jacinto. A su vez Chenevart (1963) e INGEOMINAS (1983) la correlacionan con la Formación San Cayetano Superior en el área de San Jacinto. Autores como Haffer & Beattie, (1960) postulan un período de no depósito durante todo el Paleoceno Temprano y determinan una edad de Paleoceno Tardío para la Formación Venados Superior correlacionable con la Formación San Cayetano.

### 3.3 FORMACIÓN LURUACO

*a. Autor*

Raasveldt (1953) denomina Formación Luruaco a las rocas que afloran en los alrededores de Tolú; sin embargo, dado su nombre, éste debe provenir del área de la población de Luruaco en el Departamento del Atlántico y extendido a las serranías de San Jerónimo y San Jacinto en los departamentos de Bolívar, Sucre y Córdoba (Reyes & Zapata, 2001); por lo tanto se tomará el nombre de Formación Luruaco para rocas con las mismas características litológicas de San Cayetano e igual posición estratigráfica, sólo para el Bloque Luruaco.

De acuerdo con Unión Temporal B&G (2006), autores como Olsson (1956), Bürgl (1957), Bueno (1970), entre otros, hacen referencia en sus trabajos a la Formación Luruaco, sin embargo es solo Portilla (1983) quien determina a la Formación Luruaco como una serie de intercalaciones de arcillolitas y limolitas, con láminas delgadas de carbón, restos de plantas y presencia de yeso.

En la cartografía presentada por Guzmán y otros (2004) el término de Formación Luruaco es abandonado y se extiende el de Formación San Cayetano a lo largo de todo el Cinturón de San Jacinto.

*b. Localidad tipo y Afloramientos*

La Formación Luruaco fue medida y levantada en Arroyo Zapata, el cual se encuentra ubicado 4km al noroeste de la población Repelón (Unión Temporal B&G, 2006).

Los afloramientos más importantes de esta formación se encuentran en la segunda sección de la Transecta Cartográfica 02, que se levantó en el corregimiento Las Caras a través del Arroyo Cien Pesos, y la Transecta Cartográfica 03, que se levantó en la Inspección de Santa Catalina, documentadas en el reporte de Unión Temporal B&G (2006), las cuales comprenden el anticlinal de Luruaco.

*c. Descripción Litológica*

La Formación Luruaco está integrada por tres miembros claramente diferenciables, denominados informalmente Miembros Inferior, Medio y Superior, en el bloque del mismo nombre (Unión Temporal B&G, 2006) (Figura 5).

El Miembro Inferior está constituido por una sucesión de capas medias de chert de color gris y negro, intercaladas con niveles de lodolitas grises cuyos espesores no sobrepasan los 50cm. Estas intercalaciones forman bancos de aproximadamente 30m, que originan un terreno característico de colinas escarpadas. Dentro del área afloran en el núcleo del anticlinal de Luruaco.

El Miembro Medio se encuentra en contacto transicional con el subyacente Miembro Inferior. Está formado por secuencias de estratificación cíclica las cuales se encuentran compuestas por litoarenitas de grano medio a grueso, de color pardo a crema y con estratificación cruzada, intercaladas con capas de arcillolitas y limolitas grises. Estos paquetes presentan un gran contenido de sulfuros y cristales de yeso. Es el más abundante y extenso del área cubriendo casi por completo el Bloque Luruaco.

Los contactos del Miembro Superior con las unidades infra y suprayacentes son transicionales. Se encuentra constituida por intercalaciones de litoarenitas en capas gruesas de color gris y verde, que en general son granocrecientes alcanzando el tamaño de conglomerados; limolitas grises con planos de estratificación rellenos de óxidos de hierro y arcillolitas. Estas intercalaciones forman bancos potentes, bien expuestos en los arroyos Banco y Bartola.

#### *d. Espesor y Contactos*

La Formación Luruaco tiene en total 1500m de espesor, los cuales están distribuidos en cada uno de sus miembros de la siguiente manera (Unión Temporal B&G, 2006):

Miembro Inferior: 250 m

Miembro Medio: 750 m

Miembro Superior: 500 m

Sin embargo en el Arroyo Zapata, donde la sección es más completa, se midió un espesor de 698m, que en su mayor parte corresponden a los miembros Medio y Superior de esta formación (Unión Temporal B&G, 2006).

Bueno (1970) establece que el límite Inferior de la Formación Luruaco es disconforme con la Formación Cansona, que denomina como Formación San Cayetano Inferior, sin embargo la Unión Temporal B&G (2006) no determina el contacto inferior debido a que éste no se encuentra en el área de estudio. El límite superior en el sector norte de Luruaco es discordante tanto con la Formación Pendales como con la Formación Las Perdices; este contacto también es fallado con las formaciones Pendales y Arroyo de Piedra en el flanco oriental del Anticlinorio de Luruaco.

#### *e. Edad*

Van Der Hammen (1958) establece una edad del Paleoceno para esta unidad.

#### *f. Ambiente de Depósito*

De acuerdo con la interpretación realizada por la Unión Temporal B&G (2006), se determina un ambiente de relleno de canal de un abanico, de una zona batial superior a plataforma externa. Uno de los factores determinantes de esta interpretación es la icnofacies zoophycos y los niveles de material carbonoso y vegetal. Hincapié y otros (2008)

proponen un ambiente de depósito de frente deltaico, con areniscas y conglomerados fluviales y de frente costero.

*g. Correlaciones*

La Unión Temporal B&G (2006) reporta que hay una secuencia rítmica de shales arenosos, grawacas y conglomerados, correlacionables con San Cayetano Superior de Chenevert, (1963), con las facies de turbiditas de Duque-Caro, (1972) y con San Cayetano Superior de Bueno, (1970). También es correlacionable con la Formación San Cayetano (Reyes & Zapata, 2001).

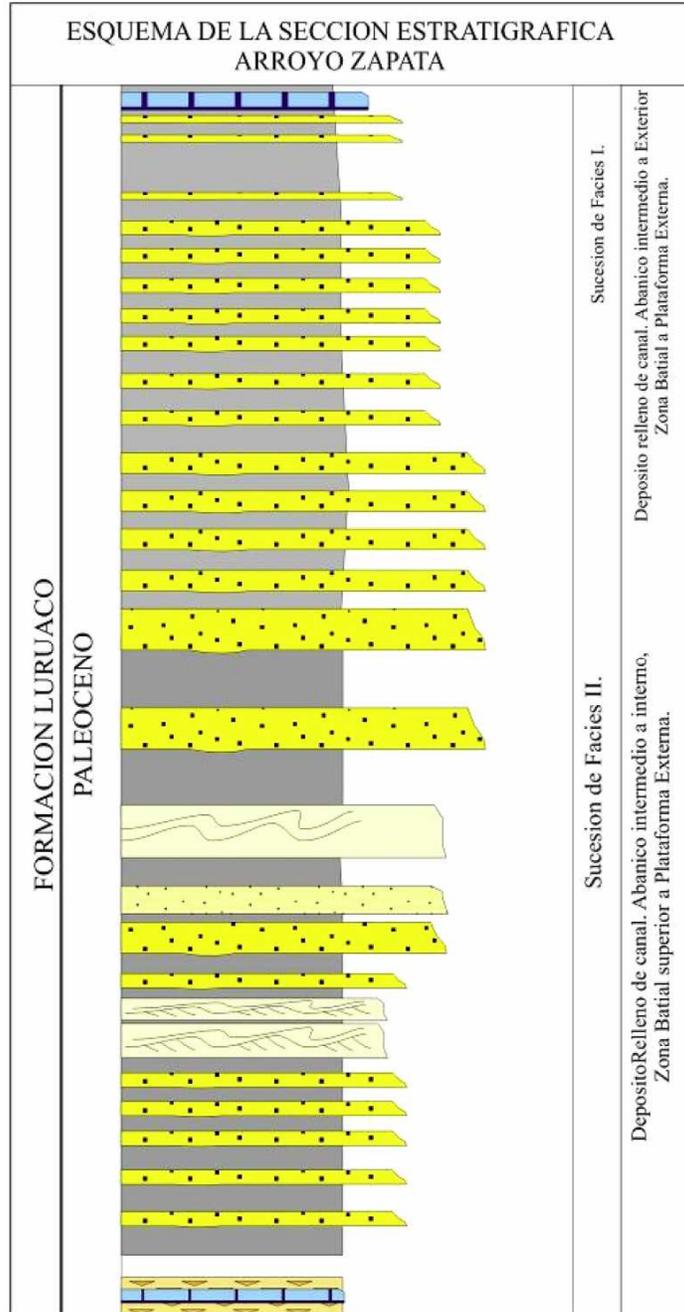


Figura 5. Columna estratigráfica esquemática de la Formación Luruaco, levantada en el Arroyo Zapata (Union Temporal B&G, 2006).

### 3.4 FORMACIÓN PENDALES

#### *a. Autor*

El nombre Formación Pendales fue utilizado informalmente por Henao (1951) para designar un conglomerado potente y compactado que aflora en los alrededores del caserío de Pendales en el Departamento del Atlántico. Posteriormente Duque-Caro y otros (1985) llaman informalmente Conglomerado de Pendales a las rocas que afloran en los alrededores del mismo caserío y del Municipio de Luruaco. Originalmente el nombre es dado por Bueno (1970) en la población de Arroyo de Piedra, para designar unas calizas fosilíferas aflorantes en los flancos del Anticlinorio de Luruaco, en su parte norte. Formalmente el nombre ha sido utilizado por Barrera (1999), Reyes, y otros (2001) y Reyes & Zapata, (2001).

#### *b. Localidad tipo y afloramientos*

Los conglomerados de la Formación Pendales toman su nombre de la población ubicada sobre la carretera Cartagena - Luruaco. Presenta buenos afloramientos entre las poblaciones de Santa Catalina y Pendales.

Sus principales afloramientos se encuentran en el Arroyo Hénequen (Reyes & Zapata, 2001), ubicado 6km al noroeste de la población de Repelón y donde se encuentra su mayor espesor (471m) y en el camino la Hacienda Agua Dulce - San Benito (Reyes, y otros 2001), donde aflora el espesor mínimo para ésta unidad (65m).

#### *c. Descripción Litológica*

Está constituida por conglomerados polimícticos, compuestos por fragmentos de rocas volcánicas basálticas, sedimentarias calcáreas, cherts y cuarzo, tamaño guijo, con matriz arenosa intercalados con areniscas conglomeráticas, litoarenitas y cuarzoarenitas de grano grueso a muy grueso, en la parte media las capas son granodecrecientes (Reyes & Zapata, 2001).

Dentro del área de estudio la Formación Pendales está constituida por potentes bancos de conglomerados polimícticos, con clastos tamaño guijo, principalmente de chert negro y pardo, clastos de areniscas arcósicas color verde y cuarzo lechoso. Todos los clastos son moderadamente redondeados y matriz-soportados (Unión Temporal B&G, 2006).

#### *d. Espesor y Contactos*

El espesor medido en la sección del arroyo Henequén es de 500m (Reyes & Zapata, 2001). Dentro del área de estudio se considera que tiene un espesor de 300m a 400m (Unión Temporal B&G, 2006).

Los límites no están bien definidos, pero en general es discordante con la Formación San Cayetano, sin embargo en el área de estudio el límite Inferior es discordante con la Formación Luruaco. El contacto Superior es aparentemente concordante con la Formación Arroyo de Piedra, discordante con la Formación las Perdices (Reyes & Zapata, 2001) y transicional con la Formación Carmen en el Bloque Luruaco (Unión Temporal B&G, 2006).

*e. Edad*

Por reportes de la fauna *Acarinina pentacamerata* y *Clavigerinella akerssi*, indicativos del Eoceno Medio (Reyes & Zapata, 2001) y por las zonas planctónicas P.10 a P.18 y a la zona bentónica *Bulimina jacksonensis* (Duque-Caro en Guzmán, y otros 2004) se asigna una edad Eoceno Medio a Tardío.

*f. Ambiente de Depositación*

Su ambiente de depósito se ha interpretado como un sistema de abanicos proximales de plataforma marina somera (Unión Temporal B&G, 2006); Hincapié y otros (2008), reporta ambientes fluviales y marinos someros.

*g. Correlaciones*

La Formación Pendales es correlacionada litológica y cronológicamente con la Formación Maco en el Anticlinorio de San Jacinto por Guzmán, y otros (2004). Se correlaciona con la Unidad Chengue, por Ecopetrol (2001) y con la Formación Chengue por Haffer & Beattie, (1960). También con la Formación Toluviejo, en el Bloque Sincelejo (Reyes & Zapata, 2001) y con la Formación Arroyo de Piedra (Guzmán, y otros 2004).

### 3.5 FORMACIÓN ARROYO DE PIEDRA

*a. Autor*

Formación Arroyo de Piedra es el nombre informal dado por Bueno (1970) en la población del mismo nombre, para designar unas calizas fosilíferas aflorantes en los flancos del Anticlinorio de Luruaco, en su parte norte.

*b. Localidad Tipo y Afloramientos*

La localidad tipo de esta formación se establece a los alrededores del municipio de Arroyo de Piedra, sobre la parte norte del flanco oriental del Anticlinorio de Luruaco (Bueno, 1970).

De acuerdo con Unión Temporal B&G (2006), se encuentran afloramientos a 2km del municipio de Arroyo de Piedra, sobre una vía destapada, hasta el sector del Arroyo Casa Vieja y se complementa la descripción de esta unidad en Arroyo Banco. Las mejores exposiciones de esta unidad se encuentran en canteras, de las cuales actualmente son explotadas calizas (Reyes & Zapata, 2001).

*c. Descripción Litológica*

Reyes & Zapata (2001) determinan que la Formación Arroyo de Piedra está constituida por cuatro segmentos principales: dos de calizas y dos de lodolitas calcáreas y margas, intercalados entre sí; empezando, de base a tope, con un segmento de lodolitas calcáreas y margas y terminando con un segmento de calizas. Las lodolitas, calcáreas y silíceas, se presentan en capas medias y delgadas intercaladas por margas blandas, grises a amarillas; por otro lado las calizas se encuentran en capas medias cuneiformes y pueden llegar a representar lentes dentro de las lodolitas.

Por otro lado en la descripción realizada por la Unión Temporal B&G (2006), para ésta formación, restringen la descripción anteriormente presentada para el área norte del

Anticlinorio de Luruaco en las cercanías de la población Arroyo de Piedra. Hacia el sur, en cercanías del municipio San Juan de Tocaguá, establecen que la formación se hace más arenosa, con areniscas cuarzosas, en capas gruesas, intercaladas con capas delgadas de lodolitas con un moderado contenido orgánico.

### *d. Espesor y Contactos*

Reyes & Zapata (2001), presentan un espesor estimado a partir de cortes estructurales de 200m. Guzmán y otros (2004), presentan una descripción de la Formación Arroyo de Piedra con un espesor desconocido. Sin embargo la Unión Temporal B&G (2006) establece un espesor de aproximadamente 1000m sobre las Transecta Cartográfica 03, realizada en el Bloque Luruaco, y un espesor de 581m (167m para el segmento superior y 414m para el segmento inferior) para las localidades mencionadas en el numeral b, aclarando que hay una parte de uno de los segmentos lodolíticos que no se pudo medir debido a su pobre exposición.

El contacto inferior con la Formación Pendales es concordante, el contacto superior es difícil de diferenciar pero se ha inferido como discordante con la Formación Las Perdices (Reyes & Zapata, 2001). La Unión Temporal B&G (2006) determina que los contactos, tanto inferior como superior, son discordantes con la infrayacente Formación Luruaco y la suprayacente Formación Pendales, sin embargo reportan que en la mayor parte del área las relaciones con las formaciones infra y suprayacentes son falladas. Guzmán y otros (2004) establecen que la Formación Arroyo de Piedra se encuentra en contacto discordante con la suprayacente Formación Carmen.

### *e. Edad*

La edad de esta formación se estableció por su posición estratigráfica y se considera de edad Eoceno Medio a Tardío (Reyes & Zapata, 2001), sin embargo Duque-Caro (comunicación escrita) estableció esta edad con base en las zonas planctónicas P.10 a P.18 y a la zona bentónica *Bulimina jacksonensis*, al igual que la Formación Pendales (Guzmán, y otros 2004).

### *f. Ambiente de Depósito*

El ambiente de depósito es batial superior a nerítico (Reyes & Zapata, 2001), mientras que Guzmán y otros (2004) indican una plataforma marina somera. La Unión Temporal B&G (2006) realiza un análisis facial de esta unidad y determina dos ambientes de la siguiente manera: Ambiente marino de plataforma somera a interna (plataforma de carbonatos) para la parte superior de la de la formación, la cual se encuentra constituida por calizas fosilíferas (Bioclastos y rodolitos de algas). Depósitos costeros de plataforma interna (bajo la influencia de olas y mareas) con períodos de máxima profundización relacionados a aumentos en el nivel del mar para el conjunto inferior de la formación que está compuesto por intercalaciones de lodolitas calcáreas, margas y algunas capas de arenisca.

### *g. Correlaciones*

Se correlaciona litológica y cronológicamente con la Formación Chengue, Maco, San Jacinto y la Formación Toluviejo del Anticlinorio de San Jacinto (Guzmán, y otros 2004). También se correlaciona con la parte Inferior de la Formación Ciénaga de Oro, en el

Bloque de San Jerónimo (Reyes, y otros 2001). Cronológicamente se correlaciona con la Formación Pendales (Guzmán, y otros 2004).

---

#### 4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La Cuenca Sinú - San Jacinto ha sido afectada por la interacción entre las placas Caribe, Nazca, Suramericana y Panamá, específicamente debido a la subducción de la Placa Caribe (corteza oceánica) debajo de la Placa Suramericana (corteza continental), desde el Cretácico Tardío hasta el Holoceno (Duque-Caro, 1984), la cual ha formado una cuña de acreción en el margen noroccidental de Colombia. Esta interacción ha generado varios bloques tectónicos con una historia de sedimentación y deformación diferente, de la que se derivó, entre otros, la Serranía de San Jacinto o Cinturón Plegado de San Jacinto (Figura 6). Presenta una tendencia regional noreste-suroeste, iniciando al sur de la población de Montería y terminando al norte bajo el Río Magdalena. Al occidente limita con la Cuenca de Cartagena (Chevron, 1986) que actualmente se conoce como la cuenca Sinú Off-shore, separada del cinturón plegado por la Falla Sinú (Duque-Caro, 1973); al Oriente la falla de Romeral separa al Cinturón Plegado de San Jacinto de la Cuenca El Plato. Se encuentra separado de la Serranía del Sinú por el lineamiento del Sinú (Duque-Caro, 1984).

Siguiendo la obducción del Plateau Oceánico del Caribe (Campaniano - Maastrichtiano) la acreción tuvo lugar a lo largo del área que hoy corresponde al Magdalena y al Bajo Sinú desde el Paleógeno hasta hoy. Un prisma de acreción interior formado por estratos del Cretácico Superior hasta el Oligoceno, depositados sobre la corteza oceánica está expuesto a lo largo de los sectores de Montería y San Jacinto. Esta sección interna del prisma contrasta con la sección exterior, la cual consiste principalmente de cuñas imbricadas desde el Mioceno hasta el Pleistoceno; el Proto-Magdalena y otros sistemas sedimentarios contribuyeron con la alta tasa de sedimentación ocasionada por el levantamiento de las cordilleras oriental y central desde el Mioceno Superior (Figura 7). Como resultado del enorme aporte de sedimentos el prisma "exterior" creció rápidamente, alcanzando el cono crítico; para equilibrar y alcanzar un perfil estable, el prisma colapsa creando un fallamiento normal (Flinch, y otros 2003).

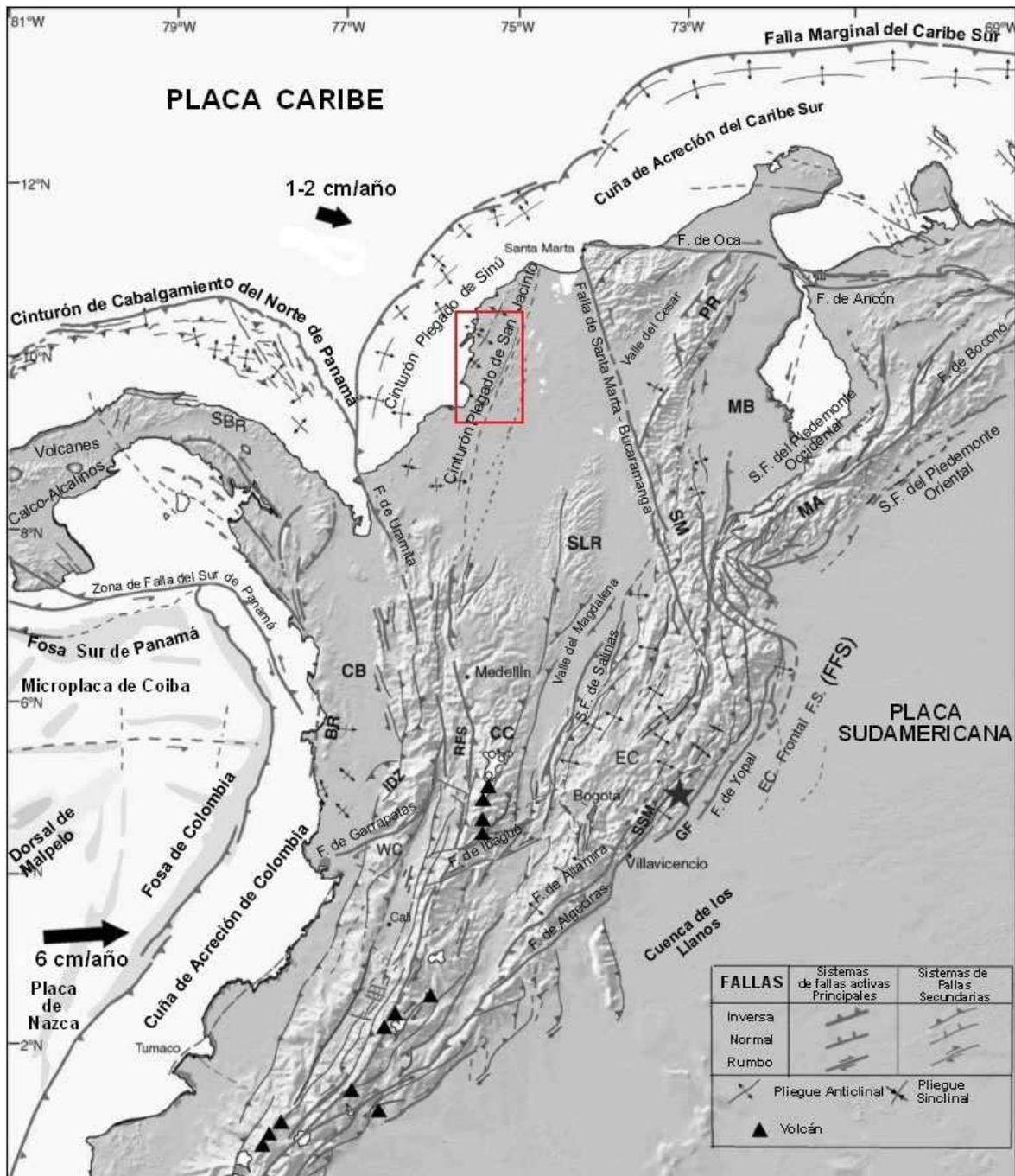


Figura 6. Marco Tectónico de Colombia. BR=Serranía del Baudó, CB=Bloque Chocó, CC=Cordillera Central, EC=Cordillera Oriental, WC= Cordillera Occidental, GF= Falla de Guaicáramo, MA=Andes de Mérida, MB=Bloque Maracaibo, PR=Serranía del Perijá, RFS=Sistema de Fallas de Romeral, SLR=Serranía de San Lucas, SM=Macizo de Santander, SSM= Falla de Servitá - Santa María (Hincapié, y otros 2008).

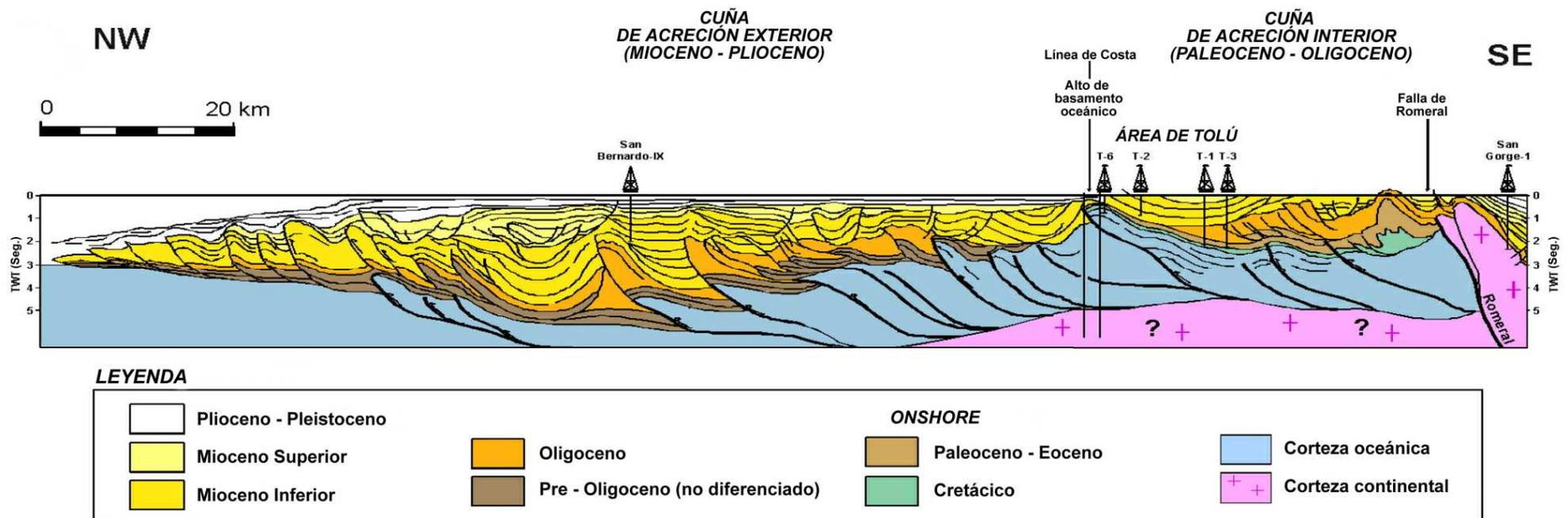


Figura 7. Perfil del Cinturón Plegado de Sinú - San Jacinto (Modificado de Flinch, y otros 2003).

En general, las unidades estructurales mayores están representadas por los Anticlinorios de Luruaco, San Jacinto y San Jerónimo. Cada cuña de acreción tiene estilos estructurales similares de anticlinales estrechos, pendientes y alargados, comúnmente fallados a lo largo del rumbo, separados por sinclinales amplios y suaves, los cuales se encuentran siempre menos deformados que los anteriores, todos paralelos a la dirección de rumbo del Cinturón (noreste-suroeste). El eje de los anticlinales está expresado por una topografía rugosa, debido a que sus núcleos se encuentran compuestos por cherts y lodolitas silíceas (Formación Cansona) intensamente deformados y con buzamientos mayores a los 45°. Hacia los flancos las características axiales se suavizan y el ángulo de buzamiento de las capas disminuye, de tal manera que los anticlinales se hacen más amplios con núcleos más jóvenes (Duque-Caro, 1984).

Entre las principales fallas que afectan el Cinturón de San Jacinto se encuentran la Falla de Romeral, la cual comprende una zona de paleosutura que separa el basamento continental Paleozoico, al este de la falla, del basamento oceánico Mesozoico, al oeste de la misma; y la Falla de Sinú que separa el subaéreo Cinturón Plegado de San Jacinto del parcialmente sumergido Cinturón Plegado del Sinú, al oeste de la falla (Toto & Kellogg 1992).

De acuerdo con la geometría de las estructuras, orientación de las mismas y estilo de fallamiento, el Cinturón de San Jacinto es dividido por Duque-Caro, (1984), en tres bloques estructurales, de norte a sur: Bloque de Luruaco, Bloque del Carmen y Bloque de Sincelejo. Reyes & Zapata, (2001) reportan un cuarto bloque denominado Bloque de San Jerónimo, sin embargo no registran una descripción estructural detallada y solo se refieren a él en la estratigrafía.

El Bloque de Sincelejo conserva la misma dirección regional del Cinturón de San Jacinto y se caracteriza por presentar fallamiento inverso y plegamientos estrechos, visibles en los Montes de María y evidenciados por sísmica en el Golfo de Morrosquillo y llanuras costeras, donde están enmascarados por sedimentos recientes semiconsolidados y no consolidados (Duque-Caro, 1984).

El Bloque del Carmen hace parte del Anticlinorio de San Jacinto, limitado en la parte occidental por la Falla Villanueva - El Totumo, la cual pertenece al lineamiento del Sinú. Debido a la dureza de las rocas arenosas forman un relieve abrupto, el cual corresponde a las formaciones San Cayetano y Maco (Reyes, y otros 2001). Un importante sistema transversal fragmenta el bloque causando inflexiones de las estructuras; este cambio de orientación muestra un curvamiento general del cinturón hacia el oriente y las fallas transversales reflejan la generación al occidente de cuencas tipo graben o de tracción, como en el Golfo de Morrosquillo y en el área de María La Baja; otro rasgo importante es la formación de estructuras en "S" cerca de las fallas inversas principales (Duque-Caro, 1984).

Finalmente el Bloque Luruaco corresponde con el Anticlinorio de Luruaco, en la parte norte del Cinturón de San Jacinto (Duque-Caro, 1973). Se extiende con dirección N30°E, entre el Bloque Turbaco, al oeste, y la depresión del Dique, al este (Reyes, y otros 2001). Se caracteriza por la presencia de un fallamiento transversal de movimiento sinistral, que

ejerce control estructural y morfológico. Los pliegues en el sector occidental están relacionados y controlados por las fallas inversas, siendo angostos con sus flancos en general asimétricos y de ángulo alto. Hacia el sector oriental el Sinclinal de Sabana Larga tiene sus flancos en ángulo bajo (Duque-Caro, 1984). La gran densidad de fallas refleja la alta actividad tectónica al este del Cinturón de San Jacinto, donde los sedimentos de comportamiento esencialmente frágil, no favorecieron la formación de pliegues (Reyes, y otros 2001).

### **4.1 PLIEGUES**

#### **4.1.1 Anticlinal De Luruaco**

Es la mayor estructura definida para esta zona, se ubica en la zona norte del Anticlinorio de Luruaco, representando su parte terminal, la cual se manifiesta con un cierre estructural, 8km al norte del Municipio de Luruaco en rocas de la Formación San Cayetano (Reyes & Zapata, 2001). Se caracteriza por ser un anticlinal asimétrico, recumbente, limitado en ambos flancos por fallas inversas, seguido en cada flanco por sinclinales amplios, con pequeños replegamientos internos. Ambos flancos del anticlinal se encuentran replegados en estructuras menores esencialmente en cercanías a las fallas que lo limitan. Al sur de Luruaco el anticlinal muestra una vergencia al este, sin embargo al norte del mismo municipio se observan características contrarias a las del sur, es decir en esta zona el anticlinal muestra una vergencia al oeste. Esto se debe a la Falla de Pendales la cual se encuentra transversal a la estructura y domina la geometría final del pliegue (Unión Temporal B&G, 2006).

#### **4.1.2 Anticlinal de Tocaguá**

Se encuentra localizado cerca de la población de San Juan de Tocaguá. Tiene una longitud de 3,5km sobre la Formación Luruaco, es un pliegue asimétrico con vergencia al occidente. Hacia el norte tiene un cierre estructural contra la Falla Pendales y hacia el sur está cubierto por sedimentos cuaternarios (Reyes, y otros 2001)

#### **4.1.3 Plegamiento de San Estanislao**

Se ubica al oriente del municipio de Villanueva y al noroccidente del municipio de San Estanislao. Se trata de un sinclinal y un anticlinal con rumbo de sus ejes N50°E en una longitud promedio de 5km. El anticlinal presenta cierre al suroccidente mientras que el sinclinal lo presenta al nororiente, así las dos estructuras tienen forma de "S". Lo anterior se debe a un límite estructural, denominado por Reyes y otros (2001) como Falla del Dique de dirección N60°W. Afecta a las formaciones Hibácharo y Tubará.

### **4.2 FALLAS**

#### **4.2.1 Sistema De Fallas El Banco-Repelón**

Se encuentra ubicado al noroccidente del Municipio de Repelón. Corresponde a un sistema de fallas imbricado de alto ángulo y de componente lateral inversa. Tiene un rumbo N65°E, inclinación al sureste y una longitud aproximada de 12km. Afecta rocas de la cuenca Sinú-San Jacinto, exponiendo rocas de las formaciones más antiguas e incluso repitiendo su secuencia. Comienza hacia el sur con una componente principalmente lateral

destral, culminando en el norte con un predominio de la componente vertical inversa (Unión Temporal B&G, 2006 y Reyes & Zapata, 2001).

