



**“INTERPRETACIÓN SÍSMICA, ESTRUCTURAL Y MODELAMIENTO  
GEOQUÍMICO DE LA FORMACIÓN LA LUNA, EN EL NORESTE DE  
COLOMBIA”.**

**EMILIO JOSE TORRES PARADA.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICO QUIMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
2008.**



**“INTERPRETACIÓN SÍSMICA, ESTRUCTURAL Y MODELAMIENTO  
GEOQUÍMICO DE LA FORMACIÓN LA LUNA, EN EL NORESTE DE  
COLOMBIA”.**

**EMILIO JOSE TORRES PARADA.**

**Trabajo de grado para optar el título de geólogo.**

**Director**

**Mario García González, Ph.D.**

**Profesor Titular Escuela de Geología.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE FISICO QUIMICAS**

**ESCUELA DE GEOLOGÍA**

**2008.**



## **AGRADECIMIENTOS**

El autor del presente trabajo de grado, agradece:

A la Universidad Industrial de Santander, por formarme académicamente y personalmente.

A la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, a los profesores, por contribuir exitosamente en mi formación profesional y personal.

Al Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones de la Universidad Industrial de Santander, por el apoyo en la realización y financiación de este proyecto.

Al Doctor Mario García González, por brindarme su asesoría, confianza y amistad a durante de mi etapa académica y especialmente durante la realización de este trabajo de grado.



*A Dios, principal motivación y guía para mi vida.*

*A mis Padres, Ana Mercedes y José Manuel.*

*A mis Hermanos, Laura Mercedes y José Manuel.*

*A mis Abuelos, Tíos y Primos, por ser parte de mi vida.*

*A mis amigos, quienes me quieren y apoyan por como soy.*

*Ellos me alegraron mi vida en la Universidad.*

*A mi novia Heidy, por su maravilloso amor y apoyo incondicional.*



## **CONTENIDO**

	<b>Pág.</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>15.</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>16.</b>
<b>2.1 OBJETIVO GENERAL</b>	<b>16.</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>16.</b>
<b>3. INFORMACIÓN GENERAL</b>	<b>17.</b>
<b>3.1 Localización</b>	<b>17.</b>
<b>3.2 Información Utilizada</b>	<b>18.</b>
<b>3.3 Información Sísmica</b>	<b>19.</b>
<b>3.4 Información Geoquímica</b>	<b>20.</b>
<b>4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL</b>	<b>23.</b>
<b>5. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL</b>	<b>28.</b>
<b>6 ESTRATIGRAFÍA</b>	<b>32.</b>
<b>6.1. Unidades Estratigráficas Presentes.</b>	<b>33.</b>
<b>6.1.1 Formación La Quinta</b>	<b>34.</b>
<b>6.1.2.3 Grupo Cogollo</b>	<b>34.</b>
<b>Formación Lagunitas</b>	<b>34.</b>
<b>Formación Aguas Blancas</b>	<b>34.</b>
<b>6.1.3 Formación La Luna</b>	<b>36.</b>
<b>6.1.4 Formación Molino</b>	<b>37.</b>
<b>6.1.5 Formación Barco</b>	<b>37.</b>
<b>6.1.6 Formación Cuervos</b>	<b>38.</b>



6.1.7 Formación Cuestas	39.
6.1.8 Cuaternario	39.
<b>7 METODOLOGÍA</b>	<b>42.</b>
7.1 Interpretación Sísmica	42.
7.2 Interpretación Estructural. Marco Teórico.	43.
7.2.1 Teoría de definición de estructuras geométricas	43.
7.2.2 Teoría de tipos de Pliegues Asociados a Fallas Inversas	46.
7.2.2.1 Sistema por Flexión de Falla.	46.
7.2.2.2 Sistema por Propagación de Falla.	51.
7.2.2.3. Sistema por propagación de falla con rompimiento.	57.
7.2.2.4 Sistema por flexión de falla tipo Imbricados.	59.
7.3 Modelamiento Geoquímico. Marco Teórico.	60.
7.3.1 Historia de Subsistencia.	60.
7.3.2 Diagramas de Tiempo Temperatura	62.
7.3.3 Método Cinético	64.
<b>8 RESULTADOS</b>	<b>66.</b>
8.1 Interpretación Sísmica.	66.
8.2 Interpretación Estructural.	74.
8.3 Modelado Geoquímico	98.
8.3.1 Historia de Subsistencia.	99.
8.3.2 Modelado 2D Línea Sísmica SAP2-13.	104.
<b>9. CONCLUSIONES.</b>	<b>115.</b>
<b>10. REFERENCIAS CITADAS.</b>	<b>117.</b>



## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Mapa de Cuencas de Colombia	<b>17.</b>
<b>Figura 2.</b> Evolución estructural de la cuenca Cesar-Ranchería en el Jurásico Tardío.	<b>24.</b>
<b>Figura 3.</b> Evolución estructural de la cuenca Cesar-Ranchería en el Cretácico Tardío.	<b>25.</b>
<b>Figura 4.</b> Evolución estructural de la cuenca Cesar-Ranchería en el Oligoceno Inferior.	<b>25.</b>
<b>Figura 5.</b> Evolución estructural de la cuenca Cesar-Ranchería en el Oligoceno Tardío.	<b>26.</b>
<b>Figura 6.</b> Evolución estructural de la cuenca Cesar-Ranchería en el Plioceno Medio.	<b>26.</b>
<b>Figura 7.</b> Geología estructural actual de la cuenca Cesar-Ranchería.	<b>27.</b>
<b>Figura 8.</b> Figura ilustrativa de los elementos tectónicos regionales que afectan la cuenca Cesar-Ranchería.	<b>27.</b>
<b>Figura 9.</b> Mapa de localización de estructuras regionales de la cuenca Cesar-Ranchería.	<b>28.</b>
<b>Figura 10.</b> Columna estratigráfica generalizada Cuenca Cesar-Ranchería.	<b>33.</b>
<b>Figura 11.</b> Sección Cronoestratigráfica sección sísmica B-B'.	<b>41.</b>
<b>Figura 12.</b> Diagrama que resume paso a paso La metodología seguida dentro del software para la integración de los datos que llevaron a la interpretación de las líneas sísmicas 2D escogidas para este trabajo.	<b>42.</b>
<b>Figura 13.</b> Falla con marcadores Offset y cutoffs.	<b>43.</b>
<b>Figura 14.</b> Translación del bloque rígido.	<b>46.</b>
<b>Figura 15.</b> Formación del pliegue por flexión de falla.	<b>47.</b>
<b>Figura 16.</b> Modelo Cinemática de un Pliegue sinclinal por flexión de falla.	<b>48.</b>
<b>Figura 17.</b> Modelo Cinemática de un Pliegue anticlinal por flexión de falla.	<b>48.</b>
<b>Figura 18.</b> Gráfica para modelar los pliegues por flexión de falla.	<b>50.</b>
<b>Figura 19.</b> Pliegue por propagación de falla.	<b>52.</b>



	<b>Pág.</b>
<b>Figura 20.</b> Modelo cinemático de un pliegue por propagación de falla.	<b>53.</b>
<b>Figura 21.</b> Terminología de los elementos en pliegues por propagación de falla.	<b>53.</b>
<b>Figura 22.</b> Diagramas de relación entre los ángulos interlimbos y ángulo $\theta_2$ .	<b>54.</b>
<b>Figura 23.</b> Modelo cinemático de los pliegues por propagación de falla con eje fijo.	<b>55.</b>
<b>Figura 24.</b> Diagramas de relación entre el ángulo interlimbos y el ángulo $\theta$ .	<b>56.</b>
<b>Figura 25.</b> Modelo Cinemático de pliegue por propagación de falla por rompimiento transversal.	<b>58.</b>
<b>Figura 26.</b> Modelo cinemático que muestra la estructura por rompimiento transversal sinclinal propuestos por Suppe y Medwedeff (1990).	<b>59.</b>
<b>Figura 27.</b> Estructura de imbricada de rompimiento hacia delante.	<b>60.</b>
<b>Figura 28.</b> Variación de la porosidad en función de la profundidad.	<b>62.</b>
<b>Figura 29.</b> Esquemmatización de la ubicación de las líneas sísmicas 2D y pozos utilizados en este estudio.	<b>66.</b>
<b>Figura 30.</b> Horizontes presentes en la información sísmica.	<b>70.</b>
<b>Figura 31.</b> Mapa estructural en tiempo (milisegundos) del tope de la formación La Luna en el área de estudio.	<b>71.</b>
<b>Figura 32.</b> Mapa estructural en profundidad (pies) del tope de la formación La Luna en el área de estudio.	<b>72.</b>
<b>Figura 33.</b> Mapa estructural en profundidad (pies) del tope de la formación La Luna en el área de estudio.	<b>73.</b>
<b>Figura 34.</b> Ilustración de la localización de las principales estructuras regionales de cabalgamiento, al igual que las secciones sísmicas utilizadas y la relación de estas con los pozos.	<b>76.</b>
<b>Figura 35.</b> Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea <b>SAP2-18</b> .	<b>77.</b>
<b>Figura 36.</b> Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea <b>SAP2-13</b> .	<b>80.</b>



	<b>Pág.</b>
<b>Figura 37.</b> Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea <b>SAP-01.</b>	<b>83.</b>
<b>Figura 38.</b> Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea <b>SAP-20.</b>	<b>86.</b>
<b>Figura 39.</b> Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea <b>SAP-16.</b>	<b>89.</b>
<b>Figura 40.</b> Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea <b>SAP-10.</b>	<b>91.</b>
<b>Figura 41.</b> Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea <b>SAP-08.</b>	<b>94.</b>
<b>Figura 42.</b> Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea <b>SAP-06.</b>	<b>96.</b>
<b>Figura 43.</b> Esquema del desarrollo estructural y aumento del desplazamiento en el área de estudio.	<b>98.</b>
<b>Figura 44.</b> Gráfico para calcular la temperatura de superficie según la latitud 9°, en el hemisferio Norte.	<b>99.</b>
<b>Figura 45.</b> Diagrama de Profundidad (m) vs. Temperatura de Fondo (°C - Celsius).	<b>100.</b>
<b>Figura 46.</b> Profundidad (m) vs. Reflectancia de Vitrinita (%Ro).	<b>100.</b>
<b>Figura 47.</b> Diagrama de soterramiento con respecto a la profundidad y la edad.	<b>101.</b>
<b>Figura 48.</b> Diagrama de soterramiento. Variación de la temperatura (°C) con respecto a la profundidad y la edad.	<b>102.</b>
<b>FIGURA 49.</b> Diagrama de soterramiento. Variación de la reflectancia de vitrinita (%Ro) con respecto a la profundidad y la edad.	<b>103.</b>
<b>Figura 50.</b> Parte de la sección SAP2-13 Interpretada en profundidad que se tomó para realizar el modelamiento geoquímico.	<b>108.</b>
<b>Figura 51.</b> Parte de la sección SAP2-13 cargada en el software PETROMOD 10. 2D.	<b>106.</b>



	<b>Pág.</b>
<b>Figura 52.</b> Parte de la sección SAP2-13 cargada en el software PETROMOD 10. 2D.	<b>107.</b>
<b>Figura 53.</b> Parte de la sección SAP2-13 cargada en el software PETROMOD 10. 2D.	<b>108.</b>
<b>Figura 54.</b> Resultado del Modelo geoquímico 2D de la línea sísmica SAP2-13. Se ilustra de la secuencia evolutiva en 45.5 Ma.	<b>109.</b>
<b>Figura 55.</b> Resultado del Modelo geoquímico 2D de la línea sísmica SAP2-13. Se ilustra de la secuencia evolutiva en 20 Ma.	<b>110.</b>
<b>Figura 56.</b> Modelo geoquímico actual 2D de la línea sísmica SAP2-13.	<b>111.</b>



## LISTA DE TABLAS.

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Programas sísmicos utilizados.	<b>19.</b>
<b>Tabla 2.</b> Datos promedios de %TOC y TMAX.	<b>21.</b>
<b>Tabla 3.</b> Datos promedio de %Ro en rocas aflorantes.	<b>21.</b>
<b>Tabla 4.</b> Corresponde a datos preestablecidos, K corresponde a la conductividad térmica, $\rho_c$ corresponde a la densidad.	<b>63.</b>
<b>Tabla 5.</b> Eventos erosivos en la zona de estudio.	<b>104.</b>



## RESUMEN

**TITULO:** INTERPRETACIÓN SÍSMICA, ESTRUCTURAL Y MODELAMIENTO GEOQUÍMICO DE LA FORMACIÓN LA LUNA, EN EL NORESTE DE COLOMBIA.<sup>1</sup>

**Autor:** Emilio José Torres Parada. \*\*

**Palabras Clave:** Formación La Luna, Anticlinal HT-1, modelo geoquímico 1D y 2D, Noreste de Colombia.

**Descripción:**

La exploración de hidrocarburos en el Noreste de Colombia, para el área de estudio no ha tenido un fuerte desarrollo, debido a la ausencia de descubrimientos importantes. Este trabajo realiza un estudio del comportamiento estructural de la Formación La Luna y su relación con la generación, migración y acumulación de los hidrocarburos. Los datos utilizados fueron suministrados por el Grupo de Investigación en Geología de hidrocarburos y Carbones de La Universidad Industrial de Santander en convenio con la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH).

Se observó que la Formación La Luna en el área de estudio se encuentra afectada tectónicamente por régimen compresivo, en donde se postula que la estructura actual, el Anticlinal HT-1 fue formado por flexión del plano de falla inversa de bajo ángulo. La estructura principal interpretada y propuesta en este estudio es de plegamiento anticlinal tipo pliegue por flexión de falla imbricado con rompimiento hacia adelante.

El Modelo Geoquímico 1D y 2D indica que la Formación La Luna entró en ventana de generación de hidrocarburos desde hace 45.5 Ma. El modelo no muestra acumulaciones de hidrocarburos debido a que no hay trampas estructurales ni sellos eficientes. Sin embargo en otras áreas donde haya trampas estructurales y sellos es posible encontrar acumulaciones de hidrocarburos.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Grado Modalidad Investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander. Director: Ph.D Mario García-González.



## ABSTRACT

**TITLE:** SEISMIC INTERPRETATION, STRUCTURAL INTERPRETATION, AND GEOCHEMICAL MODELING OF LA LUNA FORMATION, NORTHEAST COLOMBIA.<sup>1</sup>

**Author:** Emilio José Torres Parada. \*\*

**Key Words:** La Luna Formation, Anticline HT-1, Geochemical Modeling 1D and 2D, Northeast Colombia.

**Description:**

The hydrocarbon exploration in Northeast Colombia, for the area of study, hasn't been strongly developed due to the absences of important discoveries. This study is focused to the Structural behavior of La Luna Formation and the relation with the generation, migration and accumulation of hydrocarbons. The data used in this project were supplied by *Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones* of the *Universidad Industrial de Santander*.

In the studied area, La Luna Formation is tectonically affected by a compressive regime, where the actual structure, the Anticline HT-1 was formed by a low angle bended fault surface. The structure interpreted and proposed in this study for La Luna Formation is an imbricate anticline fault bend fold with forward breaking.

The Geochemical modeling 1D and 2D indicates that La Luna Formation was in the oil window since 45.5 Ma ago. The modeling doesn't show hydrocarbon accumulation because there are not structural traps and seals. However in other areas with structural traps and efficient seals, is very possible to find hydrocarbon accumulation.

---

<sup>1</sup> Undergraduate Thesis. Research Work.

\*\* Physical Chemistry Engineering School, Department of Geology, Universidad Industrial de Santander. Thesis Director: Ph.D Mario García-González.



## 1. INTRODUCCIÓN

La exploración hidrocarburífera en el Noreste de Colombia, a lo largo de su historia no ha tenido un fuerte desarrollo, debido a la ausencia de descubrimientos importantes, lo cual ha ocasionado que esta zona no sea atractiva. En consecuencia el potencial de hidrocarburos de esta zona no se conoce en su totalidad.

Este trabajo realiza un estudio del comportamiento estructural y su relación con la generación, migración y acumulación de los hidrocarburos, con los datos suministrados por el Grupo de Investigación en Geología de hidrocarburos y Carbones de La Universidad Industrial de Santander en convenio con la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). Por tales motivos este trabajo tiene restricciones de confidencialidad en publicar los datos de localización exacta y nombre del área de estudio, localización y nombres de las líneas sísmicas y pozos.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar para un área determinada del Noreste de Colombia el comportamiento estructural de La Formación La Luna, mediante interpretaciones sísmicas 2D en profundidad, interpretaciones estructurales y modelamiento Geoquímico 1D y 2D, que ayuden a determinar las características de generación, migración y acumulación.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar la interpretación sísmica de La Formación La Luna.
- Interpretar el estilo estructural de La Formación La Luna, basado en las interpretaciones sísmicas 2D en profundidad.
- Realizar la historia de subsidencia del área de estudio.
- Realizar el modelado geoquímico 2D para analizar la generación, migración y acumulación de Hidrocarburos en la Formación La Luna.



### 3. INFORMACION GENERAL

#### 3.1. Localización.

La zona de estudio corresponde a una parte de la Cuenca Cesar-Ranchería, la cual no se menciona por acuerdo de confidencialidad. La cuenca Cesar-Ranchería está localizada en la región Noreste de Colombia, a lo largo de la frontera con Venezuela. Geográficamente se encuentra en el Noreste de Colombia.



**Figura 1.** Localización de la Cuenca Cesar-Ranchería en el Noreste de Colombia. Tomado y modificado de Vargas et al., 2007.



La Cuenca Cesar – Ranchería tiene un área aproximada de 6800 Km<sup>2</sup> y es una cuenca de tipo foreland intramontaña. Limita geológicamente al NW con la Sierra Nevada de Santa Marta, al SW con la Falla Santa Marta, al SE con la Serranía de Perijá y se extiende hacia el NE hasta el Alto de Verdesia (Alto de Valledupar). Por tanto, según Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2008, se puede considerar que existen dos áreas diferentes con transición, traslape, entre ellas, estas son: área del NW y área del SE de la cuenca.

### **3.2. Información Utilizada.**

Se utilizó la información de la base de datos elaborada por el Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones (2007), para el proyecto “Inventario, Interpretación y Evaluación Integral de la Información Geológica, Geofísica y Geoquímica adquirida por la ANH en la Cuenca Cesar – Ranchería y el Área Especial Cesar-Ranchería”.

Se utilizaron (12) pozos, los cuales son los pozos exploratorios. Se utilizaron informaciones de pozos tomadas de García- González et al., 2008, la cual consiste de topes y bases de formaciones, cajas de velocidades, temperaturas de fondo de pozo.

Por acuerdo de confidencialidad, no se menciona la información detallada, tal como nombre de los pozos, coordenadas, datos del año de inicialización y terminación de la perforación, el bloque en donde está localizado, la compañía operadora, la elevación del terreno, profundidad total, formación que alcanzó, el estado final y algunas observaciones con respecto al pozo.



### 3.3. Información Sísmica.

Se utilizaron dos programas sísmicos ya que estos son los que se encuentran en el área de estudio escogida. Se denominaron los programas sísmicos de la forma SAP-1 Y SAP-2, donde se uso la información sísmica del programa SAP1 en su totalidad y del programa SAP2, las líneas sísmicas 2-D SAP2-13 y SAP2-18, ya que estas abarcaban longitudinalmente y transversalmente el área de estudio. En total Se utilizaron Ocho (8) líneas sísmicas 2D en profundidad. A continuación se mencionan los programas sísmicos utilizados.

<i>Programa Sísmico</i>	<i>Longitud (Km.)</i>	<i>Número de Líneas Sísmicas</i>	<i>Resolución Vertical</i>	<i>Resolución Horizontal</i>
Programa SAP N°1	69	6	Moderada	Buena
Programa SAP N°2	143	2	Moderada	Moderada

**Tabla 1.** Programas sísmicos utilizados.

La resolución de la información sísmica es variada, ya que de los dos (2) programas son de diferente calidad, siendo el programa SAP N°1 el de mejor resolución y sísmica profunda pero es pequeño; el programa SAP N°2 tiene Moderada calidad y sísmica profunda.

Para efectuar la correlación de las líneas sísmicas, se tomaron parámetros como la escala de las líneas sísmicas (horizontal, vertical), niveles de los datums sísmicos, datos de secciones apiladas y migradas, la intersección de las líneas sísmicas interpretadas por García-González et al., 2008.



La correlación se ve afectada porque las escalas horizontales y verticales son variadas en las diferentes líneas, los datums sísmicos son diferentes para cada programa, y se combinaron datos de secciones apiladas y migradas.

La información de la localización de la sísmica con que se cuenta fue suministrada por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH); las imágenes sísmicas se recibieron en formato SGY; los archivos para georeferenciar las imágenes sísmicas, en formato UKOOA.

### **3.4 Información Geoquímica.**

#### **Calidad y cantidad de la materia orgánica**

La información geoquímica en la Cuenca Cesar-Ranchería es escasa, la más reciente proviene del estudio contratado por la Agencia Nacional de Hidrocarburos en el 2007, en el cual se adelantó muestreo geoquímico de superficie, en el área de la Serranía de Perijá.

En dicho estudio se obtuvieron análisis de TOC, pirolisis Rock Eval, petrografía orgánica y análisis de extractos. Los resultados de los análisis geoquímicos se resumen en las **tablas 2 y 3**.



<b>Formación</b>	<b>Roca</b>	<b>% TOC</b>	<b>TMAX</b>
Cuervos	Lodolita carbonosa, arcillolita	34,47	436
Barco	Carbón	50	
La Luna	Caliza	3,43	534
Tocuy y Maracas	Caliza	0,47	573
Tocuy y Animas	Caliza	0,61	509
Animas	Caliza	1,47	530
Lagunitas	Caliza	0,41	521
Riό Negro	Arenita, arcosa	0,78	543
La Quinta	Toba	0,73	513

**Tabla 2.** Datos promedios de %TOC y TMAX. Tomado de García-González et al., 2008.

Los datos de Reflectancia de vitrinita (%Ro) se resumen en la **tabla 3**.

<b>Formación</b>	<b>%Ro</b>
Los Cuervos	0,53
La Luna	1,13
Tocuy y Maracas	0,95
Tocuy y Animas	0,82
Animas	1,16
Lagunitas	1,14
Rio Negro	1,14
La Quinta	1,41

**Tabla 3.** Datos promedio de %Ro en rocas aflorantes. Tomado de García-González et al., 2008.



Las unidades estratigráficas analizadas incluyen las formaciones La Quinta, Río Negro, Lagunitas, Aguas Blancas (Miembros Tocuy, Ánimas y Maracas), La Luna y Cuervos, los análisis no incluyen muestras de la Formación Molino.

Las propiedades de cantidad y calidad de la materia orgánica presente en las rocas analizadas, permiten establecer como rocas fuentes las siguientes formaciones: Los Cuervos (Paleoceno), La Luna y Grupo Cogollo, Formación Ánimas (Cretácico).

### **Historia Termal de la Cuenca**

El flujo de calor en la historia de la cuenca se basó la determinación realizada por García- González et al., 2008, la cual fue hecha con en el modelo de Mckenzie (1980) fundamentado en la historia tectónica de la cuenca que se inicia en el Jurásico con la depositación de unidades sedimentarias durante un evento de distensión, el cual se continúa por una subsidencia termal durante el Cretáceo culminando en el Maestrichtiano. Las fallas de cabalgamiento presentan un estilo de compresión el cual presenta flujos de calor inferiores a los de los eventos tectónicos anteriores.

La variación del flujo de calor en la Subcuenca Cesar se inicia con un valor de  $70 \text{ mW/m}^2$  el cual se incrementa a  $100 \text{ mW/m}^2$  durante el Albiano y posteriormente disminuye a  $75 \text{ mW/m}^2$  en el Maestrichtiano para luego disminuir aún más en el Terciario y Cuaternario.

La discordancia del Eoceno (53Ma), que removió los sedimentos clásticos del Eoceno Inferior y continuó hasta el Mioceno Inferior correlaciona con un levantamiento tectónico de la cuenca que se traduce en un enfriamiento progresivo de la misma. El flujo de calor actual se calculó por medio de la



ecuación de Fourier a partir de las temperaturas de fondo (BHT) tomadas de los pozos, las conductividades térmicas de las unidades, temperaturas superficiales y espesores. La ecuación de Fourier se describe a continuación:

$$T_z \equiv T_0 + q \sum \frac{x}{\lambda}$$

En donde:

$T_z$  es la temperatura del horizonte a calcular

$T_0$  es la temperatura superficial, la cual se estimó en 24.4 °C.

Q es el flujo de calor el cual se calculó en base a datos de temperaturas de fondo de los pozos perforados en cada una de las subcuencas.

X corresponde al espesor para cada formación, el cual se obtiene de la interpretación sísmica en profundidad.

$\lambda$  Es la conductividad termica para cada litología la cual es posible obtener a partir de la ecuación de Brigaud y otros (1990):  $\lambda_{roca} = (\lambda_{matriz})^{1-\varphi} + (\lambda_{fluido})^{\varphi}$

Donde  $\lambda_{matriz}$  corresponde a la conductividad que presenta cada formación dependiendo de la litología encontrada en ella,  $\lambda_{fluido}$  es la conductividad del agua equivalente a  $0.56 \approx 0.6$  W/m/k; y  $\varphi$  es la porosidad calculada durante la decompactación.

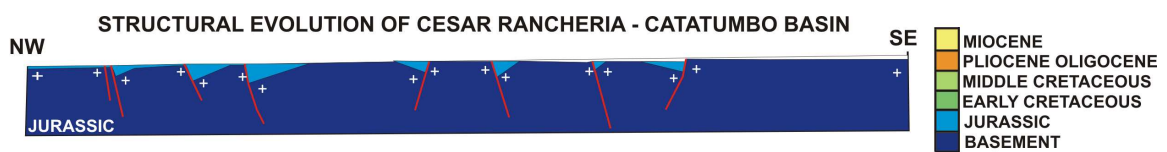
El flujo de calor actual empleado es  $50.5 \text{ mW/m}^2$ , el cual fue calculado por García González, et al., 2008.

#### 4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

A continuación se presenta la información de la Geología Regional y Evolución Tectónica Regional de la cuenca Cesar-Ranchería, elaborado por GEOPEROCOL Ltda., y por Gerencia de Estudios Regionales ECOPETROL, 1998, en el informe “Potencial Petrolífero de la Cuenca Cesar – Ranchería”.



El suceso tectónico que dominó el Mesozoico Temprano, es la formación de un Proto – Caribe activo por la presencia de un centro de expansión oceánica entre Norte y Sur América. El ambiente extensional permitió la formación de fosas continentales que sirvieron de áreas de depósito durante el Triásico y el Jurásico para la Formación La Quinta.

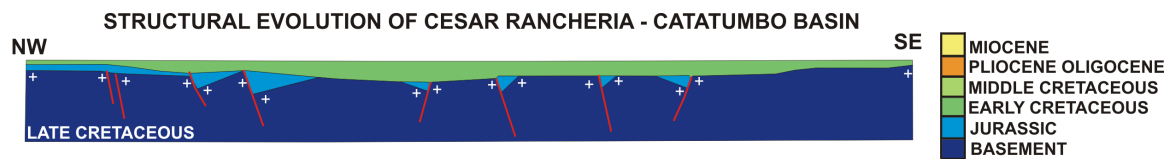


**Figura 2.** Evolución estructural de la cuenca Cesar-Ranchería en el Jurásico Tardío. Tomado de Gerencia de Estudios Regionales ECOPETROL, 1998.

En el Cretáceo Temprano la costa noroccidental de Sudamérica se encontraba más alejada del centro de expansión.

Durante este periodo y debido a un levantamiento global en el nivel del mar, el área de depósito se extendió mas al sur, cubriendo entonces la zona que hoy corresponde a las cuencas de Barinas Maracaibo, Cesar- Ranchería, Cordillera Oriental, Llanos, Valle Medio y Superior del Magdalena.

En el Cretácico Tardío, como resultado del movimiento hacia el nororiente de la placa Caribe el borde sur oriental de esta chocó oblicuamente contra Suramérica, iniciando así un cambio de ambientes de depósito marinos someros hacia ambientes transicionales en el Maestrichtiano – Daniano.

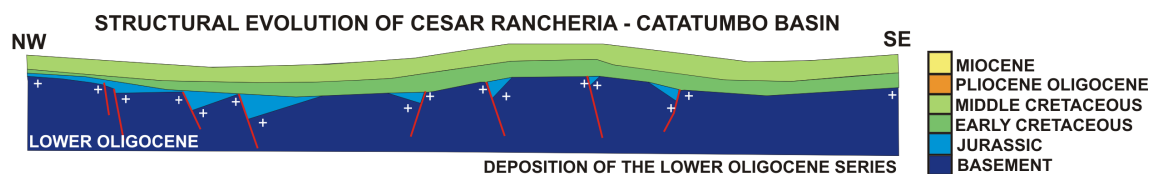


**Figura 3.** Evolución estructural de la cuenca Cesar-Ranchería en el Cretácico Tardío. Tomado de Gerencia de Estudios Regionales ECOPEPETROL, 1998.

El movimiento de la placa Caribe hacia el Nororiente continuó durante el Paleoceno. Además la configuración tectónica pasó de un borde pasivo predominante hasta el cretáceo tardío a un régimen convergente y compresivo.

Durante el Paleoceno – Eoceno Inferior, continuó en el continente el régimen de subsidencia y depositación que produjo un grueso paquete de sedimento clásticos en la cuenca del Cesar.

En el Eoceno superior - Oligoceno, durante la Orogenia del Eoceno inferior al Eoceno Superior, la subducción o movimiento de transgresión de la placa del Caribe con respecto a Sur América está apenas comenzando.

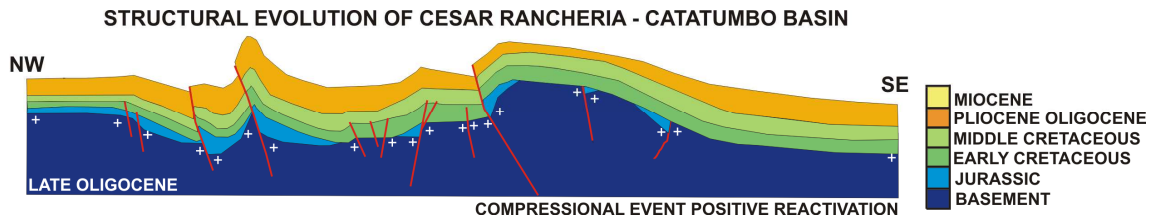


**Figura 4.** Evolución estructural de la cuenca Cesar-Ranchería en el Oligoceno Inferior. Tomado de Gerencia de Estudios Regionales ECOPEPETROL, 1998.

El tectonismo del Eoceno Inferior en la cuenca Cesar-Ranchería es posterior a la depositación ya que existe una discordancia que está documentada por la erosión que removi6 la secuencia clástica del Eoceno inferior y que continu6 hasta el mioceno inferior.

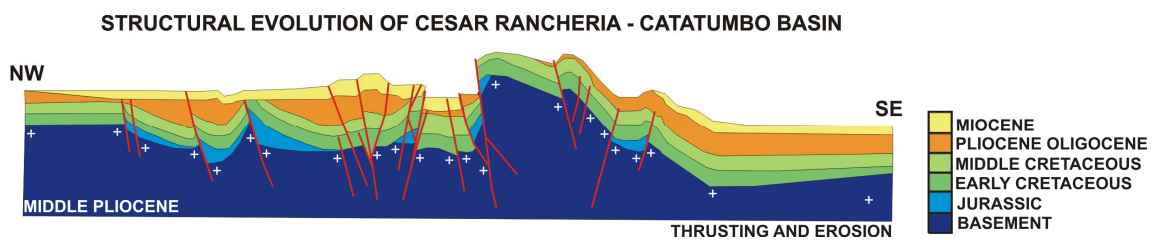


Durante el Oligoceno, en la subcuenca del Cesar se desarrollan fallas de cabalgamiento y pliegues. En el Oligoceno Superior (25 m.a.) por causa de la intensa compresión a nivel regional, el basamento es levantado.



**Figura 5.** Evolución estructural de la cuenca Cesar-Ranchería en el Oligoceno Tardío. Tomado de Gerencia de Estudios Regionales ECOPETROL, 1998.

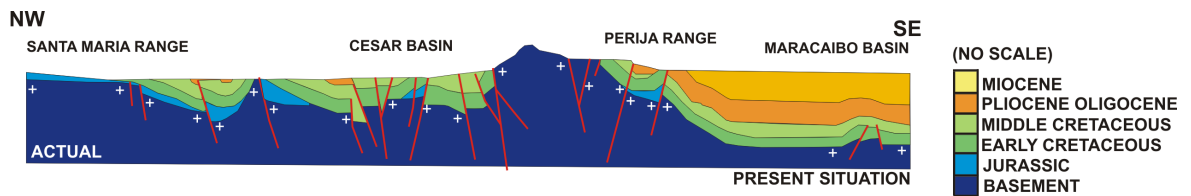
Durante el Mioceno – Plioceno, el evento más influyente en el área de Cesar – Ranchería, es el levantamiento de la Serranía de Perijá, presentando fallamiento de bloques. De manera simultánea con este tectonismo, sucede sedimentación sobre la discordancia generada por estos eventos tectónicos y la subcuenca Cuenca es rápidamente sedimentada con material proveniente de los altos ubicados hacia el Noroccidente y Suroriente. Esta serranía sirvió de barrera a la compresión en dirección Suroriente, generada por la Placa del Caribe y el movimiento de la Sierra Nevada de Santa Marta a través de la Falla de Oca.



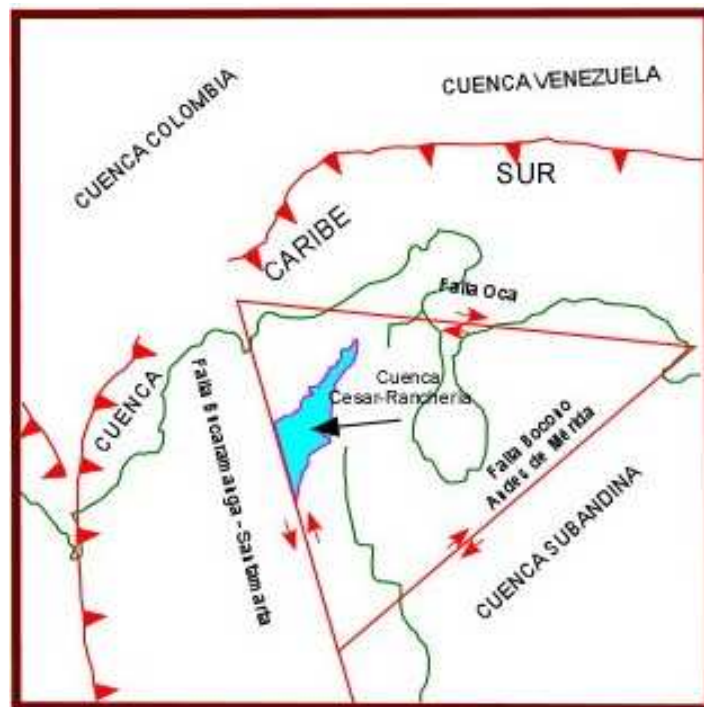
**Figura 6.** Evolución estructural de la cuenca Cesar-Ranchería en el Plioceno Medio. Tomado de Gerencia de Estudios Regionales ECOPETROL, 1998.



En el presente los efectos de compresión continúan siendo causados por la interacción de las placas del Caribe y sur América. El moderado pero continuo levantamiento de la sierra nevada de Santa Marta y de la serranía de Perijá hace que estas sigan siendo fuentes de aporte de sedimentos para las áreas de Cesar y Ranchería



**Figura 7.** Geología estructural actual de la cuenca Cesar-Ranchería. Tomado de Gerencia de Estudios Regionales ECOPETROL, 1998.



**Figura 8.** Figura ilustrativa de los elementos tectónicos regionales que afectan la cuenca Cesar-Ranchería. Tomado y modificado de Geopetrocol. 1998.



## 5. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL

Con base en García- González et al., 2008, y Gerencia de Estudios Regionales ECOPETROL S.A., 1998, en el informe “Potencial Petrolífero de la Cuenca Cesar – Ranchería”. Se menciona a continuación los aspectos más relevantes de la geología estructural de la Subcuenca Cesar describiéndose de forma detallada de las estructuras presentes. En general, se explica las estructuras en superficie y subsuelo, analizando la forma como éstas influyen a la actividad y tendencias tectónicas regionales.



**Figura 9.** Mapa de localización de estructuras regionales de la cuenca Cesar-Ranchería. Tomado de García- González et al., 2008.



### 5.1. Aspectos tectónicos Cuenca Cesar.

**La Falla de Oca**, es de tipo *wrench* – transcurrente, dextro lateral y marca el límite norte de la subcuenca de Ranchería, se considera una falla de gran actividad con un desplazamiento de 180 kilómetros. Su movimiento está relacionado con el empuje de la Placa Caribe que subduce al continente.

Los esfuerzos de la Falla de Oca y la Placa Caribe han originado una rotación dextral de la región occidental del Bloque de Maracaibo, incluyendo la Sierra Nevada de Santa Marta y la Cuenca cesar–Ranchería.

**La Falla de Santa Marta**, que sirve de límite sur – occidental a la Cuenca de Cesar – Ranchería, es de tipo transcurrente, sinestral y se relaciona hacia el oriente con la Falla de Boconó.

**La Falla de Perijá**, es de tipo transcurrente y dextral y limita a la Subcuenca del Cesar. Su origen se plantea como la acción de un esfuerzo derivado del empuje de la Falla de Oca al oriente y del Macizo de Santander al norte, cuyo resultado es un cabalgamiento tipo subcabalgamiento en la subcuenca de Ranchería y de tipo transcurrente en la subcuenca del Cesar.

**El Sinclinal de la Jagua**. Tiene una dirección NE-SW y se puede seguir en superficie por más de 25 Km.

**Alto de Verdesia**. Es una estructura anticlinal asociada a la rampa frontal del Sistema de Fallas de Verdesia.



**Sistema de Fallas de Verdesia.** Es caracterizado por ser un sistema imbricado con propagación hacia el Oeste, constituido por dos estructuras imbricadas con apretados cierres estructurales que involucran la secuencia Cretácica.

**Sistema de Fallas de Bosconia.** Este sistema de fallas tiene convergencia hacia el Este, con desplazamiento corto, e involucran el basamento pre-Jurásico.

**Anticlinal de Becerril.** Es un pliegue anticlinal con vergencia hacia el Este, desarrollado por propagación de falla. Expone en superficie los depósitos de las Formaciones Aguas Blancas y la Luna.

**Sinclinal de los Venados.** Forma parte del flanco occidental del Alto de Verdesia y tiene vergencia hacia el Este. El flanco occidental de esta estructura es cortado por el Sistema de Fallas de Verdesia.

Se considera que la interacción de estos elementos tectónicos, ha generado la configuración actual de la cuenca Cesar–Ranchería.

El desarrollo de la Cuenca Cesar–Ranchería se puede resumir desde el post-Triásico en los siguientes pasos:

1. El fallamiento extensional Jurásico con formación de *rift*, localizado en el Cesar, en los sectores occidentales de Ranchería y en la Sierra de Perijá.
2. Una subsidencia térmica ocurrida durante el Cretáceo temprano a medio, desarrollando una espesa secuencia “post-*rift*”, separada del margen



pasivo del proto-Caribe por el Bloque de la Sierra Nevada de Santa Marta, desarrollada durante el Mesozoico.

3. En el Oligoceno se presenta compresión y cabalgamiento dentro de la Cuenca Cesar-Ranchería y en margen oeste de la Serranía de Perijá.
4. Fallamiento de rumbo durante el Plioceno y desarrollo de las Fallas de Santa Marta y Oca. En general la reactivación de fallas y erosión masiva de todos los elementos estructurales caracterizan la historia del Plioceno en la región

Kellogg, J, et al., 1982, resume la configuración actual de la Cuenca como “el resultado de una tectónica compresional y transpresional asociada a la convergencia tectónica a lo largo del margen sur del Caribe y el sector norte de los Andes durante el Cenozoico”.