#### **4.2.2 Falla De Luruaco**

Cruza por la región de Mapurito, con un rumbo N40°E, inclinación hacia el oriente y una longitud aproximada de 25km (Guzmán, y otros 2004). Es una falla inversa que repite parte de la secuencia de la Formación Luruaco y deja a su paso cizallamiento y plegamiento muy pronunciado (Reyes, y otros 2001).

#### **4.2.3 Falla Villanueva - Totumo**

Localizada en la región de Rocha, al este de Arjona, en la localidad de Bayano y en las localidades de Villanueva y El Totumo. Tiene una extensión de más de 75km, con un rumbo de N40°E en el sur y al norte cambia su dirección de rumbo (norte-sur). Hace parte del Lineamiento del Sinú de tal manera que es el rasgo que separa, al norte, los Cinturones de San Jacinto, al oriente, y Sinú al occidente. Su componente principal es inverso y genera gran perturbación en los estratos de las formaciones San Cayetano, Pendales y Arjona, tales como inversiones y plegamientos (Reyes, y otros 2001).

#### **4.2.4 Falla de Pendales**

Se encuentra en las inmediaciones de la localidad de Pendales, con un rumbo N30°-40°E, su inclinación es cercana a los 60° hacia el oriente y tiene una extensión aproximada de 20km. Esta falla tiene un comportamiento inverso afectando la Formación San Cayetano produciendo su cabalgamiento sobre la Formación Pendales. (Reyes, y otros 2001).

#### **4.2.5 Zona de Fractura de Pendales**

Es el nombre propuesto por la Unión Temporal B&G (2006) a una estructura transversal de dirección este-oeste, definida por una amplia zona baja, que a manera de valle cerrado interrumpe la continuidad morfológica del Anticlinal de Luruaco. Está relacionado a los cambios en las vergencias de los pliegues que atraviesa de forma ortogonal. Ésta estructura corresponde posiblemente a una zona de falla de alto ángulo de componente sinistral-normal. Debido a su expresión morfológica es muy difícil medir sus características básicas, sin embargo es identificable por su entorno regional (Unión Temporal B&G, 2006).

---

## **5 EVOLUCIÓN GEOLOGICA**

La historia geológica del Cinturón Plegado de San Jacinto se puede resumir en el desarrollo de un fallamiento de rumbo durante el Cretácico Tardío, un importante cabalgamiento durante el Eoceno y, finalmente, una leve deformación extensiva durante el Mioceno. Se desarrolló durante el "Cuarto ciclo de desarrollo Tectónico del Caribe: Mediados del Cretácico Hasta el Cuaternario", sin embargo el cinturón no se empezó a desarrollar sino hasta el Cretácico Superior, ya que las limitaciones estratigráficas de la región no permiten considerar edades más antiguas (López, 2005).

### 5.1 CAMPANIANO-PALEOCENO

Durante el Campaniano, dentro del estilo tectónico del noroccidente colombiano, la Falla de Romeral representaba la sutura entre la placa continental Suramericana al este, y la placa oceánica del Caribe al oeste (Figura 8). Esquistos y filitas parecen formarse durante este tiempo en la zona de convergencia entre la Placa del Caribe y el borde noroccidental de Suramérica (Esquistos del Rodadero, filitas y esquistos micáceos del Pozo Cábano-1), posiblemente asociados al paso del Ridge de Aves por el borde continental, formando un prisma acrecional y elevando el borde continental. Esto levantó segmentos de la proto-Cordillera Central, restringiendo la extensión de la cuenca cretácica hacia el occidente (López, 2005).

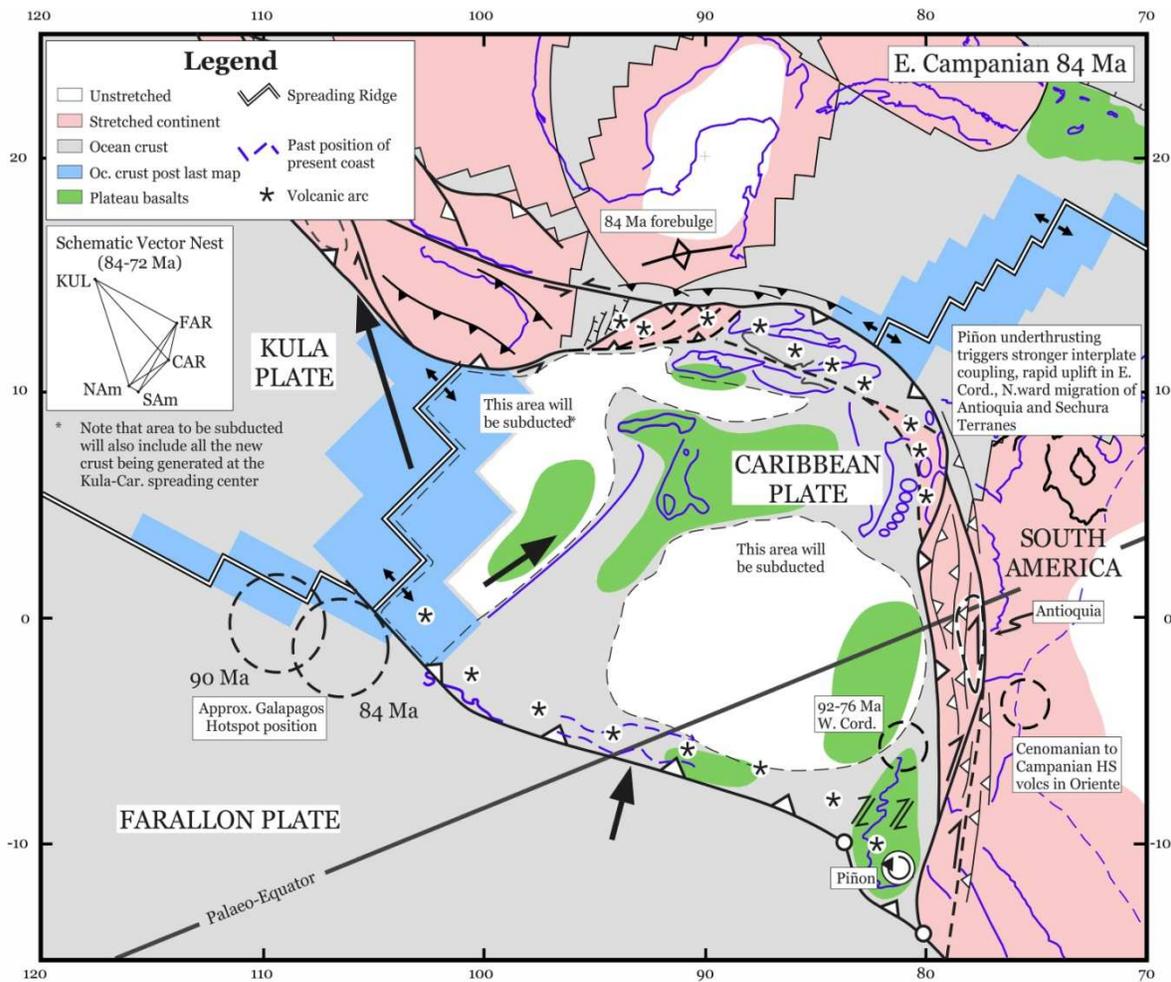


Figura 8. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Campaniano (Pindell, y otros 2001).

A mediados del Paleoceno en el borde del continente, la placa del Caribe subduce el Ridge de Aves, mientras en la Placa Suramericana se está generando deformación y metamorfismo además de intrusiones aisladas de cuerpos principalmente graníticos o cuerpos intrusivos afectados por nuevas intrusiones, acompañado de vulcanismo andesítico (reportes en el pozo Callos-1). Al interior del continente, grandes extensiones

de él emergen, a medida que se desarrollan numerosos sistemas deltaicos hacia la periferia, con direcciones nororiental (formaciones Barco y Los Cuervos) y noroccidental (formaciones San Cayetano y Manantial). La depositación de secuencias turbidíticas, como las observadas en las Formación San Cayetano, es más clara hacia el Eoceno Medio, siendo posibles áreas de aporte algunos paleoaltos localizados en lo que hoy se conoce como Subcuenca de Plato y San Jorge en el Valle Inferior del Magdalena (López, 2005).

Lo anterior se ubica dentro lo que Duque-Caro, (1984) llamó Ciclo Cansona o Cansoniense, el cual es definido por los estratos de pelagitas y hemipelagitas, con abundante micro fauna planctónica, y turbiditas constituidas principalmente por combinaciones de arcillas, arenas y conglomerados con mucho aporte terrígeno, que afloran a lo largo de la zona axial del Cinturón de San Jacinto, e incluye las formaciones Cansona y San Cayetano, respectivamente (Formación Luruaco en el Bloque Luruaco).

Dentro de este mismo ciclo Duque-Caro, (1973) describe una “inconformidad” de edad Paleoceno, entre lo que él reconoce como pelagitas (Formación Cansona) y las turbiditas (Formación San Cayetano), la cual fue sugerida a partir de información paleobatimétrica y cambios en el carácter litológico. Sin embargo Duque-Caro, (1984); nota una mayor deformación de las pelagitas y por lo tanto sugiere una actividad diapírica, de acuerdo con unas reflexiones cónicas y zonas dómicas transparentes detectadas en la sísmica, y al diapirismo actual evidente en el Cinturón del Sinú, por los volcanes de lodo como Cañaverales y el Totumo. Este diapirismo da inicio a la deformación y emergencia del Cinturón Plegado de San Jacinto y se desarrolla desde el Paleoceno hasta la Inconformidad del Eoceno Medio, la cual no solo clausura el evento diapírico sino también el ciclo Cansoniense (Figura 43).

Chevron (1986) divide este ciclo en dos: Ciclo Cansona (Formación Cansona), definido como un ambiente oceánico profundo al occidente de lo que fue llamado como “Cansona Megasuture” (Falla de Romeral), y Ciclo Luruaco, en el que se depositaron las formaciones San Cayetano, depositada antes y durante el movimiento lateral generado en la “Cansona Megasuture”, y Maco, depositada cuando el movimiento de rumbo cesa y se tiene un máximo compresional. Lo anterior es debido a que para estos autores, la diferencia de ambientes entre las formaciones Cansona y San Cayetano marcan ciclos diferentes. Sin embargo se vio que la Formación Maco tiene una edad de Eoceno Medio a Tardío, lo cual se sale de la edad reportada por Chevron de Paleoceno a Eoceno Medio, y por lo tanto se abandona esta interpretación.

## 5.2 EOCENO MEDIO-OLIGOCENO

A mediados del Eoceno (40Ma), la Placa Caribe continúa su avance hacia el Oriente, dando origen a un margen transformante al norte de la Placa Suramericana (Figura 9). Como resultado en este momento la Falla de Romeral se convierte en una falla de rumbo y se genera una nueva zona de subducción al occidente de la misma, conocida como la Fosa del Sinú (López, 2005).

Es justo en el Eoceno Medio que ocurre un importante evento conocido como la Orogenia Pre- Andina. Fue en este episodio en el que los esfuerzos compresionales regionales alcanzaron su clímax, produciendo un primer levantamiento importante del Cinturón de San Jacinto y de la Cordillera Occidental (del orden de los 5000m) (Duque-Caro, 1972 - 1973), dejando emergidas las áreas de San Antero y San Onofre.

Como consecuencia de este levantamiento, hacia la periferia de la Placa Suramericana, la sedimentación durante esta época es principalmente siliciclástica, conglomerática, desarrollo de shales arenosos, calizas y en menor proporción presencia de carbones hacia la base de la denominada Formación Ciénaga de Oro, debido a que ocurren algunos abanicos submarinos que cubren la zona entre la Sutura de Romeral y la Fosa del Sinú, alimentados por complejos fluvio-lacustres desarrollados en la parte occidental del Arco de Magangué (López, 2005). Estos depósitos están representados por las formaciones Pendales y Arroyo de Piedra.

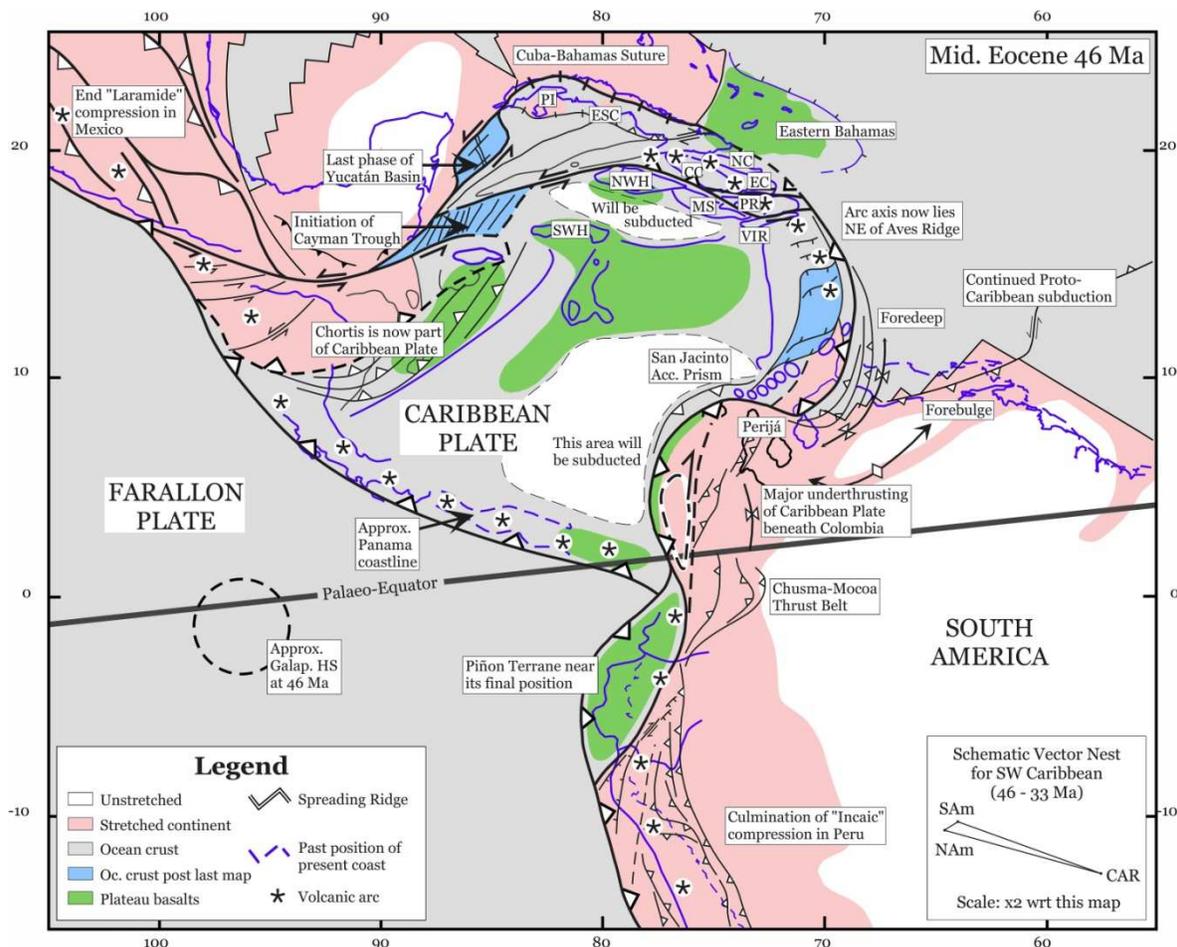


Figura 9. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Eoceno Medio (Pindell, y otros 2001).

Lo anterior se ubica dentro del Ciclo Carmiense Temprano, definido por depósitos de sedimentos terrígenos clásticos marinos, facialmente muy variables, y hemipelagitas, de

edad Eoceno Medio, que descansan inconformemente sobre las turbiditas del piso Cansoniense Tardío y que se encuentran distribuidas principalmente sobre los flancos orientales del Cinturón de San Jacinto (Duque-Caro, 1984). El ambiente de depósito durante este ciclo representa ambientes marinos más someros que los del ciclo Cansoniense.

Nuevamente Duque-Caro, (1984) establece un evento de diapirismo, menos intenso que el anterior, durante el Eoceno Medio que deforma intensamente las hemipelagitas basales del Ciclo Carmenense Temprano y que ocurre durante el depósito de las facies clásticas gruesas del mismo ciclo. Este evento remodeló el relieve pre-existente de las cuencas del Eoceno Medio y finalizó con la inconformidad del Oligoceno Temprano.

Chevron, (1986) también reporta este ciclo denominándolo Ciclo Carmen y abandonó el sufijo "iense" propuesto por Duque-Caro, (1984), debido a que este sufijo tiene una connotación más cronoestratigráfica y las litofacies de las que habla Duque-Caro varían en edad de oeste al este. Los mismos autores finalizan el ciclo en el Mioceno Medio, con base a la inconformidad regional reconocida para esta época, e incluyen las formaciones Ciénaga de Oro, Porquero, Hibácharo y Puerto Colombia, pertenecientes al Mioceno Medio, de tal manera que es evidente el desfase de edades entre el reporte de Chevron (1986) y Duque-Caro, (1984).

### 5.3 OLIGOCENO-MIOCENO

Durante este intervalo de tiempo ocurre el conocido diastrofismo de Stainforth (Stainforth, 1968), correspondiente a la fase proto-Andina de Van Der Hammen, (1958); a la cual estuvieron asociados levantamientos, erosión y basculamiento hacia el oeste en el Cinturón Plegado de San Jacinto, permitiendo una profundización marina propicia para la depositación de la Formación Las Perdices (Reyes & Zapata, 2001). Esto fue una consecuencia inmediata de otro aumento de los esfuerzos compresionales existentes al norte de Suramérica, más exactamente en la Fosa del Sinú (Figura 10).

A pesar de que varios autores aceptan el diastrofismo propuesto por Stainforth, quien se apoya en variaciones paleobatimétricas sugeridas por los foraminíferos del intervalo Oligoceno-Mioceno, Duque-Caro, (1973), presenta un registro estratigráfico completo para el mismo intervalo y posteriormente Duque-Caro, (1984) menciona no evidenciar ninguna inconformidad asociada con este fenómeno a lo largo del Cinturón de San Jacinto cuestionando la relación entre las variaciones paleobatimétricas propuestas con base en foraminíferos y la contraparte estructural para cada una.

### 5.4 MIOCENO TEMPRANO A MEDIO

A principios del Mioceno (20Ma), la Placa Caribe continúa su movimiento hacia el oriente, transportando a cuevas al Ridge de Beata. Durante este tiempo, la Fosa del Sinú se acerca hacia el Oriente, involucrando y acrecionando corteza oceánica al occidente de la Falla de Romeral, aumentando el ángulo y ocasionando erosión en el borde occidental de la cuenca del Valle Inferior del Magdalena. Grandes sistemas de abanicos submarinos se desarrollan

en el margen occidental de la Placa Suramericana, posiblemente relacionados con las salidas de los incipientes ríos Magdalena y Cauca separados entre sí por el Arco de Magangué (López, 2005).

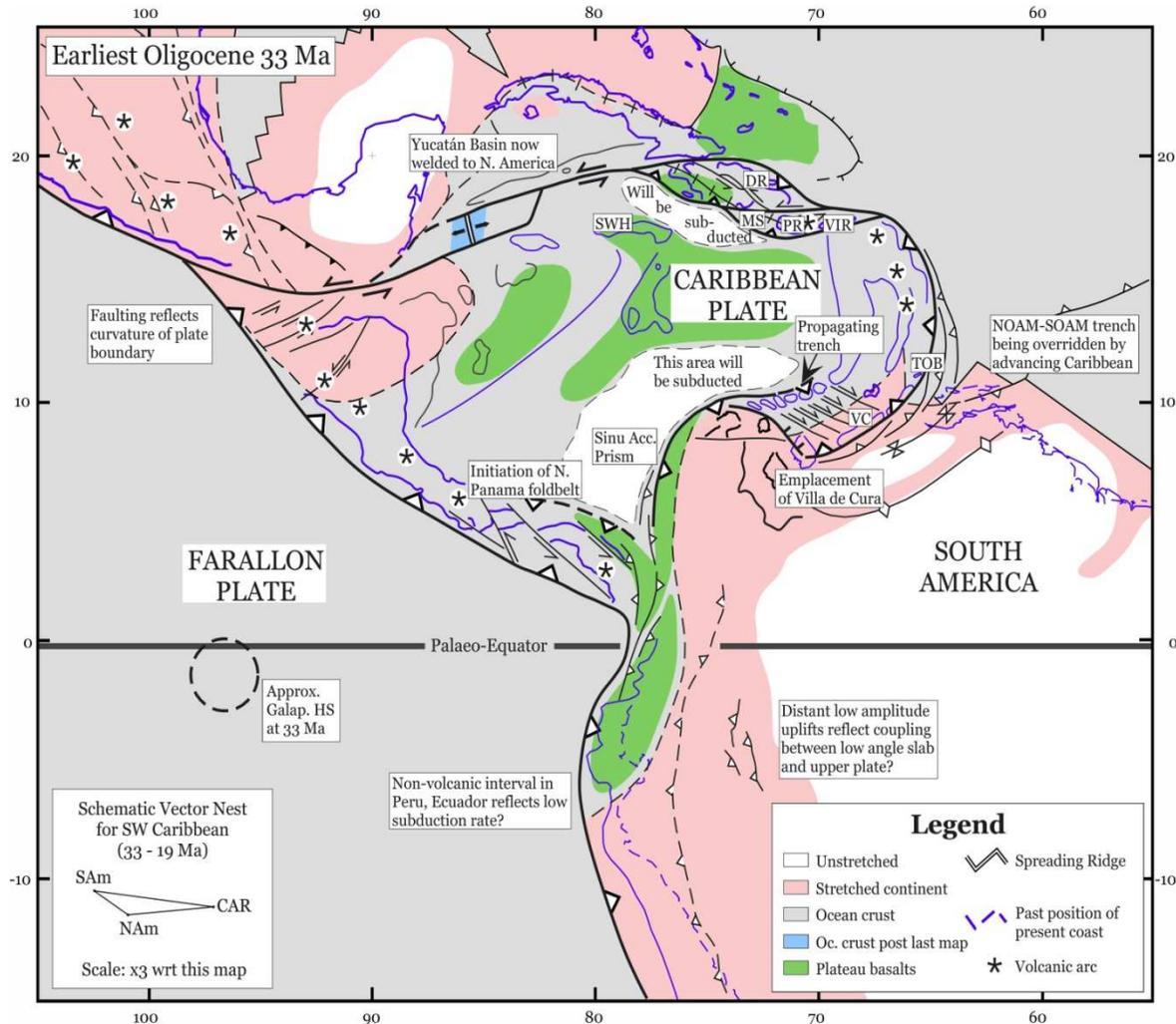


Figura 10. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Oligoceno Temprano (Pindell, y otros 2001).

Una profundización de la cuenca, dio paso para que al término de la sedimentación de la Formación Las Perdices, se depositara la Formación Hibácharo, en el Mioceno Temprano, debido a que la invasión marina se extendió mucho más al sur, hasta las estribaciones septentrionales de la Cordillera Occidental, y hacia el oriente sobre gran parte de la plataforma cubriendo los altos de Cicuco y de El Difícil (Duque-Caro, 1984).

Durante el Mioceno Medio, el cierre del Arco de Panamá contra el borde noroccidental de Suramérica, comprime y expulsa tectónicamente los sedimentos cenozoicos acumulados en el margen continental, hacia el margen del Caribe (Figura 11). Lo anterior dio origen a un extenso abanico de cabalgamientos transpresivos, aumentando el ángulo de las cuñas y permitiendo el levantamiento de las serranías del Sinú y San Jacinto, y por lo tanto el

plegamiento y cabalgamiento de los depósitos en estas cuencas, limitando las subcuencas de Plato y San Jorge (López, 2005). Lo anterior ocurre en lo que Duque-Caro, (1984) denominó Carmiense Medio.

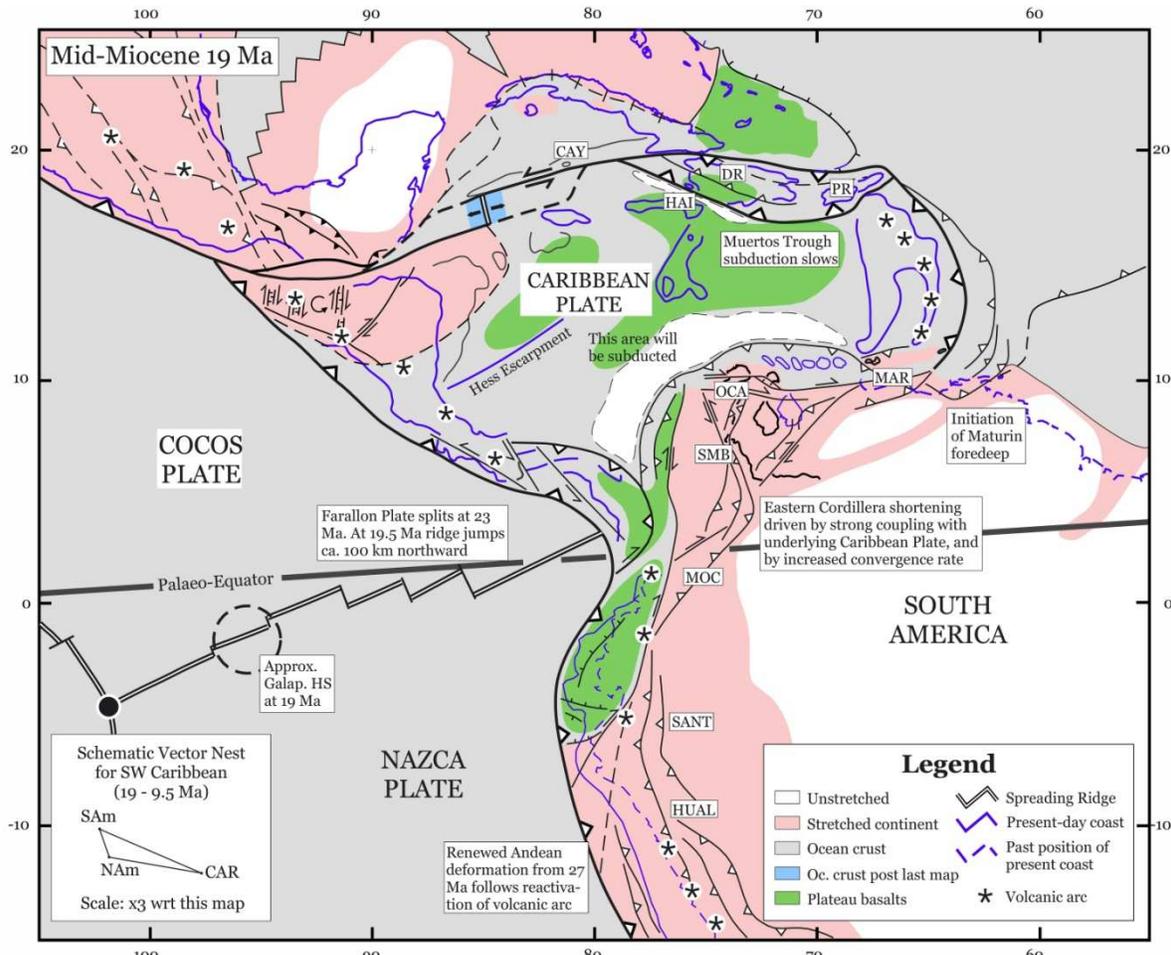


Figura 11. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Mioceno Medio (Pindell, y otros 2001).

## 5.5 MIOCENO TARDÍO-PLIOCENO

Constituye la época de mayor inestabilidad y levantamiento al noroccidente colombiano como consecuencia de esfuerzos compresionales laterales (compresión orogénica de Kugler, 1968) cada vez más intensos (Mora, 2008), lo que trajo el desarrollo de la geofractura de Plato y la depresión tectónica de Sucre (Duque-Caro, 1980).

La sedimentación en la llanura abisal, inmediatamente al occidente del cinturón de San Jacinto y a lo largo del surco de Sinú, fue eminentemente turbidítica con gran aporte terrígeno, donde los paleocañones de Plato, de Sucre y posiblemente otro importante localizado más hacia el sur, se comportaron como enormes canales de descarga del gran volumen sedimentario procedente del interior del continente (Figura 12). Las máximas acumulaciones de sedimentos ocurrieron en el área del cinturón de Sinú, en las intersecciones con los cañones submarinos, particularmente los de Plato y Sucre (Duque-Caro, 1980).

Lo anterior es representado por la Formación Tubará, la cual, de acuerdo con Duque-Caro, (1973), se depositó en el Ciclo Tubará, que posteriormente se denominó como Carmiense Tardío (Duque-Caro, 1984). Este episodio no registra ninguna evidencia de diapirismo a lo largo de los flancos del Cinturón de San Jacinto, donde los estratos que conforman este ciclo están mejor expuestos.

Chevron (1986) define el Ciclo Tubará como las facies transgresivas de la Formación Tubará, el avance máximo del nivel del mar, evidenciado en la Formación Agua Viva, y las facies regresivas de la Formación Usiacurí. Comprende el Mioceno medio Temprano hasta el Mioceno Tardío y su fin coincide con la Orogenia Andina. Sin embargo como ya se vio, este ciclo es totalmente emergente y por lo tanto no pueden existir facies transgresivas dentro del mismo.

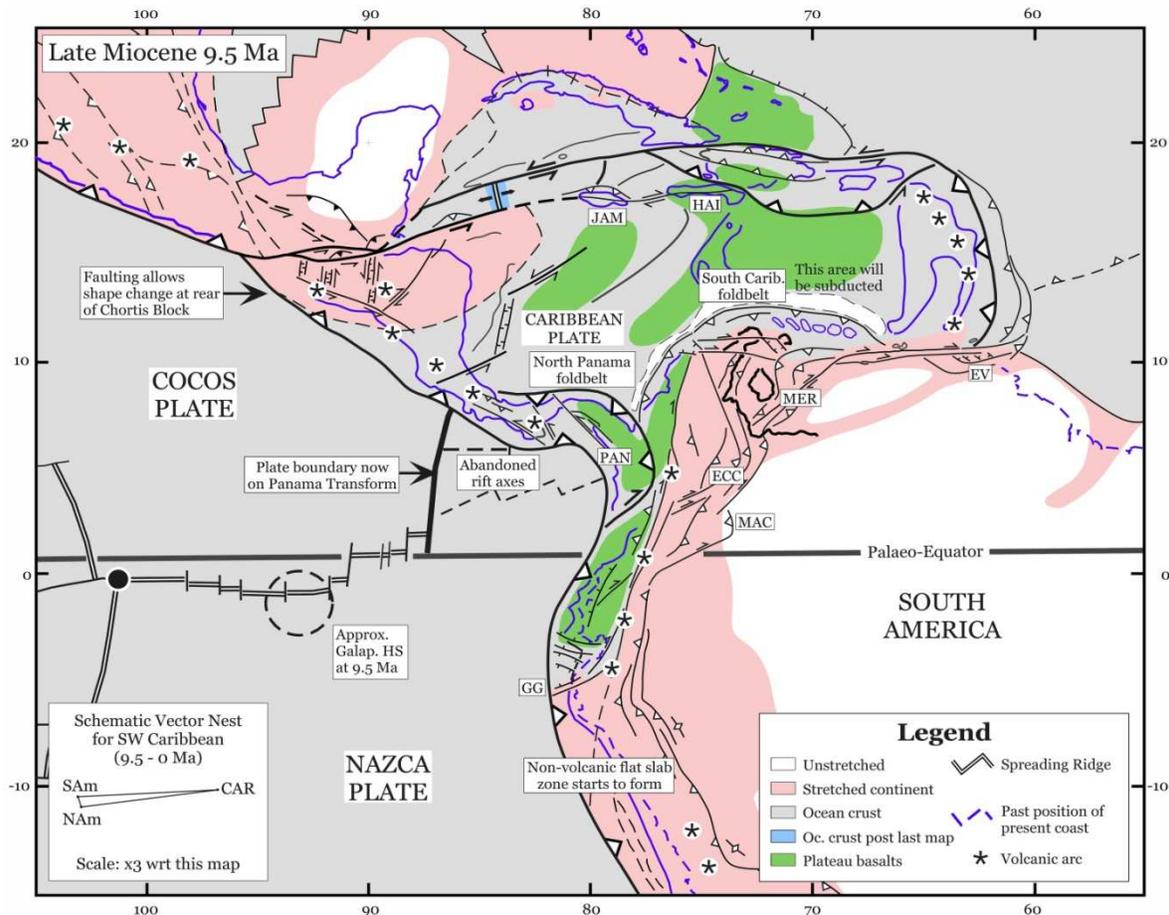


Figura 12. Marco tectónico del margen noroccidental de Suramérica en el Mioceno Tardío (Pindell, y otros 2001).

## 5.6 PLIOCENO -PLEISTOCENO

Por efecto de esfuerzos compresivos noroeste-sureste, se produce la Orogenia Andina, la cual se extendió hasta el área del Cinturón de San Jacinto como consecuencia de otro clímax diastrófico provocado por los esfuerzos mencionados. Además del plegamiento y fallamiento característico de estos esfuerzos, se produjo un fenómeno tectónico mucho

más variado y complejo acompañado por fallamiento transcurrente y flexiones paralelas a los trenes estructurales mayores (Mora, 2008).