Además reconoce para la Serranía del Perijá y áreas adyacentes las siguientes cuatro fases tectónicas Cenozoicas, asociadas a inconformidades:

- Fase Tectónica. Eoceno Temprano
- Orogenia Caribe. Eoceno Medio
- Fase Tectónica. Oligoceno Tardío
- Orogenia Andina. Mioceno Tardío – Reciente.

Solo las dos últimas fases pueden ser identificadas en la cuenca Cesar – Ranchería, debido a la erosión del final del Mioceno.



## 6. ESTRATIGRAFIA DE LA SUB-CUENCA CESAR

Las unidades de roca presentes en la Sub-Cuenca Cesar abarcan desde el Precámbrico hasta depósitos recientes. En este capítulo se describen las unidades presentes en el área de estudio, haciendo referencia a su edad, espesores, contactos, ambiente de depósito. Con la anterior información se da una idea de la evolución sedimentológica de la cuenca. Las características de las unidades de roca presentes en el área de estudio, se describen a continuación tomando como referencia se utiliza la columna estratigráfica generalizada mostrada en la **Figura 10**.

Se presenta un resumen de las características de las formaciones en términos de su contenido de materia orgánica, potencial de generación, potencial de acumulación, sellos y posibles tipos de hidrocarburos generados.

La información estratigráfica se ha tomado del Léxico Estratigráfico Internacional de Colombia elaborado por Julivert et al., 1968 y Porta et al., 1974, también del Informe de Prospectividad de la cuenca Cesar-Ranchería, elaborado por García- González et al., 2008 y de la información de Compañías petroleras que han trabajado en una misma área ha dado lugar a la definición de términos litoestratigráficos.

Las diferentes etapas de la evolución en el desarrollo del conocimiento geológico de Colombia han sido trazadas por Julivert et al., 1968 como una primera parte del Léxico Estratigráfico Internacional – Colombia, comprendiendo el Pre-Cámbrico, Paleozoico, Mesozoico e intrusiones Terciarias y la parte comprendida del Terciario y Cuaternario de Colombia se menciona en de Porta et al., 1974. En el volumen elaborado por Porta se han tratado no sólo las unidades litoestratigráficas sino también las bioestratigráficas.

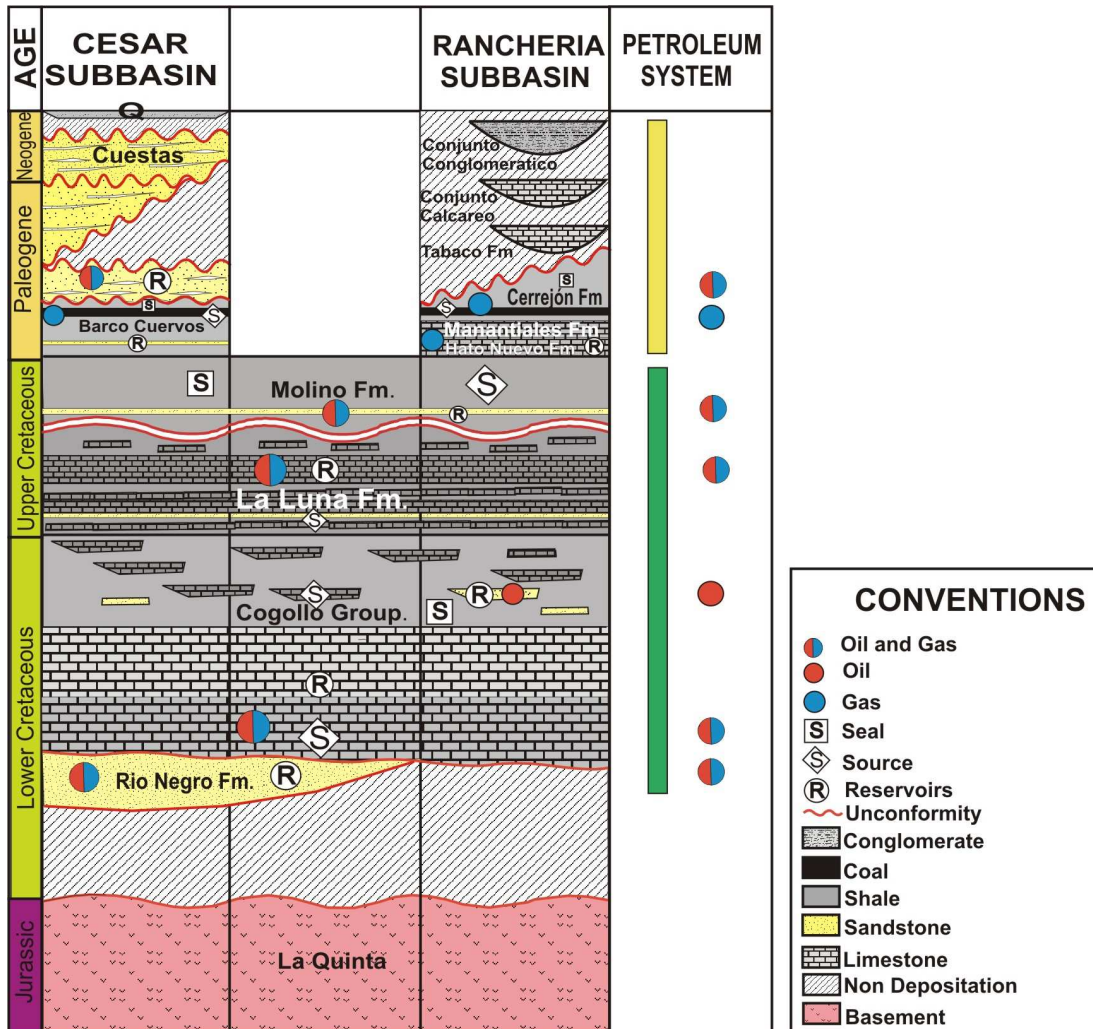


Figura 10. Columna estratigráfica generalizada Cuenca Cesar-Ranchería. Tomado de García-González y otros 2008.

### 6.1 UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS PRESENTES

A continuación se mencionan las unidades estratigráficas presentes en la información geológica utilizada.



## **Mesozoico.**

### **Triásico – Jurásico.**

#### **6.1.1 Formación La Quinta (Jrq).**

Estudios iniciales de Kunding en 1938. Indican que se compone de depósitos clásticos no marinos, asociados a rocas vulcanoclásticas, areniscas arcósicas, limolitas abigarradas y conglomerados color rojo, cuyas clastos varían de ígneos a metamórficos o procedentes de la misma formación; hacia la parte media de la sección se presentan cenizas félsicas, flujos andesíticos basaltitos y brechas. Su edad según Maze corresponde a Triásico tardío – Jurásico tardío y Jurásico tardío. (Bonaparte, 1979).

En la Cuenca Cesar–Ranchería aflora parcialmente, pero en la sección tipo, en La Grita, Venezuela, alcanza más de mil metros. Reposo discordante sobre las rocas paleozoicas y es suprayacida discordantemente por rocas cretácicas. El Ambiente de Depósito corresponde al tipo continental fluvial

## **Cretácico.**

#### **6.1.2 Grupo Cogollo (Kic).**

Las rocas que conforman este grupo corresponden a los depósitos posteriores a la Formación Río Negro y anteriores a la Formación La Luna. De acuerdo con la zona de estudio, se ha dividido de la siguiente manera:



### **Formación Lagunitas:**

Definida por Lill y Nugent en 1950. Corresponde a calizas masivas fosilíferas con intercalaciones de shales calcáreos negros. Se hace más detrítica en la Subcuenca de Ranchería. A partir de estudios bioestratigráficos en Pozos de la Subcuenca Ranchería, se le asigna edad Aptiano–Albiano. Se plantea que en la parte sur de la cuenca, su edad varía de Barremiano – Albiano y en la parte Norte Aptiano–Albiano (Gallo et al. 1974). El máximo espesor reportado fue de 346 metros. Su contacto inferior es discordante con la Formación La Quinta en la Subcuenca de Ranchería y concordante a transicional con la Formación Río Negro en la subcuenca del Cesar. El Ambiente de Depósito es de plataforma interna. Su Potencial como

### **Formación Aguas Blancas:**

Durham (1946) y Lill & Nugent (1950) la descubrieron y le diferencian tres miembros de base a techo:

**Miembro Ánimas:** Es una secuencia conformada por shales negros carbonosos, calcáreos, con abundante materia orgánica, hacia la base de estos se encuentran concreciones calcáreas. Con los shales se intercalan calizas negras, micríticas, duras, localmente fosilíferas (bivalvos), carbonosas.

**Miembro Tocuy:** compuesto por areniscas glauconíticas de grano medio a grueso, con intercalaciones de calizas arenosas y lutitas negras, expuestas en el Río Casacará. Según la columna levantada en la quebrada Ánimas, hacia la base esta compuesto por limolitas arenosas colores gris oscuro, levemente calcáreos, algo fósiles, las cuales gradan localmente a areniscas de grano fino.



**Miembro Maracas:** caracterizado por la presencia de calizas lumaquéllicas (pelecípodos y gasterópodos), masivas. Muy similar a las calizas de la Formación Lagunitas.

La edad asignada es del Cenomaniano por Dueñas (1995). El espesor máximo 750 metros. Tiene contactos concordantes con las formaciones La Luna y Lagunitas. El ambiente de depósito es de plataforma. La formación Aguas Blancas tiene potencial como reservorio evidenciado por la presencia de gas. Se ha encontrado el mayor espesor de esta formación, calculándose en 750 metros aproximadamente. Sin embargo, en perforaciones exploratorias el máximo espesor encontrado ha sido de 575 metros.

### 6.1.3 Formación La Luna (Ksl).

Descrita por Gardner (1926) como una secuencia alternante de limolitas, arcillolitas, lutitas negras carbonosas y calcáreas, calizas bituminosas, capas de chert, concreciones y nódulos de diversos tamaños. Las lodolitas son predominantes hacia la base de la formación al igual que las capas de chert mientras que las calizas son comunes en la parte superior. A partir de fósiles en la Subcuenca del Cesar la edad sería Turoniano Temprano – Coniaciano y de información bioestratigráfica se determinó Turoniano – Santoniano temprano. Tiene espesor entre 250 y 350 m, observados en los pozos. Sus contactos son Concordante con el Grupo Cogollo, Formación Aguas Blancas y transicional con el Grupo Molino. A partir de información bioestratigráfica se ha establecido un hiato al tope de esta formación, por lo cual su contacto con la Formación Molino sería discordante. Este hiato también se ha documentado en las Cuencas de Maracaibo y Valle Medio del Magdalena. El ambiente de depositación es marino oceánico. Su potencial petrolífero tiene como interés primordial que esta formación es generadora de hidrocarburos, aunque



también debe ser considerada reservorio dado la presencia de fracturas, que al ser abundante podrían generar mayores porosidades.

#### **6.1.4 Formación Molino (Ksm).**

Descrita por Gardner (1926) como una sucesión monótona de shale gris azulado y gris oliva a negros, calcáreos, con abundantes microfósiles. Presenta delgadas intercalaciones de areniscas glauconíticas de grano fino, limolitas y calizas grises a negras en capas delgadas.

De manera no formal se han establecido dos intervalos; el inferior o Miembro Tres esquinas, constituido por lutitas calcáreas glauconíticas, el cual alcanza algunos metros de espesor.

Se ha identificado en casi todos los pozos y se interpreta como una sección condensada y el Miembro Socuy, conformado por calizas y margas, con 30 metros de espesor. Intervalo superior, constituido por lutitas carbonosas, intercaladas con delgadas capas de calizas y areniscas. Su edad es del Campaniano – Maestrichtiano, según bioestratigrafía de pozos. Se han reportado espesores hasta de 1686 metros.

La sección tipo fue Tomada sobre el Río Molino, al norte de Colón. El contacto inferior con la Formación la Luna, debe ser paraconforme, según el hiato propuesto. El contacto superior con la Formación Barco-Cuervos en la Subcuenca del Cesar algunos lo consideran. El ambiente de Depósito condiciones de mar abierto en un ambiente abisal.



## **Cenozoico**

## **Paleógeno**

### **6.1.5 Formación Barco**

Nombrada por Notestein (1944) y está constituida por una alternancia de areniscas de grano medio interestratificadas con arcillolitas grises a negras, carbonosas y mantos de carbón. De acuerdo con Loboguerrero (1982) la edad de esta unidad es del Paleoceno. (Proyecto Cesar Ranchería, informe final geología, 1998).

El espesor a partir de pozos exploratorios varía de 235 – 335 metros. El contacto inferior con la Formación Molino es de carácter transicional – discordante?, y su contacto superior es de tipo transicional – discordante?. El ambiente de depósito pertenece a un sistema deltáico.

### **6.1.6 Formación Los Cuervos.**

Definida por Notestein (1944) como una secuencia de lutitas carbonosas, limolitas, areniscas y mantos de carbón. Estos últimos son frecuentes hacia la base. Los restos vegetales indican una edad Paleoceno. A partir de pozos exploratorios se estima en 650 metros de espesor. Su contacto superior con la Formación Cuesta es discordante. El ambiente de depósito pertenece a un sistema deltáico, al igual que la Formación Barco.



## **Neógeno**

### **6.1.7 Formación Cuestas**

Definida por Rojas, 1967 como una formación constituida por areniscas muy poco consolidadas, mal seleccionadas, con algunas intercalaciones de conglomerados, limolitas y arcillositas. La edad de esta unidad es Terciario Superior, posiblemente Mioceno medio a Plioceno aunque no hay referencias al respecto.

El espesor de esta unidad a partir de pozos exploratorios varía entre 300 – 700 metros. La Formación Cuesta suprayace discordantemente todo registro estratigráfico y a su vez es cubierta discordantemente por depósitos recientes. El ambiente de depósito es netamente continental.

### **6.1.8 Cuaternario (Q)**

Los depósitos recientes corresponden a abanicos aluviales y depósitos de material de derrubio (aluviales), que presentan un desarrollo asociado con las cuencas hidrográficas de los ríos cercanos.

Estos depósitos son muy variados y reflejan en los diferentes sectores la litología correspondiente de las rocas aflorantes en las zonas aledañas al sitio de estudio. Están constituidos, normalmente, por bloques, cantos, guijos y gujarros de rocas de las diferentes formaciones, con una matriz areno arcillosa, en algunos casos calcárea (García- González y otros, 2008).



Se consultaron las secciones Cronoestratigráficas elaboradas por Chajín y Martínez, 2007 (ver **Figura 11**), donde muestran tres inconformidades regionales: la inconformidad inferior, entre la Formación La Quinta y las rocas suprayacentes del Grupo Cogollo; la inconformidad media, entre la Formación La Luna y las rocas suprayacentes de la Formación Molino; y, la inconformidad superior, entre la Formación Barco-Cuervos y las rocas suprayacentes de la Formación Cuesta. Dichas inconformidades se asocian a los períodos de levantamiento y enterramiento de la cuenca. Se evidencia la abundancia de rocas generadoras de hidrocarburos, en el Grupo Cogollo, la Formación La Luna, y, la Formación Barco-Cuervos.

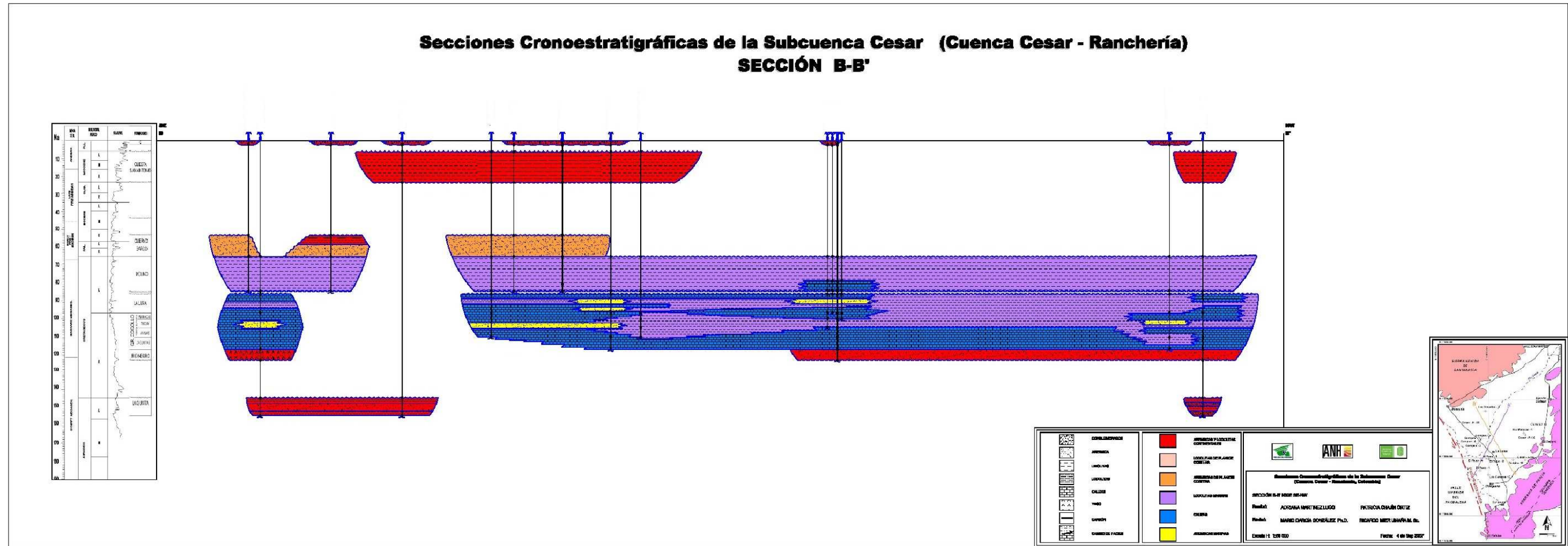


Figura 11. Sección Cronoestratigrafía sección sísmica B-B'. Tomado de Chajín y Martínez, 2007.

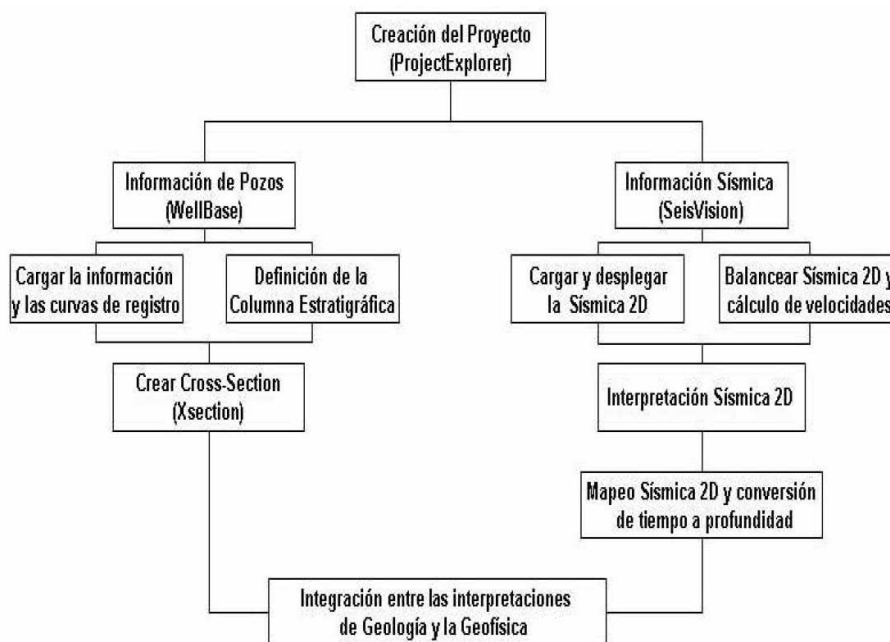


## 7. METODOLOGÍA

### 7.1 Interpretación Sísmica

Se utilizó la licencia adquirida por el Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones del software GeoGraphix Discovery, con el cual se puede acceder, manipular, analizar e interpretar, datos geológicos, geofísicos, petrofísicos, para aplicarlos a la geología de hidrocarburos. Se emplearon las siguientes herramientas:

- ProjectExplorer
- GeoAtlas
- Coordinate System Manager
- PRIZM
- SeisVision
- WellBase



**Figura 12.** Diagrama que resume paso a paso La metodología seguida dentro del software para la integración de los datos que llevaron a la interpretación de las líneas sísmicas 2D escogidas para este trabajo.



## **7.2 Interpretación Estructural. Marco Teórico.**

La interpretación de la geología estructural presente en el área de estudios se realizó de acuerdo a la metodología de interpretación sísmica de Pliegues Asociados a Fallas Inversas y sus implicaciones en la exploración de Hidrocarburos, la cual fue propuesta por Shaw, J., Connors, C., Suppe, J., y otros (2005) en la publicación del Atlas Sísmico AAPG de Interpretación Sísmica de Pliegues Relacionados a Fallas.

A continuación se menciona el marco teórico para el estilo estructural compresivo en el área de estudio, de acuerdo a la metodología de Shaw (2005), la cual comprende:

### **a) Teoría de definición de estructuras geométricas.**

- i. Definición de la forma del pliegue y dominios de buzamiento
- ii. Reconocimiento de fallas inversas y cabalgamientos
- iii. Reconocimiento de estratos de crecimiento.

### **b) Teoría de tipos de Pliegues relacionados a fallas.**

- i. Pliegue por flexión de falla
- ii. Pliegue por propagación de falla
- iii. Pliegues por despegue de falla (Detachment)
- iv. Pliegues por flexión de falla tipo Imbricados.

### **7.2.1 Teoría de definición de estructuras geométricas**

Los pliegues son flexuras de capas de roca que se forman en respuesta al movimiento a lo largo de las fallas, diapirismo, compactación, subsidencia y



levantamiento regional. Los pliegues se expresan en secciones sísmicas como una o más regiones de reflexiones con buzamiento (con dominios de buzamiento), que corresponden a contactos estratigráficos inclinados.

Los dominios de buzamiento son separados por **superficies axiales**, que son planos imaginarios los cuales son vistos en dos dimensiones, forman trazas axiales. Las superficies axiales anticlinales ocupan pliegues con crestas cóncavas hacia abajo; las superficies axiales sinclinales ocupan pliegues con crestas cóncavas hacia arriba.

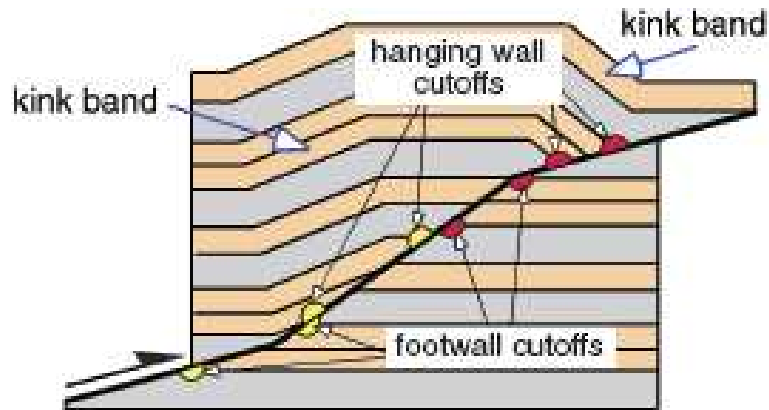
Las Fallas son identificadas en perfiles de reflexión sísmica mediante:

- a) Terminaciones de reflexiones o cambios abruptos de atributos de reflexión (ej. Amplitud, polaridad) sobre la superficie de falla se conocen como *Fault Cutoffs* (Ver **Figura 13**).
- b) Terminaciones de flancos de pliegues o bandas kink.
- c) Reflexiones directas del plano de falla, es decir claramente visible producida por cambios en la velocidad y densidad a lo largo o dentro de la zona de falla.

Cutoffs y reflexiones del plano de falla directamente construyen la posición de la falla. Fallas de cabalgamiento y sus cutoffs sin embargo son generalmente difícil de reconocer e identificar, y así el reconocimiento de las terminaciones de las bandas kink es un componente vital para la interpretación de estas fallas.



### Cutoffs de fallas



**Figura 13.** Falla con marcadores Offset y cutoffs. Nótese que las bandas kink del hanging wall terminan hacia abajo dentro de la superficie de falla. Tomado de Shaw et. Al., 2005.

### Terminaciones de bandas kink

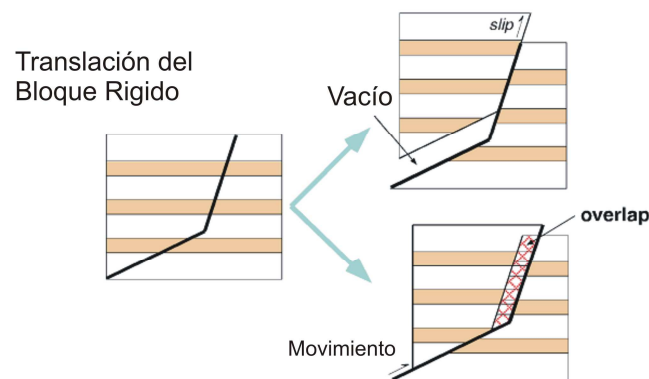
Fallas de cabalgamiento pueden ser identificadas por las terminaciones abruptas de bandas kink. Las terminaciones son generalmente marcadas por regiones de reflexiones que buzcan respecto a la horizontal y pueden contener cutoffs de fallas. Reflexiones de las bandas kink representan estratos plegados in el bloque colgante de una falla inversa de cabalgamiento; por tanto, reflexiones horizontales o mas suaves en buzamiento representan estratos del bloque yacente por debajo de la falla. Así, las fallas pueden ser interpretadas sobre la transición entre estos dos dominios de buzamiento (ver **Figura 13**).



## 7.2.2 Teoría de tipos de Pliegues relacionados a fallas inversas.

### 7.2.2.1 Pliegue por flexión de falla.

Para describir el concepto básico de plegamiento por flexión de falla, se considera el caso hipotético de una falla en una sección con una flexión acompañando los segmentos superiores e inferiores (**Figura 14**). La translación del bloque rígido (**Figura 14**) del bloque colgante paralela al segmento superior de la falla produce un vacío entre los bloques de la falla; donde la translación del hanging wall es paralela al segmento inferior de la falla, produce un “overlap”. En ambos casos es poco probable que esto ocurra.

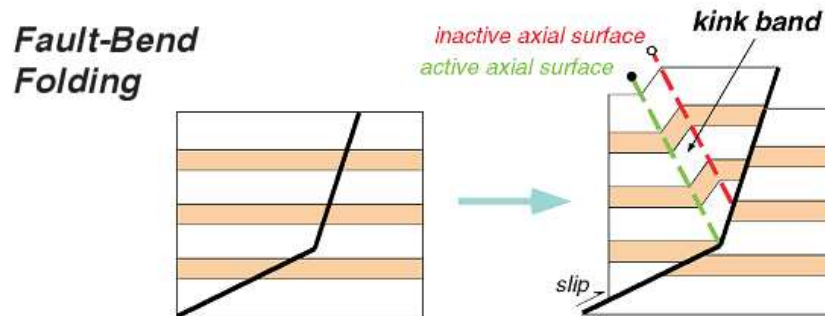


**Figura 14.** Translación del bloque rígido. Tomado de Shaw et. Al., 2005.

En contraste, el plegamiento del bloque colgante a lo largo del desarrollo de una banda kink acomoda un desplazamiento de falla sin generación de un overlap o vacío irracional. Este plegamiento por flexión de falla es localizado a lo largo de una superficie axial activa, la cual es fija con respecto a la falla flexionada. Después de que los estratos sean plegados sobre la superficie axial activa, ellos son trasladados sobre el segmento superior de la falla (Ver **Figura 15**). La superficie axial inactiva marca posición de las partículas que fueron localizadas a lo largo de la superficie axial activa sobre la iniciación del movimiento de falla (Ver



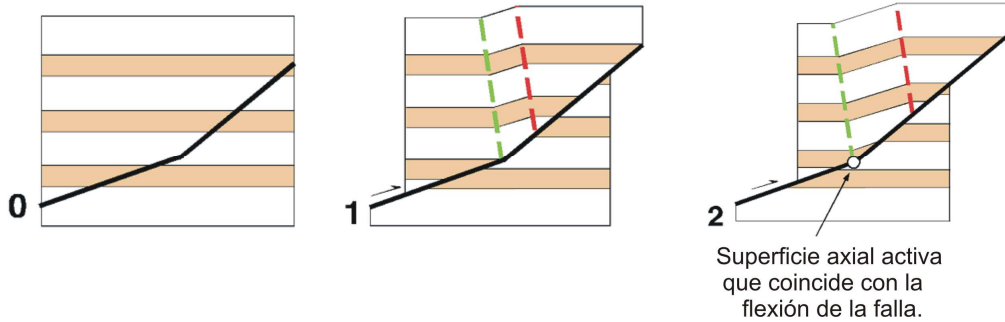
**Figura 16).** La superficie axial inactiva se mueve alejándose de la superficie axial activa con un movimiento de falla progresivo, y por tanto el ancho de la banda kink interviniente es proporcional a la cantidad del movimiento de la falla (Ver **Figura 15**).



**Figura 15.** Formación del pliegue por flexión de falla; Nótese las superficies axiales activas (*active axial surface*) e inactivas (*inactive axial surface*). Tomado de Shaw et. Al., 2005.

### Pliegue Sinclinal por flexión de Falla

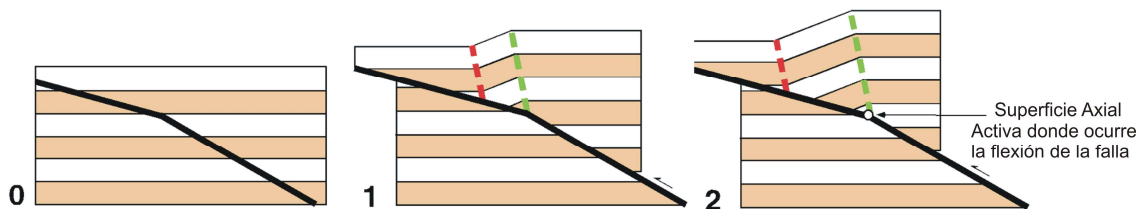
Los pliegues sinclinales por flexión de falla forman una falla cóncava hacia arriba. (Ver **Figura 16**, parte 1 y 2). Las superficies axiales del sinclinal se asignan en la flexión de la falla y son generalmente superficies axiales activas. Las superficies axiales anticlinales son inactivas y se mueven con el bloque colgante (Ver **Figura 16**, parte 1 y 2).



**Figura 16.** Modelo Cinemática de un Pliegue sinclinal por flexión de falla. Tomado de Shaw et. Al., 2005.

### Pliegue anticlinal por flexión de falla.

Los pliegues anticlinales por flexión de falla forman una falla cóncava hacia abajo (Ver **Figura 17**, parte 1 y 2). Las superficies axiales anticlinales coinciden con la flexión de la falla y son generalmente activas; por otro lado las superficies axiales sinclinales son inactivas y se mueven con el bloque colgante.



**Figura 17.** Modelo Cinemática de un Pliegue anticlinal por flexión de falla. Tomado de Shaw et. Al., 2005.



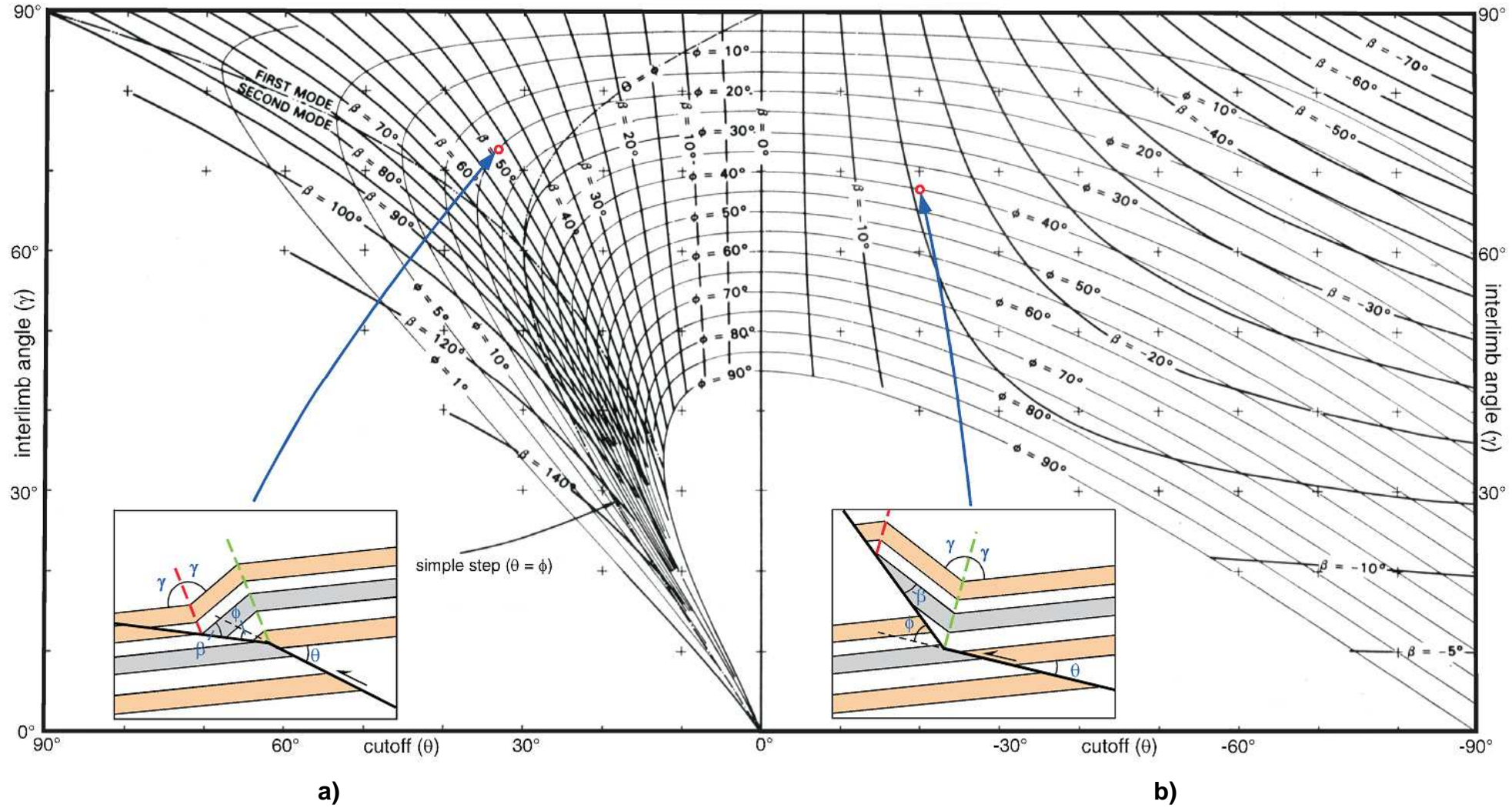
## Plegamiento cuantitativo por flexión de falla

De acuerdo a Suppe (1983) y con base en las asunciones de conservación de la longitud y espesor de las capas durante el plegamiento, la forma de un pliegue por flexión de falla estará relacionada con la falla de la siguiente forma:

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{-\sin(\gamma - \theta)[\sin(2\gamma - \theta) - \sin \theta]}{\cos(\gamma - \theta)[\sin(2\gamma - \theta) - \sin \gamma]} \right\}$$

Donde  $\theta$  es el ángulo del cutoff del bloque colgante antes de la flexión de la falla;  $\phi$  es el cambio de ángulo de la falla, ó ángulo de cambio de buzamiento de la falla;  $\beta$  es el ángulo cutoff del bloque colgante después de la falla;  $\gamma$  es la bisectriz del ángulo interflancos.

Las relaciones se muestran en el **Figura 18**, donde el lado izquierdo de la gráfica describe los pliegues anticlinales por flexión de falla y el lado derecho describe los pliegues sinclinales por flexión de falla, donde el pliegue es convexo en dirección de la falla. Al interpretar las secciones sísmicas, típicamente el ángulo interflancos ( $\gamma$ ) puede observarse fácilmente y uno de los ángulos cutoff del bloque colgante ( $\beta$  o  $\theta$ ) puede verse específicamente. De acuerdo a la Metodología de Shaw (2005), usando la gráfica, el cambio en el buzamiento de la falla ( $\phi$ ) y el ángulo cutoff remanente puede ser identificado. Para pliegues anticlinales por flexión de falla hay dos soluciones de plegamiento para cada valor de  $\theta$  y  $\phi$ ; la primera solución produce pliegues abiertos que han sido mostrados para describir efectivamente muchas geometrías de pliegues observados; por otro lado la segunda solución es geoméricamente válida pero no ha sido mostrada para describir efectivamente formas naturales de pliegues.



**Figura 18.** Gráfica para modelar los pliegues por flexión de falla. **a)** Pliegue anticlinal por flexión de falla; **b)** pliegue sinclinal por flexión de falla. Tomado de Shaw et. Al. 2005.



### 7.2.2.2 Sistema por propagación de falla

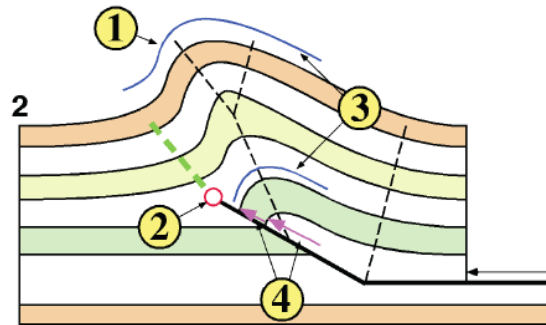
*Los pliegues por propagación de falla (Fault Propagation Folds)*, se forman en las terminaciones de las fallas y el desplazamiento es apretado en el centro del pliegue. Estos Pliegues son generalmente asimétricos, con alta inclinación, de flancos delanteros estrechos, y flancos traseros suaves y anchos.

Los pliegues por propagación de falla pueden originar forma de fallas con o sin despegue. Como la rampa de la falla se propaga en dirección hacia arriba (**Figura 19**), un pliegue asimétrico se desarrolla en el bloque colgante con vergencia en la dirección de transporte. El pliegue genera desplazamiento sobre la rampa, donde el desplazamiento es mayor sobre la base de la rampa y cero sobre la terminación de la rampa. A medida que el desplazamiento incrementa, la terminación de la falla avanza y el pliegue crece alargándose mientras se mantiene la geometría básica.

#### **Características comunes.**

Aunque los pliegues por propagación de falla exhiben un amplio rango de geometrías, varias características son comunes en la mayoría de las estructuras, incluyendo:

- 1) Pliegues asimétricos, con flancos delanteros que son generalmente mucho más estrechos y más inclinados que sus respectivos flancos traseros.
- 2) Sinclinales son fijados en la terminación de la falla.
- 3) Pliegues son más apretados con la profundidad.
- 4) El desplazamiento sobre la falla decrece en dirección hacia arriba, terminando dentro del pliegue.



**Figura 19.** Pliegue por propagación de falla, donde se observan sus características comunes: **(1)** Inicio Pliegue asimétrico y flanco delantero de mayor inclinación y estrecho; **(2)** Sinclinal fijo en la terminación de la falla. **(3)** El pliegue se aprieta en profundidad; **(4)** Desplazamiento sobre la falla decrece en dirección hacia arriba, terminando con el pliegue. Las flechas moradas denotan el movimiento sobre el plano de falla y el desplazamiento del horizonte verde. Tomado de Shaw e. al. 2005.

### **Marco teórico - Pliegues por propagación de falla con espesores constantes**

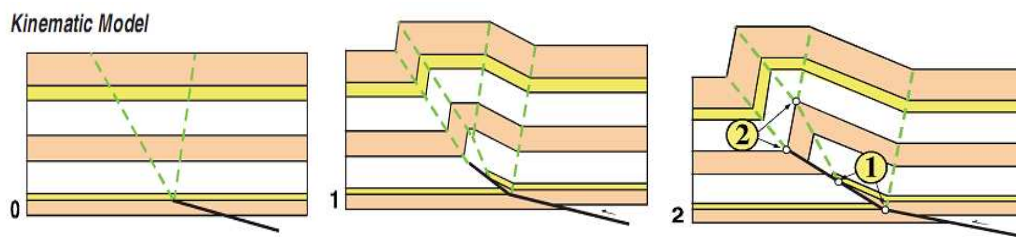
Suppe y Medwedeff (1990) en Shaw et. Al, 2005, presentan una relación general entre la forma del pliegue y la forma de la falla para pliegues por propagación de falla para espesores contantes.