A partir de la orogenia se generó:

- Vulcanismo de lodo, levantando y deformando inicialmente el cinturón, lo que causa un cambio brusco en la batimetría (Duque-Caro, 1973).
- Levantamiento y plegamiento completos del cinturón de San Jacinto, asociados con corrientes estructurales en "S" a lo largo del flanco oriental.
- Emergencia de la cubierta sedimentaria del área de la plataforma.

## 5.7 PLEISTOCENO-HOLOCENO

Durante el Pleistoceno Temprano, debido a la Orogenia Andina, se desarrolla una sedimentación fluvial y de frente de playa, en las nuevas áreas emergidas, representada por la Formación Gravas de Rotinet. En las áreas que continuaban sumergidas se desarrollaron arrecifes, como los de la Formación La Popa, los cuales serían posteriormente expuestos.

A partir del Pleistoceno hasta el Holoceno se estabiliza el sistema tectónico, por lo que se presentan ambientes tranquilos, donde imperaba una sedimentación fluvial y deltaica a lo largo de canales remanentes del río, dejados por los paleo cañones (Cuenca de San Jorge), y una sedimentación lacustre adyacente a los drenajes (Mora, 2008).

El cinturón de Sinú continuó emergiendo como consecuencia, tanto de la compresión lateral como de la alta presión almacenada dentro del cinturón. Esta situación hizo que el fenómeno de vulcanismo y plutonismo de lodo, causa principal de la deformación del cinturón, siguiera activo (Higgins & Saunders, 1974).

Duque-Caro, (1984) establece el Ciclo Sincelejiense para denominar a las rocas depositadas durante este intervalo de tiempo, de tal manera que se puedan identificar los sedimentos fluviales y lacustres en los flancos orientales del Cinturón de San Jacinto, particularmente en la región de Sincelejo-Ovejas. Estos sedimentos se encuentran supra yaciendo inconformemente los sedimentos depositados en el Ciclo Carmiense.

---

## 6 GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO

El primer pozo perforado en la Cuenca Sinú-San Jacinto es Las Perdices 1-1<sup>A</sup> en 1907, por la compañía Coloil. Este también fue el primer pozo en Colombia y de acuerdo con la compañía Chevron el poco aceite encontrado era de 39.9° API. Según la información disponible en la página web de la EPIS (Exploration and Production Information Service), en la Cuenca Sinú San Jacinto se han perforado 44 pozos exploratorios, para un cubrimiento aproximado de un pozo cada 871km<sup>2</sup> (Barrero, y otros 2007).

A pesar del desarrollo exploratorio en el área no se han hecho grandes hallazgos de gas o aceite. Las manifestaciones encontradas en los pozos Caracolí, Manatí y Molinero-1 constituyen el estímulo para la continuidad de la exploración.

### 6.1 ROCA GENERADORA

Las principales rocas generadoras en el Cinturón Plegado de Sinú-San Jacinto son las formaciones Ciénaga de Oro y Porquero, del Oligoceno y el Mioceno respectivamente y la Formación Cansona, del Cretácico Tardío (Chevron, 1986; Permanyer & Sánchez 2006; Alemán, 1983; Georesponse, 1991).

Para la Formación Cansona los valores de carbono orgánico total reportados se encuentran entre el 1% y el 11%, con valores promedio cercanos al 3% (Chevron, 1986; Martínez, y otros 1994); predomina el querógeno tipo I y II de origen marino, con valores de reflectancia de vitrinita de 0.77% y temperaturas máximas de pirolisis entre 438°C y 453°C en la parte sur de la cuenca (Georesponse, 1991).

En las formaciones Ciénaga de Oro y Porquero predomina el querógeno tipo II y III amorfo y herbáceo, con valores de carbono orgánico total entre 1% y 7%, temperaturas máximas de pirolisis de 430°C a 440°C y reflectancia de vitrinita inferior a 0.6% (Georesponse, 1991; Permanyer & Sánchez, 2006).

Datos geoquímicos medidos en muestras de los pozos exploratorios Polonuevo-1, Molinero-1 y Molinero-2 muestran además como unidades con posibilidades de generación de gas seco a las formaciones Arroyo de Piedra, Molinero y Perdices; todas presentan una maduración marginal, con temperaturas máximas de pirolisis entre 417°C y 433°C, contenidos de carbono orgánico total entre 0.5% y 1.0% y querógeno tipo IV (Georesponse, 1991) (Figura 13, Figura 14 y Figura 15).

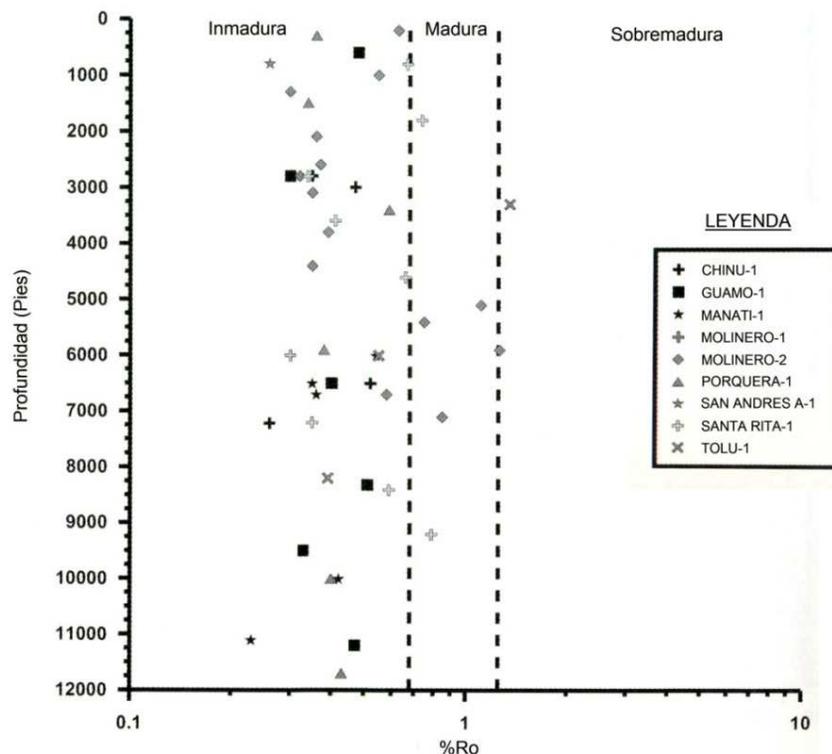


Figura 13. Profundidad vs. Reflectancia de vitrinita (ANH, y otros 2009).

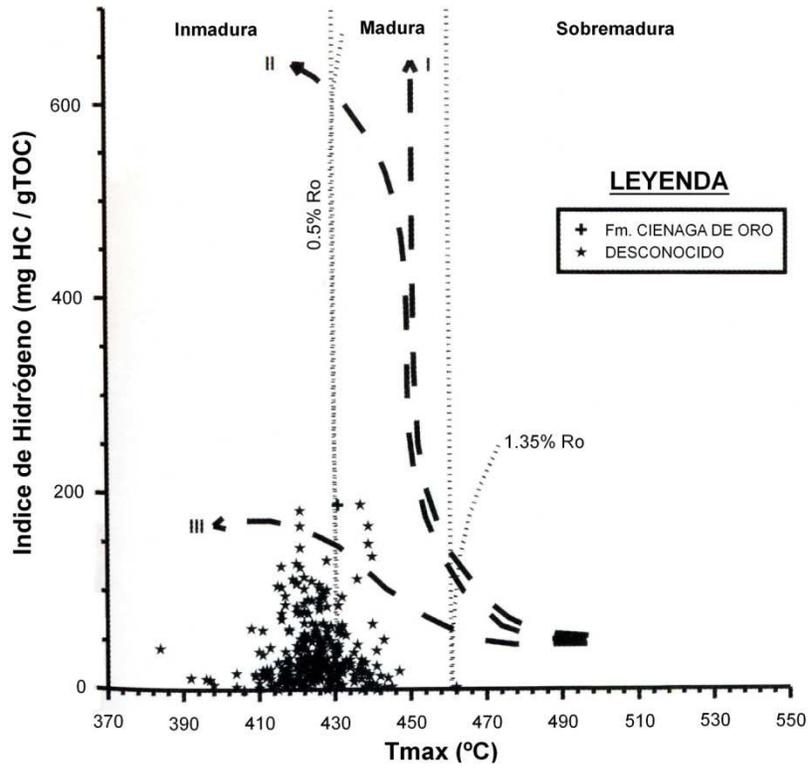


Figura 14. Índice de hidrógeno vs. Tmax (ANH y otros 2009).

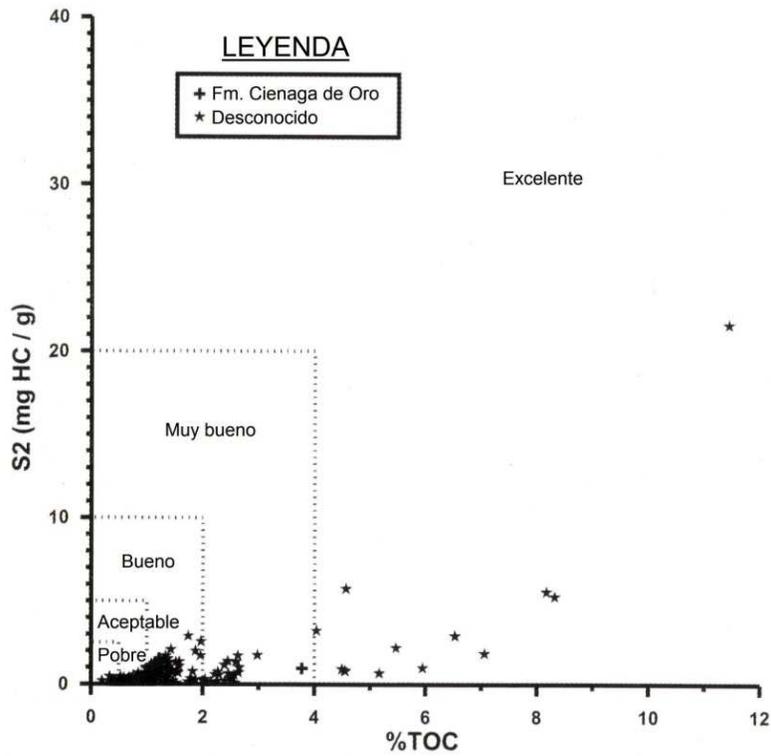


Figura 15. S2 vs. Carbono Orgánico Total (ANH, y otros 2009).

## 6.2 ROCA ALMACENADORA

Alemán, (1983) determina que la Formación San Cayetano a pesar de tener pocas características de roca reservorio, puede desarrollar porosidad intergranular secundaria o porosidad por fracturamiento durante lo que denominó “Laramide Orogeny” en el Eoceno Medio.

Martínez y otros (1994) reportan que las principales unidades almacenadoras son las rocas siliciclásticas Cenozoicas, específicamente el intervalo comprendido entre el Oligoceno y el Plioceno, correspondientes a las formaciones Perdices, Hibácharo y Tubará. Las rocas con características de reservorio están representadas por areniscas y conglomerados con porosidades promedias entre 6% y 15%.

Pachón (1994) indica que en pozo Media Luna-1 las areniscas pertenecientes a las Formaciones Ciénaga de Oro y Porquero, son buenos reservorios con porosidades entre 20% y 25%.

Hincapié y otros (2008) indican que las principales rocas reservorio son las areniscas de las formaciones San Jacinto, Maco y San Cayetano, y localmente, las calizas fracturadas de las formaciones La Risa y Toluviejo. La información petrofísica indica que estos reservorios tienen una porosidad efectiva que oscila entre 6% y 12%.

## 6.3 ROCA SELLO

Según Bucheli, (2002) la roca sello representativa del Bloque Luruaco corresponde a las lutitas y arcillolitas de la Formación Perdices. GeoResponse, (1991) también determina esta formación como un buen sello y propone los shales de la Formación Porquero como una buena roca sello debido a su continuidad regional.

Según Hincapié y otros (2008) las formaciones sello corresponden a los niveles arcillosos cenozoicos de las formaciones Maralú, Chengue y Carmen.

## 6.4 TRAMPA

En esta cuenca se han identificado cuatro etapas tectónicas formadoras de trampas, las cuales ocurrieron, respectivamente, durante el Eoceno Temprano, la parte más tardía del Mioceno Temprano, Plioceno Temprano y Pleistoceno. Durante la primera fase se generaron trampas coetáneas a la cuña acrecionada que dio inicio al desarrollo del Cinturón Plegado de San Jacinto. Este evento produjo el plegamiento y fallamiento de unidades del Cretácico Tardío y Paleoceno, y los paleoaltos generados controlaron la distribución de las formaciones generadas a partir del Eoceno, especialmente el origen de unidades arrecifales, las cuales se formaron en las crestas y flancos de estos paleoaltos (Reyes, 2001). Las trampas estratigráficas con control estructural se evidencian en el Pozo Manatí-1, localizado al nororiente de la zona de estudio (Georesponse, 1991).

Durante la segunda y la tercera fase se reactivaron las fallas existentes, generando una nueva deformación de los sedimentos e incluso erosión de ellos en algunas zonas. El desarrollo de un fallamiento lístrico en el Mioceno Temprano, pudo dar lugar a importantes trampas, a pesar de que la actividad tectónica que ocurrió en la tercera fase

haya afectado las mismas (Reyes, 2001). Por lo tanto se pueden deducir trampas de tipo estructural, tales como las reportadas por Bucheli, (2002), quien establece un marco regional de corrimientos apilados de bajo ángulo y un fallamiento transcurrente de larga extensión. Predominan los anticlinales sobre los sinclinales, ya que estos en ocasiones son reemplazados por fallas inversas. Alemán, (1983) describe anticlinales asimétricos apretados cortados por fallas inversas de alto ángulo para la Formación San Cayetano, en el Cinturón inverso de San Jacinto, como posibles estructuras que podrían poner en contacto estratos impermeables con unidades reservorio.

El último evento tectónico ocurre en el Pleistoceno y en este las partes central y sur del Cinturón Plegado de San Jacinto son levantadas, erosionadas y expuestas. Hacia la parte norte del Cinturón estos procesos ocurren en un menor grado. Bucheli, (2002) describe, en el Bloque Luruaco, trampas asociadas a fallas transcurrentes de larga extensión, trampas asociadas a fallas normales y trampas asociadas a cuencas de tracción.

## 6.5 MIGRACIÓN

Georesponse, (1991) indica que la presencia de abanicos aluviales y canales distributarios de tamaños importantes, pudieron constituir las vías que favorecieron la migración de hidrocarburos hacia áreas más altas. Reyes, (2001) reporta un primer evento de expulsión al final del Paleoceno Tardío, anterior a la Orogenia Preandina; un segundo evento pudo haber ocurrido antes de la deformación del Mioceno Temprano.

---

## 7 HISTORIA DE ENTERRAMIENTO

Reconstrucciones estructurales del Cinturón Plegado realizadas por el Instituto Francés del Petróleo con información proporcionada por TotalFinaElf indican un potencial de generación bueno y regular para el kerógeno tipo II del Cretácico (Formación Cansona) y el kerógeno tipo III del Cenozoico (Formación Ciénaga de Oro), respectivamente (Benguigui, y otros 2004) (Figura 16 y Figura 17).

Las temperaturas de superficie de dicho modelo varían desde 5°C en la llanura abisal hasta 25°C en las partes internas, sin embargo el flujo basal de calor utilizado es constante (45 mW/m<sup>2</sup>). El modelamiento muestra un incremento significativo en la transformación del kerógeno en la parte más oriental del sistema imbricado durante la tectónica compresiva, y el progresivo desplazamiento de la cocina hacia la llanura abisal con el tiempo; en el caso de la Formación Cansona, la transformación empieza a finales del Plioceno cuando se produce una parte importante de los cabalgamientos, y se incrementa durante el Pleistoceno, alcanzando el estado actual; para la roca generadora cenozoica, la transformación empieza levemente en el Plioceno y se incrementa hasta el presente (Benguigui, y otros 2004).

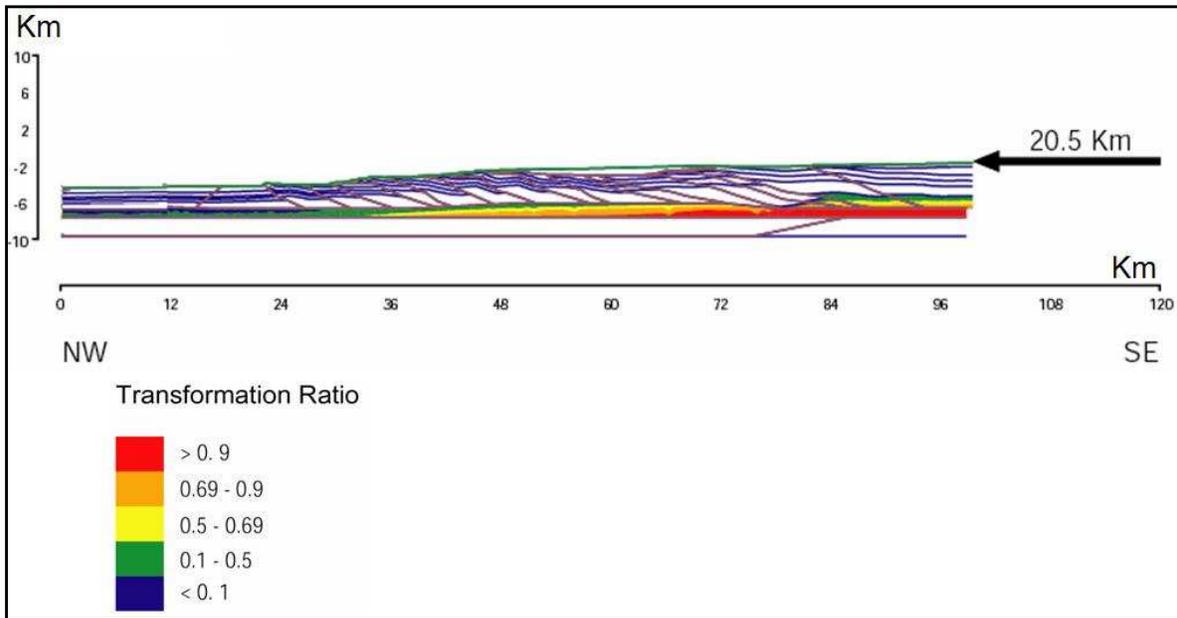


Figura 16. Modelo de maduración para la Formación Cansona en una sección transversal del Cinturón Plegado de Sinú-San Jacinto (Benguigui, y otros 2004).

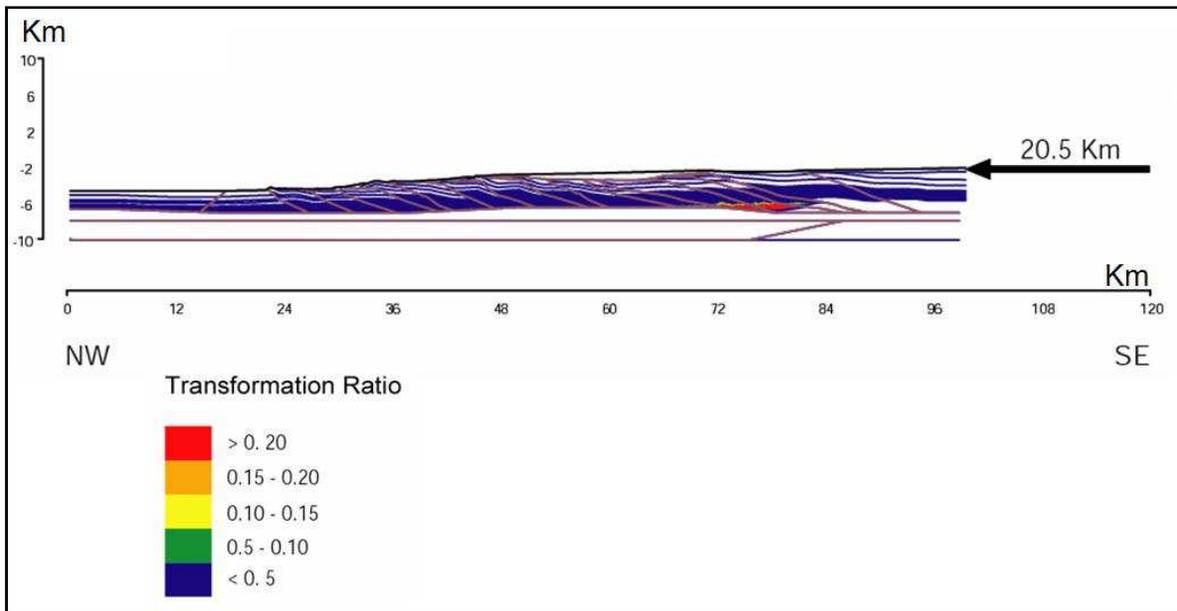


Figura 17. Modelo de maduración para las formaciones generadoras Cenozoicas en una sección transversal del Cinturón Plegado de Sinú-San Jacinto (Benguigui, y otros 2004).

Teniendo en cuenta la información de columnas estratigráficas levantadas en estudios anteriores, información de pozos exploratorios perforados en el área y que en la cuenca Sinú-San Jacinto las unidades potencialmente generadoras pertenecen a los períodos del Cretácico Tardío e inicios del Paleoceno (correspondientes a las formaciones Cansona y, en menor grado, San Cayetano) y al Oligoceno Temprano-Mioceno Temprano, (Formación

Ciénaga de Oro); se generaron las siguientes curvas con el fin de obtener una base de la historia de enterramiento de la cuenca.

Cabe aclarar que las curvas que se presentan a continuación representan las historias de enterramiento en dos bloques diferentes, dentro de la cuenca Sinú-San Jacinto: Bloque Luruaco y Bloque Carmen, las dos primeras graficas hacen parte del Bloque Luruaco, mientras las dos últimas pertenecen al Bloque Carmen.

La Formación Cansona no aflora en el Bloque Luruaco pero se asume que suprayace el basamento oceánico con un espesor similar al medido en el Bloque Carmen. Dicha suposición se hace debido a que los sedimentos pelágicos de la Formación Cansona, se depositaron uniformemente sobre el lecho oceánico hasta el momento en que subdujeron bajo la corteza continental.

La Figura 18 muestra la historia de enterramiento para el Bloque Luruaco, con los espesores mínimos reportados y teniendo en cuenta los períodos erosivos dentro de la pila sedimentaria, calculados a través de la fórmula de Guidish y otros (1985); usando dicha fórmula, para la discordancia del Eoceno Inferior, el material erodado es mayor al espesor total de la Formación Luruaco, razón por la cual se propone un período de no deposición y cero subsidencia. La Formación Cansona que según Permanyer & Sánchez (2006), es la mejor roca fuente en la cuenca, se encontró dentro de la ventana de generación hace aproximadamente 25Ma. Las unidades restantes no han alcanzado temperaturas que permitan la formación de hidrocarburos líquidos.

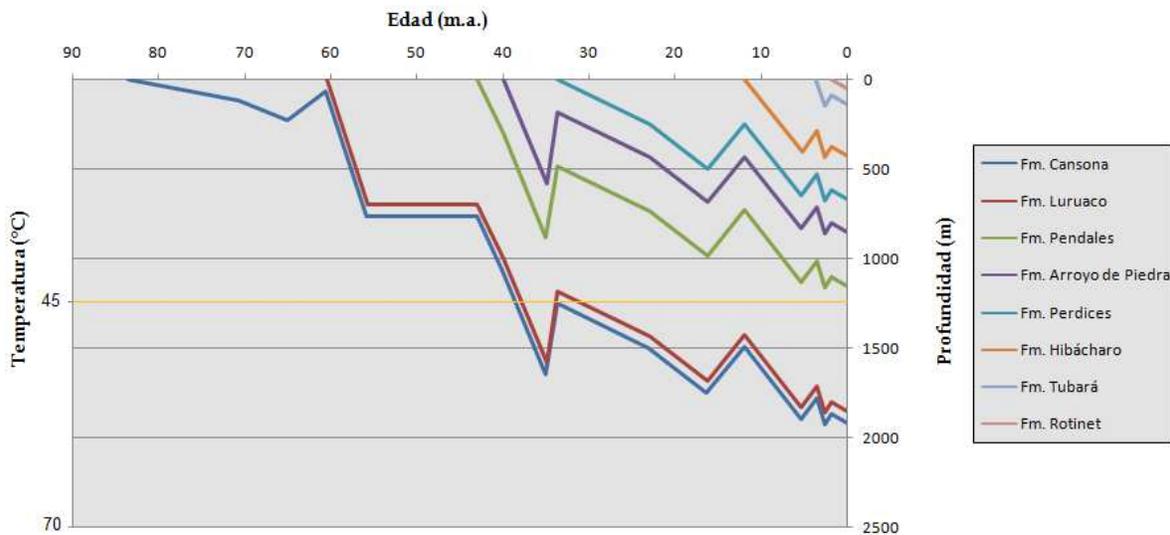


Figura 18. Curva de enterramiento para el Bloque Luruaco usando los espesores mínimos reportados para cada unidad.

En la Figura 19 se usaron los espesores máximos reportados en la bibliografía, asumiendo además que no hay períodos erosivos y las tasas de aporte de sedimentos permanecen constantes para cada una de las formaciones.

Tres de las cinco unidades con potencial de generación de hidrocarburos están sobremaduradas, Cansona, Luruaco y Arroyo de Piedra; las dos restantes, Perdices y Tubará, se encuentran dentro de la ventana desde hace menos de 5Ma., lo que limita considerablemente la cantidad de crudo producido.

Las siguientes figuras corresponden a las curvas de enterramiento del Bloque Carmen, la primera, con espesores mínimos y períodos erosivos, y la segunda, con espesores máximos y tasas constantes de depositación.

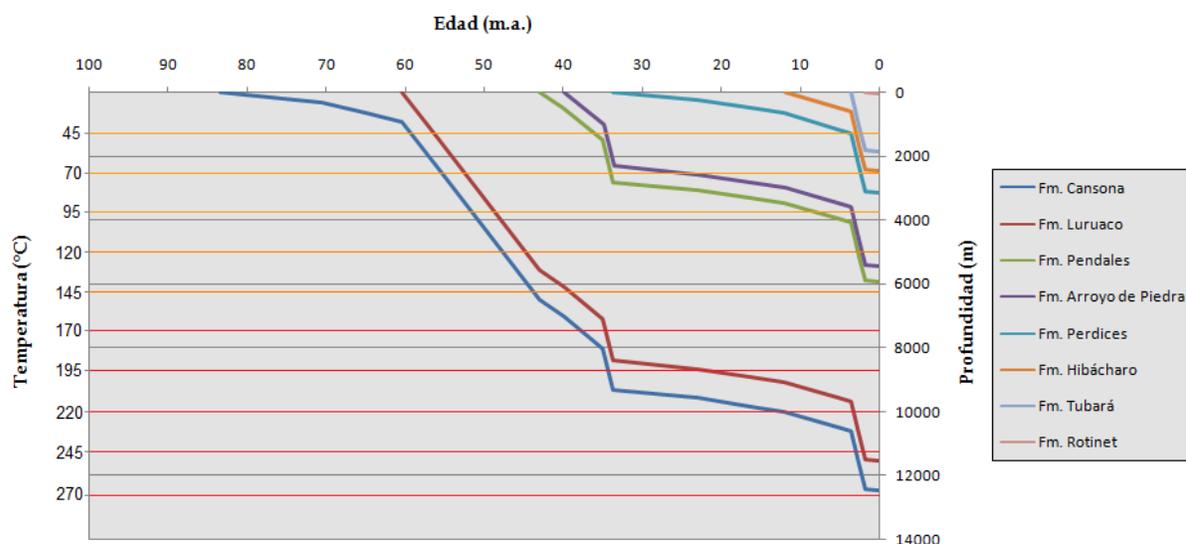


Figura 19. Curva de enterramiento para el Bloque Luruaco, usando los espesores máximos reportados para cada unidad.

De la Figura 20 se deduce que la única formación con potencial de generar hidrocarburos líquidos, que está dentro de la ventana de maduración en esta zona, es la Formación Cansona, compuesta principalmente de cherts y sedimentos finos. Según este gráfico, esta unidad entró a la zona de generación de hidrocarburos hace 20 Ma. y justo después sufrió un levantamiento evidenciado por la discordancia erosiva observada en este punto. A partir de ese momento empieza a enterrarse rápidamente, por lo que la temperatura de cocción de la materia orgánica también se incrementa vertiginosamente.

Aunque para esta curva la Formación Cansona entró a la ventana de generación de hidrocarburos líquidos hace poco tiempo, las altísimas tasas de depositación observadas en el Grupo Rancho y la Formación Jesús del Monte (179 m/Ma. y 52 m/Ma. respectivamente; Guzmán, y otros 2004) la han enterrado a una profundidad en la cual la materia orgánica pudo haberse madurado en poco tiempo.

Los tres intervalos erosivos identificados en esta zona son:

1. Paleoceno Temprano
2. Mioceno Medio
3. Pleistoceno Temprano

Utilizando las ecuaciones de Guidish y otros (1985), el período de erosión más importante ocurre durante el Mioceno Temprano con una disminución estimada del espesor de la Formación El Carmen de 124m.

En la Figura 21 se observa la curva de enterramiento para Carmen de Bolívar con los espesores máximos registrados por Guzmán y otros (2004) y asumiendo que en las discordancias la cuenca siguió enterrándose a la misma tasa de depositación de la formación infrayacente.

En esta curva se observa que la Formación Cansona entra a la ventana de generación hace 53Ma aproximadamente y se sobre madura hace 20Ma, lo cual contrasta fuertemente con la curva de valores mínimos y confirma la incertidumbre significativa que hay entre las curvas.

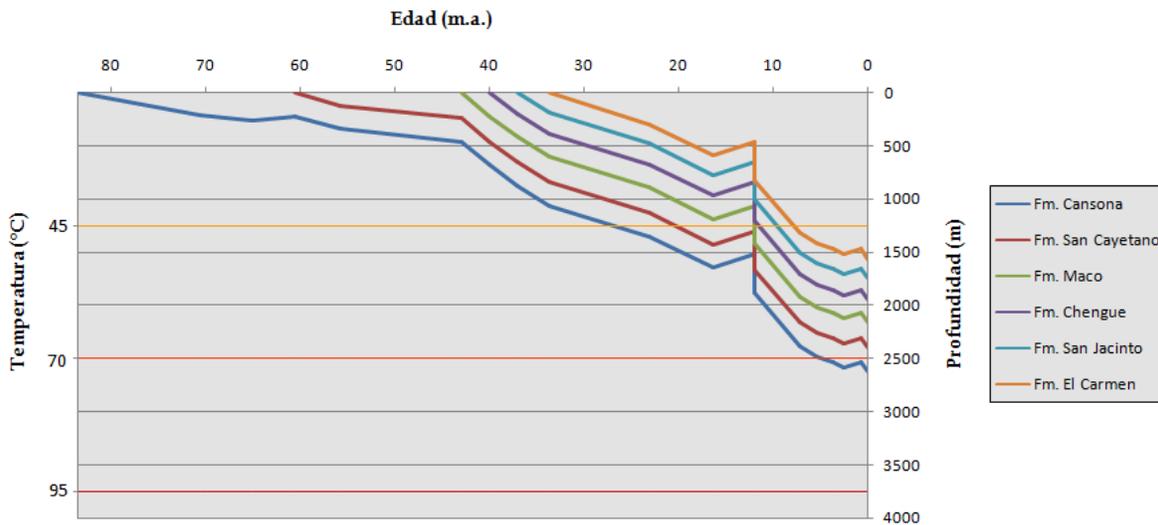


Figura 20. Curva de enterramiento para el Bloque Carmen usando los espesores mínimos reportados para cada unidad.

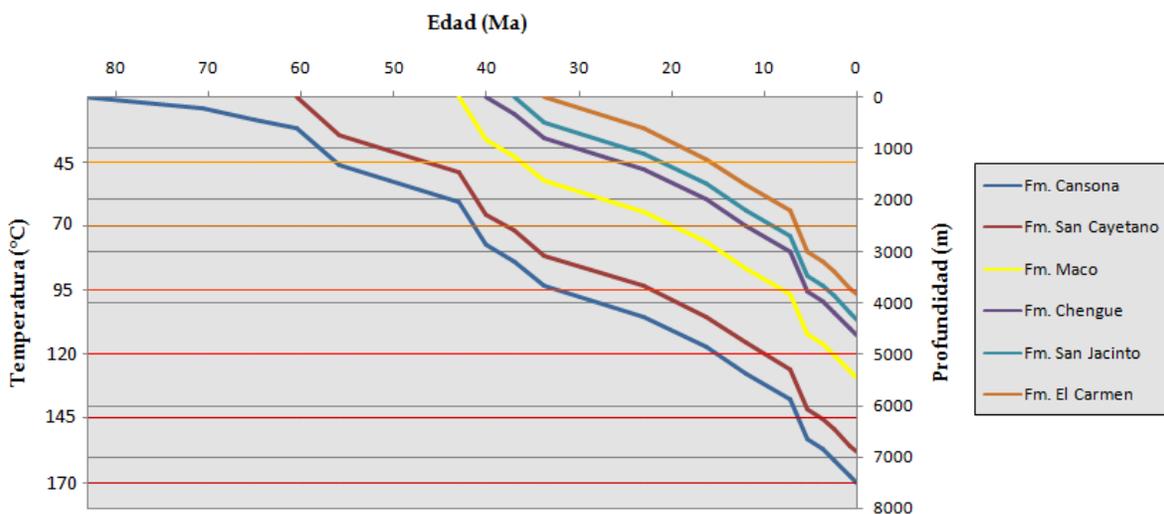


Figura 21. Curva de enterramiento para el Bloque Carmen usando los espesores máximos reportados para cada unidad.

Se observan dos factores importantes que generan una incertidumbre adicional en las curvas de enterramiento de esta zona:

Guzmán y otros (2004) indican que las formaciones Maco y Chengue son contemporáneas y solo corresponden a cambios faciales laterales de la cuenca, sin embargo, Reyes & Zapata, (2001) colocan la Formación Chengue encima de Maco, de esta forma se usa en las curvas de enterramiento realizadas para esta zona.

La gran diferencia entre las curvas propuestas hace evidente la incertidumbre que existe en la información recopilada, la cual impide definir con exactitud el potencial petrolífero de la cuenca, razón principal para la consecución de este proyecto, donde convergen el análisis de trazas de fisión y la reflectancia de la vitrinita.

El análisis de trazas de fisión ubica en el tiempo el momento en el cual cierto estrato rocoso alcanza una determinada temperatura, para el caso de los apatitos, entre 60°C y 120°C, muy cerca a la ventana de generación de hidrocarburos; la medición de la reflectancia de la vitrinita determina el grado de madurez térmica de la materia orgánica presente dentro del sedimento. Estas dos técnicas en conjunto, conforman una óptima herramienta para determinar el potencial real de la cuenca para la producción de crudo.

---

## 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 Unión Temporal B&G (2006) en el área de Sinú-San Jacinto.

Durante los días 17 al 26 de Octubre de 2008, se realizó el muestreo de campo en los municipios de Luruaco, Arroyo de Piedra, Repelón y Carmen de Bolívar, utilizando las planchas a escala 1:25000 del IGAC: Plancha 24-I-C (Luruaco y Arroyo de Piedra), Plancha 24-III-A (Repelón), Plancha 38-III-C, Plancha 37-IV-D y Plancha 37-IV-B (Carmen de Bolívar). Las formaciones geológicas muestreadas corresponden a la nomenclatura utilizada en los trabajos de Reyes & Zapata (2001), Guzmán y otros (2004), y la Unión Temporal B&G (2006), correspondientes a la Formación Cansona, Formación San Cayetano, Formación Luruaco, Formación Pendales y Formación Arroyo de Piedra. Para el área que corresponde a Luruaco, Arroyo de Piedra y Repelón se tomó como base la cartografía elaborada por Guzmán y otros (1998), Plancha 23 Cartagena y por Reyes & Zapata (1998), Plancha 24 Sabanalarga a escala 1:100000, en esta zona se tomaron muestras de las Formaciones Luruaco, Pendales y Arroyo de Piedra. En la zona que corresponde al municipio de Carmen de Bolívar y Montes de María se tomó como base la cartografía elaborada por Guzmán y otros (1998), Plancha 36-37 María La Baja, a escala 1:100000. En esta área se tomaron muestras de las Formaciones Cansona y San Cayetano en los Montes de María en cercanías al Cerro Cansona.

La descripción de las muestras se realizó con base en la clasificación textural y composicional propuesta por Folk (1974) para rocas siliciclásticas. 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 de la cuenca Sinú - San Jacinto 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 está discriminada mediante dos siglas: una correspondiente a la Muestra Geológica para la Litoteca Nacional (ML), con un peso de 4Kg, y otra denominada 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.: SSJ-AFTA MT 01 ó SSJ- RV ML 01), georreferenciadas y orientadas de base a tope.

Se tenía presupuestado recolectar por formación 12 muestras para análisis de Reflectancia de Vitrinita (RV) y 6 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 número requerido de muestras, se tomaron rípios 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 rípios que se denominan Zanja Húmeda; el secado al horno al cual son sometidos los de Zanja Seca los hacen inservibles para análisis de reflectancia.

## INFORME FINAL

- 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 1 y Tabla 2).

**Tabla 1. Información de los pozos evaluados para la toma de muestras.**

Cuenca	Pozo	Núcleos	Ripios	Registro Grafico Compuesto (RGC)	Observaciones
Sinú-San Jacinto	Ayhombe 1	Si	Si	Si	No cubre las formaciones de interés, Ciénaga de Oro es la formación más antigua.
Sinú-San Jacinto	Bálsamo 1	No	No	No	//
Sinú-San Jacinto	Bálsamo 2	No	Si	No	Los ripios disponibles corresponden a Zanja Seca (ZS).
Sinú-San Jacinto	Caracolí - 1	No	Si	Si	Los ripios son aptos para el muestreo. El RGC aparece en la base de datos pero no está en el archivo.
Sinú-San Jacinto	Guepaje 1	Si	Si	Si	No cubre las formaciones de interés, Ciénaga de Oro es la formación más antigua.
Sinú-San Jacinto	Guepaje 2	Si	Si	Si	No cubre las formaciones de interés, Ciénaga de Oro es la formación más antigua.
Sinú-San Jacinto	Guepaje 3	Si	Si	Si	No cubre las formaciones de interés, Ciénaga de Oro es la formación más antigua.
Sinú-San Jacinto	Molinero 3X	Si	Si	No	La única formación corazonada es Maco (32ft), y los ripios existentes corresponden a Zanja Seca (ZS).
Sinú-San Jacinto	Polonuevo- 1	No	Si		Los ripios disponibles corresponden a Zanja Seca (ZS).
Sinú-San Jacinto	Porquera - 1	Si	Si	Si	Los núcleos tienen 1/3 o menos de muestra, los ripios son de Zanja Seca (ZS).
Sinú-San Jacinto	Tubará - 1	No	Si	No	Los ripios disponibles corresponden a Zanja Seca (ZS).

**Tabla 2. Trabajos de geología de superficie y número de muestras tomadas.**

Nombre del proyecto	ID Proyecto	Numero de Muestras
CINTURON PLEGADO SAN JACINTO	SANJACINTO	26
CONTROL Y REVISION DE LA CARTOGRAFIA GEOLOGICA Y MUESTREO DE ROCAS. CUENCAS VIM Y SINU.	SINU0099	10
CRONOLOGIA DE LAS SECUENCIAS BIOESTRATIGRAFICAS DEL CENOZOICO DEL VALLE INFERIOR DEL MAGDALENA-2003	VIMBIO2003	7

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).

## 8.2 LOCALIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE MUESTREO

### 8.2.1 Formación Cansona

Esta formación aflora únicamente en el Cerro Cansona, en los Montes de María, al occidente de la población de Carmen de Bolívar. Para llegar a este cerro se toma la carretera que va de Carmen de Bolívar a la población de Caracolí. Aproximadamente 5km después de esta población se llega al inicio de la poligonal levantada sobre la carretera por la Unión Temporal B&G (2006). La poligonal llega a la cima del cerro y continúa por la trocha que conduce a la Vereda Huamanga.

Se realizaron 12 estaciones (de la SSJ-42 a SSJ-53) y se recogieron en total 13 muestras, de las cuales 3 son para análisis de AFT y 10 son para análisis de RV. La escasez de muestras para AFT se debe a la litología de esta formación, predominantemente arcillolitas, cherts y lodolitas. Dentro de la zona los afloramientos sobre los cuales se llevó a cabo la recolección de muestras se presentan sobre la carretera y se encuentran meteorizados.

### 8.2.2 Formación San Cayetano

La sección fue levantada en el Arroyo Alférez al sur del Cerro Cansona en los Montes de María, al occidente de la población de Carmen de Bolívar. Para llegar a este arroyo se toma la carretera que va de Carmen de Bolívar a la población de Caracolí, antes de llegar a la cima del Cerro que está en la vía hacia la vereda Huamanga, se toma un desvío hacia el sur, por un sendero que a 2km aproximadamente cruza el arroyo. Finalmente se continúa por el arroyo aguas para llegar al inicio de la poligonal levantada por la Unión Temporal B&G (2006).

Se realizaron 6 estaciones (SSJ-55 a SSJ-60) y se recolectaron seis muestras para análisis de AFT, pero no se recolectaron muestras para RV, debido a las escasez de afloramientos de lodolitas y las zonas donde se identificaron estratos de sedimento fino, se encontraban en un estado avanzado de meteorización.

### **8.2.3 Formación Luruaco**

Con esta unidad hubo problemas para encontrar la poligonal y columna presentadas por la Unión Temporal B&G (2006) porque estos autores determinan que la poligonal se encuentra sobre el Arroyo Zapata. Una vez se localizaron las coordenadas exactas sobre las cuales trabajó la Unión Temporal B&G (2006) se estableció que realmente esta poligonal se encuentra sobre el Arroyo Empolva, el cual constituye un afluente del Arroyo Zapata. Para llegar al Arroyo Empolva se debe desviar por una trocha hacia la derecha de la carretera principal entre Luruaco y Repelón 2km antes de llegar a Repelón. Se toma la carretera paralela al Canal hacia el occidente y después de un kilómetro y medio se toma el primer carreteable que cruza la carretera del Canal, hacia el noroccidente. Por esta trocha se deben recorrer 3 km aproximadamente hasta llegar al cruce de la trocha con el arroyo. Finalmente desde el cruce se coge por el arroyo aguas arriba y a un kilómetro y medio aproximadamente, se llega al inicio de la poligonal levantada por la Unión Temporal B&G (2006).

En este arroyo se realizaron 14 estaciones (de la SSJ-28 a SSJ-41) en las cuales se recolectaron 17 muestras, de las cuales seis son para análisis de AFT y once son para RV. Las características litológicas de esta formación permitieron la recolección de la totalidad de las muestras presupuestadas.

### **8.2.4 Formación Pendales**

El muestreo de esta unidad se realizó en el Arroyo Henequén, al norte de la población de Repelón, donde la Unión Temporal B&G (2006) realizó la cartografía de esta formación. El arroyo cruza la carretera principal que va desde Luruaco a Repelón, 3Km antes de llegar a Repelón por el costado Noroccidental. El inicio de la poligonal realizada por la Unión Temporal B&G (2006) se encuentra a 2500m aproximadamente aguas arriba del cruce del arroyo con la carretera, por el cual se puede llegar por un sendero paralelo al curso del arroyo.

En esta formación se realizaron seis estaciones (de la SSJ-22 a SSJ-27) y se recolectaron en total 10 muestras, de las cuales seis son para análisis de AFT y cuatro para RV. El déficit de muestras para el análisis de RV se debe a que la Formación Pendales (predominantemente conglomerados) no presenta la litología requerida para las muestras de RV en los afloramientos observados en el Arroyo Henequén.

### **8.2.5 Formación Arroyo de Piedra**

Las muestras correspondientes a la parte superior de esta formación se recolectaron en el Arroyo Casa Vieja (siguiendo la sección estratigráfica levantada por la Unión Temporal

B&G, 2006), al norte del corregimiento Arroyo de Piedra. Al arroyo se llega por la carretera La Cordialidad, hasta Arroyo de Piedra, se toma la entrada al corregimiento ubicada en el extremo norte, luego se toma el primer desvío al norte y se sigue la carretera 800m aproximadamente, hasta encontrar el cruce con el arroyo. El inicio de la poligonal se encuentra 550m, aguas arriba del cruce del arroyo y la carretera.

En el arroyo se recolectaron cinco muestras que no se encuentran dentro de la poligonal de la Unión Temporal B&G (2006) (SSJ-AFTA01, SSJ-RV01 a SSJ-RV04) por lo que en esta sección se levantó una poligonal y una columna estratigráfica esquemática nuevas, que se añadieron a la poligonal y columna estratigráfica base.

El segmento basal de la unidad fue levantado por la Unión Temporal B&G (2006) en el Cerro Juan del Toro, ubicado al noroccidente de la Población de Arroyo de Piedra, al occidente del nacimiento del Arroyo Casa Vieja. Para llegar a esta poligonal se toma la trocha que va paralela al Arroyo Casa Vieja desde el cruce del arroyo con la carretera hasta la cima del Cerro (400m de altura), la distancia aproximada es de 1800m.

En el cerro Juan del Toro no se encontraron la mayoría de los afloramientos ni el tipo de rocas presentados por la Unión Temporal B&G (2006) en su poligonal. Los pocos afloramientos presentes se encontraban altamente meteorizados, por lo que solo se recolectaron dos muestras que cumplían con las características especificadas para cada análisis. Adicionalmente se recolectaron dos muestras testigo para demostrar el estado de los afloramientos.

En esta formación se recolectaron en total siete muestras para análisis de AFT (cinco en el Arroyo Casa Vieja, dos en La poligonal del Cerro Juan del Toro) pero sólo cinco muestras para RV, debido la escasez y meteorización de afloramientos de sedimento fino expuestos en el Arroyo Casa Vieja y el Cerro Juan del Toro. En total se realizaron 21 estaciones (de la SSJ-1 a SSJ-16 en el Arroyo Casa Vieja y de la SSJ-17 a SSJ-21 en el Cerro Juan del Toro) en las que se incluyen los afloramientos en los que se recolectaron muestras y puntos de control de la poligonal sobre el arroyo y el cerro Juan del Toro.

---

## 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 $\mu$ 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 20, 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 (Figura 22).

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.

Posteriormente la fracción obtenida fue tamizada, utilizando los tamices malla 30 (apertura de 600 $\mu$ m), malla 40 (apertura de 425 $\mu$ m) y malla 80 (apertura de 180 $\mu$ 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 $\mu$ m se denominaron FRACCION FINA, los granos entre 180 y 425 $\mu$ m se nombraron FRACCION MEDIA y los granos con tamaños superiores a 425 $\mu$ 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.

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<sup>3</sup>. 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/cm<sup>3</sup>. En este caso se separan los circones

(densidad de  $4.5\text{g/cm}^3$ ) de los apatitos (densidad de  $3.15 - 3.2\text{g/cm}^3$ ) y estos a su vez de los minerales más livianos que aun estén presentes en esta fracción.

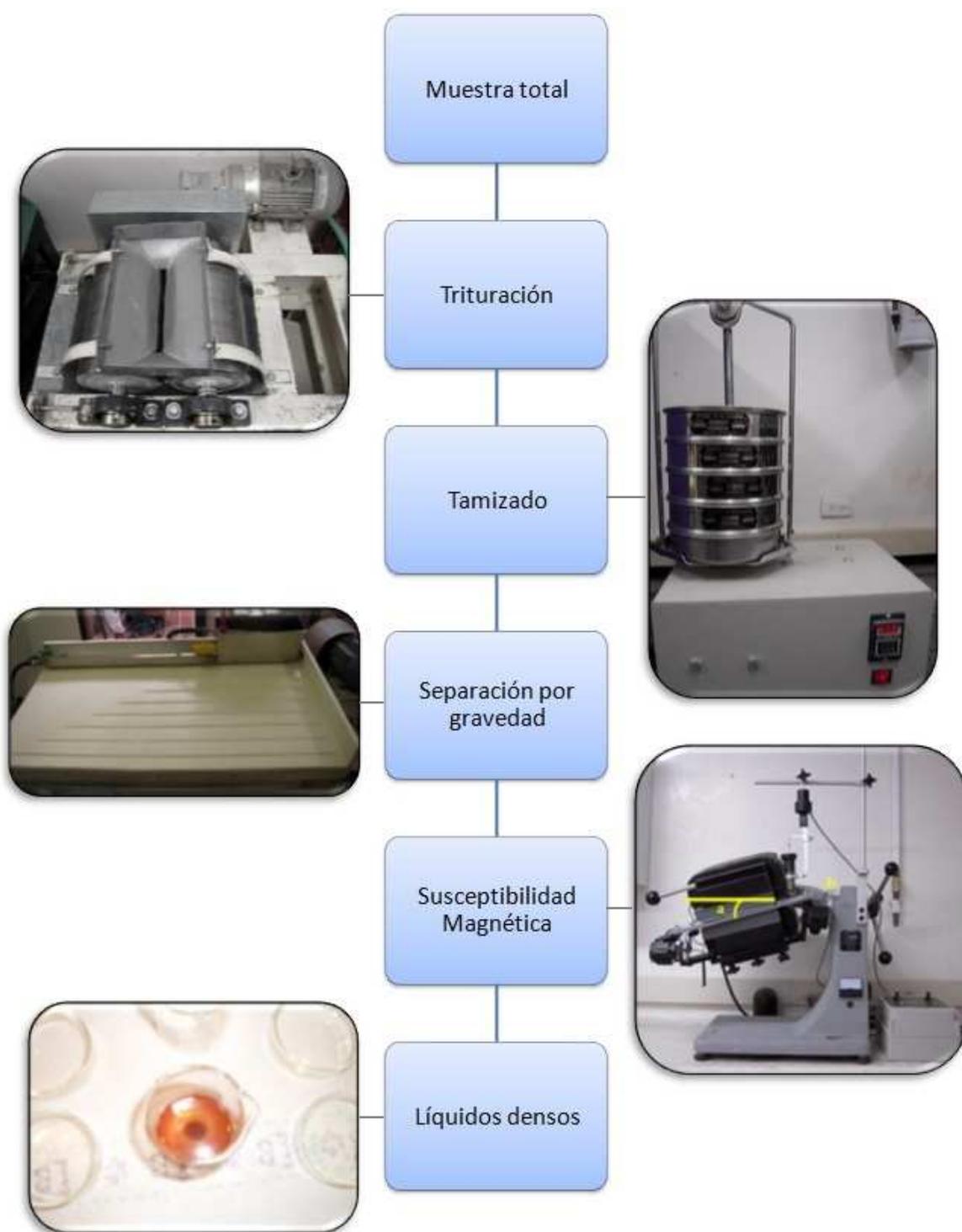


Figura 22. Metodología de preparación y separación de apatitos.

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/cm<sup>3</sup> 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/cm<sup>3</sup> y se procede de la misma forma que en el paso anterior. En esta ocasión los minerales que se hundan 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 y se clasifica dentro de los rangos: abundante - moderada - pobre - muy pobre (Tabla 3).

Tabla 3. 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		
SSJ-AFTA-MT-01	X	X				Arroyo de Piedra	Caliza
SSJ-AFTA-MT-03	X			X		Arroyo de Piedra	Caliza
SSJ-AFTA-MT-04	X	X				Arroyo de Piedra	Caliza
SSJ-AFTA-MT-06	X	X				Arroyo de Piedra	Caliza
SSJ-AFTA-MT-08	X	X				Pendales	Conglomerado
SSJ-AFTA-MT-10	X	X				Pendales	Conglomerado
SSJ-AFTA-MT-11	X	X				Pendales	Conglomerado
SSJ-AFTA-MT-13	X	X				Pendales	Conglomerado
SSJ-AFTA-MT-14	X	X				Luruaco	Arenisca
SSJ-AFTA-MT-16	X	X				Luruaco	Arenisca
SSJ-AFTA-MT-17	X	X				Luruaco	Arenisca
SSJ-AFTA-MT-19	X	X				Luruaco	Arenisca
SSJ-AFTA-MT-20	X	X				Cansona	Arenisca
SSJ-AFTA-MT-21	X	X				Cansona	Arenisca
SSJ-AFTA-MT-22	X	X				Cansona	Arenisca
SSJ-AFTA-MT-23	X	X				San Cayetano	Conglomerado
SSJ-AFTA-MT-25	X	X				San Cayetano	Conglomerado
SSJ-AFTA-MT-26	X	X				San Cayetano	Arenisca
SSJ-AFTA-MT-27	X	X				San Cayetano	Arenisca
SSJ-AFTA-MT-28	X	X				San Cayetano	Arenisca

### 9.3 MEDICIÓN DE LA EDAD POR TRAZAS DE FISIÓN

De la fisión nuclear natural del isótopo <sup>238</sup>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

tramo dañado dentro de su estructura cristalina, a lo largo de la trayectoria de las dos partículas, denominada Trazas de Fisión Espontanea (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  $^{238}\text{U}$  en el mismo que aún no se ha fisionado (Ecuación 1). Esta relación se obtiene contando la trazas de fisión espontaneas contenidas un grano de apatito, con la ayuda de un microscopio óptico, y midiendo el contenido restante de  $^{238}\text{U}$  por medio de un LA - ICP - MS (Laser Ablation - Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry).

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

**Ecuación 1.** Ecuación de la edad por Trazas de Fisión de una población n de apatitos.  $\lambda_d$  = constante de decaimiento total de  $^{238}\text{U}$ .  $\zeta_{MS}$  = factor de calibración  $\zeta$  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 espontaneas contadas en el área  $\Omega$ .  $p_i = (^{238}\text{U}/^{43}\text{Ca})$  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  $14\text{nm}$  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  $21^\circ\text{C}$ .

#### 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  $10^\circ$  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  $^{252}\text{Cf}$ , lo que eleva la calidad y precisión de los datos recolectados (Figura 23). 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.

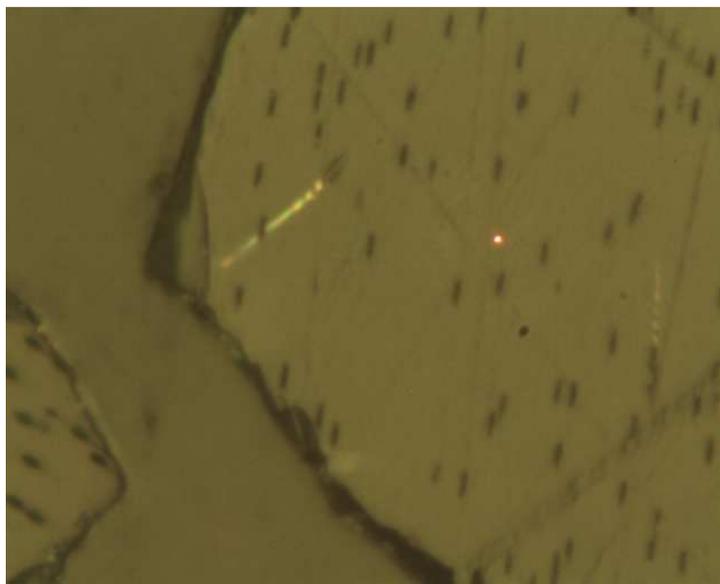


Figura 23. Traza Confinada en Apatito irradiado con  $^{252}\text{Cf}$ .

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):

- $D_{\text{Par}}$ .
- El contenido de  $\text{Cl}^-$ : 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  $\alpha$  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 24).

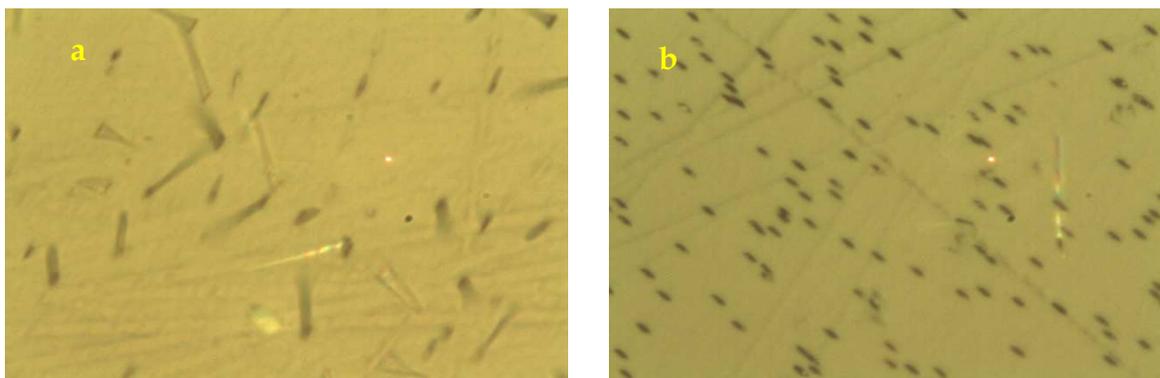


Figura 24. Figuras de Corrosión (a). Figuras de corrosión previas al bombardeo con  $^{252}Cf$ . (b) Figuras de Corrosión después de la irradiación con  $^{252}Cf$ .

---

## 10 REFLECTANCIA DE VITRINITA

### 10.1 METODOLOGIA

Las muestras recolectadas en la fase de campo con referencia SSJ-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 50 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 25).

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 $\mu$ m, FRACCIÓN MEDIA a la que se encuentra entre 830 $\mu$ m y 415 $\mu$ m, y FRACCIÓN FINA a la que está por debajo de 430 $\mu$ m.

Para aumentar la relación materia orgánica/materia mineral, en cada una de las muestras se procedió a atacar con ácido fluorhídrico 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 30%, razón por la cual se procedió a separarla de la materia mineral restante, sumergiéndola en una solución de cloruro de zinc con una densidad aproximada de 1.9g/cm<sup>3</sup>, obteniendo pobres resultados; la cantidad de materia orgánica concentrada alcanzó aproximadamente 1.5mg, suma insuficiente para realizar los análisis.

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 8000 RPM. 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 0.8 cm 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 $\mu$ 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 de agua sobre la superficie.

### 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 ( $n_d=1.515$ ). 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.

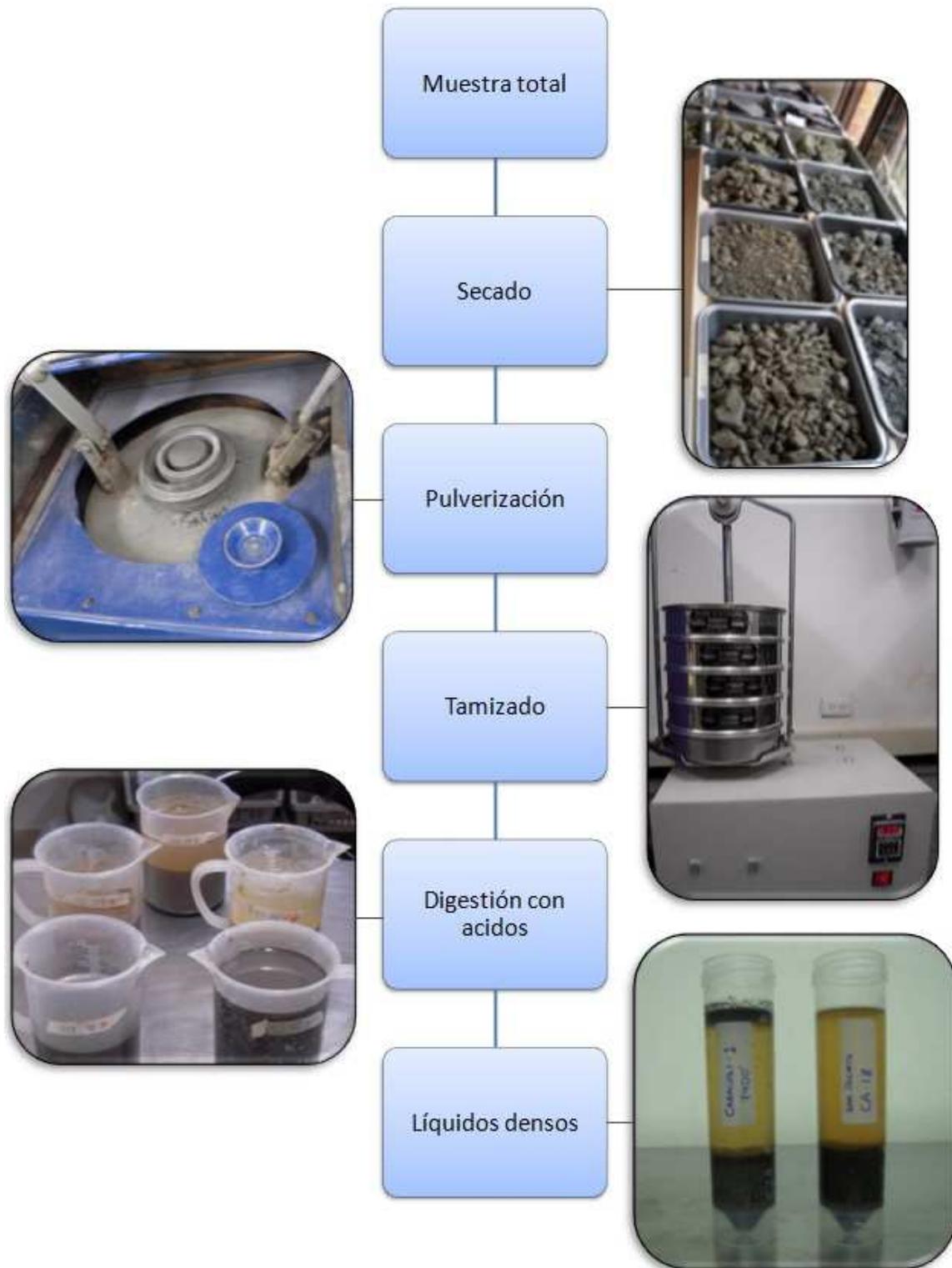


Figura 25. Metodología de preparación y concentración de materia orgánica dispersa.

## 11 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 11.1 TRAZAS DE FISIÓN EN APATITOS

En el momento en el que los cristales de apatito son depositados en la cuenca tienen un número desconocido de trazas heredadas que se han generado de acuerdo con la historia de enfriamiento de las rocas de las cuales provienen. Cuando los sedimentos han sido depositados y empiezan a enterrarse, las trazas de fisión en los apatitos comienzan a disminuir su longitud y su densidad, al experimentar temperaturas entre 60°C y 110°C, correspondientes a la zona de borrado parcial (Partial Annealing Zone - PAZ); como resultado del borrado, la edad de trazas de fisión es menor a la de depositación. En ausencia de otros procesos termales como plutonismo o flujo hidrotermal, el enterramiento de la roca a temperaturas menores que las de la zona de borrado parcial resulta en la preservación de la longitud de las trazas y la edad heredada, de forma que la edad de huellas de fisión será más antigua o muy cercana a la edad de depositación de la roca.

Con los datos de la Tabla 4 se realizó para el Bloque Luruaco la Figura 26 y para el Bloque Carmen la Figura 27, las cuales relacionan la edad estratigráfica, la edad de trazas de fisión, el valor de  $D_{par}$  y la longitud de las trazas de fisión con la posición estratigráfica en profundidad de las muestras colectadas en la zona exhumada de la Cuenca Sinú-San Jacinto. A partir de estas se puede concluir que las edades de las trazas de fisión son un poco más antiguas o muy cercanas a las edades estratigráficas establecidas para cada formación, a excepción de las muestras más antiguas en la sección, correspondientes a las Formaciones Luruaco y Cansona, cuya edad de trazas de fisión es entre 5Ma y 10Ma menor que la edad de depositación. Esta observación sugiere que la rocas sufrieron un calentamiento muy leve que tan solo acercó los apatitos presentes en las rocas a la PAZ.

La longitud de las trazas de fisión de las formaciones del Bloque Luruaco oscila entre los 13.5µm y 14µm, mientras que en el Bloque Carmen oscila entre 13.8µm y 14.5µm. En el primer bloque se aprecia una tendencia al aumento de la longitud de las trazas a medida que se asciende estratigráficamente, indicando que las muestras recolectadas al tope de la columna alcanzaron temperaturas más bajas durante el enterramiento que las muestras de la base de la columna sedimentaria. En el bloque del Carmen de Bolívar no existe una tendencia definida de los datos, sin embargo se aprecia que los valores aumentan levemente con respecto a los anteriores, a pesar que las formaciones que allí afloran son más antiguas que las unidades del Bloque Luruaco.