Los pliegues pro propagación de falla con espesores constantes se desarrollan a medida que una falla se propaga verticalmente desde un pliegue. Una superficie axial sinclinal activa está unida a la terminación de la falla. A medida que los estratos pasan a través de esta superficie axial, son plegados hacia el flanco frontal del pliegue. Dependiendo de la geometría de la falla, los estratos también pueden pasar a través de la superficie axial anticlinal hacia el flanco frontal ó desde el flanco frontal hacia la cresta del pliegue.



Los pliegues por propagación de falla tienen varias relaciones geométricas que son útiles para construir modelos e interpretar estructuras.

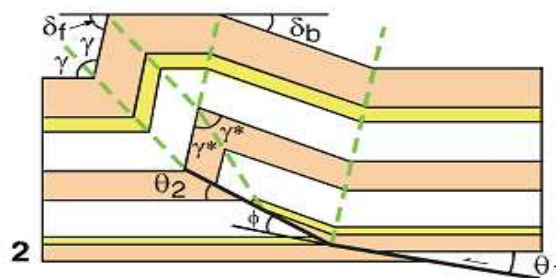
- 1) La distancia entre el pliegue de la falla y el punto donde la superficie axial anticlinal se encuentra con la falla es igual al acortamiento del pliegue.
- 2) El punto de bifurcación de la superficie axial anticlinal se encuentra a lo largo del mismo horizonte en el que se ubica el fin de la propagación de la falla.



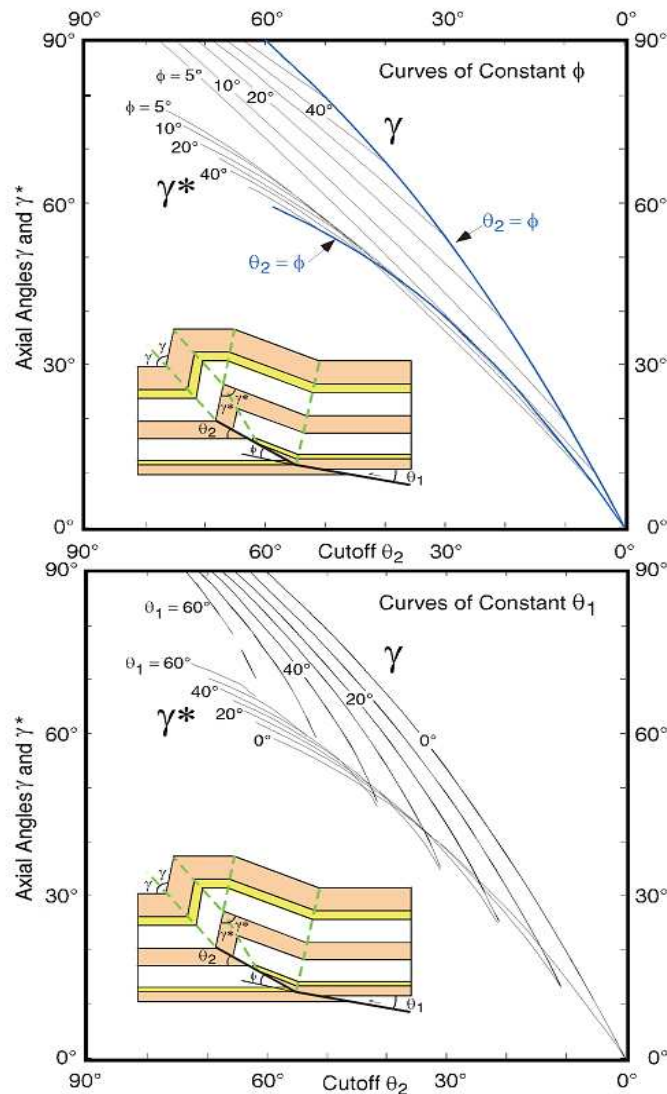
**Figura 20.** Modelo cinemático de un pliegue por propagación de falla. Tomado de Shaw et. Al, 2005.

### Terminología de los PPF

- . $\theta_1$  = ángulo entre la falla y los estratos del bloque colgante.
- . $\theta_2$  = ángulo entre la falla y los estratos del bloque yacente.
- . $\phi$  = inclinación de la falla
- . $\gamma$  = ángulo interlimbos del sinclinal
- . $\gamma^*$  = ángulo interlimbos del anticlinal
- . $\delta_b$  = buzamiento del flanco trasero
- . $\delta_f$  = buzamiento del flanco frontal



**Figura 21.** Terminología de los elementos en pliegues por propagación de falla. Tomado de Shaw et. Al, 2005.



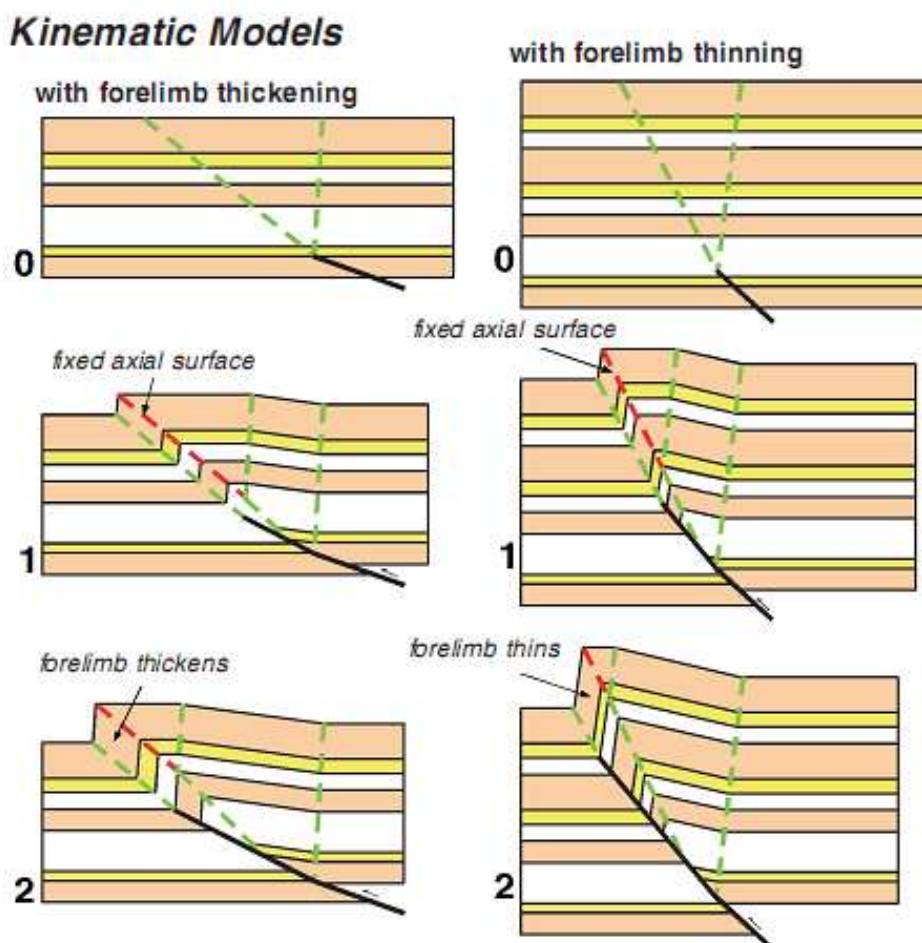
**Figura 22.** Diagramas de relación entre los ángulos interlimbos y el ángulo  $\theta_2$ . Tomado de Shaw et. Al, 2005.

### Marco teórico - Pliegues por propagación de falla con eje fijo

Suppe y Medwedeff (1990) en Shaw et. Al, 2005, presentan una segunda relación general entre la forma del pliegue y la forma de la falla denominada la teoría de los pliegues por propagación de falla con eje fijo.

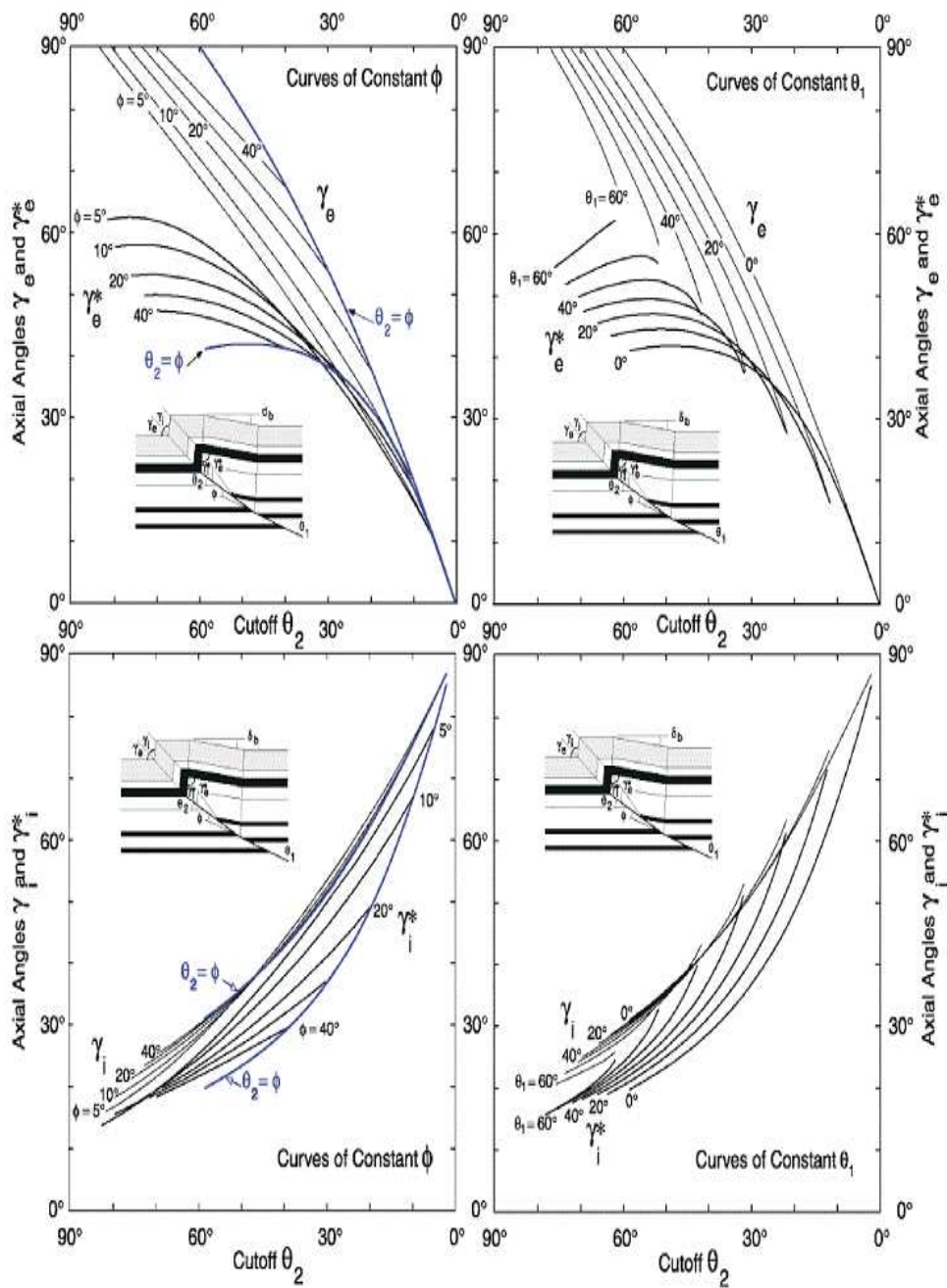


Esta teoría es similar a la teoría de espesores constantes con la excepción de que esta permite el adelgazamiento o engrosamiento de los estratos en el flanco frontal. Estos cambios en el espesor son inducidos debido a que la superficie axial anticlinal está fija, lo que significa que el material no pasa a través de esta. El estilo y magnitud de los cambios en el espesor de las capas están regidos por la forma inicial de la falla y los ángulos  $\theta$ .



**Figura 23.** Modelo cinemático de los pliegues por propagación de falla con eje fijo.

Tomado de Shaw et al, 2005.



**Figura 24.** Diagramas de relación entre el ángulo interlimbos y el ángulo  $\theta$ , Tomado de Shaw et al, 2005. Estas gráficas muestran las relaciones entre la forma de la falla ( $\theta_2$ ) y la forma del pliegue ( $\gamma$  y  $\gamma^*$ ) para pliegues por propagación de falla de espesor constante. El caso especial de rampamiento desde un *Detachment* es



mostrado como las línea  $\theta 2= \Phi$ . Estas relaciones son usadas para la interpretación de estos tipos de pliegues que se aprecian en perfiles sísmicos.

### Terminología

Los Siguietes términos son usados en la derivación de gráficas que describen los pliegues por propagación de falla.

$\theta 1$ = Cutoff del bloque colgante (Segmento inferior de la falla).

$\theta 2$ = Cutoff del bloque yacente (segmento superior de la falla).

$\Phi$ = Cambio del buzamiento de la falla.

$\gamma$ = Angulo interflanco del flanco delantero sinclinal.

$\gamma^*$ = Angulo del anticlinal interlimbo

$\delta b$ = Buzamiento del flanco trasero.

$\delta f$ = Buzamiento del flanco delantero.

#### 7.2.2.3 Sistemas por propagación de falla con rompimiento.

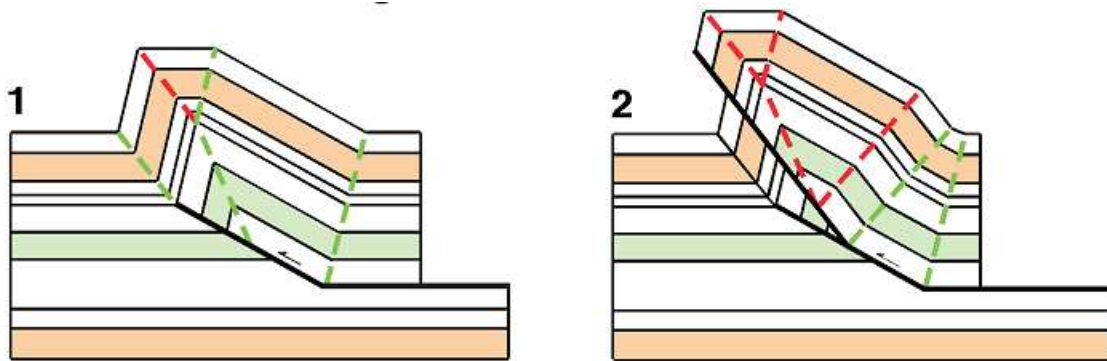
En cualquier estado del crecimiento del pliegue, las fallas pueden cortar através de la propagación de los pliegues, alternado las geometrías de las estructuras.

Las formas de este “Rompimiento Transversal” de estructuras están influenciadas por el camino de la falla, donde usualmente corta a través del flanco delantero o de manera superior a un despegue. En los casos donde el desplazamiento sobre el rompimiento transversal de la falla es sustancial y/o las estructuras son profundamente erodadas, solo geometrías remanentes del pliegue original por propagación de falla se conservan.



## Modelo Cinemático

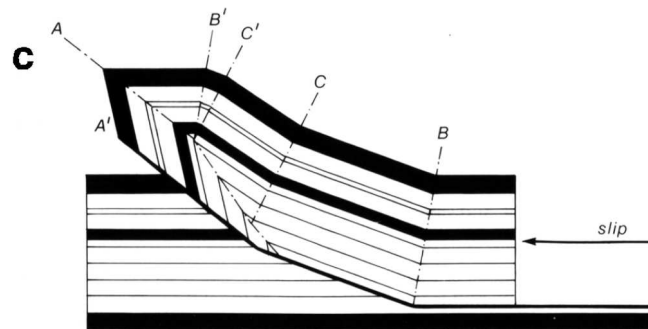
Este modelo secuencial a continuación muestra un pliegue por propagación de falla con espesor constante, donde la falla rompe a través del flanco delantero. LA falla modifica la geometría original del pliegue al descuadrar el bloque colgante del flanco delantero y produciendo una banda kink adicional dentro del flanco trasero que se desarrolla del plegamiento por flexión (Ver **Figura 26**).



**Figura 25.** Modelo Cinemático de pliegue por propagación de falla por rompimiento transversal. **1** representa el pliegue por propagación de falla desarrollado. **2** representa el rompimiento transversal de la falla emergente por el flanco delantero que genera una nueva geometría del pliegue. Tomado de Shaw et. al., 2005.

### Estilos de rompimiento transversal.

EL modelo cinemático que se identifica en el pliegue por propagación de falla presente en las líneas sísmicas es acorde a las estructuras por rompimiento transversal propuestos por Suppe y Medwedeff (1990) en Shaw et. Al. 2005. Las características identificadas han permitido llegar a la conclusión que es de tipo pliegue por propagación con rompimiento sinclinal. **Ver Figura 26.**



**Figura 26.** Modelo cinemático que muestra la estructura por rompimiento transversal sinclinal propuestos por Suppe y Medwedeff (1990). Tomado de Shaw et. Al. 2005.

#### 7.2.2.4 Sistema por flexión de falla tipo Imbricados.

**Las estructuras imbricadas** son formadas por el apilamiento de dos o más escamas de cabalgamiento y son comunes en cinturones de plegamiento-cabalgamiento. Pueden ser formadas como “Rompimiento hacia delante” y “Rompimiento hacia atrás” o por movimiento coetáneo de las fallas profundas y someras.

#### Modelo Cinemático

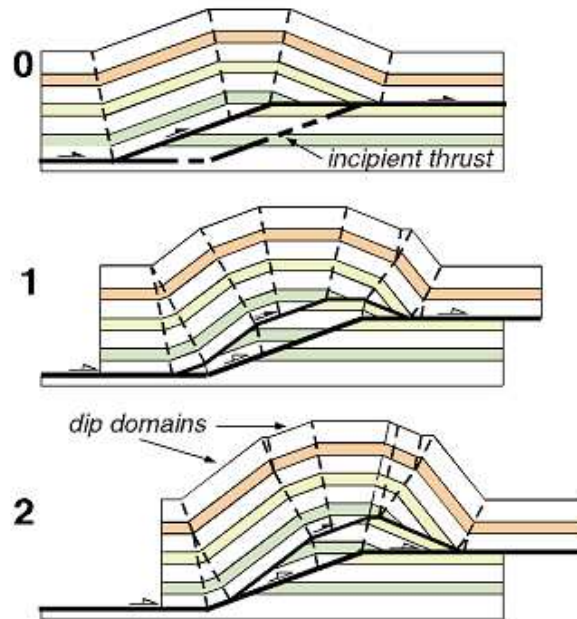
Las estructuras imbricadas se desarrollan donde dos o más escamas de cabalgamiento son apiladas verticalmente. Estas fallas de cabalgamiento pueden o no involucrar despegues, pero estas estructuras imbricadas son más comunes en regiones con despegues.

En el modelo secuencial de rompimiento hacia delante (Ver **Figura 22**), muestra desplazamiento sobre la falla de cabalgamiento más profunda que produce un



pliegue por flexión de falla que deforma nuevamente la escama de cabalgamiento sobreyacente.

En el modelo secuencial de rompimiento hacia atrás, el pliegue por flexión de falla es cortado por una rampa de cabalgamiento mas joven y mas somera.



**Figura 27.** Estructura de imbricada de rompimiento hacia adelante. Se aprecia la evolución del pliegue imbricado. Tomado de Shaw et. Al. 2005.

### 7.3 Modelamiento Geoquímico. Marco Teórico.

#### 7.3.1 Historia de Subsistencia

Los diagramas de subsidencia dan información inicial de las profundidades que existían en la cuenca a lo largo del tiempo de depositación, para construir estos diagramas se tienen en cuenta las siguientes variables: las unidades con su respectiva edad que presenta cada cuenca, las discordancias presentes, hiatos deposicionales, calculo de decompactación, sedimento erosionado, paleo batimetría, entre otros.