INFORME FINAL

Tabla 4. 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
<b>Bloque Luruaco</b>											
SSJ-AFTA-MT-01	1669114,0	886914,8	110	Arroyo de Piedra	38.5± 4.5	36	411	51.2± 2.9	2.15	13.63±0.10	162
SSJ-AFTA-MT-03	1669104,0	887253,8	75	Arroyo de Piedra	38.5± 4.5	13	127	59.8± 5.6	2.40	13.98±0.26	37
SSJ-AFTA-MT-04	1669082,1	887308,8	76	Arroyo de Piedra	38.5± 4.5	37	549	49.8± 2.5	2.12	13.58±0.12	117
SSJ-AFTA-MT-06	1669325,0	885358,8	387	Arroyo de Piedra	38.5± 4.5	40	890	51.4± 2.2	2.26	13.98±0.09	204
SSJ-AFTA-MT-08	1658396,1	883754,0	155	Pendales	38.5± 4.5	40	491	46.1±2.4	1.97	13.37±0.10	188
SSJ-AFTA-MT-10	1658318,1	883835,0	155	Pendales	38.5± 4.5	40	789	49.9+/- 2.2	2.14	13.74±0.10	210
SSJ-AFTA-MT-11	1658418,1	883974,0	148	Pendales	38.5± 4.5	40	636	52.4+/- 2.5	1.97	13.70±0.09	203
SSJ-AFTA-MT-13	1658217,1	884380,0	145	Pendales	38.5± 4.5	39	607	52.4+/- 2.6	2.40	14.05±0.10	204
SSJ-AFTA-MT-14	1656769,1	880823,1	250	Luruaco	59±3	40	1057	54.8+/- 2.2	2.33	13.57±0.09	204
SSJ-AFTA-MT-16	1656701,1	880865,1	240	Luruaco	59±3	40	820	51.5+/- 2.3	2.61	14.40±0.09	202
SSJ-AFTA-MT-17	1656623,1	880928,1	227	Luruaco	59±3	40	1767	51.8+/- 1.8	2.21	13.45±0.08	206
SSJ-AFTA-MT-19	1656567,1	880989,1	222	Luruaco	59±3	39	1225	51.1+/- 2.0	2.17	13.59±0.09	205
<b>Bloque Carmen</b>											
SSJ-AFTA-MT-23	1568743,1	869198,0	470	San Cayetano	52.5±9.5	40	413	43.3+/- 2.6	1.99	13.97±0.13	100
SSJ-AFTA-MT-25	1568680,1	869659,0	457	San Cayetano	52.5±9.5	40	455	69.0+/- 3.7	2.02	14.07±0.09	205
SSJ-AFTA-MT-26	1568651,1	869707,0	449	San Cayetano	52.5±9.5	40	478	50.4+/- 2.7	2.01	13.93±0.09	200
SSJ-AFTA-MT-27	1568648,1	869751,0	449	San Cayetano	52.5±9.5	38	307	60.6+/- 3.8	2.44	14.36±0.08	201
SSJ-AFTA-MT-28	1568550,1	869821,0	491	San Cayetano	52.5±9.5	37	336	54.0+/- 3.3	1.97	13.86±0.09	204
SSJ-AFTA-MT-20	1569365,1	869910,0	610	Cansona	75.5±10.5	40	293	62.5+/- 4.0	2.14	14.11±0.08	200
SSJ-AFTA-MT-21	1569979,0	869419,0	633	Cansona	75.5±10.5	39	203	67.3+/- 5.1	2.51	14.52±0.08	162
SSJ-AFTA-MT-22	869419,0	869462,0	602	Cansona	75.5±10.5	30	58	95.0+/- 12.7	2.54	14.01±0.17	41

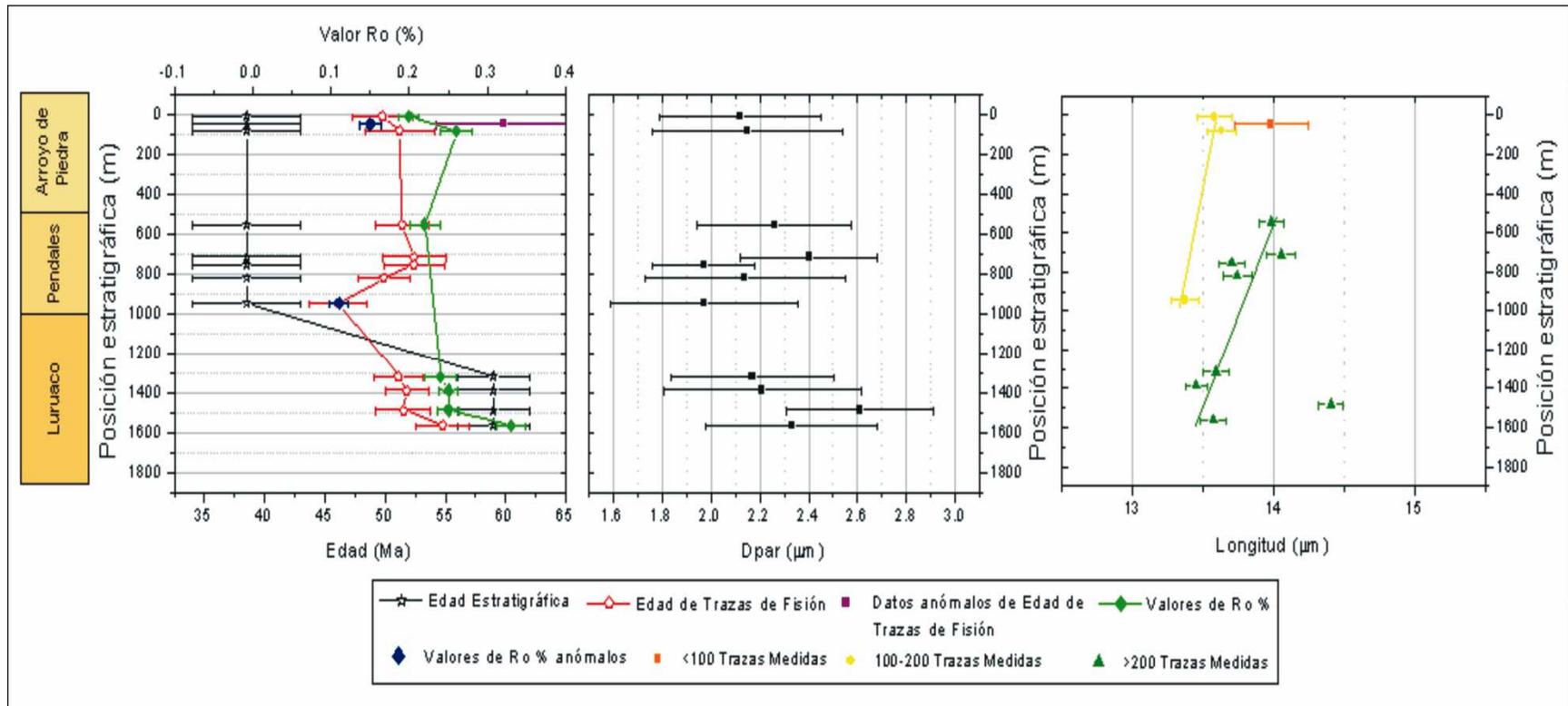


Figura 26. Valores de trazas de fisión y reflectancia de vitrinita (R0) graficadas contra la posición estratigráfica en profundidad, para la muestras del Bloque Luruaco.

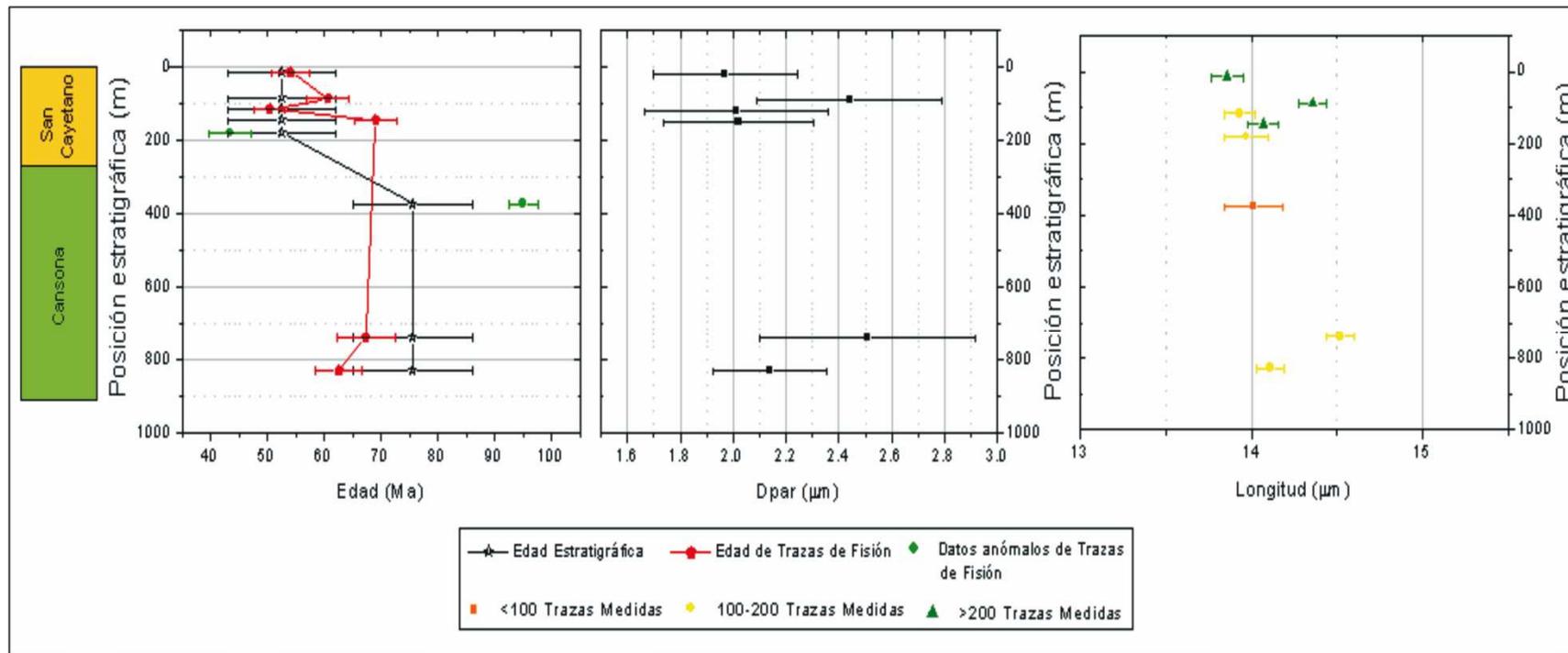


Figura 27. Valores de trazas de fisión y reflectancia de vitrinita (Ro) graficadas contra la posición estratigráfica en profundidad, para la muestras del Bloque Carmen.

Características similares se presentan en el estudio de Coutand y otros (2006): (a) las edades determinadas por las trazas de fisión son mayores, iguales o muy cercanas a las edades de depositación; y (b) Ambas, las edades centrales y de pico, se incrementan sistemáticamente hacia la base de la sección. Estos resultados indican que los apatitos en los sedimentos analizados no alcanzaron durante el enterramiento la zona de borrado parcial, entre 60°C y 110°C.

Se puede concluir entonces que las trazas presentes en los apatitos que componen cada una de estas formaciones son heredadas, ya que el borrado de las huellas ha sido parcial a casi nulo. Por lo tanto la historia que se puede deducir de los apatitos detríticos de estas formaciones es la de enfriamiento, exhumación y erosión de las rocas fuente pero desafortunadamente no es posible trazar la historia térmica de estos sedimentos después de su depositación que era uno de los objetivos de este estudio.

## 11.2 REFLECTANCIA DE VITRINITA

De las 50 muestras procesadas, únicamente 6 de superficie y 11 provenientes de cortes del pozo Caracolí - 1 resultaron con contenidos de vitrinita suficientes para poder determinar el porcentaje de reflectancia de la luz, Ro% (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados de las mediciones de reflectancia de vitrinita.

Muestra ID	Reflectancia Random (%)	Desviación Estándar	Unidad Litoestratigráfica
SSJ 06	0,11	0,012	Fm. Pendales
SSJ 12	0,33	0,019	Fm. Luruaco
SSJ 14	0,25	0,014	Fm. Luruaco
SSJ 15	0,25	0,011	Fm. Luruaco
SSJ 16	0,25	0,019	Fm. Luruaco
SSJ 19	0,24	0,020	Fm. Luruaco
Caracolí 5150	0,26	0,021	Fm. Arroyo de Piedra
Caracolí 5300	0,15	0,016	Fm. Arroyo de Piedra
Caracolí 5450	0,15	0,014	Fm. Arroyo de Piedra
Caracolí 5600	0,10	0,022	Fm. Arroyo de Piedra
Caracolí 6200	0,13	0,012	Fm. Arroyo de Piedra
Caracolí 6350	0,20	0,013	Fm. Arroyo de Piedra
Caracolí 6650	0,17	0,017	Fm. Arroyo de Piedra
Caracolí 6950	0,24	0,012	Fm. Arroyo de Piedra
Caracolí 7100	0,22	0,020	Fm. Arroyo de Piedra
Caracolí 7400	0,15	0,018	Fm. Luruaco
Caracolí 8300	0,20	0,013	Fm. Luruaco

Los resultados de reflectancia de vitrinita de las muestras tanto de afloramientos como del pozo Caracolí -1 están por debajo de 0.3% el cual se considera como el umbral inferior de confiabilidad de la técnica, esto implica que la materia orgánica presente en la muestra es huminita, un precursor de la vitrinita en muestras poco cocinadas; las mediciones realizadas sobre huminita tienen una alta variación debido a la baja alteración térmica que ha sufrido la muestra, la cual resulta en una gran heterogeneidad de los macerales presentes y de la composición del querógeno, material precursor de los hidrocarburos. Con valores tan bajos solo se puede inferir que la materia orgánica ha sufrido muy poca alteración térmica post-deposicional y por lo tanto se encuentra inmadura, con temperaturas por debajo de la ventana de generación de hidrocarburos.

### 11.3 ANALISIS DE MODELAMIENTO INVERSO PARA TRAZAS DE FISION

Utilizando el programa Hefty® se puede buscar un modelo de evolución termal que se ajuste a los datos obtenidos para cada una de las muestras, en el caso en que estas hayan sufrido acortamiento de trazas, es decir que pasen de 60°C, ya que de no ser así la distribución de longitudes es la que tenía la muestra en el depósito y por lo tanto no refleja una historia de enterramiento. De acuerdo con la edad estratigráfica de la formación a la cual la muestra pertenece, la edad de trazas de fisión de la misma y el conocimiento de la edad del área de aporte, se pueden establecer ciertas restricciones para las rutas que pueda tomar el modelo.

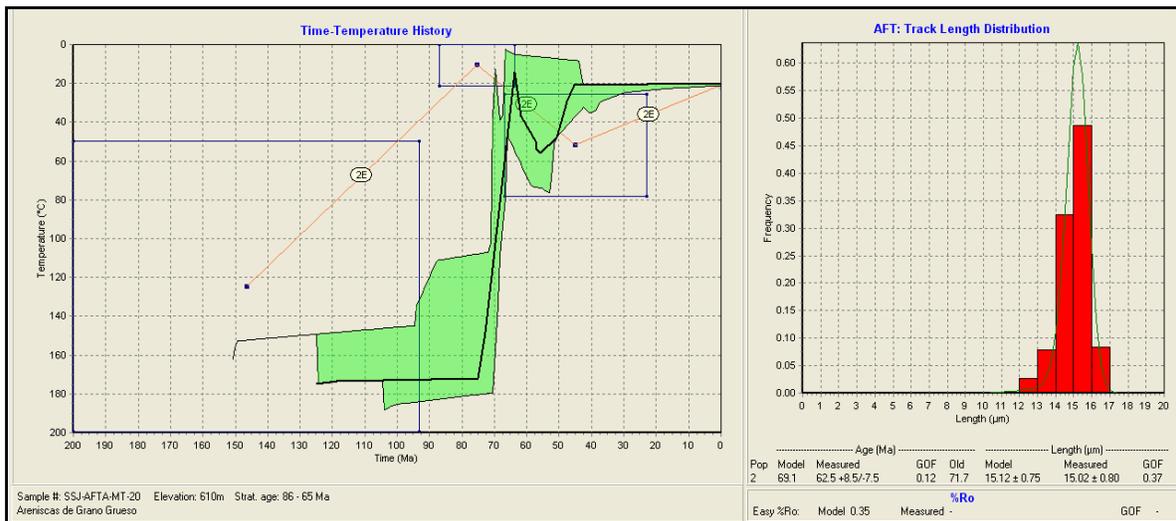
La Figura 28 muestra un ejemplo del modelamiento inverso realizado con el software Hefty® para una muestra localizada a la base de la Formación Cansona. Para ver más detalles sobre el funcionamiento del software, ejemplos de aplicación y sus calibraciones se recomienda revisar el manual publicado por Ketcham (2008).

En cuanto a las edades de trazas de fisión se identifican edades heredadas de la roca fuente, lo que confirma una vez más un grado de calentamiento post-deposicional muy bajo. El  $D_{par}$  medido en cada una de las muestras revela un valor alto y por lo tanto una alta resistividad al borrado. Esta sería otra razón por la cual la cuenca necesitaría mayor temperatura para un borrado parcial de las trazas.

La restricción predeposicional tiene un rango muy amplio, tanto de tiempo como de temperatura, debido a la poca información de proveniencia de los sedimentos de esta cuenca. Por otro lado, de acuerdo con Gálvez (1998) las rocas fuente de las formaciones Cansona y San Cayetano (estribaciones norte de las Cordilleras Central y Occidental) varían en edad desde el Paleozoico hasta el Cretácico. La poca información solo permite suponer que pueden existir rocas fuente de diferentes edades (en este caso desde los 200Ma) que pudieron estar a temperaturas entre 50°C y 200°C.

La existencia de edades heredadas de las trazas de fisión solo permite asegurar que las formaciones muestreadas en este estudio en los afloramientos de Luruaco y Carmen de Bolívar no alcanzaron las temperaturas de borrado parcial de las trazas de fisión, PAZ, de tal manera que no es posible determinar la historia térmica post-deposicional de los

sedimentos muestreados. Las longitudes y sus distribuciones por lo tanto provienen del último evento termal que haya sufrido la roca fuente.



**Figura 28. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-20 localizada en la base de la Formación Cansona.**

El carácter detrítico de las muestras evidencia que la variabilidad de edades puede ser muy alta y el número de poblaciones depende del número de rocas fuente que aportaron a la cuenca durante el periodo de depositación de cada formación. Esto se confirma cuando el Hefty® hace la prueba Chi Cuadrado ( $\chi^2$ ) y los datos tienen una dispersión amplia; por lo tanto la edad promedio que arrojan los modelos tampoco es confiable para determinar una historia termocronológica a partir del momento de la depositación de cada unidad.

Solo las muestras más antiguas de cada una de las columnas en los Bloques Luruaco y Carmen presentan un borrado parcial, debido a que presentan edades de trazas de fisión más jóvenes que sus edades de depositación. No obstante son edades muy cercanas a la depositación y las longitudes medidas de las trazas son largas, por lo tanto confirman un bajo enterramiento de la pila sedimentaria llegando la base de la columna a temperaturas máximas entre 40°C y 60°C.

Los resultados obtenidos aparentemente contradicen lo propuesto por Benguigui y otros (2004), cuyo modelo estructural favorece la madurez termal de la Formación Cansona, además de las evidencias de generación que ofrecen los múltiples manaderos de hidrocarburos localizados en la cuenca; esta disparidad podría explicarse así:

Los afloramientos de Cerro Cansona muestreados para este estudio pertenecen a capas delgadas de sedimentos oceánicos, que fueron rasgadas de la placa Caribe que se subduce y cabalgadas en una melange acrecionaria que jamás se enterró lo suficiente como para alcanzar la ventana de generación de hidrocarburos líquidos; el aceite observado en los manaderos superficiales sería producido a partir de fragmentos de la Formación Cansona que junto con la corteza oceánica se enterraron lo suficiente debajo de la Placa Sudamericana para alcanzar la ventana de generación de hidrocarburos.

---

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La sección muestreada en afloramientos de la zona exhumada de la cuenca Sinú-San Jacinto, no alcanzó temperaturas lo suficientemente altas como para generar hidrocarburos líquidos, tanto los datos de trazas de fisión en apatitos como la reflectancia de vitrinita sustentan dicha afirmación. Las zonas donde estos sedimentos no afloran posiblemente alcanzan las condiciones necesarias y suficientes para generar gas y/o aceite como se puede deducir de los cientos de manaderos superficiales existentes en el área.

Las muestras son apropiadas para termo-cronología detrítica, de tal manera que se puede llegar a conocer la historia del área fuente si se agrupan diferentes poblaciones de edades de trazas de fisión.

Uno de los objetivos principales, que era la integración de datos de reflectancia de vitrinita junto con edades obtenidas a partir de análisis de trazas de fisión no se cumplió en las formaciones del Bloque Carmen, debido al nulo recobro de materia orgánica de las muestras colectadas.

Se sugiere extender el estudio de la historia térmica usando los métodos descritos aquí a toda la cuenca, especialmente se recomienda el muestreo de cortes de perforación en pozos exploratorios y si es posible incluir también los núcleos existentes. Es claro que en la Cuenca Sinú-San Jacinto se han generado cantidades significativas de hidrocarburos líquidos como lo demuestra la existencia de cientos de manaderos; estos hidrocarburos son el producto de una maduración térmica de los sedimentos ricos en materia orgánica como la Formación Cansona y sus equivalentes, y esto requiere que los sedimentos alcancen la zona de borrado parcial de trazas en los granos de apatitos, PAZ. Esto se debe poder verificar con muestras del subsuelo.

Los análisis de proveniencia en la cuenca permitirían evaluar mejor la disposición geográfica de las áreas de aporte. Con esto se puede generar una mayor resolución en la edad de la roca fuente y en la temperatura máxima de enterramiento, ya que al conocer la longitud inicial y actual de las trazas heredadas se puede determinar cómo fue el comportamiento real de su borrado. También se podría complementar y rectificar las afirmaciones desarrolladas sobre como la tectónica del área afecta la historia termocronológica de la cuenca.

Estudios de Índice de Kübler en illitas servirían para calibrar los datos de reflectancia y ajustar la historia de enterramiento de la cuenca. Otro parámetro que se puede tener en cuenta en la mineralogía de arcillas son las relaciones illita-esmectita en los interestratificados que representarían la profundidad a la cual llegó la roca en esta cuenca y a su vez calibraría el Índice de Kübler para profundidades muy someras.

Análisis de U-Th/He en los apatitos de las formaciones más antiguas de las columnas en cada uno de los dos bloques, aumentarían la resolución de la historia de enterramiento que es posible evidenciar, debido a la sensibilidad del mismo a temperaturas entre 40°C y 80°C.

---

**BIBLIOGRAFÍA**

- ALEMÁN, A. Geología Del Petróleo, Geology and Hydrocarbon Evaluation of Northwest Colombia. Gulf Oil Exploration y Production Company. 1983.
- 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.
- ÁVILA, J.M. y MONROY, L.G. Geología y estratigrafía de la región Chalán – Don Gabriel, Departamento de Sucre. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1973.
- 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.
- BARRERA, R. Geología de las Planchas 16-17 Galerazamba y Barranquilla. INGEOMINAS. Bogotá. 1999.
- BARRERO, D., PARDO, A., VARGAS, C.A. y MARTINEZ, J. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a new proposal. ANH. Bogotá. 2007.
- BENGUIGUI, A.; DEVILLE E. y PAÉZ, A. Tectonic Framework, Kinematics of Deformation and Petroleum System Evaluation of the Offshore Sinú Accretionary Wedge. 2004
- BUCHELI, F. Proyecto Interpretación del Radar Sinú San Jacinto, Informe Final, ANH. Bogotá. 2002.
- BUENO, R. Guidebook to the geology of the Tubará region, Lower Magdalena Basin. En: Geology Field Trips, Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists. Bogotá. 1970.
- BÜRGL, H. Resumen de la Estratigrafía de Colombia. En: Informe 1248, INGEOMINAS Bogotá. 1957.
- BUTLER, J.W. Geology of Municipio de San Jacinto and parts of the municipios de San Juan Nepomuceno and El Carmen, Department of Bolivar. En: Texas Petroleum Company, Internal Report PA-18. 1942.
- CACERES, G. y PORTA, J. Contribución a la geología de la Serranía de San Jacinto entre Toluviejo y Chalán. Colombia S.A. y C.R.S. Soc. Geo. Francia. 1972
- CHENEVART, CH. Les dorsales transverses anciennes de Colombia et leurs homologues D' Amerique Latine. En: Ecl. Geol. Helv., Vol. 56 No. 2. Basel. 1963.
- CHEVRON OVERSEAS PETROLEUM INC. Northwestern Colombia Hydrocarbon Evaluation. Informe Geológico 1406 (ISN 15780), ECOPETROL. 1986.
- CLAVIJO, J. y BARRERA, R. Memoria explicativa de la geología de las planchas 44 Sincelejo y 52 Sahagún. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Bogotá. 2001.

- COUTAND I., y otros Propagation of orographic barriers along an active range front: Insights from sandstone petrography and detrital apatite fission track thermochronology in the intramontane Angastaco Basin, NW Argentina. *Basin Research* Vol 18, pp 1-26. 2006
- DONELICK, R; O'SULLIVAN P. y KETCHAM, R. Apatite Fission-Track Análisis. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, Vol 58, pp. 49-94. 2005
- DONELICK, R; KETCHAM, R; CARLSON, W. Variability of apatite fission-track Annealing kinetics: II. Crystallographic orientation effects. *Am Mineral* 84: 1224-1234. 1999.
- DUEÑAS, H. y DUQUE-CARO, H. Geología del cuadrángulo F-8. En: *Boletín Geológico* Vol. 24, No. 1, pp. 1-35, INGEOMINAS. Bogotá. 1981.
- 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*, pp. 108-121. 1962.
- DUQUE-CARO, H. Estilo estructural, diapirismo y episodios de acrecionamiento del terreno Sinú - San Jacinto en el Noroccidente de Colombia. En: *Boletín Geológico* Vol. 27, No. 2, INGEOMINAS. Bogotá. 1984.
- \_\_\_\_\_. Geotectónica y evolución de la región noroccidental de Colombia. En: *Boletín Geológico* Vol. 23, No. 3, pp. 4-37, INGEOMINAS. Bogotá. 1980.
- \_\_\_\_\_. Foraminíferos planctónicos y el Terciario de Colombia. En: Informe 1651, INGEOMINAS. Bogotá. 1973.
- \_\_\_\_\_. Relaciones entre la bioestratigrafía y la cronoestratigrafía en el llamado Geosinclinal de Bolívar. En: *Boletín Geológico INGEOMINAS*, Vol. 19, No.3, pp. 25-98. Bogotá. 1972b.
- \_\_\_\_\_. Ciclos Tectónicos y Sedimentarios en el norte de Colombia y sus relaciones con la Paleocología. En: *Boletín Geológico* Vol. 19, No.3, pp. 1-23 INGEOMINAS. Bogotá. 1972a.
- DUQUE-CARO, H.; GUZMÁN, G. y HERNANDEZ, R. Geología de la Plancha 38, Carmen de Bolívar. INGEOMINAS. Bogotá, 1996.
- ECOPETROL. Cartografía Mapa Geológico de las Cuencas Valle Inferior del Magdalena - Sinú, Escala 1:500.000. 2001.
- FLINCH, J.; AMARAL, J.; DOULCET, A.; MOULY, B; OSORIO, C. y PINCE, J. Onshore-Offshore Structure of the Northern Colombia Accretionary Complex. AAPG International Conference. Barcelona, España. 2003.
- FOLK, R. Petrology of sedimentary rocks. Austin Texas, Hells phills. 1974.
- FONVILLE, H.A. The geology of the Gulf of Morrosquillo and contiguous areas, Republic of Colombia. En: Informe Geológico No. 160, Ecopetrol. Bogotá. 1956.
- GALVEZ, E. Caracterización petrográfica y la determinación de la fuente de aporte, de los niveles conglomeráticos de las formaciones: Cansona (Campaniano - Maashtichtiano) y San Cayetano (Paleoceno Superior), en el cinturón de San Jacinto, Plancha 37. Trabajo de

- Grado (Geólogo) Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá. 1998.
- GEORESPONSE Ltda. Evaluación Exploratoria del área del Atlántico. Contrato 4.A.SET.304/90. ECOPETROL. Bogotá. 1991.
- GEOTEC Ltda. Geología Estructural, Estratigrafía y Geología de los Cinturones Sinú - San Jacinto. 50 Puerto escondido, 51 Loricá, 59 Mulatos, 60 Canalete, 61 Montería, 69 Necoclí, 70 San Pedro de Urabá, 71 Planeta Rica, 79 Turbo, 80 Tierralta. Escala 1:100.000. Memoria Explicativa INGEOMINAS. Bogotá. 2003.
- \_\_\_\_\_. Cartografía geológica de la Región del Sinú (Noroeste de Colombia), Planchas 50, 51, 59, 60, 61, 69, 70, 71, 79 y 80. 3 volúmenes. Bogotá. 1997.
- \_\_\_\_\_. Tolú Block Colombia S.A. A preliminary Field Geology Study. (Inédito). Bogotá, 1981.
- GUIDISH, T. M.; KENDALL, C. G. ST. C.; LERCHE, I.; TOTH, D. J. Y YARZAB, R. F. Basin Evaluation Using Burial History Calculation: an Overview. Bulletin American Association of Petroleum Geologists. pp. 92-105. 1985.
- GUZMÁN, G.; GÓMEZ, E. y SERRANO, B.E. Geología de los Cinturones Sinú, San Jacinto y Borde Occidental del Valle Inferior del Magdalena, Caribe Colombiano. Memorias del Mapa Caribe, Escala 1:300.000. INGEOMINAS. Bogotá. 2004.
- HAFFER, J. y BEATTIE, D. Geological Reconnaissance Studies in the Cansona Area (north Bolivar). Colombian Petroleum Company. ER-272. 1960.
- HENAO, L. Geología del Departamento del Atlántico. En: Instituto Geológico Nacional, Informe 754. Bogotá. 1951.
- HIGGINS, G.E. y SAUNDERS, J.B. Mud Volcanoes - their Nature and Origin. Verhandl. Naturf. Ges., Vol. 84, No. 1, pp. 101 - 152. Basel. 1974.
- HINCAPIÉ, G y RUIZ, C. Inventario, interpretación y evaluación integral de la información geológica, geofísica y geoquímica en la cuenca Sinú - San Jacinto y el área especial Sinú. Resumen ejecutivo. ANH. 2008.
- INGEOMINAS. Estratigrafía y Geología de los Terrenos de Sinú y San Jacinto. En: Publicación Geológica Especial No. 14-I. Bogotá. 1983.
- KASSEM, T.; CACERES, C. y CUCALON, I. Geología del Cuadrángulo E-8 Sincelejo. Informe inédito. Servicio Geológico Nacional. Bogotá. 1967.
- KETCHAM, R. Observation and the relationship between crystallographic orientation and biasing in apatite fission track measurements. Am Mineral 88: 817-829. 2003
- KETCHAM, R & APATITE TO ZIRCON INC. Hefty Version 1.5.1, Manual, Austin, 2008
- KUGLER, H.G. Sedimentary Volcanism. Trans. 4th Caribbean Geology Conference, pp. 11-13. Trinidad. 1968.
- LÓPEZ, E. Evolución Tectónica de la Región Caribe de Colombia. INGEOMINAS. Bogotá. 2005.
- MARTINEZ, J., LUNA, O. y LAMILLA, J. Estado actual del conocimiento de las cuencas de Plato y San Jorge (Fase 2). Proyecto regional del Departamento del Valle Inferior del Magdalena. ECOPETROL. Bogotá. 1994.

- MORA, A. Características Geológicas De La Cuenca Sinú - San Jacinto. Proyecto de Investigación Dirigida. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2008.
- OLSSON, A.A. En: JENKS, W. F. (ed.). Handbook of South American Geology. Geol. Soc.Am. Mem. 65. 1956.
- PACHÓN, F. Informe Geológico Final Pozo Media Luna - 1. ECOPETROL. Bogotá, 1994.
- PERMANYER, A. y SÁNCHEZ, C. Origin and alteration of oils and oil seeps from the Sinú - San Jacinto Basin, Colombia. Organic Geochemistry. Vol. 5, pp. 1831- 1845. 2006.
- 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.
- PORTILLA, O. Estudio Estratigráfico y Sedimentológico del Terciario Inferior en el área Luruaco, Departamento del Atlántico. Tesis ECP-UN. 123 p. Informe Geológico ECP # 1051. 1983.
- RAASVELDT, H. Algunas anotaciones del croquis foto geológico del Departamento del Atlántico. En: Informe 936, Servicio Geológico Nacional. 1953.
- REYES, G; GUZMAN G; BARBOSA G y ZAPATA G. Memoria Explicativa Geología de las Planchas 23 Cartagena, 29 y 30 Arjona. Esc 1:100000 INGEOMINAS. Bogotá. 2001.
- REYES, A. y ZAPATA, G. Memoria Explicativa, Geología de la Plancha 24 Sabanalarga. Escala 1:100.000, INGEOMINAS. Bogotá. 2001.
- REYES, J.P. Evaluación de la prospectividad sector Atlántico. Instituto colombiano del petróleo división de exploración y coordinación de modelamiento de subsuelo. 177 p. Bogotá. 2001.
- STAINFORTH, R.M. Mid - Tertiary diastrophism in Northern South America. Trans. 4th Carib. Geol. Conf., pp. 159 - 174. Trinidad. 1968.
- TAGAMI, T y O'SULLIVAN, P. Fundamentals of Fission-Track Thermochronology. Riviews in Mineralogy & Geochemistry, Vol 58, pp 19-47. 2005.
- TOTO, E.A. y KELLOGG J.N. Structure of the Sinú-San Jacinto fold belt -- An active accretionary prism in northern Colombia. En: Journal of South American Earth Sciences. Vol. 5, No. 2, pp. 211-222, Great Britain. 1992.
- UNION TEMPORAL B y G. Cartografía Geológica en los Cinturones plegados Sinú-San Jacinto. Bogotá. 2006.
- VAN DER HAMMEN, T. Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiano continentales y tectogénesis de los Andes Colombianos. Servicio Geológico Nacional, Boletín Geológico Vol. 6, No. 1-3, pp. 67-128. Bogotá. 1958.
- WENTWORTH, C.K. A scale of grade and class terms for clastic sediments: The Journal of Geology, v. 30, p. 377-392. 1922.
- ZIMMERLE, W. Serpentine graywackes from the North Coast basin, Colombia and their geotectonic significance. N. Jb. Miner.Abb. Stuttgart. 1968.

**ANEXO 1.A**  
**LISTADO DE ESTACIONES DE CAMPO**  
**SECTOR LURUACO Y CERRO CANSONA**

**FORMACIÓN CANSONA**

SSJ-42

Toma de la muestra SSJ-RV21 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 569 346,1      E: 869 974

Datos estructurales: S23W/65NW

Litología: Capas de lodolitas de color morado ligeramente meteorizadas (Figura 1).



**Figura 1. Afloramiento sobre la carretera que va de Carmen de Bolívar a Caracolí donde se exponen las lodolitas de la Formación Cansona.**

SSJ-43

Toma de la muestra SSJ-RV22 (ML-MGG) y SSJ-AFTA20 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 569 365,1      E: 869 910

Datos estructurales: S40W/60NW

Litología: Intercalaciones de capas medias con lodolitas silíceas de color violeta y verde con capas delgadas de areniscas de grano medio con cemento silíceo. No se pueden discriminar claramente los contactos (Figura 2).

SSJ-44

Toma de la muestra SSJ-RV23 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 6569 493,1 E: 869 860

Datos estructurales: S50W/55NW

Litología: Lodolitas masivas de color negro moderadamente meteorizadas hacia el tope del afloramiento (coloraciones verdes y amarillas).



**Figura 2. Intercalaciones de capas medias de lodolitas con capas delgadas de areniscas sobre la carretera que va de Carmen de Bolívar a Caracolí. Los contactos no son claros.**

#### SSJ-45

Toma de la muestra SSJ-RV24 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 569 411,1 E: 869 747

Datos estructurales: /// El plegamiento y fracturamiento de las capas de lodolita no permite determinar un plano confiable para medir parámetros estructurales

Litología: Lodolitas de colores verde y gris ligeramente meteorizadas, plegadas y fracturadas (Figura 3).



**Figura 3. Capas gruesas de lodolitas de color verde levemente meteorizadas sobre la carretera que va de Carmen de Bolívar a Caracolí.**

SSJ-46

Toma de la muestra SSJ-RV25 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 569 699      E: 869 561

Datos estructurales: S40W/80NW

Litología: Capas gruesas de lodolitas silíceas de color verde ligeramente meteorizadas. Localmente se presentan estructuras flasser. (Figura 4).



**Figura 4. Capas gruesas de lodolitas silíceas moderadamente meteorizadas sobre la carretera que va de Caracolí a Huamanga.**

SSJ-47

Toma de la muestra SSJ-RV26 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 569 847 E: 869 565

Datos estructurales: S20W/55NW

Litología: Lodolitas silíceas de color verde que presentan nódulos de chert negro. Las lodolitas se encuentran fracturadas perpendicular y paralelamente a la estratificación.

SSJ-48

Toma de la muestra SSJ-RV27 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 569 884 E: 869 513

Datos estructurales: ///

Afloramiento muy plegado y fracturado, por lo que no se puede tomar un dato estructural confiable

Litología: Lodolitas silíceas de color verde, presentan fractura concoidea (Figura 5).



Figura 5. Lodolitas silíceas meteorizadas sobre la carretera que va de Caracolí a Huamanga.

SSJ-49

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

Coordenadas: N: 1' 569 905 E: 869 473

Datos estructurales: N65W/35SW

Litología: Lodolitas silíceas de color gris

SSJ-50

Toma de la muestra SSJ - AFTA21 (MT-ML-MGG)

ANEXO 1.A. LISTADO DE ESTACIONES DE CAMPO

Coordenadas: N: 1' 569 979 E: 869 419

Datos estructurales: S62W/50NW

Litología: Intercalaciones de capas medias y delgadas de areniscas de grano fino a muy fino con cemento calcáreo de lodolitas de color gris-violeta (Figura 6Figura 6).



Figura 6. Capas medias de areniscas de grano muy fino sobre la carretera que va de Caracolí a Huamanga.

SSJ-51

Toma de la muestra SSJ-RV29 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 570 109 E: 869 431

Datos estructurales: N70E/20SE

Litología: Lodolitas silíceas de color gris y verde, fracturadas.

SSJ-52

Toma de la muestra SSJ - AFTA22 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 570 162 E: 869 462

Datos estructurales: ///

Litología: Capas delgadas de areniscas de grano muy fino con cemento calcáreo.

SSJ-53

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

Coordenadas: N: 1' 570 191 E: 869 452

Datos estructurales: ///

Litología: Lodolitas silíceas de color negro y gris, fractura concoidea.

SSJ-54

Punto de control de la poligonal

Coordenadas: N: 1' 570 333 E: 869 472

**FORMACIÓN SAN CAYETANO**

SSJ-55

Toma de la muestra SSJ-AFTA23 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 568 743,1 E: 869 198

Datos estructurales: N45W/45SE

Litología: Capas muy gruesas de conglomerados polimícticos matriz-soportados con clastos redondeados de guijos y cantos, matriz arenosa de grano grueso a muy grueso. Los fragmentos del conglomerado están compuestos de líticos volcánicos básicos e intermedios, fragmentos de cuarzo y en menor proporción líticos metamórficos (Figura 7).



**Figura 7. Conglomerados polimícticos azules basales de la Formación San Cayetano expuestos sobre el Arroyo Alférez.**

SSJ-56

Toma de la muestra SSJ-AFTA24 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 568 720,1      E: 869 631

Datos estructurales: S55E/50NW

Litología: Capas gruesas de conglomerados muy parecidos a las de la estación anterior, a excepción de que los clastos predominantemente son de tamaño gránulo; intercalados con areniscas conglomeráticas de grano grueso y matriz lodosa.

SSJ-57

Toma de la muestra SSJ-AFTA25 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 568 680      E: 869 659

Datos estructurales: S30W/40NW

Litología: Intercalaciones de capas gruesas de litoarenitas de grano medio a grueso con matriz lodosa con capas delgadas de lodolita con estructura flasser y lentes de arena. Los lentes de arena son muy abundantes en los niveles de lodolita por lo que se consideró que no eran una litología apta para muestras para análisis de reflectancia (Figura 8).



**Figura 8. Intercalaciones de areniscas con lodolitas aflorando sobre el Arroyo Alférez.**

SSJ-58

Toma de la muestra SSJ-AFTA26 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 568 651,1      E: 869 707

Datos estructurales: S15W/55NW

Litología: Capas medias a gruesas de litoarenitas de color gris-azul de grano medio a grueso con cemento calcáreo, moderadamente seleccionadas y granos subredondeados.

SSJ-59

Toma de la muestra SSJ-AFTA27 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 568 648,1      E: 869 751

Datos estructurales: S17W/65NW

Litología: Capas medias a gruesas de litoarenitas con cemento calcáreo muy similares a las de la estación anterior, excepto que se encuentran levemente meteorizadas.

SSJ-60

Toma de la muestra SSJ-AFTA28 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 568 550,1      E: 869 821

Datos estructurales: S43W/75NW

Litología: Capas medias a gruesas de litoarenitas de color gris-azul de grano medio a grueso con cemento calcáreo, moderadamente seleccionadas y granos subredondeados (Figura 9).



Figura 9. Capas medias de litoarenitas de color gris de grano medio sobre el Arroyo Alférez.

## FORMACIÓN LURUACO

SSJ-28

Toma de las muestras SSJ-AFTA14 (MT-ML-MGG) y SSJ-RV10 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 656 769,1      E: 880 823,1

Datos estructurales: S40W/75NW

Litología: Intercalaciones de capas gruesas lodolitas de colores grises y negras (meteorizadas son de color amarillas y rojizas) con capas medias de areniscas de grano fino a medio redondeados, moderadamente seleccionados (Figura 10).

*Hasta este punto se pudo reconocer la poligonal levantada por Unión Temporal B&G (2006) debido a los derrumbes que obstruyeron completamente el arroyo.*



**Figura 10. Capas medias de lodolita de color negro a la base del afloramiento sobre el Arroyo Empolvá.**

SSJ-29

Toma de la muestra SSJ-RV11 (ML GG)

Coordenadas: N: 1' 656 766,1 E: 880 833,1

Datos estructurales: S55W/65NW

Litología: Intercalaciones de capas medias de lodolitas de color gris con niveles menores de areniscas de grano medio (Figura 11).

SSJ-30

Toma de la muestra SSJ-AFTA15 (MT-ML-MGG) y SSJ-RV12 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 656749,1 E: 880 836,1

Datos estructurales: S67W/65NW

Litología: Intercalaciones de capas gruesas de sublitoarenitas de grano grueso a muy grueso mal seleccionado, subredondeados a redondeados, con matriz lodosa, intercalados

con capas medias a gruesas de lodolita de color negro. Hacia los contactos se observan cambios transicionales en el contenido de arena (Figura 11).



**Figura 11. Intercalaciones de capas muy gruesas de areniscas de grano grueso con capas medias de lodolita de color negro sobre el Arroyo Empolvá.**

SSJ-31

Punto de control de la poligonal

Coordenadas: N: 1' 656 739,1      E: 880 848,1

Datos estructurales: Se observa un anticlinal tumbado, evidencia del punto en que las capas se invierten. Se observa que los niveles de lodolitas de la intercalación acomodan la deformación (al fracturarse las capas de areniscas las lodolitas rellenan los espacios para amortiguar el esfuerzo).

Litología: intercalaciones de capas medias de areniscas de grano medio con capas medias de lodolitas de color negro a gris (Figura 12).



**Figura 12. Pliegue anticlinal que evidencia la inversión de las capas desde este punto sobre el Arroyo Empolvá. El martillo se encuentra sobre la charnela del pliegue.**

SSJ-32

Toma de las muestras SSJ-AFTA16 (MT-ML-MGG) y SSJ-RV13 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 656 701,1      E: 880 865,1

Datos estructurales: S70W/55NW

Litología: Intercalaciones de capas delgadas y medias de lodolitas de color negro (color rojo meteorizadas) con estructuras flasser, con capas medias de sublitoarenitas en las que se observa grano decrecimiento de grano muy grueso a grano medio. Presencia de venas de calcita, localmente se observa cemento calcáreo (Figura 13).

SSJ-33

Toma de la muestra SSJ-RV14 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 656 672,1      E: 880 900,1

Datos estructurales: S45W/65NW

Litología: Intercalaciones de capas muy gruesas de sublitoarenitas con capas gruesas de lodolitas de color negro. Las areniscas presentan concreciones de hasta 20cm de diámetro (Figura 14).

ANEXO 1.A. LISTADO DE ESTACIONES DE CAMPO



Figura 13. Intercalaciones de capas medias de lodolita de color negro con capas medias de litoarenitas sobre el Arroyo Empolvá.



Figura 14. Capas gruesas de litoarenitas de grano medio a grueso sobre el Arroyo Empolvá.

SSJ-34

Toma de las muestras SSJ-AFTA17 (MT-ML-MGG) SSJ-RV15 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 656 623,1      E: 880 928,1

Datos estructurales: S50W/70NW

Litología: Intercalaciones de capas gruesas de de areniscas de grano medio a grueso con capas medias de lodolitas de color negro.

SSJ-35

Toma de la muestra SSJ-AFTA18 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 656 618,1      E: 880 949,1

Datos estructurales: S30W/80NW

Litología: Intercalaciones de capas muy gruesas de sublitoarenitas de grano medio hasta conglomeráticas con capas delgadas de lodolita de color negro.

SSJ-36

Toma de la muestra SSJ-AFTA19 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 656 567,1      E: 880 989,1

Datos estructurales: S51W/70NW

Litología: Capas medias de sublitoarenita de grano medio a fino con cemento calcáreo

SSJ-37

Toma de la muestra SSJ-RV16 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 656 484,1      E: 881 032,1

Datos estructurales: /// Zona derrumbada, no se pudieron medir parámetros estructurales.

Litología: Capas medias de lodolita de color negro aflorando a la base del afloramiento (Figura 15).

SSJ-38

Toma de la muestra SSJ-RV17 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 656 437,1      E: 881 067,1

Datos estructurales: N-S/60W

Litología: Capas medias de lodolitas de color negro.

SSJ-39

Toma de la muestra SSJ-RV18 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 656 413,1      E: 881 113,1

Datos estructurales: S70W/70NW

Litología: Intercalaciones de capas gruesas de lodolitas de color negro con capas delgadas de areniscas de grano fino. Se observa recristalización de sílice y carbonato (Figura 16).



Figura 15. Capas masivas de lodolitas de color negro a la base de un afloramiento derrumbado sobre el Arroyo Empolvá.



Figura 16. Capas gruesas de lodolitas de color negro intercaladas con niveles menores de areniscas de grano fino sobre el Arroyo Empolvá.

SSJ-40

Toma de la muestra SSJ-RV19 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 656 372,1      E: 881 147,1

Datos estructurales: S65W/80NW

Litología: Intercalaciones de capas gruesas de lodolitas de color negro con capas gruesas a muy gruesas de areniscas de grano medio a fino (Figura 17).



**Figura 17. Intercalación de capas gruesas de lodolita de color negro con areniscas de grano medio a fino sobre el Arroyo Empolvá.**

SSJ-41

Toma de la muestra SSJ-RV20 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 656 283,1      E: 881 260,1

Datos estructurales: S75W/65NW

Litología: Capas de lodolitas de color negro ligeramente meteorizadas con coloraciones verdes y amarillas (Figura 18).



Figura 18. Capas masivas de lodolita de color negro ligeramente meteorizadas sobre el Arroyo Empolvá.

## FORMACIÓN PENDALES

### SSJ-22

Toma de la muestra SSJ - AFTA08 (MT - ML - MGG)

Coordenadas: N: 1' 658 396,1      E: 883 754

Datos estructurales: N70E/35SE

Litología: Intercalaciones de capas gruesas de conglomerados polimícticos de guijos y cantos redondeados, matriz-soportados (matriz de arena gruesa) con capas gruesas de areniscas conglomeráticas de grano grueso, donde los fragmentos conglomeráticos son tamaño guijo. Los conglomerados están compuestos de líticos volcánicos porfiríticos (Riolitas, Andesitas y Basaltos), líticos de rocas ígneas faneríticas (probablemente un Granito de dos feldespatos), Chert negro, Cuarzo blanco, Cuarzo ahumado y Anfibolitas. El afloramiento se encuentra ligeramente meteorizado y en algunas zonas se observa la formación de suelo (Figura 19).

### SSJ-23

Toma de las muestras: SSJ-AFTA09 (MT-ML-MGG) y SSJ-RV06 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 658 348,1      E: 883 765

Datos estructurales: N32E/65SE

Litología: Intercalaciones similares a las de la estación anterior. Conglomerados polimícticos tamaño guijo y canto clasto-soportados con matriz de arena gruesa y venas de calcita ubicadas en los niveles con los fragmentos de mayor tamaño.

Se observa un nivel menor de lodolita de color verde levemente meteorizado (Figura 20).



**Figura 19. Intercalaciones de capas gruesas de conglomerados polimícticos con areniscas conglomeráticas sobre el Arroyo Henequén.**

SSJ-24

Toma de las muestras: SSJ-AFTA10 (MT-ML-MGG) y SSJ-RV07 (MT-MGG)

Coordenadas: N: 1' 658 318,1 E: 883 835

Datos estructurales: N40E/65SE

Litología: Intercalaciones de capas gruesas de conglomerados polimícticos con clastos tamaño guijo y canto (localmente bloques), redondeados, rodeados de una matriz de arena media a gruesa, con niveles menores de lodolita de color verde ligeramente meteorizados. Los líticos presentes en los conglomerados son ígneos volcánicos básicos (basaltos) e intrusivos ácidos (granitos de dos feldespatos).



**Figura 20. Capa delgada de lodolita entre capas gruesas de conglomerados con clastos guijo y canto sobre el Arroyo Henequén.**

SSJ-25

Toma de las muestras SSJ-AFTA11 (MT-ML-MGG) y SSJ-RV08 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 658 418,1      E: 883 974

Datos estructurales: N30E/65SE

Litología: Intercalaciones de capas gruesas de conglomerados polimícticos con clastos tamaño guijo y canto redondeados (localmente bloques), rodeados de una matriz de arena media a gruesa, con niveles menores de lodolita de color verde ligeramente meteorizados (Figura 21).

SSJ-26

Toma de la muestra SSJ-AFTA12 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 658 218,1      E: 884 329

Datos estructurales: N50E/30SE

Litología: Conglomerados polimícticos de tamaño guijo y canto con matriz arenosa y cemento calcáreo. Se observa la alternancia de niveles conglomeráticos más competentes que otros (Figura 22).

ANEXO 1.A. LISTADO DE ESTACIONES DE CAMPO



Figura 21. Nivel de lodolita de color café entre capas gruesas de conglomerados sobre el Arroyo Henequén.



Figura 22. Capas muy gruesas de conglomerados polimícticos de clastos tamaño guijo y canto sobre el Arroyo Henequén.

SSJ-27

Toma de las muestras SSJ-AFTA13 (MT-ML-MGG) y SSJ-RV09 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 658 217,1      E: 884 380

Datos estructurales: N50E/30SE

Litología: Conglomerados polimícticos con matriz arenosa y calcárea con un nivel delgado de lodolita color verde ligeramente meteorizado. Presencia de venas de calcita. Se observa una variación en el tamaño de los fragmentos que conforman el conglomerado en forma de bandas (Figura 23).



Figura 23. Intercalaciones de capas gruesas de conglomerados con niveles menores de lodolita de color verde sobre el Arroyo Henequén.

**FORMACIÓN ARROYO DE PIEDRA**

SSJ-1

Punto de control de la poligonal

Coordenadas: N: 1' 669 094      E: 886 904, 8

Datos estructurales: Afloramiento masivo, no hay planos para tomar datos.

Litología: Bioesparitas rudstone de rodolitos de algas.

SSJ-2

Punto de control de la poligonal

Coordenadas: N: 1' 669 115      E: 886 892,8

Datos estructurales: Afloramiento masivo, no hay planos para tomar datos.

Litología: Bioesparitas rudstone de rodolitos de algas.

SSJ-3

Toma de muestra SSJ-AFTA01 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 669 114 E: 886 914,8

Datos estructurales: S30W/25NW

Litología: Capas masivas de bioesparitas rudstone y floatstone de rodolitos de algas.

SSJ-4

Punto de control de la poligonal

Coordenadas: N: 1' 669 094 E: 886 955,8

Datos estructurales: N-S/65W

Litología: Bioesparitas rudstone y floatstone de rodolitos de algas, color beige-crema (Figura 24).



Figura 24. Rodolito de algas en bioesparita floatstone sobre el Arroyo Casa Vieja.

SSJ-5

Punto de control de la poligonal

Coordenadas: N: 1' 669 096 E: 886 983, 8

Datos estructurales: N-S/65W

Litología: Bioesparitas Wackestone a Packestone con rodolitos de algas y fragmentos de conchas.

SSJ-6

Toma de la muestra SS-RV01 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 669 111 E: 887 003, 8

Datos estructurales: N-S/65W

Litología: Lodolitas calcáreas de color verde, replegadas y fracturadas. No se presenta un plano representativo para tomar datos estructurales.

El contacto con la estación anterior es transicional, en forma de intercalaciones de bioesparitas rudstone y lodolitas verdes en capas delgadas (5–10cm). Las esparitas presentan intraclastos de lodolita (Figura 25).



Figura 25. Capas masivas de lodolita de color verde sobre el Arroyo Casa Vieja.

SSJ-7

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

Coordenadas: N: 1' 669 116            E: 887 036,8

Datos estructurales: S40E/35NE

Litología: Lodolitas calcáreas verdes (Figura 26).

SSJ-8

Toma de la muestra SSJ-RV03 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 669 101            E: 887 058,8

Datos estructurales: S40E/35NE

Litología: Lodolitas calcáreas verdes.

SSJ-9

Toma de la muestra SSJ-RV04 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 669 132            E: 887 077,8

Datos estructurales: S40E/35NE

Litología: Lodolitas calcáreas verdes-grises (Figura 27).



Figura 26. Capas gruesas de lodolitas de color verde sobre el Arroyo Casa Vieja.

SSJ-10

Punto de control de la poligonal

Coordenadas: N: 1' 669 127            E: 887 106,8

Datos estructurales: ///

Litología: Lodolitas calcáreas verdes - grises.

SSJ-11

Toma de la muestra SSJ-RV05 (ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 669 140            E: 887 123,8

Datos estructurales: S10W/35SE

Litología: Lodolitas calcáreas de color verde. En este punto termina la sucesión de lodolitas (Figura 28).

ANEXO 1.A. LISTADO DE ESTACIONES DE CAMPO



Figura 27. Capas medias de lodolitas calcáreas de color verde sobre el Arroyo Casa Vieja.



Figura 28. Capas macizas de lodolitas calcáreas de color verde sobre el Arroyo Casa Vieja.

SSJ-12

Punto de control de la poligonal

Coordenadas: N: 1' 669 140 E: 887 123,8

SSJ-13

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

Coordenadas: N: 1' 669 146 E: 887 238,8

Datos estructurales: S65E/75NE

Litología: Bioesparitas packstone a wackestone arenosas recristalizadas con cuarzo, color beige y fragmentos de conchas.

SSJ-14

Toma de la muestra SSJ - AFTA03 (MT - ML - MGG)

Coordenadas: N: 1' 669 104 E: 887 253,8

Datos estructurales: S10E/15NE

Litología: Areniscas fosilíferas de grano grueso con cemento calcáreo, venas de cuarzo y fragmentos de conchas, color beige-crema y laminación plano paralela (Figura 29).



Figura 29. Capas gruesas de areniscas fosilíferas sobre el Arroyo Casa Vieja.

SSJ-15

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

Coordenadas: N: 1' 669 082,1      E: 887 308,8

Datos estructurales: N50E/65SE

Litología: Bioesparitas arenosas con textura wackestone a packestone con rodolitos de algas y fragmentos de bivalvos y gastrópodos.

SSJ-16

Toma de la muestra SSJ-AFTA05 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 669 089,1      E: 887 313,8

Datos estructurales: N50E/65SE

Litología: Areniscas fosilíferas de grano medio a grueso con cemento calcáreo y fragmentos de conchas de bivalvos (Figura 30).



Figura 30. Areniscas fosilíferas de grano medio con cemento calcáreo sobre el Arroyo Casa Vieja.

SSJ-17

Toma de la muestra SSJ - Testigo 1

Coordenadas: N: 1' 669 173      E: 885 143,8

Datos estructurales: ///

Litología: Caliza y lodolita meteorizada.

SSJ-18

Toma de la muestra SSJ - Testigo 2

Coordenadas: N: 1' 669 254      E: 885 269,8

Datos estructurales: ///

Litología: Rodados de caliza meteorizada con rodolitos de algas e intraclastos de lodolita verde.

SSJ-19

Toma de la muestra SSJ-AFTA06 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 669 325            E: 885 358,8

Datos estructurales: N20E/35SE

Litología: Sublitoarenita de grano fino a medio con cemento calcáreo, grano subredondeado a redondeado, moderadamente seleccionada y fuertemente recristalizada con venas de calcita (Figura 31).



Figura 31. Sublitoarenitas aflorando sobre un carreteable en el Cerro Juan del Toro.

SSJ-20

Toma de la muestra SSJ-AFTA07 (MT-ML-MGG)

Coordenadas: N: 1' 669 385            E: 885 483,8

Datos estructurales: N35E/20SE

Litología: Esparita arenosa de color negro con venas de calcita.

SSJ-21

Punto de control de la Poligonal

Coordenadas: N: 1' 668 958    E: 885 979,8

Datos estructurales: ///

Litología: Lodolitas meteorizadas.

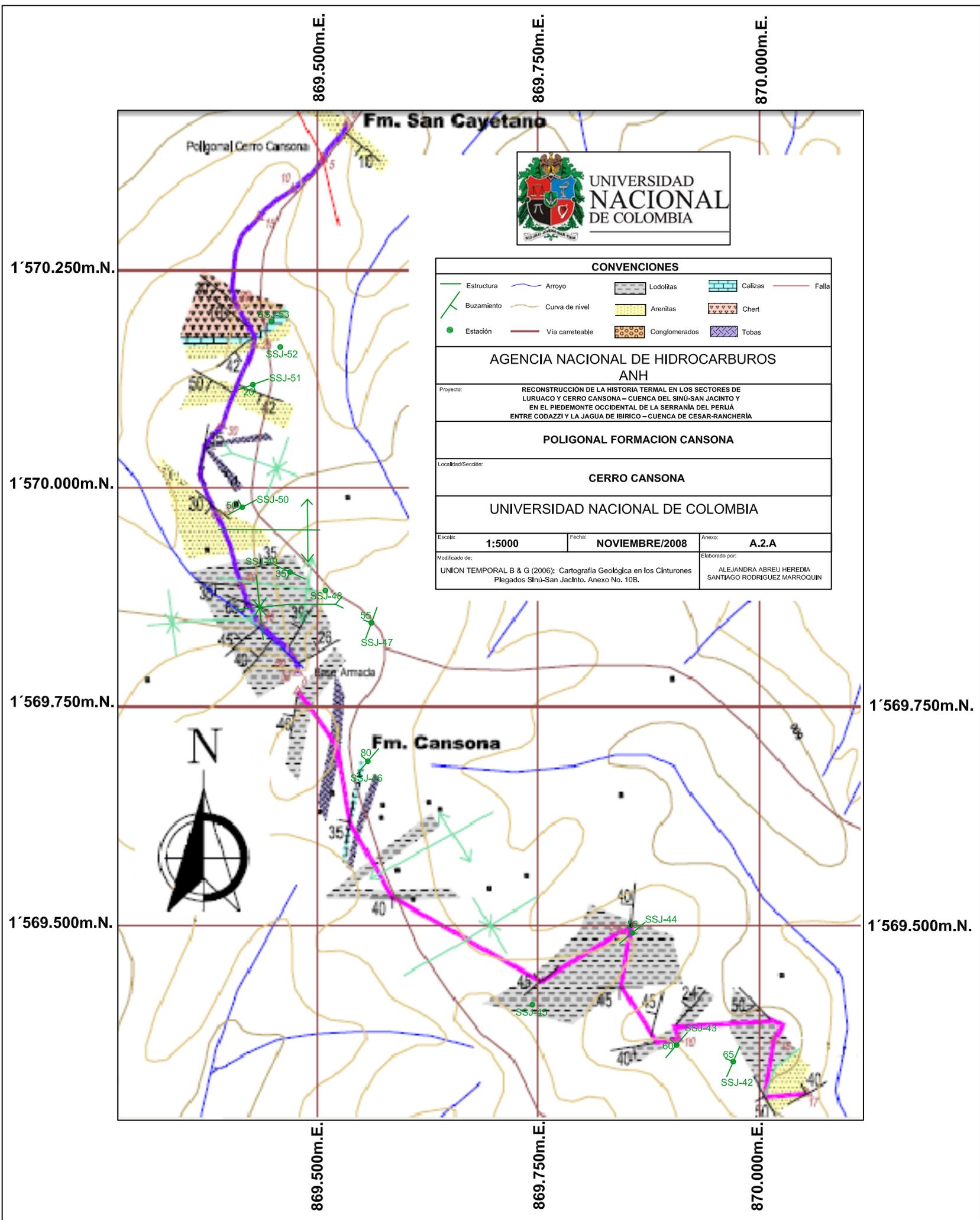
## ANEXO 1.A. LISTADO DE ESTACIONES DE CAMPO

## LISTADO DE ESTACIONES

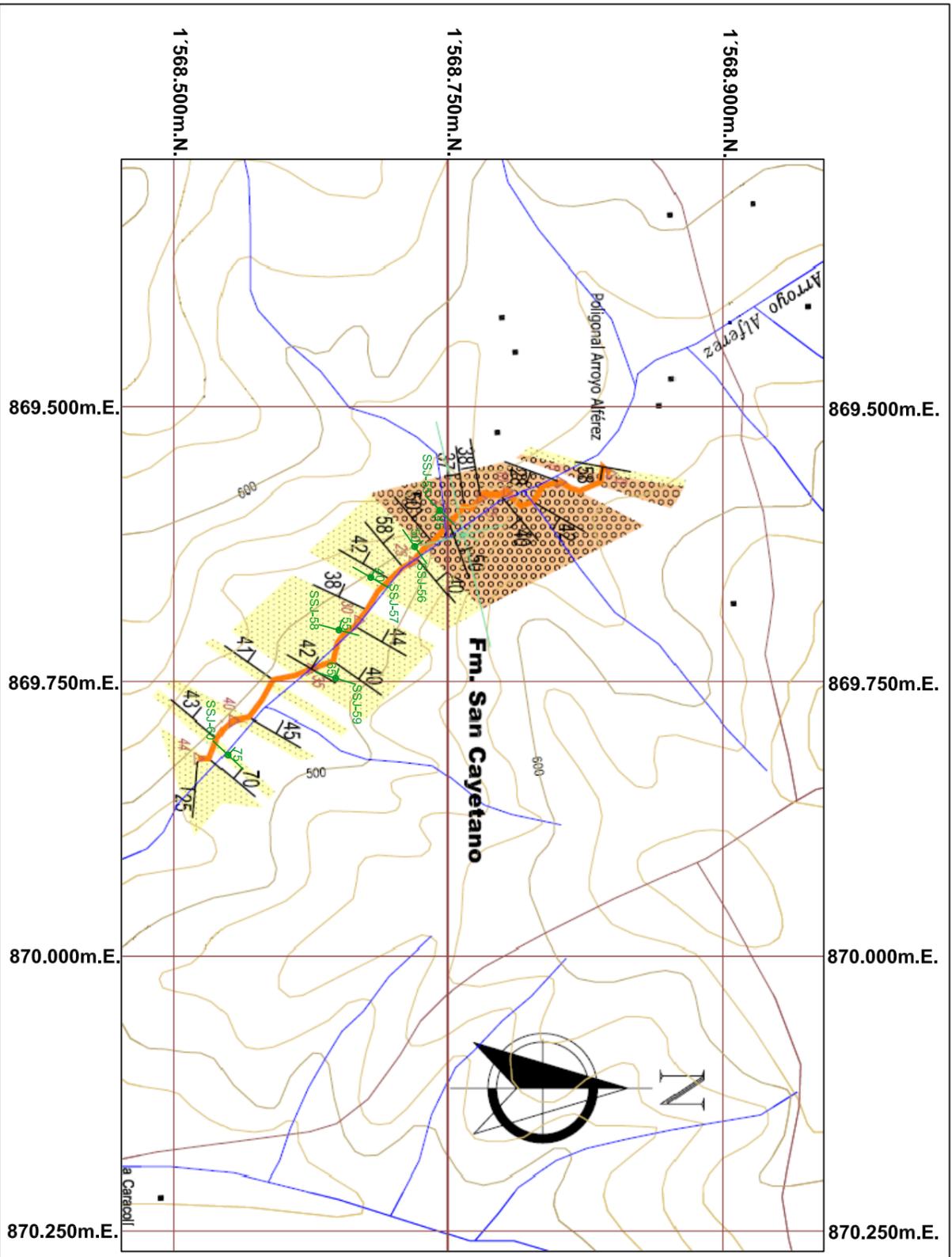
ESTACIÓN	ID MUESTRA	COORDENADAS PLANAS			COORDENADAS MAGNAS - SIRGAS			RUMBO/BUZAMIENTO	LITOLOGÍA	PLANCHA	FORMACIÓN
		N	E	ORIGEN	N	E	ORIGEN				
SSJ - 22	SSJ - AFTA08	1658396	883752	BOGOTÁ	1658396,1	883754,0	BOGOTÁ	N70E/35SE	Conglomerado	24 - III -A	Pendales
SSJ - 23	SSJ - AFTA09	1658348	883763	BOGOTÁ	1658348,1	883765,0	BOGOTÁ	N32E/65SE	Conglomerado	24 - III -A	Pendales
SSJ - 23	SSJ - RV06	1658348	883763	BOGOTÁ	1658348,1	883765,0	BOGOTÁ	N32E/65SE	Lodolita	24 - III -A	Pendales
SSJ - 24	SSJ - AFTA10	1658318	883833	BOGOTÁ	1658318,1	883835,0	BOGOTÁ	N40E/65SE	Conglomerado	24 - III -A	Pendales
SSJ - 24	SSJ - RV07	1658318	883833	BOGOTÁ	1658318,1	883835,0	BOGOTÁ	N40E/65SE	Lodolita	24 - III -A	Pendales
SSJ - 25	SSJ - AFTA11	1658418	883972	BOGOTÁ	1658418,1	883974,0	BOGOTÁ	N30E/65SE	Conglomerado	24 - III -A	Pendales
SSJ - 25	SSJ - RV08	1658418	883972	BOGOTÁ	1658418,1	883974,0	BOGOTÁ	N30E/65SE	Lodolita	24 - III -A	Pendales
SSJ - 26	SSJ - AFTA12	1658218	884327	BOGOTÁ	1658218,1	884329,0	BOGOTÁ	N50E/30SE	Conglomerado	24 - III -A	Pendales
SSJ - 27	SSJ - AFTA13	1658217	884378	BOGOTÁ	1658217,1	884380,0	BOGOTÁ	N50E/30SE	Conglomerado	24 - III -A	Pendales
SSJ - 27	SSJ - RV09	1658217	884378	BOGOTÁ	1658217,1	884380,0	BOGOTÁ	N50E/30SE	Lodolita	24 - III -A	Pendales
SSJ - 28	SSJ - AFTA14	1656769	880821	BOGOTÁ	1656769,1	880823,1	BOGOTÁ	S40W/75NW	Arenisca	24 - III -A	Luruaco
SSJ - 28	SSJ - RV10	1656769	880821	BOGOTÁ	1656769,1	880823,1	BOGOTÁ	S40W/75NW	Lodolita	24 - III -A	Luruaco
SSJ - 29	SSJ - RV11	1656766	880831	BOGOTÁ	1656766,1	880833,1	BOGOTÁ	S55W/65NW	Lodolita	24 - III -A	Luruaco
SSJ - 30	SSJ - AFTA15	1656749	880834	BOGOTÁ	1656749,1	880836,1	BOGOTÁ	S67W/65NW	Arenisca	24 - III -A	Luruaco
SSJ - 30	SSJ - RV12	1656749	880834	BOGOTÁ	1656749,1	880836,1	BOGOTÁ	S67W/65NW	Lodolita	24 - III -A	Luruaco
SSJ - 31	punto control	1656739	880846	BOGOTÁ	1656739,1	880848,1	BOGOTÁ	///	///	25 - III -A	Luruaco
SSJ - 32	SSJ - AFTA16	1656701	880863	BOGOTÁ	1656701,1	880865,1	BOGOTÁ	S70W/55NW	Arenisca	24 - III -A	Luruaco
SSJ - 32	SSJ - RV13	1656701	880863	BOGOTÁ	1656701,1	880865,1	BOGOTÁ	S70W/55NW	Lodolita	24 - III -A	Luruaco
SSJ - 33	SSJ - RV14	1656672	880898	BOGOTÁ	1656672,1	880900,1	BOGOTÁ	S45W/65NW	Lodolita	24 - III -A	Luruaco
SSJ - 34	SSJ - AFTA17	1656623	880926	BOGOTÁ	1656623,1	880928,1	BOGOTÁ	S50W/70NW	Arenisca	24 - III -A	Luruaco
SSJ - 35	SSJ - AFTA18	1656618	880947	BOGOTÁ	1656618,1	880949,1	BOGOTÁ	S30W/80NW	Arenisca	24 - III -A	Luruaco
SSJ - 36	SSJ - AFTA19	1656567	880987	BOGOTÁ	1656567,1	880989,1	BOGOTÁ	S51W/70NW	Arenisca	24 - III -A	Luruaco
SSJ - 37	SSJ - RV16	1656484	881030	BOGOTÁ	1656484,1	881032,1	BOGOTÁ	///	Lodolita	24 - III -A	Luruaco
SSJ - 38	SSJ - RV17	1656437	881065	BOGOTÁ	1656437,1	881067,1	BOGOTÁ	N-S/60W	Lodolita	24 - III -A	Luruaco