Se tomó un corte balanceado realizado de la línea sísmica SAP-08 que es la sección mas regional de la zona de estudio, con el fin de determinar los espesores de cada unidad en la zona, no se tomo en cuenta espesores dados por otros autores debido a la falta de continuidad lateral de las formaciones.

Posteriormente se ubicó en un diagrama donde el eje x corresponde al tiempo y el eje y corresponde al espesor (espesor actual), y se procedió a determinar el espesor inicial cada unidad, para calcular el espesor inicial se calculó la decompactación, esto se realizó teniendo en cuenta cálculos de porosidad establecidos en tablas para cada litología, para esto se tuvo en cuenta el diagrama de Van Hinte (1978), donde muestra la variación del espesor de las unidades a través del tiempo de enterramiento teniendo en cuenta la porosidad.

$$T_o \equiv \frac{(1-\phi_N)T_N}{1-\phi_o}$$

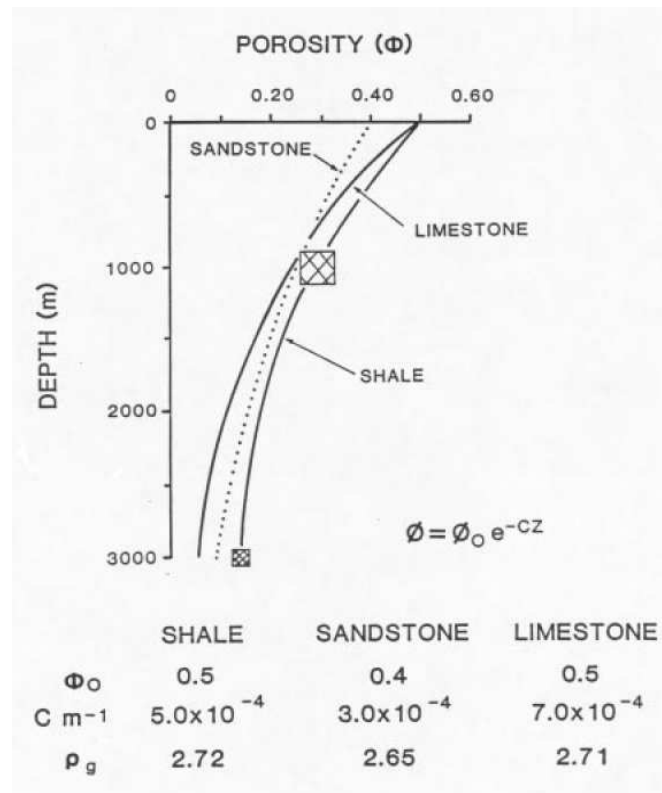
La anterior ecuación es determinada a partir del diagrama de Van Hinte para determinar el espesor inicial ( $T_o$ ) de una unidad,  $T_N$  corresponde al espesor final.

$\phi_N$  es la porosidad actual de las capas.  $\phi_o$  es la porosidad

La rata de decrecimiento de la porosidad durante enterramiento puede ser determinada empíricamente, a continuación se da una Relación exponencial para el cambio de porosidad en las unidades:

$$\phi_N = \phi_o \exp(-CZ)$$

La anterior ecuación de Van Hinte es para determinar la porosidad actual de cada una de las formaciones  $\phi_N$ ,  $\phi_o$  es la porosidad original de la formación, C es la constante de decompactación, Z es la profundidad actual de cada formación.



**Figura 28.** Variación de la porosidad en función de la profundidad, valores estándar para porosidades iniciales de cada litología. Tomado de Van Hinte (1978).  $\phi_0$  la porosidad original de cada una de las formaciones; C es la constante de compactación, para las litologías respectivas;  $\rho$  es la densidad de cada litología.

### 7.3.2 DIAGRAMAS DE TIEMPO TEMPERATURA

Para medir la temperatura en función del tiempo se usan dos métodos, uno teniendo en cuenta el gradiente geotérmico y el otro se basa en el flujo de calor, este último es el que se va a usar para la construcción del diagrama ya que tiene en cuenta más variables, por lo tanto es más preciso.



**Tabla 4.** Corresponde a datos preestablecidos de densidad, porosidad; K corresponde a la conductividad térmica,  $\rho_c$  corresponde a la densidad,  $\phi_0$  es la porosidad original. Tomado de Van Hinte (1974).

Litología	K [mW/m-K]	$\rho_G$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\Phi_0$
Arena	4.4	2.76	0.39
Shale	1.5	2.76	0.35
Arena Carbonática	2.9	2.72	0.47
Lodo Carbonático	4.8	2.72	0.43
Sal	5.4	2.16	0.0

Los diagramas de Tiempo – Temperatura son graficados a partir de los datos obtenidos con la ecuación de Fourier con base a las historias de subsidencia decompactadas que se puedan realizar. La ecuación de Fourier es:

$$T_z \equiv T_0 + q \sum \frac{x}{\lambda}$$

En donde:

$T_z$  es la temperatura del horizonte a calcular.

$T_0$  es la temperatura superficial, la cual se estimó en 24.4 °C.

q es el flujo de calor el cual se calculó en base a datos de temperaturas de fondo de pozo, tratamiento que se llevó a cabo por García-González et al., 2008 y que dio como resultado un flujo de 50.5 mW/m<sup>2</sup>.

X corresponde al espesor para cada formación, este se toma a partir de los espesores decompactados.

$\lambda$  es la conductividad térmica para cada litología la cual es posible obtener a partir de la ecuación de Brigaud y otros (1990):  $\lambda_{roca} = (\lambda_{matriz})^{1-\phi} + (\lambda_{fluido})^{\phi}$



Donde  $\lambda_{\text{matriz}}$  corresponde a la conductividad que presenta cada formación dependiendo de la litología encontrada en ella, estos valores están preestablecidos en tablas generales.  $\lambda_{\text{fluido}}$  es la conductividad del agua equivalente a  $0.56 \approx 0.6$  W/m/k; y  $\varphi$  es la porosidad calculada durante la decompactación.

### 7.3.3 METODO CINÉTICO

El método cinético (Razón de transformación, TR) según Tissot et al., 1987 y Welte et al., 1981, cuantifica la cantidad de hidrocarburos generados por las reacciones químicas de transformación de kerogeno en gas. Esta cuantificación se lleva a cabo con un modelo cinético de degradación térmica del kerogeno con incrementos de la temperatura a lo largo del tiempo.

Con el fin de llevar a cabo el método cinético se entran a analizar las dos ecuaciones de Arrhenius:  $dC/dt = -kC^n$  y  $K = Ae^{-E/RT}$  donde C es la concentración, t el tiempo, k la constante de la tasa de reacción, n el orden de la reacción, A el factor de frecuencia, E la energía de activación, R la constante de los gases (1.987 calorías/mol/°K) y T la temperatura absoluta en K.

La rata de transformación TR se define como la fracción de kerógeno transformado a petróleo o gas con relación al potencial genético de algún tipo específico de kerogeno y se calcula con la siguiente ecuación de Tissot y Welte1984:

$$TR = \frac{C_i - \sum C_i}{C_o} + Y_o$$

Donde  $C_i$  es la fracción de la masa de kerógeno remanente en la reacción,  $\sum C_i$  es el potencial genético o la masa de kerógeno transformada a hidrocarburos cuando la reacción esta completa; y  $Y_o$  es el aceite de origen bioquímico.



Según Tissot y Welte 1984 los valores de TR de 0.1 y 0.4 corresponden a los límites inferiores y superiores de la ventana de generación de petróleo.

Se utilizó el software PetroMod 10, de la compañía IES (Integrated Exploration Systems), del cual se empleó el paquete PetroMod 2D, con el cual se puede integrar sísmica, estratigrafía e interpretaciones geológicas, con simulaciones bidimensionales de temperatura, flujo de fluidos e historias de migración de hidrocarburos en cuencas sedimentarias.

Principalmente, este software es usado en el trabajo de exploración e investigación en áreas nuevas con un potencial de hidrocarburos desconocido, y con disponibilidad de datos limitados; así como investigación en áreas ya exploradas donde existen problemas de correlación de la roca fuente, de eficiencia de la roca sello, y de sistemas sobrepresionados. Además, se da a la tarea fundamental de obtener la predicción más exacta, de la posición de la ventana de generación, de la expulsión, y de los procesos de migración de los hidrocarburos.

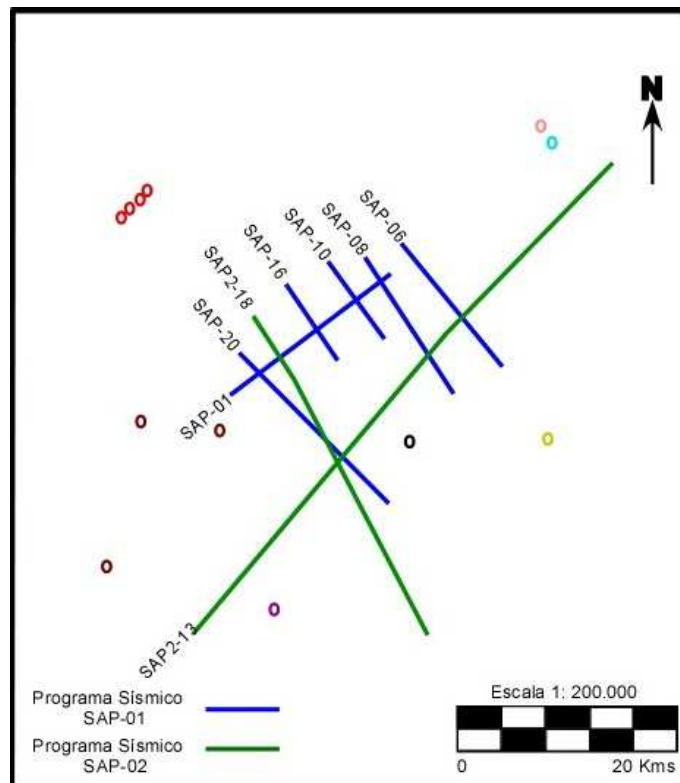
El software tiene un simulador completo que relaciona temperatura y presión, y proporciona la más avanzada tecnología de modelado de migración de hidrocarburos, con un método diferente a los existentes.



## 8 RESULTADOS

### 8.1 INTERPRETACIÓN SÍSMICA

Las líneas sísmicas interpretadas corresponden a los programas sísmicos SAP N° 2 y el programa SAP N° 1 y comprenden un área de 440 Km<sup>2</sup> aproximadamente. Del programa SAP N° 2 se utilizaron las líneas SAP2-08 y SAP2-13; Mientras que el programa SAP N° 1 se utilizó la totalidad de sus líneas que comprenden SAP-01, SAP-06, SAP-08, SAP-10, SAP-16, SAP-20. Todas las líneas se amarraron con la línea SAP2-08, que es la línea más regional y se ajustaron con los datos de pozo. Si bien ninguna línea coincide con la localización de los pozos, se utilizaron los datos de los mismos como referencia de las unidades presentes, sus espesores, distribuciones, propiedades que se tuvieron en cuenta al hacer la interpretación.



**Figura 29.** Esquemización de la ubicación de las líneas sísmicas 2D y pozos utilizados en este estudio.



Para esta interpretación, se tuvo como referencia la columna estratigráfica de la cuenca tomada de García-González et al., 2008 (ver **Figura 10**), se tuvieron en cuenta las inconformidades regionales de la Subcuenca Cesar, reconocidas en la sección Cronoestratigráfica (**Figura 11**), tomándose como referencia la inconformidad media, como el tope de la Formación La Luna y reconociéndola de manera inicial en todas las secciones sísmicas.

### **Horizontes cartografiados**

La interpretación sísmica permitió la definición de tres horizontes sísmicos de fácil reconocimiento y evidente continuidad en el área (**Figura 29**):

- ***Tope de la Fm. Barco – Los Cuervos.***
- ***Tope de la Fm. La Luna.***
- ***Tope de la Fm. La Quinta.***

### **Características de los Horizontes sísmicos interpretados.**

Los horizontes de las formaciones Barco y Los Cuervos incluye las formaciones con presencia de carbones; estas formaciones se dividieron analizando los datos de pozos de acuerdo al espesor de cada unidad y a la continuidad de los reflectores sísmicos, herramientas con las que se realizó la división de estas formaciones, donde se encontró gran continuidad lateral en el área de estudio de los topes de las mismas.

El tope de la formación Cuervos es de edad Paleoceno a Eoceno, es una discordancia regional, que en el área Sur-Occidente de la Subcuenca del Cesar es claramente reconocible.



El horizonte llamado La Luna, coincide con el inicio de la secuencia calcárea del Cretácico, y es continuo y fallado a lo largo del área de estudio. Su espesor varía en la Subcuenca del Cesar. Constituye un contacto inconforme con la Formación Molino, que la suprayace y sus reflexiones constituyen un aspecto claramente positivo y reconocible en la totalidad de líneas disponibles en el área de estudio.

El horizonte La Quinta, constituye una discordancia Jurásica continua hacia los extremos del área de estudio, que comprende el límite de la capa sedimentaria, ya que sobreyace el basamento cristalino. Este horizonte, que infrayace a la secuencia cretácica calcárea (Formación La Luna y Grupo Cogollo), presenta una velocidad alta en la propagación de las ondas sísmicas por su contenido calcáreo y constituye el basamento económico.

Una vez finalizada la interpretación sísmica, se generaron mapas estructurales en tiempo y profundidad para el horizontes correspondiente al tope de la formación La Luna en el área del Sur-Occidente de la Sub-Cuenca Cesar, donde posteriormente estos mapas se ajustaron con las interpretaciones estructurales.

### **Mapas elaborados.**

Mapas estructurales del tope de la formación La Luna, en tiempo y profundidad, fueron realizados para el tope de la secuencia calcárea cretácica, asignado al tope de la Formación La Luna; Estos mapas encuentran a escala 1:100000.

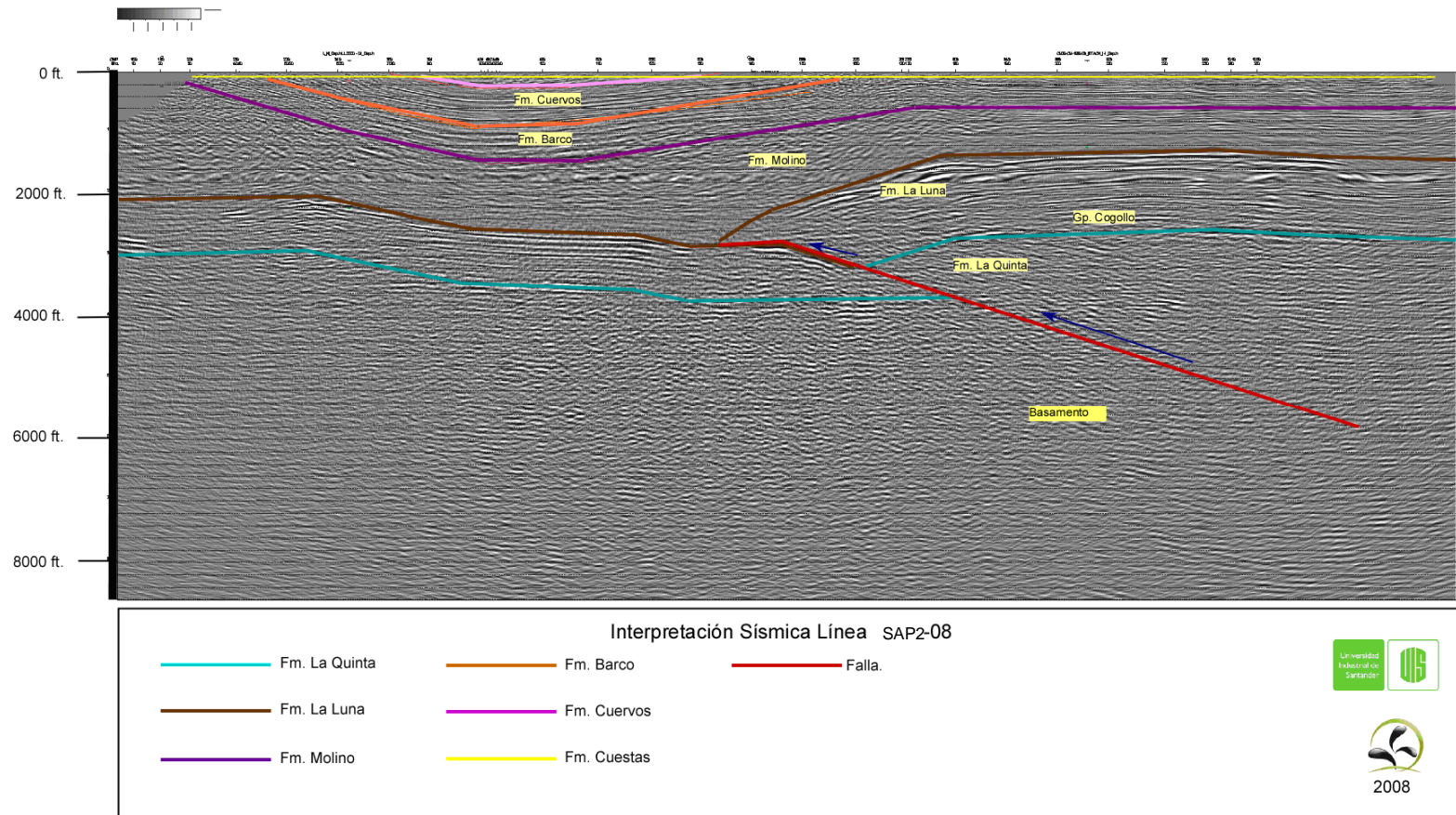
En los mapas tanto de tiempo como de profundidad, se aprecian cabalgamientos con vergencia Noroeste que generan las elevaciones de la Formación La Luna; al Nor-Oriente una elevación bastante clara y al Sur-Occidente, una depresión similar a la estructura anterior.



Las fallas inversas de cabalgamiento que afectan la formación la luna son de tipo inversas y generan plegamientos asociados a fallas de cabalgamiento del tipo por flexión de falla, por lo tanto no se aprecia en el mapa los cierres estructurales; para una mejor claridad, ver ***Interpretación Estructural, Capítulo 7.2.***

Los altos estructurales del centro del mapa que corresponden al centro del área de estudio, constituyen un objetivo con interés exploratorio, ya que son anticlinales de cabalgamiento fallados. (Ver **figuras 32, 33 y 34**).