ANEXO 1.A. LISTADO DE ESTACIONES DE CAMPO

ESTACIÓN	ID MUESTRA	COORDENADAS PLANAS			COORDENADAS MAGNAS - SIRGAS			RUMBO/BUZAMIENTO	LITOLOGÍA	PLANCHA	FORMACIÓN
		N	E	ORIGEN	N	E	ORIGEN				
SSJ - 39	SSJ - RV18	1656413	881111	BOGOTÁ	1656413,1	881113,1	BOGOTÁ	S70W/70NW	Lodolita	24- III -A	Luruaco
SSJ - 40	SSJ - RV19	1656372	881145	BOGOTÁ	1656372,1	881147,1	BOGOTÁ	S65W/80NW	Lodolita	24- III -A	Luruaco
SSJ - 41	SSJ - RV20	1656283	881258	BOGOTÁ	1656283,1	881260,1	BOGOTÁ	S75W/65NW	Lodolita	24- III -A	Luruaco
SSJ - 42	SSJ - RV21	1569345	869970	BOGOTÁ	1569346,1	869974,0	BOGOTÁ	S23W/65NW	Lodolita	37 - IV - D	Cansona
SSJ - 43	SSJ - RV22	1569364	869906	BOGOTÁ	1569365,1	869910,0	BOGOTÁ	S40W/60NW	Lodolita	37 - IV - D	Cansona
SSJ - 43	SSJ - AFTA20	1569364	869906	BOGOTÁ	1569365,1	869910,0	BOGOTÁ	S40W/60NW	Arenisca	37 - IV - D	Cansona
SSJ - 44	SSJ - RV23	1569492	869856	BOGOTÁ	1569493,1	869860,0	BOGOTÁ	S50W/55NW	Lodolita	37 - IV - D	Cansona
SSJ - 45	SSJ - RV24	1569410	869743	BOGOTÁ	1569411,1	869747,0	BOGOTÁ	///	Lodolita	37 - IV - D	Cansona
SSJ - 46	SSJ - RV25	1569688	869557	BOGOTÁ	1569669,0	869561,0	BOGOTÁ	S40W/80NW	Lodolita	37 - IV - D	Cansona
SSJ - 47	SSJ - RV26	1569846	869561	BOGOTÁ	1569847,0	869565,0	BOGOTÁ	S20W/55NW	Lodolita	37 - IV - D	Cansona
SSJ - 48	SSJ - RV27	1569883	869509	BOGOTÁ	1569884,0	869513,0	BOGOTÁ	///	Lodolita	37 - IV - D	Cansona
SSJ - 49	SSJ - RV28	1569904	869469	BOGOTÁ	1569905,0	869473,0	BOGOTÁ	N65W/35SW	Lodolita	37 - IV - D	Cansona
SSJ - 50	SSJ - AFTA21	1569978	869415	BOGOTÁ	1569979,0	869419,0	BOGOTÁ	S62W/50NW	Arenisca	37 - IV - D	Cansona
SSJ - 51	SSJ - RV29	1570118	869427	BOGOTÁ	1570109,0	869431,0	BOGOTÁ	N70E/20SE	Lodolita	37 - IV - B	Cansona
SSJ - 52	SSJ - AFTA22	1570161	869458	BOGOTÁ	1570162,0	869462,0	BOGOTÁ	///	Arenisca	38 - IV - B	Cansona
SSJ - 53	SSJ - RV30	1570190	869448	BOGOTÁ	1570191,0	869452,0	BOGOTÁ	///	Lodolita	39 - IV - B	Cansona
SSJ - 54	punto control	1570332	869468	BOGOTÁ	1570333,0	869472,0	BOGOTÁ	///	///	38 - IV - B	Cansona
SSJ - 55	SSJ - AFTA23	1568742	869594	BOGOTÁ	1568743,1	869198,0	BOGOTÁ	N45W/45SE	Conglomerado	37 - IV - D	San Cayetano
SSJ - 56	SSJ - AFTA24	1568719	869627	BOGOTÁ	1568720,1	869631,0	BOGOTÁ	S55E/50NW	Conglomerado	37 - IV - D	San Cayetano
SSJ - 57	SSJ - AFTA25	1568679	869655	BOGOTÁ	1568680,1	869659,0	BOGOTÁ	S30W/40NW	Arenisca	37 - IV - D	San Cayetano
SSJ - 58	SSJ - AFTA26	1568650	869703	BOGOTÁ	1568651,1	869707,0	BOGOTÁ	S15W/55NW	Arenisca	37 - IV - D	San Cayetano
SSJ - 59	SSJ - AFTA27	1568647	869747	BOGOTÁ	1568648,1	869751,0	BOGOTÁ	S17W/65NW	Arenisca	37 - IV - D	San Cayetano
SSJ - 60	SSJ - AFTA28	1568549	869817	BOGOTÁ	1568550,1	869821,0	BOGOTÁ	S43W/75NW	Areniscas	37 - IV - D	San Cayetano



CONVENCIONES				
Estructura	Arroyo	Lodolitas	Calizas	Falla
Buzamiento	Curva de nivel	Arenitas	Chert	
Estación	Vía carretable	Conglomerados	Tobas	
<b>AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS ANH</b>				
Proyecto: RECONSTRUCCIÓN DE LA HISTORIA TERMAL EN LOS SECTORES DE LURUAGO Y CERRO CANSONA – CUENCA DEL SINÚ-SAN JACINTO Y EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA SERRANÍA DEL PERLÍA ENTRE CODAZZI Y LA JAGUA DE IBIRICO – CUENCA DE CESAR-RANCHERÍA				
<b>POLIGONAL FORMACION CANSONA</b>				
Localidad/Sección: <b>CERRO CANSONA</b>				
<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA</b>				
Escala:	<b>1:5000</b>	Fecha:	<b>NOVIEMBRE/2008</b>	Anexo:
Modificado de:	UNION TEMPORAL B & G (2006): Cartografía Geológica en los Cinturones Plegados Sinú-San Jacinto. Anexo No. 10B.		Elaborado por: ALEJANDRA ABREU HEREDIA SANTIAGO RODRIGUEZ MARROQUIN	



**CONVENCIONES**

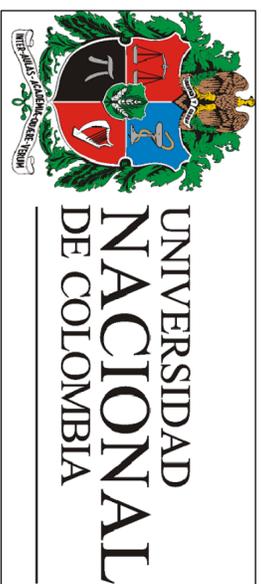
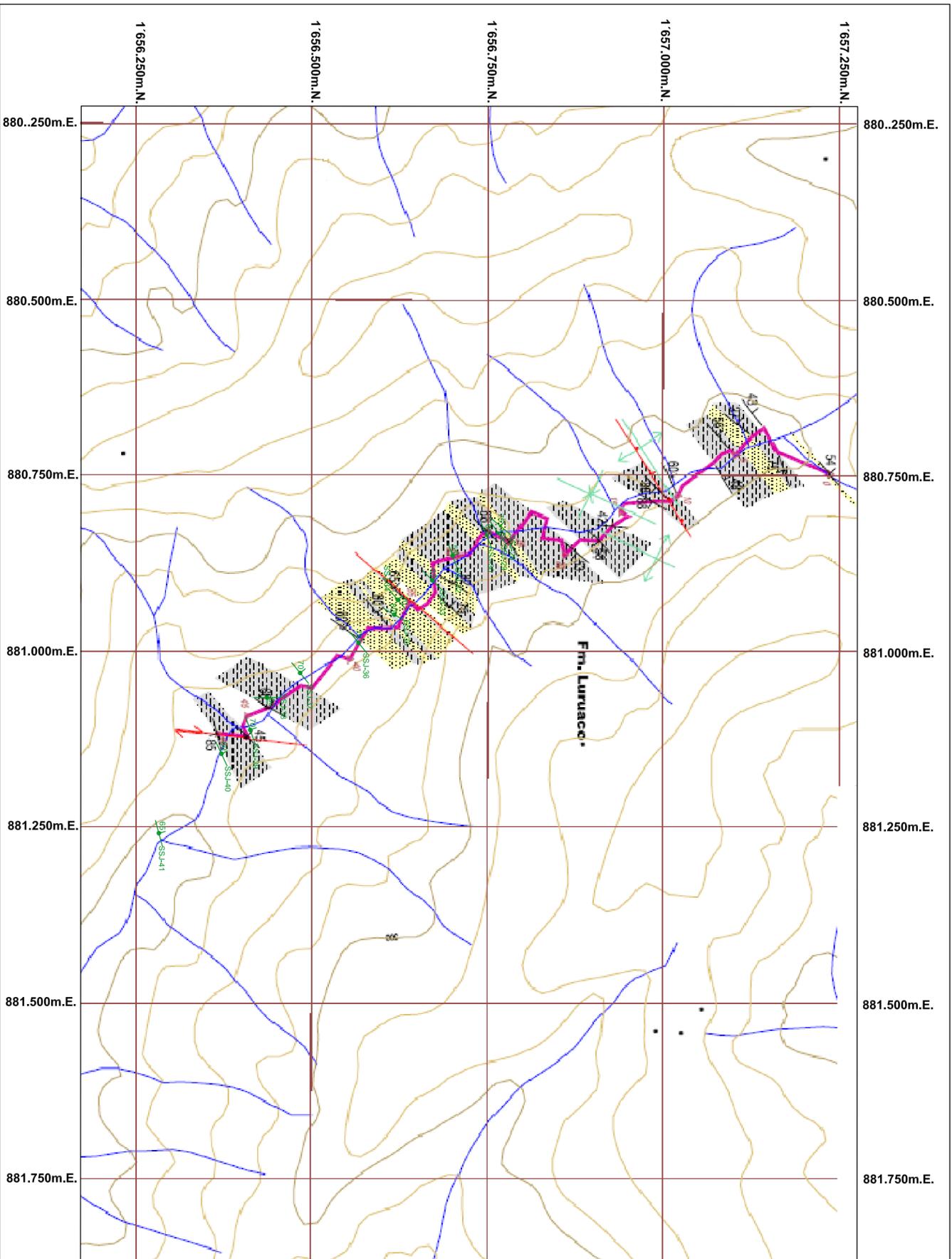
	Estructura		Arroyo		Lodolitas		Falla
	Buzamiento		Curva de nivel		Avenidas		Chert
	Estación		Via campestre		Conglomerados		Tobas

**AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS ANH**

Proyecto:  
RECONSTRUCCION DE LA HISTORIA TERRESTRE EN LOS SECTORES DE LUMBACO Y CERRO CANSONA - CUENCA DEL SINU-SAN JACINTO Y EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA SIERRANA DEL PERUJA ENTRE CODAZZI Y LA JAGUA DE IBIRICO - CUENCA DE CESAR-PANCHERIA

**POLIGONAL FORMACION SAN CAYETANO**

Localidad/Sección:		ARROYO ALFEREZ	
Institución:		UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
Escala:	1:5000	Fecha:	NOVIEMBRE/2008
Elaborado por:	ALEJANDRA ABREU HEREDIA SANTIAIGO RODRIGUEZ MARROQUIN		



**CONVENCIONES**

—	Estructura	—	Arroyo	■	Chert	■	Arenitas
—	Buzamiento	—	Curva de nivel	■	Lodolitas	■	Conglomerados
●	Estación	—	Falla	■	Calizas	—	Via pavimentada

**AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS**

ANH

Proyecto:  
RECONSTRUCCION DE LA HISTORIA TERMAL EN LOS SECTORES DE LURUACO Y CERRO CANSONA – CUENCA DEL SINU-SAN JACINTO Y EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA SERRANIA DEL PERUA ENTRE CODAZZI Y LA JAGUA DE IBIRICO – CUENCA DE CESAR-RANCHERIA

**POLIGONAL FORMACION LURUACO**

Localidad/Sección:

ARROYO EMPOLVA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Escala:

1:5000

Fecha:

NOVIEMBRE/2008

Autores:

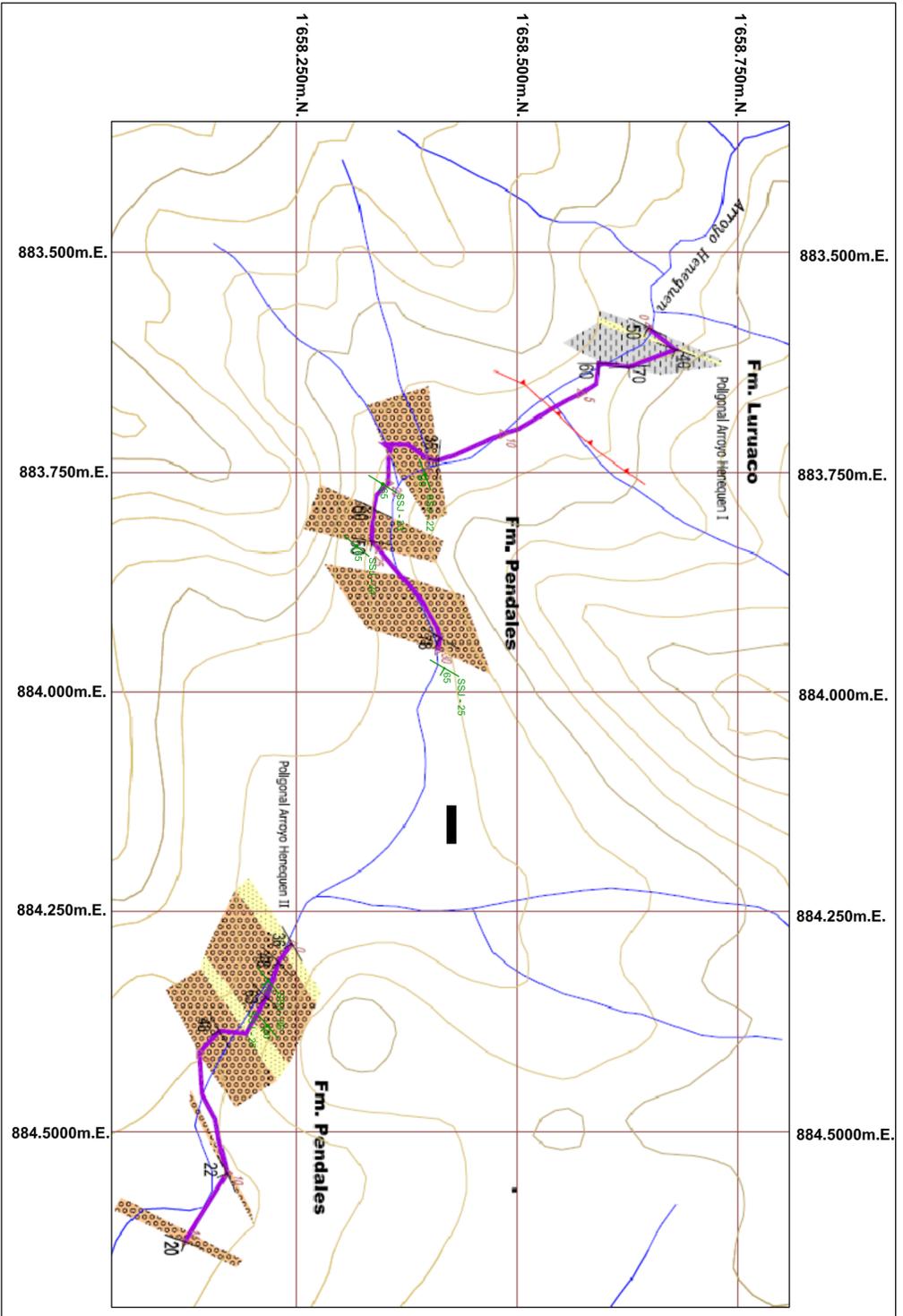
A.2.C

Modificado de:

UNION TEMPORAL B & G (2006). Cartografía Geológica en los Cinturones Plegados Sinu-San Jacinto. Anexo No. 12A.

Elaborado por:

ALEJANDRA ABREU HEREDIA  
SANTIGO RODRIGUEZ MARRONJUN



**CONVENCIONES**

Estructura	Arroyo	Chert	Arenillas
Buzamiento	Curva de nivel	Lodolitas	Conglomerados
Estación	Falla	Calizas	

**AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS**

**ANH**

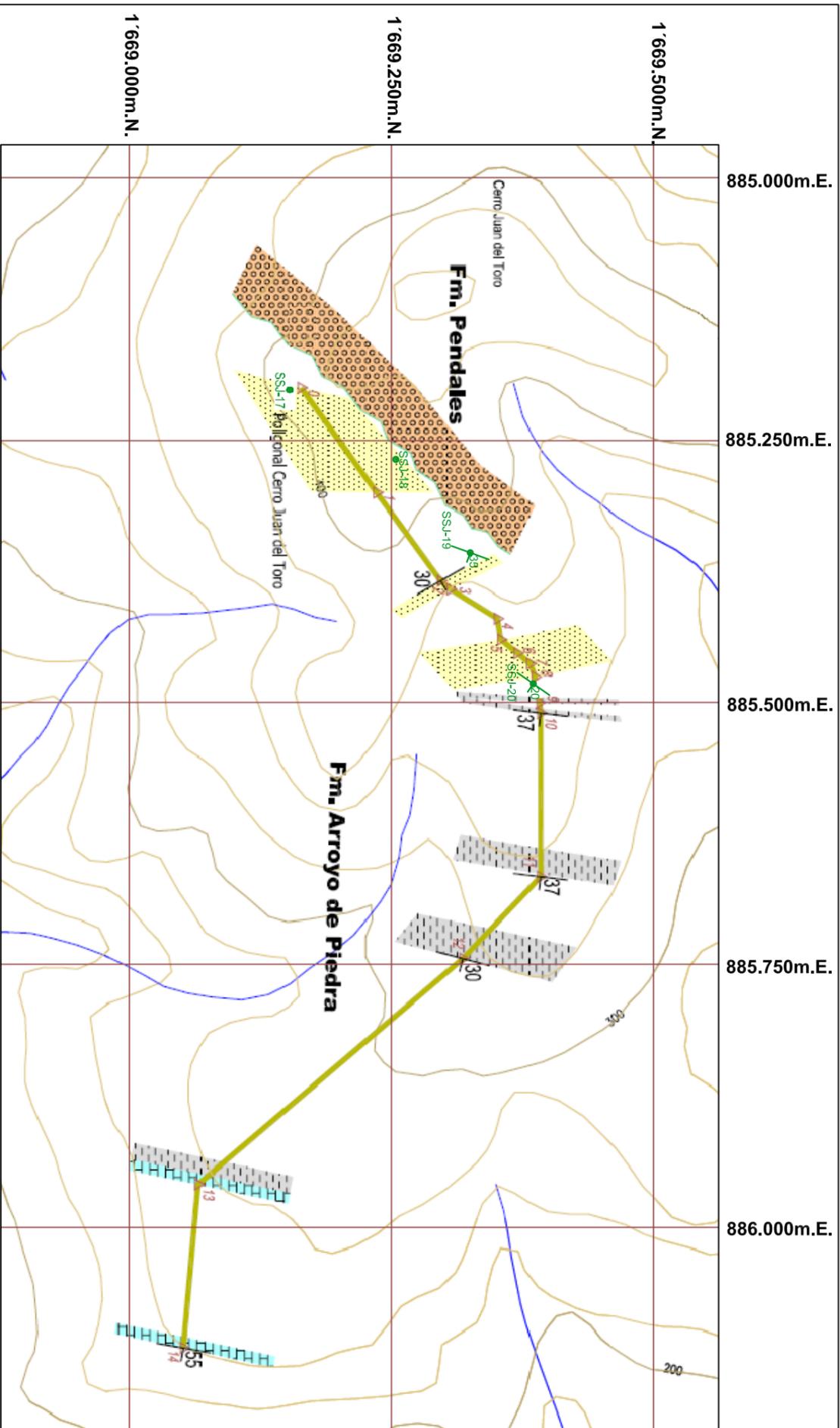
Proyecto: RECONSTRUCCION DE LA HISTORIA TERRESTRE EN LOS SECTORES DE LURIBAO Y CERRO CAÑONSA – CUENCA DEL SIMU-SAN JACINTO Y EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA SERRANIA DEL PERUJA ENTRE CODAZZI Y LA JAGUA DE IBIRICO – CUENCA DE CESAR-RANCHERIA

**POLIGONAL FORMACION PENDALES**

Localidad(es): **ARROYO HENEQUEN**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

Escala: <b>1:5000</b>	Fecha: <b>NOVIEMBRE/2008</b>	Autor: <b>A.2.D</b>
Modificado por: <b>UNION TEMPORAL B &amp; G (2008). Cartografía Geológica en los Cinturones Pláginos Simu-San Jacinto, Anexo No. 12B.</b>	Elaborado por: <b>ALEJANDRA ABREU HERRERA, SANTIAGO RODRIGUEZ MARRQUIN</b>	



### CONVENCIONES

Estructura	Arroyo	Via pavimentada	Lodolitas
Buzamiento	Curva de nivel	Via sin pavimentar	Arenitas
Estación	Laguna	Calizas	Conglomerados

### AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS ANH

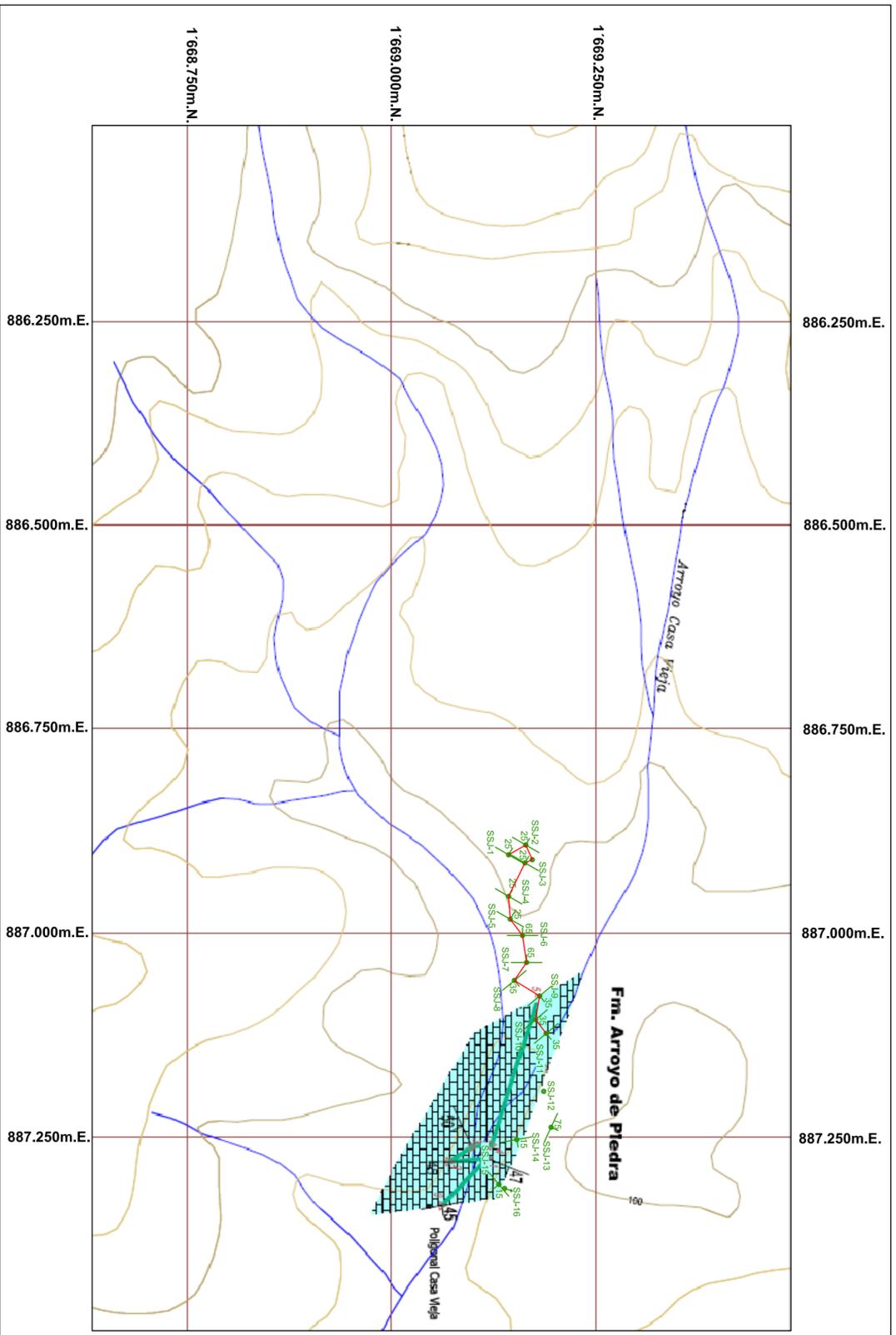
Proyecto:  
RECONSTRUCCIÓN DE LA HISTORIA TERMAL EN LOS SECTORES DE LURIAO Y CERRO CANSONA – CUENCA DEL SINÚ-SAN JACINTO Y EN EL PIEDMONTE OCCIDENTAL DE LA SERRANÍA DEL PERLA ENTRE CODAZZI Y LA JAGUA DE IBIRICO – CUENCA DE CESAR-RANCHERIA

### POLIGONAL FORMACION ARROYO DE PIEDRA (SEGMENTO INFERIOR)

Localidad/Sector:  
CERRO JUAN DEL TORO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Escala:	1:5000	Fecha:	NOVIEMBRE/2008	Anexo:	A.2.E.1
Modificado de:	UNION TEMPORAL B & G (2006): Cartografía Geológica en los Cinturones Plegados Sinu-San Jacinto. Anexo No. 11B			Elaborado por:	ALEJANDRA ARREU HEREDIA SANTIAIGO RODRIGUEZ MARROQUIN



**CONVENCIONES**

- Estructura
- Poligonal
- Via pavimentada
- Arroyo
- Via sin pavimentar
- Curva de nivel
- Calizas
- Estación

**AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS**

ANH

Proyecto:  
RECONSTRUCCION DE LA HISTORIA TERMINAL EN LOS SECTORES DE LUBIRICO Y CERRO CANSONA – CIENCIA DEL SIMULSAN JACINTO Y EN EL PIEDMONTE OCCIDENTAL DE LA SERRANIA DEL PERULA ENTRE COOAZZI Y LA JAGUA DE IBIRICO – CIENCIA DE CESAR-RANCHERIA

**POLIGONAL FORMACION ARROYO DE PIEDRA (SEGMENTOS MEDIO Y SUPERIOR)**

Localidad/Sector:  
ARROYO CASA VIEJA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

Escala:	1:5000	Fecha:	NOVIEMBRE/2008	Autor:	A.2.E.2
Modificado de:	UNION TEMPORAL B & G (2006). Cartografía Geológica en los Cinturones Plagados Simul-San Jacinto. Anexo No. 11A			Elaborado por:	ALEXANDRA ABREU HERRERA SANTIAIGO RODRIGUEZ MARRQUIN

### ANEXO 3.A

## HISTORIAS TERMOCRONOLÓGICAS SECTOR LURUACO Y CERRO CANSONA

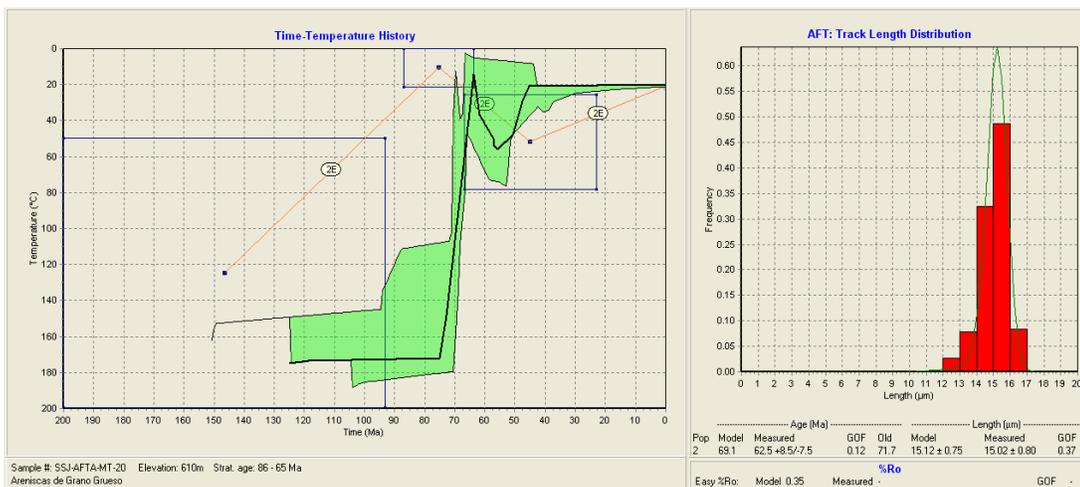


Figura 1. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-20 ubicada a la base de la Formación Cansona.

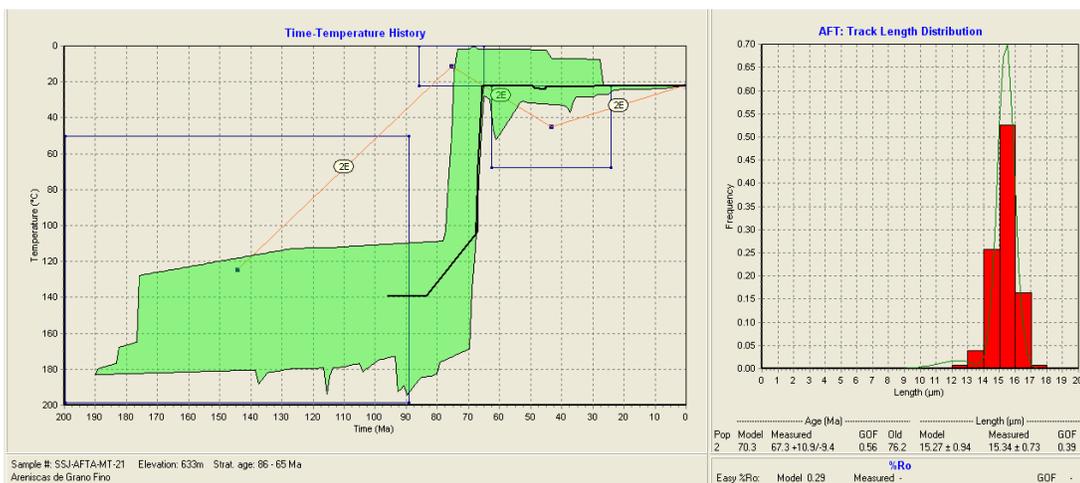


Figura 2. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-21 ubicada en la parte media de la Formación Cansona.