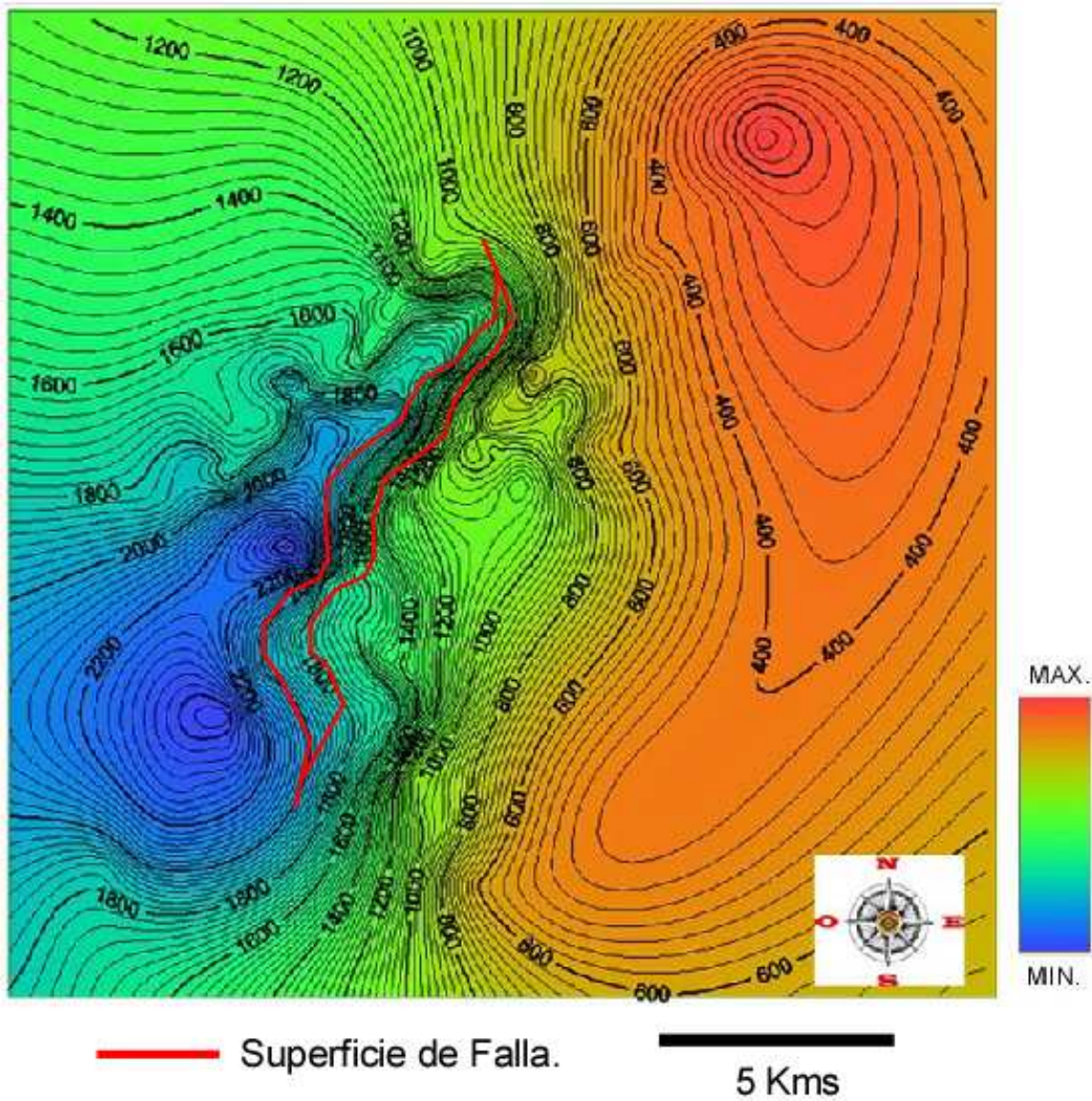
Las depresiones que se aprecian en color azul, sobres las cotas de 2200 milisegundos y 3200 pies , corresponden a la parte sinclinal de la formación, donde se encuentran las partes mas profundas y se asocian a las cocinas de generación de hidrocarburos, ya que por encima de estas se encuentra una robusta capa sedimentaria de aproximadamente 2100 pies de espesor.



**Figura 30.** Horizontes presentes en la información sísmica. Cartografía del subsuelo de la línea sísmica 2D en dirección de rumbo de las estructuras.



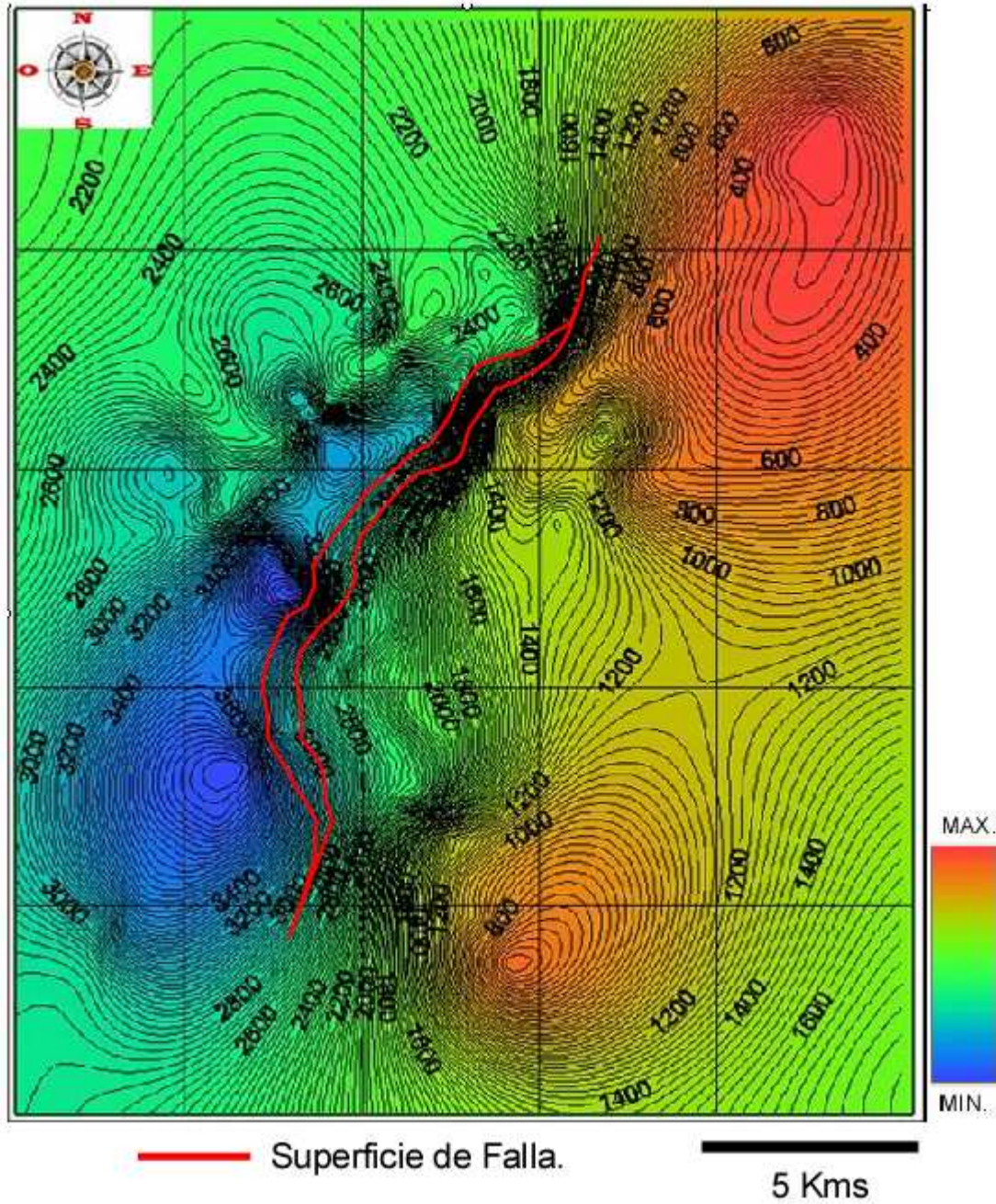
## Mapa en tiempo (milisegundos) del Tope de la Formación La Luna



**Figura 31.** Mapa estructural en tiempo (milisegundos) del tope de la formación La Luna en el área de estudio. Contorno detallado. Escala 1:100000.



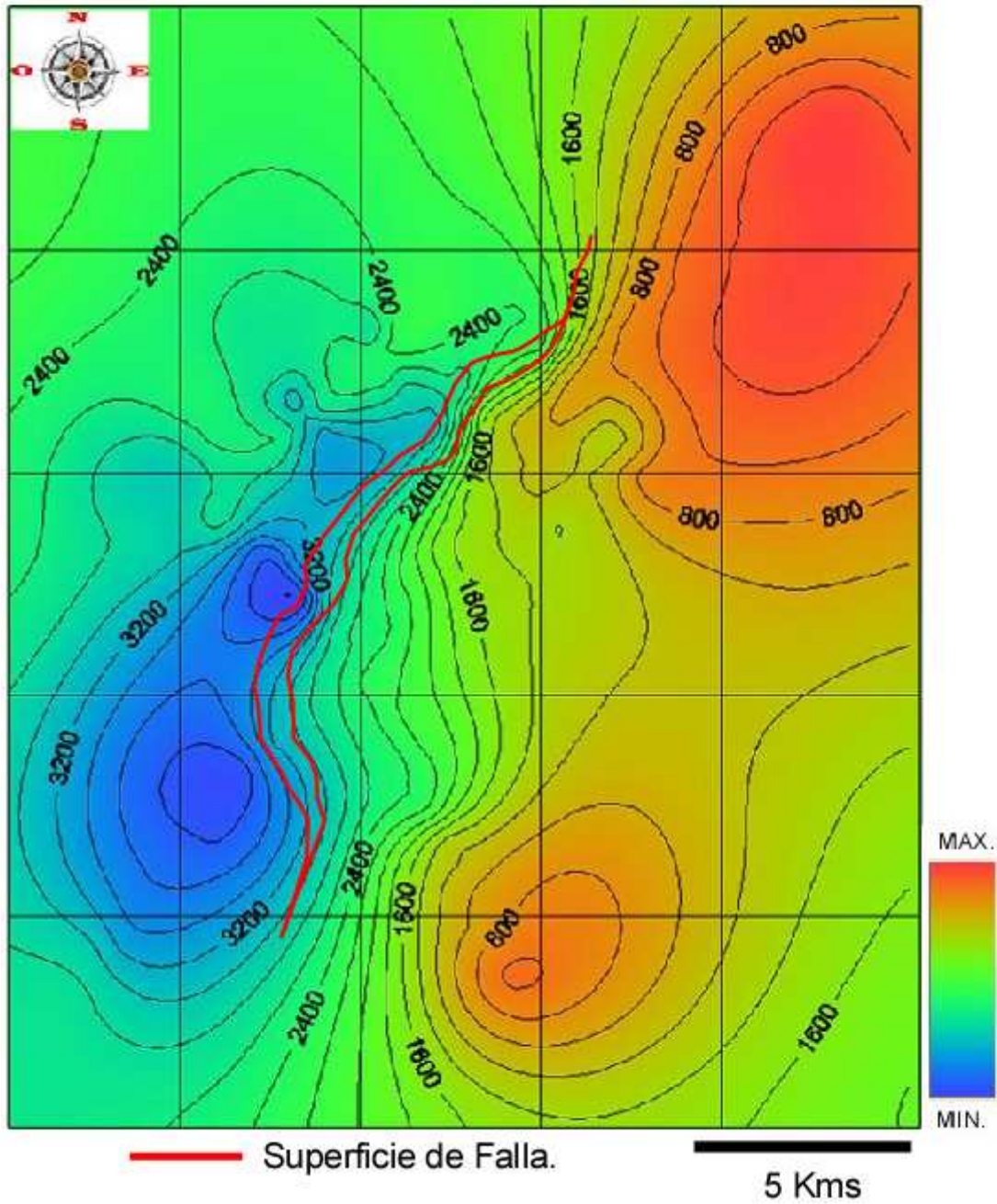
### Mapa en profundidad (pies) del Tope de la Formación La Luna



**Figura 32.** Mapa estructural en profundidad (pies) del tope de la formación La Luna en el área de estudio. Contorno detallado. Escala 1:100000.



### Mapa en profundidad (pies) del Tope de la Formación La Luna



**Figura 33.** Mapa estructural en profundidad (pies) del tope de la formación La Luna en el área de estudio. Contorno generalizado. Escala 1:100000.



## 8.2 INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL

Las estructuras reconocidas en las líneas sísmicas interpretadas son: Cabalgamientos con Rumbo Nor-Oeste y se han denominado Str1, Str2, Str3, este último corresponde a un sistema más complejo. Ver **Figura 34**.

En las secciones sísmicas 2D en profundidad, se pudo hacer la interpretación estructural basada en la teoría y metodología de Pliegues asociados a fallas inversas y de cabalgamiento (Shaw et. Al., 2005). Se realizó tal interpretación con relación de escala horizontal-vertical 1:1. A continuación se mencionan e ilustran las estructuras identificadas y modeladas.

### Sección Sísmica SAP2-18

Para explicar la cinemática del movimiento y desplazamiento de las estructuras con vergencia hacia el Noroeste y de rumbo SW-NE, se interpretó como estructura inicial y mas antigua un despegue (*Detachment*) basal regional con dirección del movimiento de la vergencia y que a medida que se propaga el desplazamiento genera las fallas de cabalgamiento; ocurre a los 5800 pies de profundidad. (Ver **Figura 35** , parte **A**).

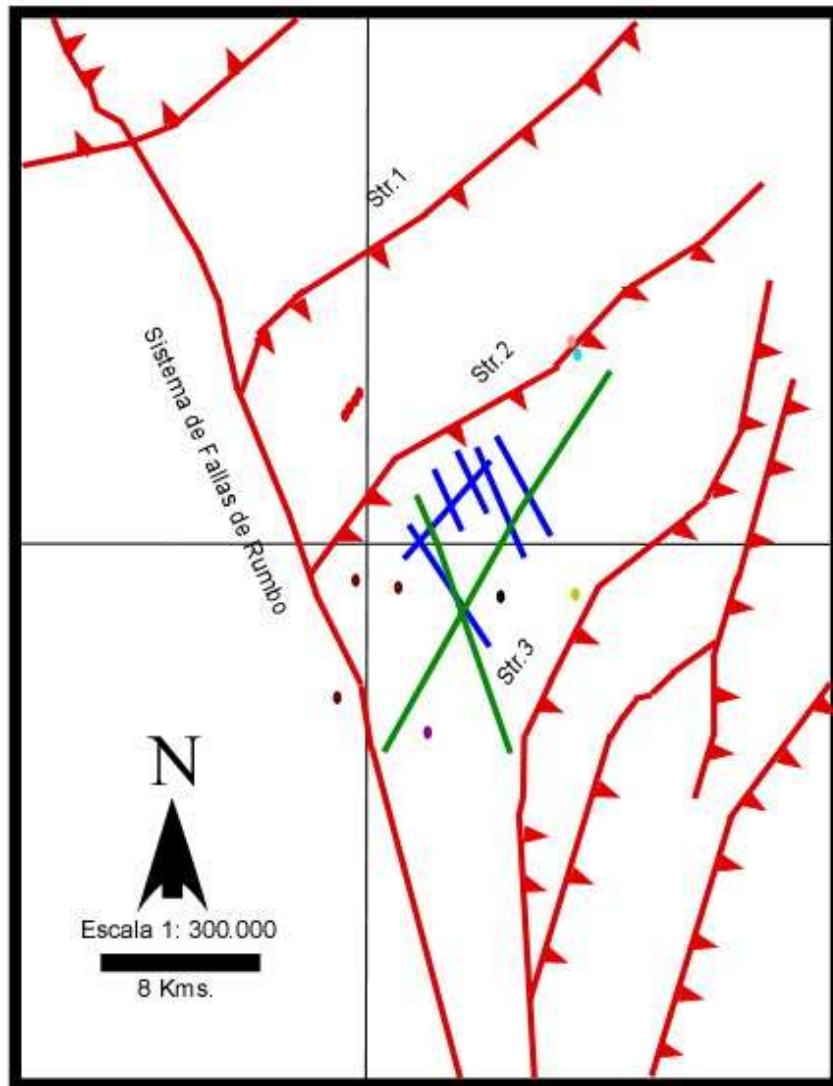
Una vez iniciado el despegue desde el NE de la sección, la falla encuentra una superficie de debilidad donde se flexiona y genera una superficie axial sinclinal, la cual será activa y permitirá el paso del material para generar el pliegue anticlinal por flexión de falla. Al propagarse la falla esta falla de manera inversa las formaciones La Quinta, Grupo Cogollo y La Luna, y como rasgo notable al finalizar el desplazamiento pone en contacto el tope de la formación La luna del bloque yacente con el tope de la Formación La Quinta del bloque colgante (Ver **Figura 35**, parte B). LA formación Molino se deposita a modo de estrato de crecimiento, de



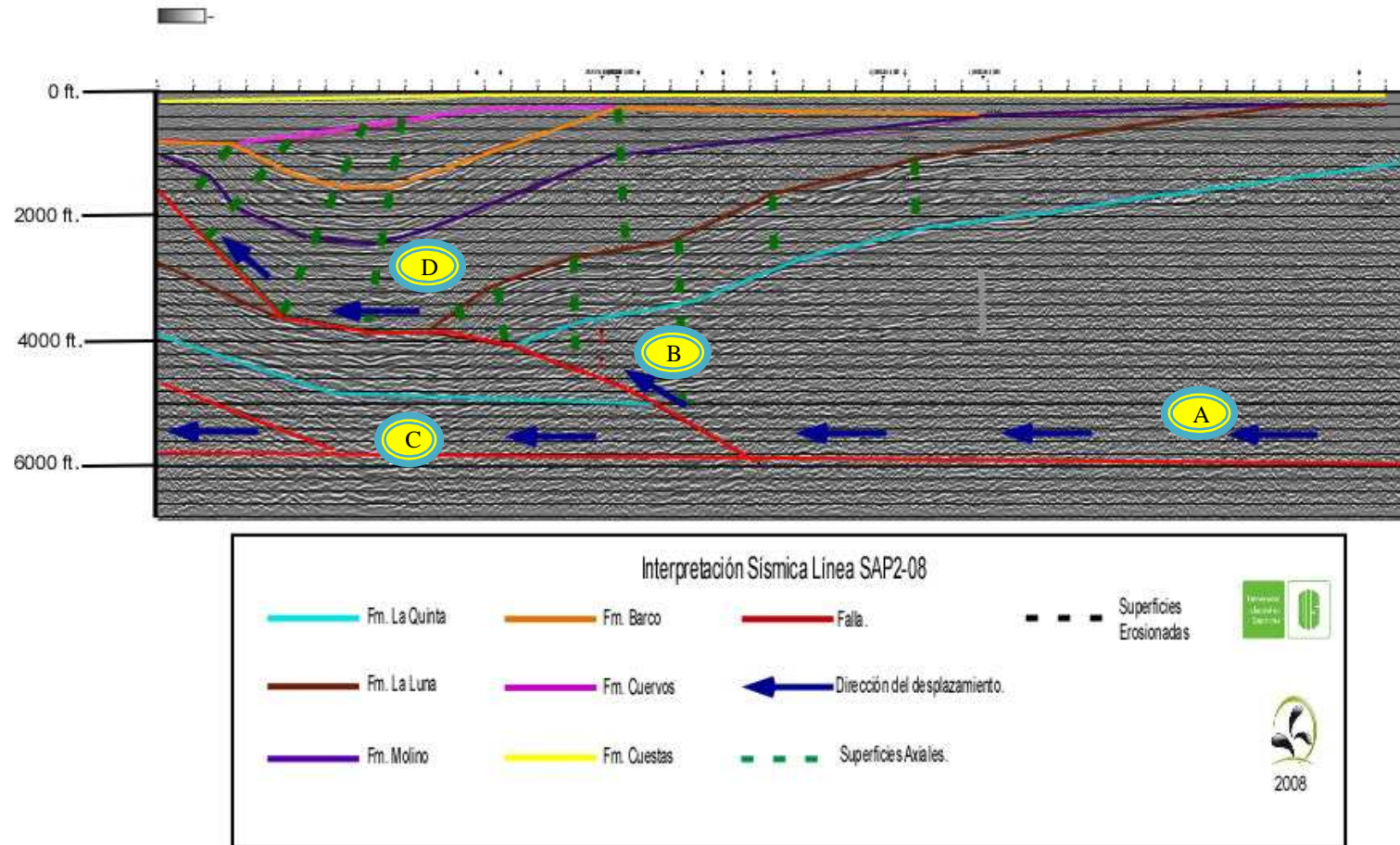
manera sintectónica con la deformación, donde la rata de depositación es mayor a la tasa de levantamiento. La geometría de los estratos de crecimiento no se aprecia muy bien debido a las reflexiones difusas que presenta esta formación. El inicio de la deformación corresponde al tope del pre-crecimiento, es decir al tope de la formación La Luna y Base de La formación Molino, es decir que su edad de inicio correspondería a finales del cretácico.

Hacia la parte SW de la sección, se aprecia un pliegue anticlinal por flexión de falla que se origina al avanzar el despegue, este cabalgamiento afecta al basamento cristalino, levantando las formaciones La Quinta, La Luna y Molino; es posterior a la deformación cretácica (Ver **Figura 35**, parte C).

La cinemática del sinclinal que se aprecia claramente en las formaciones Molino, Barco y Los Cuervos, se explica mediante la propagación de la falla de deformación cretácica, que no finaliza al deformar el tope de la Formación la Luna, sino que continua emergiendo y afectando estructuralmente, con terminación de pliegue por propagación de falla tipo sinclinal, donde la transición entre la cinemática de flexión a la de propagación se expresa con la generación de una superficie sinclinal activa, que permite el paso del material y lo deforma (**Ver Figura 35** , parte D).



**Figura 34.** Ilustración de la localización de las principales estructuras regionales de cabalgamiento, al igual que las secciones sísmicas utilizadas y la relación de estas con los pozos.