# HISTORIAS TERMOCRONOLÓGICAS –SECTOR LURUACO-CERRO CANSONA-

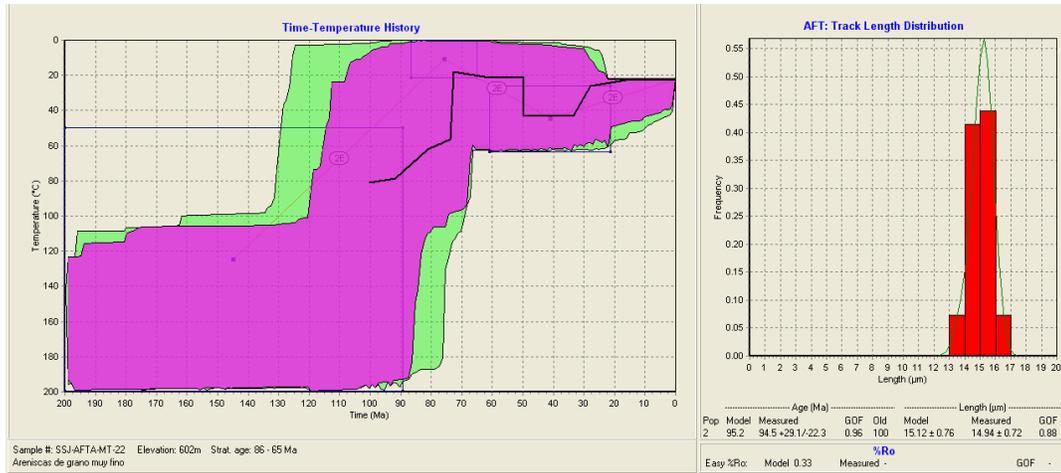


Figura 3. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSI-AFTA-MT-22 ubicada hacia el tope de la Formación Cansona.

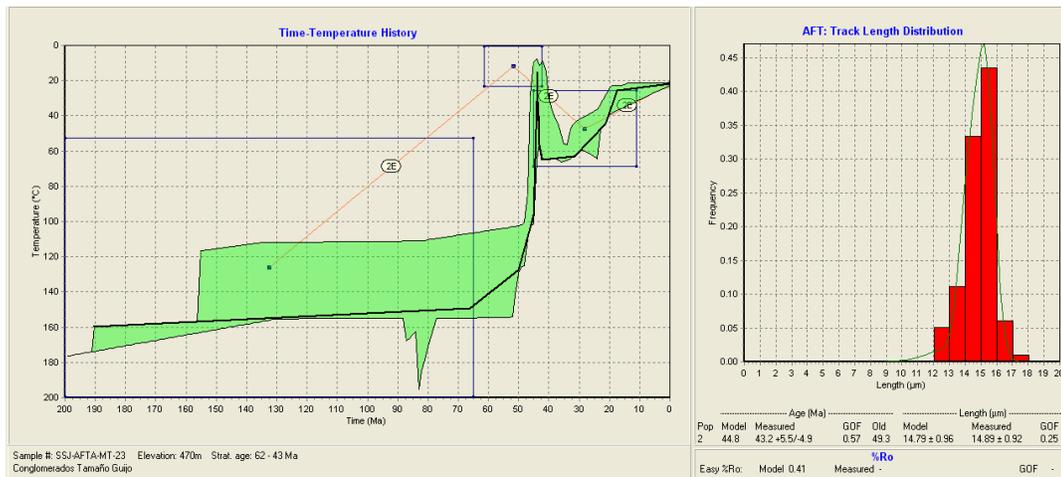


Figura 4. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSI-AFTA-MT-23 ubicada hacia la base de la Formación San Cayetano.

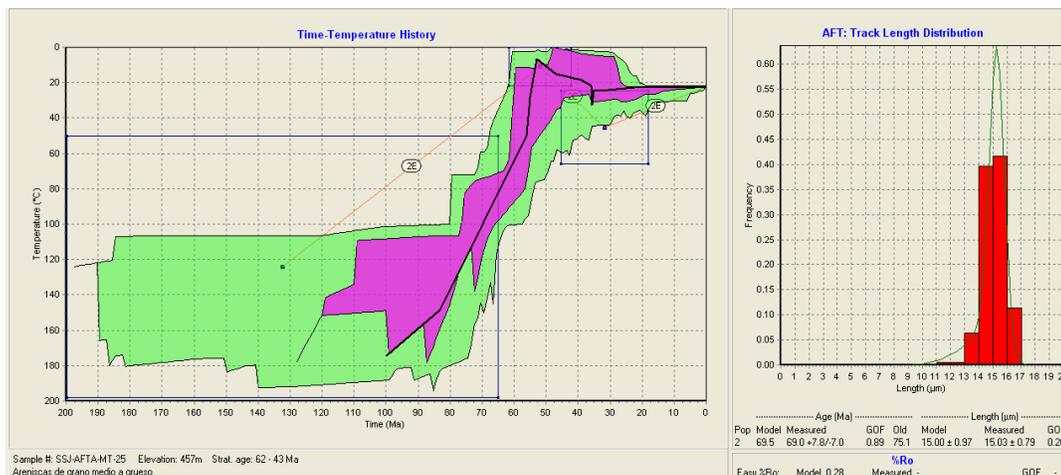


Figura 5. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSI-AFTA-MT-25 ubicada hacia la parte media inferior de la Formación San Cayetano.

# HISTORIAS TERMOCRONOLÓGICAS –SECTOR LURUACO-CERRO CANSONA-

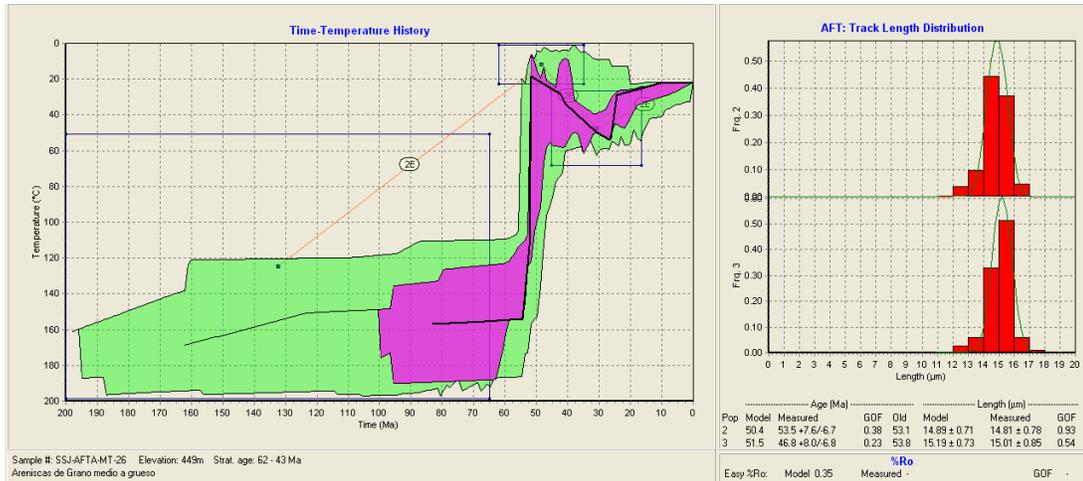


Figura 6. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-26 ubicada en la parte media de la Formación San Cayetano.

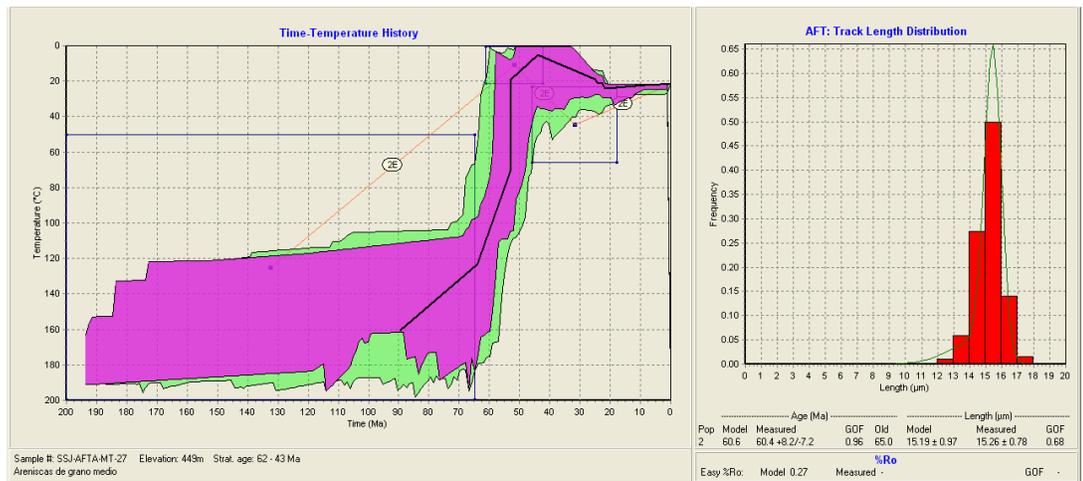


Figura 7. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-27 ubicada hacia la parte media superior de la Formación San Cayetano.

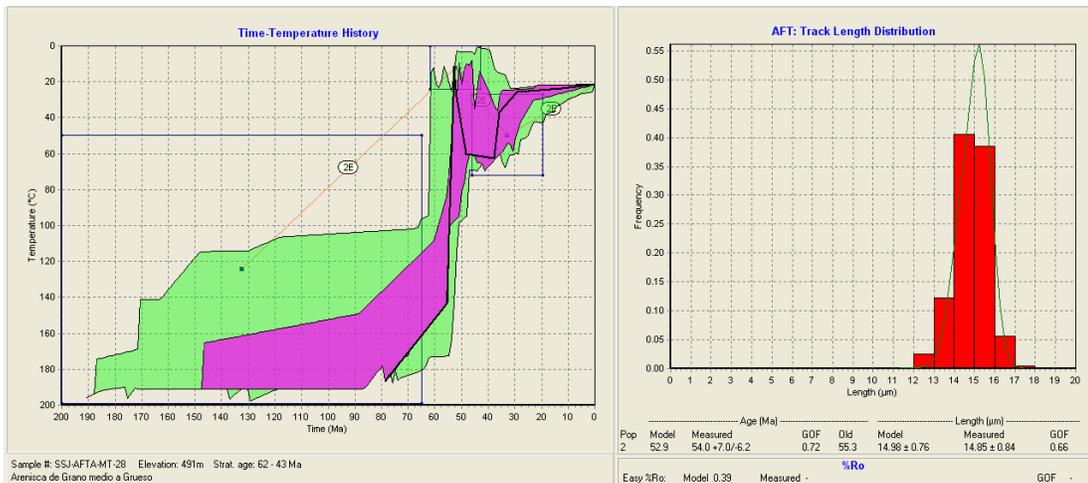


Figura 8. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-28 ubicada hacia el tope de la Formación San Cayetano.

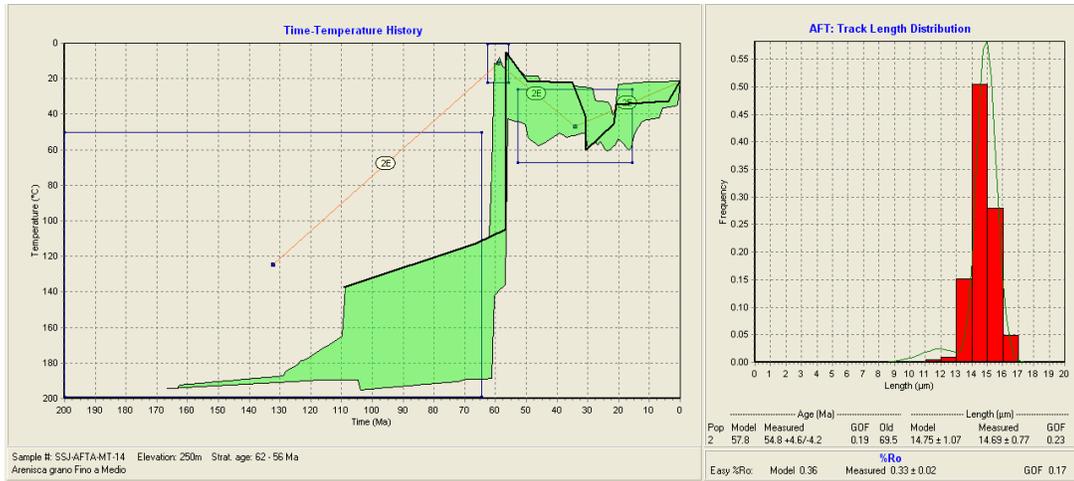


Figura 9. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-14 ubicada hacia la base de la Formación Luruaco.

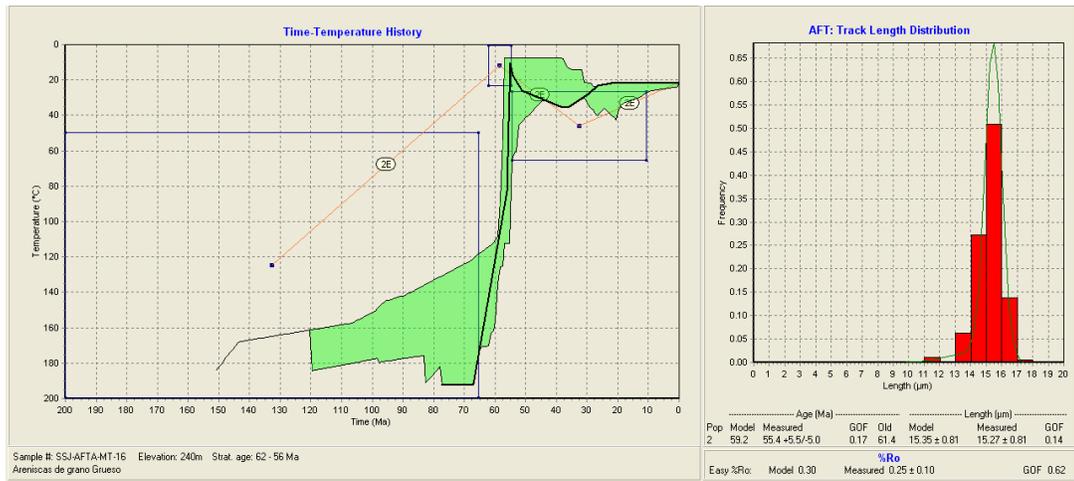


Figura 10. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-16 ubicada en la parte media inferior de la Formación Luruaco.

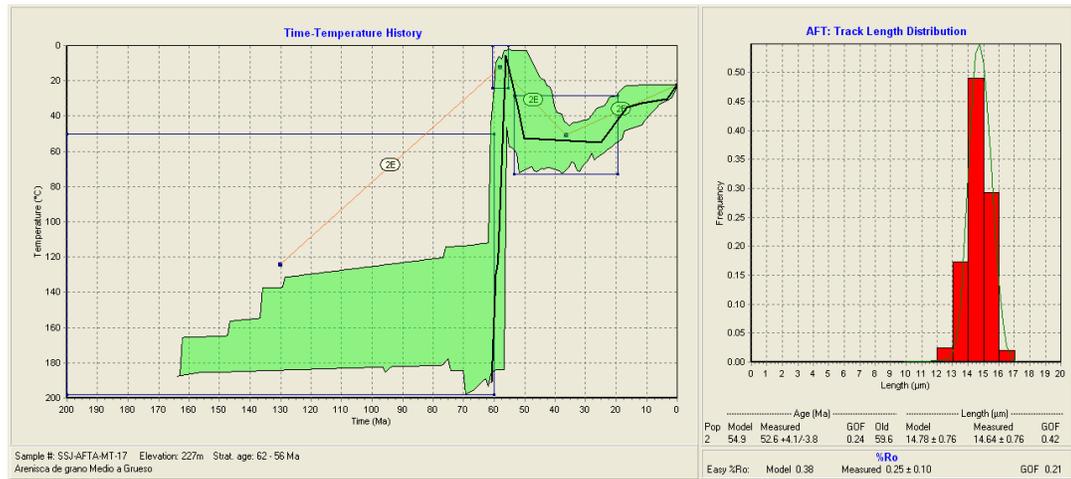


Figura 11. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-17 ubicada hacia la parte media superior de la Formación Luruaco.

# HISTORIAS TERMOCRONOLÓGICAS –SECTOR LURUACO-CERRO CANSONA-

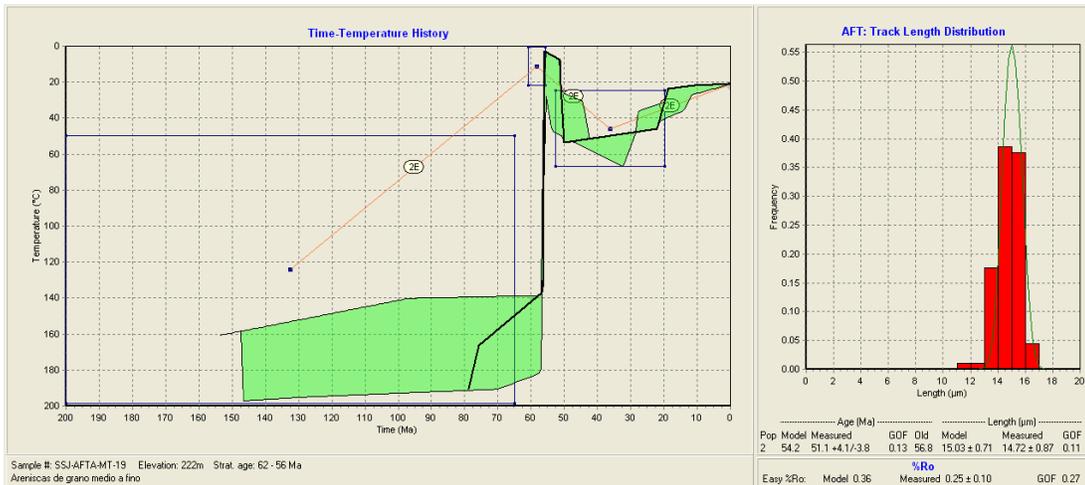


Figura 12. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-19 ubicada hacia el tope de la Formación Luruaco.

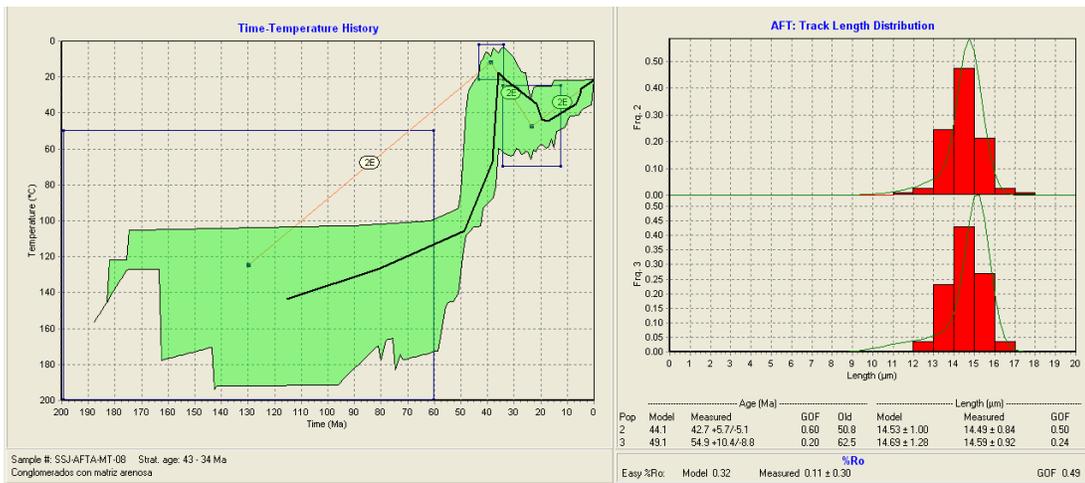


Figura 13. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-08 ubicada hacia la base de la Formación Pendales.

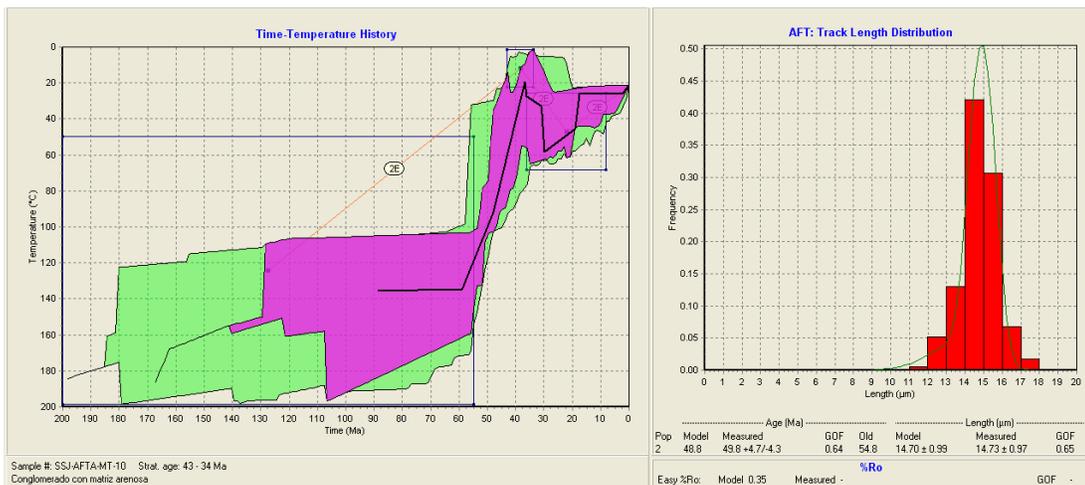


Figura 14. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-10 localizada hacia la parte media inferior de la Formación Pendales.

# HISTORIAS TERMOCRONOLÓGICAS –SECTOR LURUACO-CERRO CANSONA-

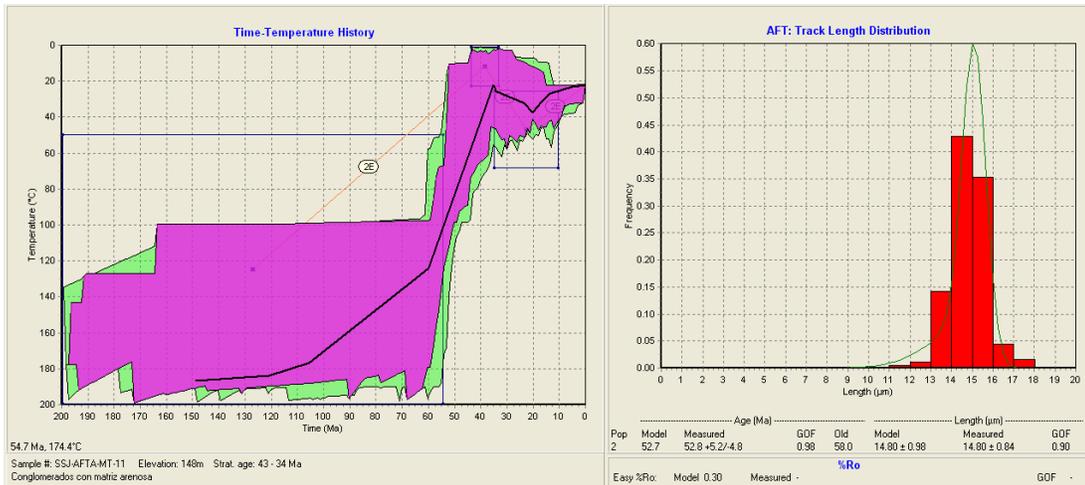


Figura 15. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-11 ubicada hacia la parte media superior de la Formación Pendales.

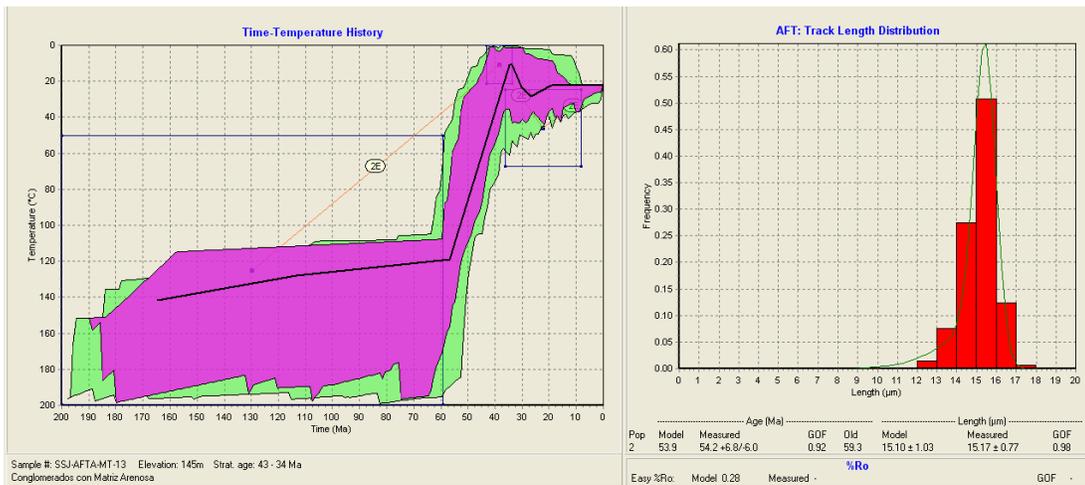


Figura 16. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-13 ubicada hacia el tope de la Formación Pendales.

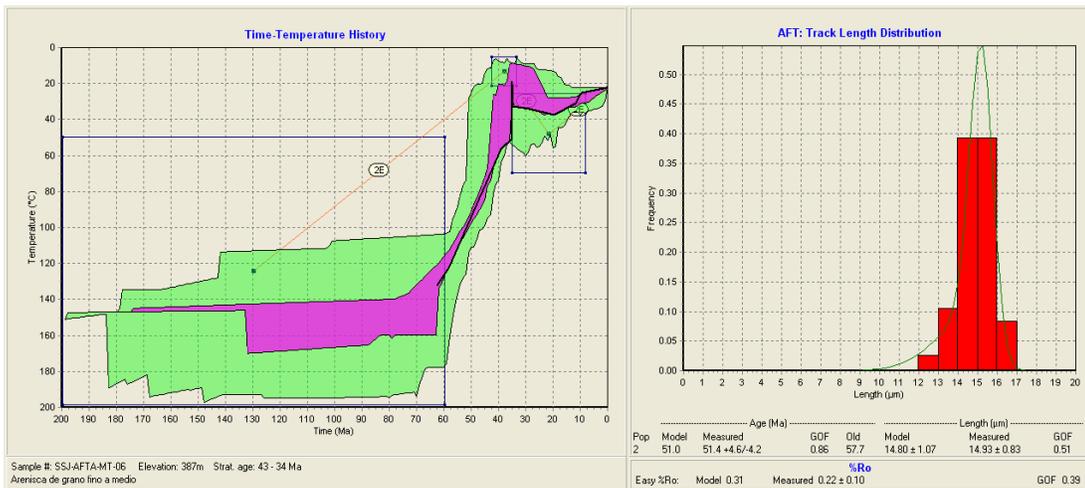


Figura 17. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-06 ubicada a la base de la Formación Arroyo de Piedra.

# HISTORIAS TERMOCRONOLÓGICAS –SECTOR LURUACO-CERRO CANSONA-

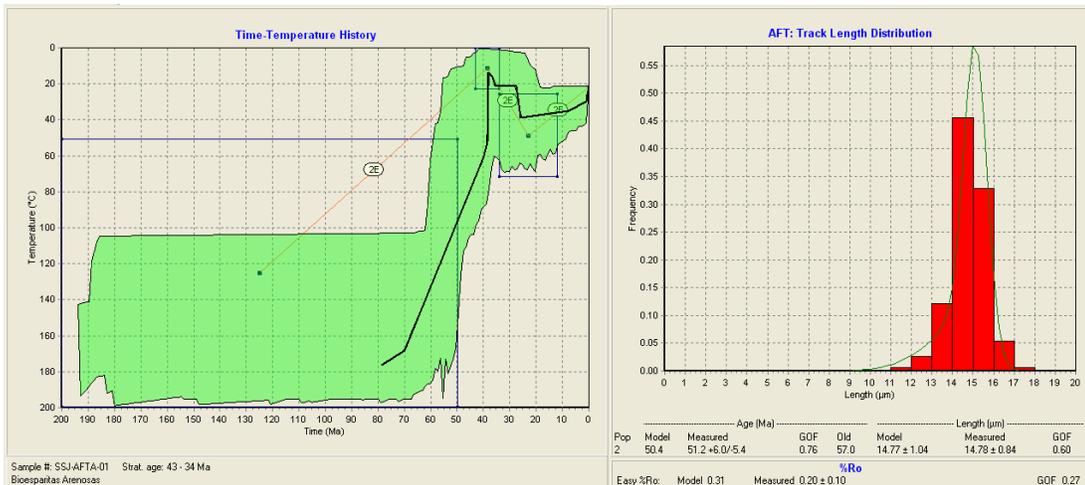


Figura 18. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-01 ubicada en la parte media inferior de la Formación Arroyo de Piedra.

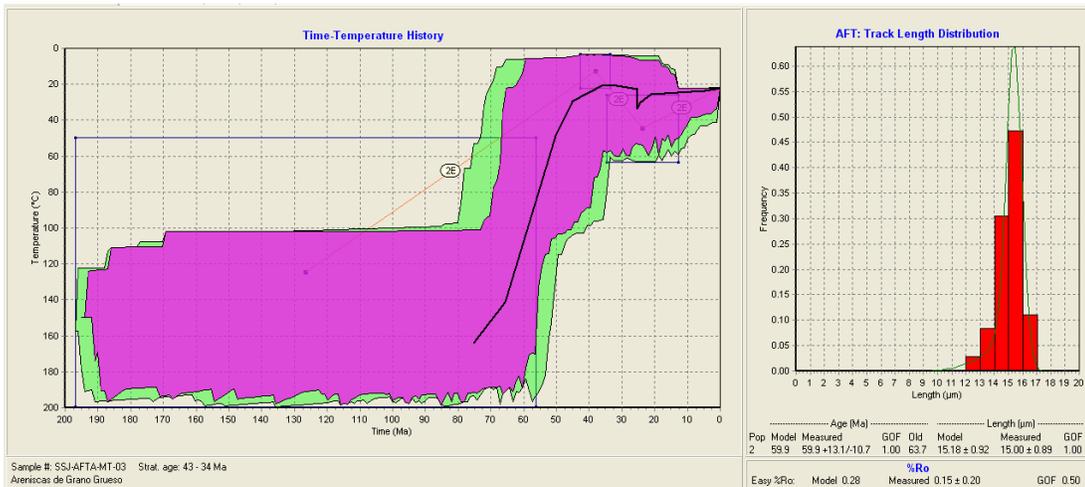


Figura 19. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-03 ubicada en la parte media superior de la Formación Arroyo de Piedra.

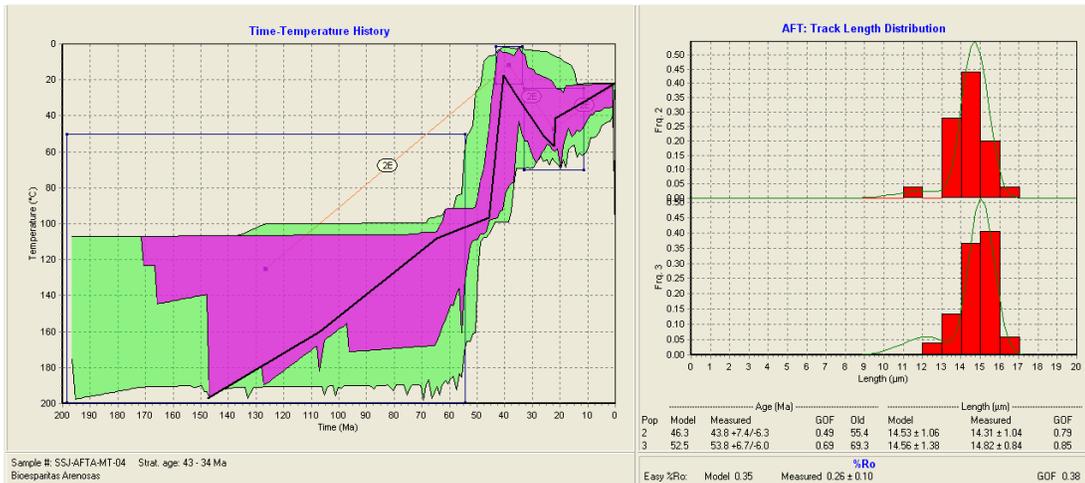


Figura 20. Modelo inverso de la historia termocronológica de la muestra SSJ-AFTA-MT-04 ubicada hacia el tope de la Formación Arroyo de Piedra.