**Figura 35.** Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea **SAP2-18**. Escala H:V = 1:1. **A)** Despegue regional que corta al basamento cristalino y da la dirección de la vergencia; **B)** Pliegue por flexión de Falla, desarrolla el anticlinal; **C)** Pliegue por flexión de falla sobre el basamento; **D)** Pliegue por propagación de falla que desarrolla el sinclinal. Ocurre como una falla emergente.



### Sección Sísmica SAP2-13.

Para explicar la cinemática del movimiento y desplazamiento de las estructuras con vergencia hacia el Noroeste y de rumbo SW-NE, se interpretó como estructura inicial y más antigua un despegue (Detachment) basal regional con dirección del movimiento de la vergencia y que a medida que se propaga el desplazamiento genera las fallas de cabalgamiento; ocurre aproximadamente a 5850 pies de profundidad. (Ver **Figura 36**, parte **A**).

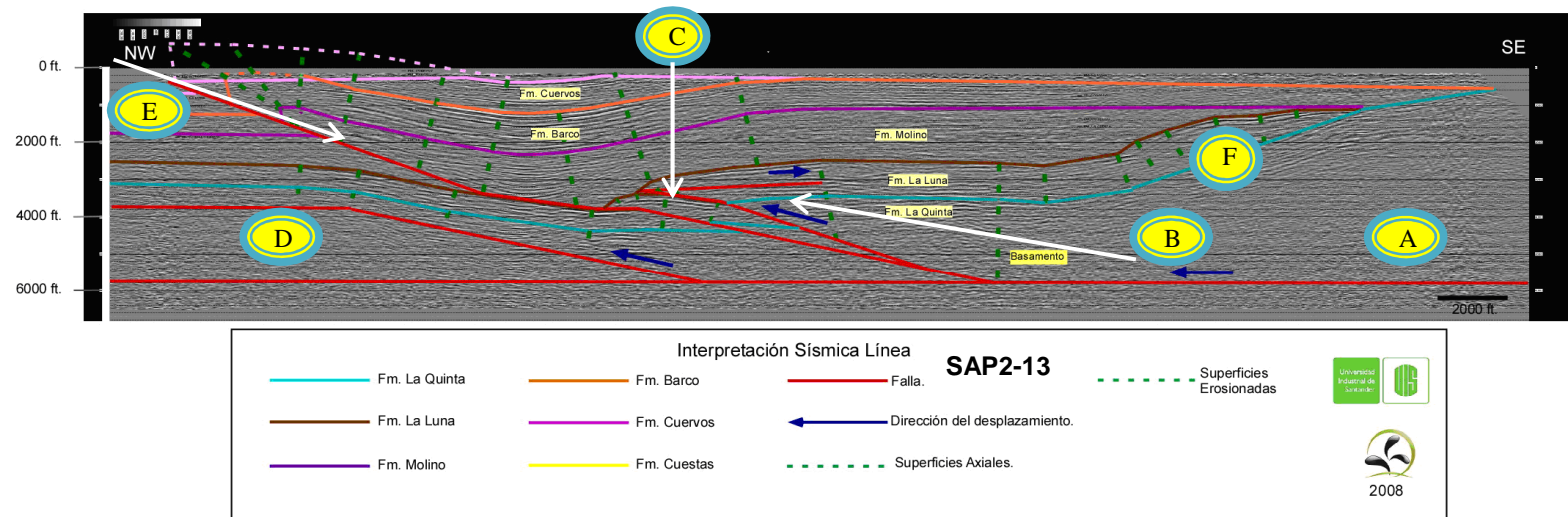
Una vez iniciado el despegue desde el SE de la sección, la falla se flexiona y genera una superficie axial sinclinal, la cual será activa y permitirá el paso del material para generar el pliegue anticlinal por flexión de falla. Al propagarse la falla esta corta de manera inversa las formaciones La Quinta, Grupo Cogollo y La Luna, y como rasgo notable pone en contacto el tope de la formación La luna del bloque yacente, con el tope de la Formación La Quinta del bloque colgante; La falla no se propaga mas en dirección hacia delante, por lo que se forma una cuña tectónica al ir terminando el desplazamiento (Ver **Figura 36**, parte **B**). La formación Molino se deposita a modo de estrato de crecimiento, de manera sintectónica con la deformación, donde la rata de depositación es mayor a la tasa de levantamiento. La geometría de los estratos de crecimiento no se aprecia muy bien debido a las reflexiones difusas que presenta esta formación. El inicio de la deformación corresponde al tope del pre-crecimiento, es decir al tope de la formación La Luna y Base de La formación Molino, es decir que su edad de inicio correspondería a finales del cretácico.

Este pliegue por flexión de falla (**Figura 36**, parte **B**), se imbrica con rompimiento hacia delante, formando un pliegue por flexión que corta al flanco delantero y emerge un fallamiento nuevo (Ver **Figura 36**, parte **C**).



Hacia la parte NW de la sección, se aprecia un pliegue anticlinal por flexión de falla que se origina al avanzar el despegue, este cabalgamiento afecta al basamento cristalino, levantando las formaciones La Quinta, La Luna y Molino; es posterior a la deformación cretácica (Ver **Figura 36**, parte **D**).

La cinemática del sinclinal que se aprecia claramente y que deforma a las formaciones Molino, Barco y Cuervos, se explica mediante la propagación de la falla imbricada de rompimiento hacia delante (**Figura 36**, parte **C**), que no finaliza al deformar el tope de la Formación la Luna, sino que continua emergiendo y afectando estructuralmente, con terminación de pliegue por propagación de falla tipo sinclinal; la transición entre la cinemática de flexión a la de propagación se expresa con la generación de una superficie sinclinal activa, que flexiona la falla y permite el paso del material (Ver **Figura 36**, parte **E**). Finalmente se ve un Onlap de La Formación La Luna (**Figura 36**, parte **F**) sobre el tope de La Quinta. Esta parte fue levantada posiblemente durante la orogenia de la serranía del Perijá.



**Figura 36.** Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea **SAP2-13**. Escala H:V = 1:1. **A)** Despegue regional que corta al basamento cristalino y da la dirección de la vergencia; **B)** Pliegue por flexión de Falla, desarrolla el anticlinal; posteriormente el mismo desplazamiento genera una estructura en cuál que genera mas relieve estructural del pliegue; **C)** Pliegue por flexión de falla generado por la imbricación del pliegue **B**, con rompimiento hacia adelante; **D)** Pliegue por flexión de falla sobre el basamento. El plegamiento levanta las Formaciones La Luna y La Quinta; **E)** Pliegue por propagación de falla que desarrolla el sinclinal. Ocurre como una falla emergente de la falla imbricada que tiene rompimiento hacia delante. **F)** Onlap de La Formación La Luna sobre el tope de la formación La Quinta. Esta parte fue levantada posiblemente durante la orogenia de la serranía del Perijá.



### **Sección Sísmica SAP-01.**

Esta sección es una línea sísmica trazada en dirección del rumbo de las estructuras. La cinemática del movimiento y desplazamiento de las estructuras, se asoció e interpretó a un plegamiento asociado a la ocurrencia de falla inversa.

Como estructura inicial y más antigua un ocurre un despegue (Detachment) basal regional con dirección del movimiento de la vergencia, en este caso SW-NE y que a medida que se propaga el desplazamiento genera las fallas de cabalgamiento; ocurre aproximadamente a 5800 pies de profundidad. (Ver **Figura 38**, parte **A**).

Una vez iniciado el despegue desde el SE de la sección, la falla se flexiona y genera una superficie axial sinclinal, la cual será activa y permitirá el paso del material para generar el pliegue anticlinal por flexión de falla.

Al propagarse la falla esta corta de manera inversa las formaciones La Quinta, Grupo Cogollo y La Luna, y como rasgo notable pone en contacto el tope de la formación La luna del bloque yacente, con el tope de la Formación La Quinta del bloque colgante(Ver **Figura 38**, parte **B**).

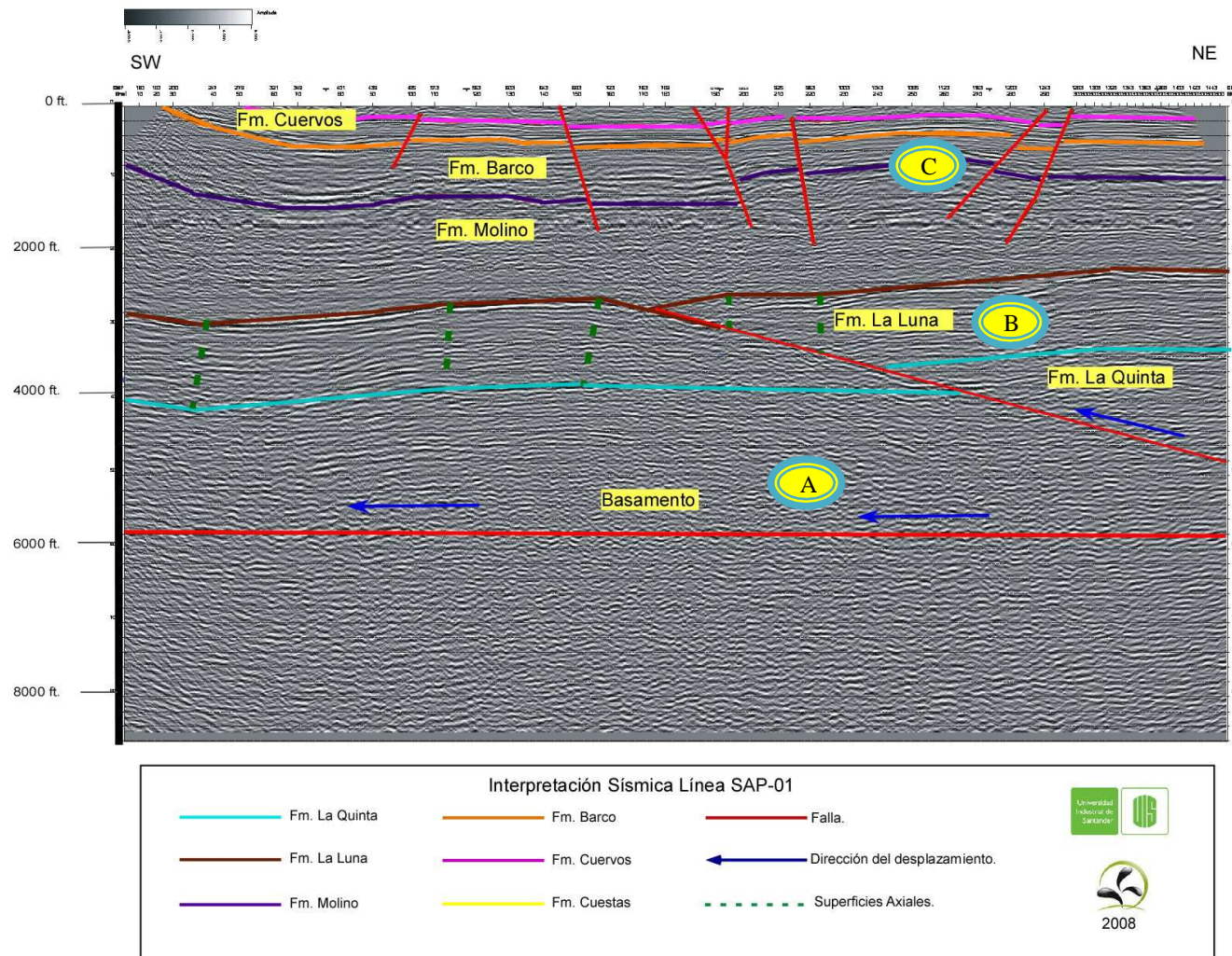
La formación Molino se deposita a modo de estrato de crecimiento, de manera sintectónica con la deformación, donde la rata de depositación es mayor a la tasa de levantamiento. El inicio de la deformación corresponde al tope del pre-crecimiento, es decir al tope de la formación La Luna y Base de La formación Molino, es decir que su edad de inicio correspondería a finales del cretácico.



Se aprecia que el plegamiento por flexión de falla no es tan pronunciado como en las secciones anteriores, esto es debido a que esta línea no fue trazada sobre el máximo buzamiento de las estructuras.

Las formaciones Molino, Barco y Cuervos no se aprecian con alta deformación, no se aprecia la estructura sinclinal. Esto es debido a que la línea corta la parte del flanco derecho de este sinclinal donde la capa sedimentaria se someriza presentándose un alto estructural (Ver **Figura 38**, parte **C**).

Hacia la parte más somera de la sección se ve fallamiento de alto ángulo, correspondiente a estructuras de fallamiento normal y de rumbo que cortan las formaciones Barco, Cuervos y Molino principalmente (Ver **Figura 38**, parte **C**).



**Figura 37.** Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea **SAP-01**. Relación escala Horizontal:Vertical = 1:1. **A)** Despegue basal. **B)** Estructura de Cabalgamiento. **C)** Fallamiento Normal y de Rumbo Sinistral.



## Sección Sísmica SAP-20.

Para explicar la cinemática del movimiento y desplazamiento de las estructuras con vergencia hacia el Noroeste y de rumbo SW-NE, se interpretó de la misma manera una estructura inicial y más antigua un despegue (Detachment) basal regional con dirección del movimiento de la vergencia y que a medida que se propaga el desplazamiento genera las fallas de cabalgamiento y plegamiento asociado a las mismas; ocurre aproximadamente a 5900 pies de profundidad. (Ver **Figura 38**, parte **A**).

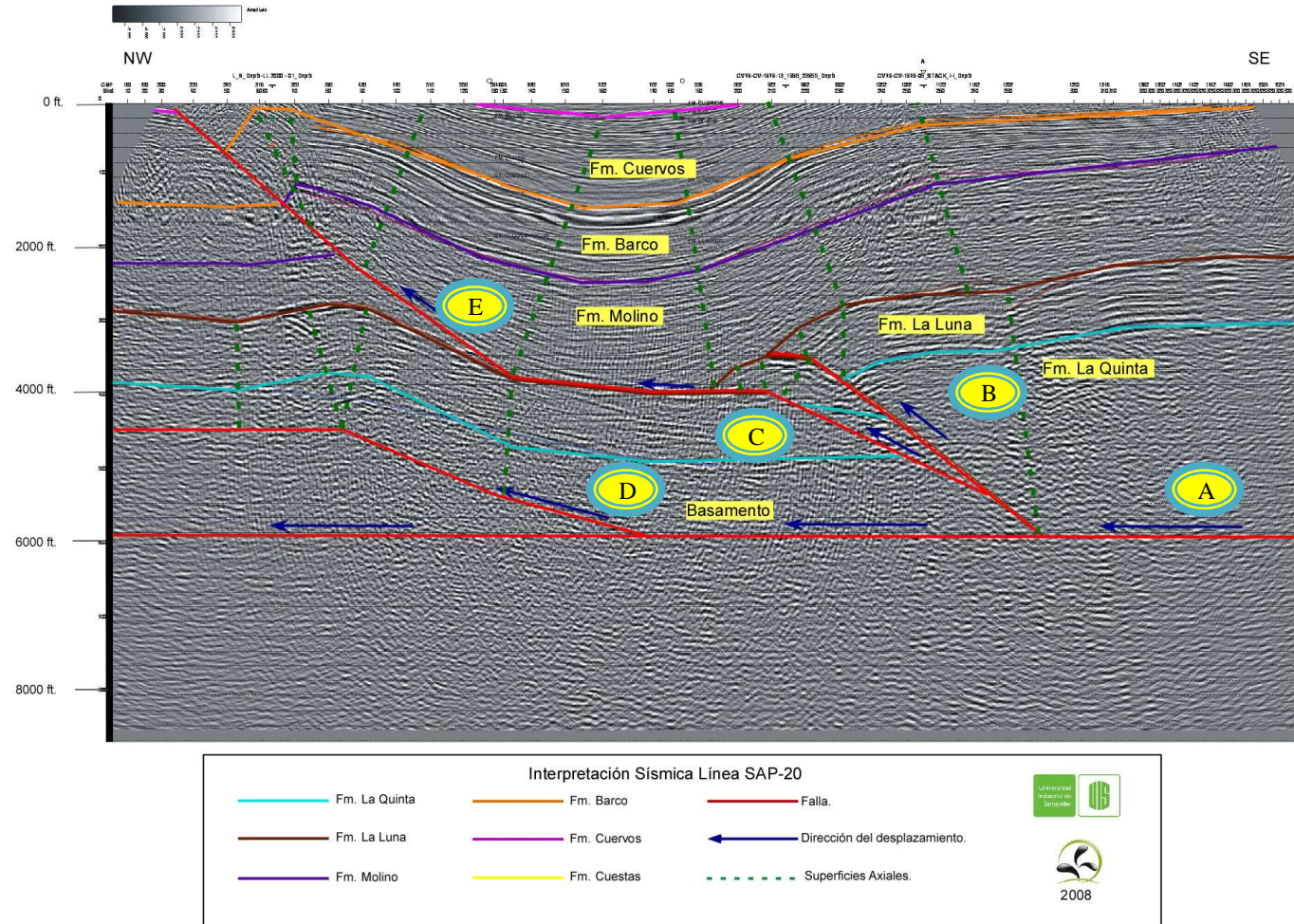
Una vez iniciado el despegue desde el SE de la sección, la falla se flexiona y genera una superficie axial sinclinal, la cual será activa y permitirá el paso del material para generar el pliegue anticlinal por flexión de falla. Al propagarse la falla esta corta de manera inversa las formaciones La Quinta, Grupo Cogollo y La Luna (Ver **Figura 38**, parte **B**). La formación Molino se deposita a modo de estrato de crecimiento, de manera sintectónica con la deformación, donde la tasa de depositación es mayor a la tasa de levantamiento. La geometría de los estratos de crecimiento no se aprecia muy bien debido a las reflexiones difusas que presenta esta formación; posiblemente el mecanismo de formación del crecimiento es un sistema híbrido, tanto por rotación de la banda *kink* por el intenso plegamiento como migración de bandas *kink* ya que a medida que se propaga el fallamiento crecen los flancos del pliegue. El inicio de la deformación corresponde al tope del pre-crecimiento, es decir al tope de la formación La Luna y Base de La formación Molino, es decir que su edad de inicio correspondería a finales del cretácico.

Este pliegue por flexión de falla (**Figura 38**, parte **B**), se imbrica con rompimiento hacia delante, formando un pliegue por flexión que corta al flanco delantero y emerge un fallamiento nuevo (Ver **Figura 38**, parte **C**) deformando las formaciones La Luna, La Quinta y Gp. Cogollo nuevamente de manera Inversa.



Hacia la parte NW de la sección, se aprecia un pliegue anticlinal por flexión de falla que se origina al avanzar el despegue, este cabalgamiento afecta al basamento cristalino, levantando las formaciones La Quinta, La Luna y Molino; es posterior a la deformación cretácica (Ver **Figura 38** , parte **D**).

La cinemática del sinclinal que se aprecia claramente y que deforma a las formaciones Molino, Barco y Los Cuervos, se explica mediante la propagación de la falla imbricada de rompimiento hacia delante (**Figura 38**, parte **E**), que no finaliza al deformar el tope de la Formación la Luna, sino que continua emergiendo y afectando estructuralmente, con terminación de pliegue por propagación de falla tipo sinclinal; la transición entre la cinemática de flexión a la de propagación se expresa con la generación de una superficie sinclinal activa, que flexiona la falla y permite el paso del material (Ver **Figura 38**, parte **E**).



**Figura 38.** Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea **SAP-20**. Relación escala Horizontal: Vertical = 1:1. **A)** Despegue basal. **B)** Anticlinal por flexión de Falla. **C)** Anticlinal por imbricación de rompimiento hacia adelante. **D)** Sinclinal por flexión de falla. **E)** Sinclinal por propagación de falla.



## Sección Sísmica SAP-16.

Esta línea es más corta, más limitada y abarca la parte del flanco izquierdo del sinclinal que corta las formaciones Molino, Barco y Cuervos explicado anteriormente.

La cinemática del movimiento y desplazamiento de las estructuras se asigna de la misma manera una estructura inicial y más antigua un despegue (Detachment) basal regional con dirección del movimiento de la vergencia y que a medida que se propaga el desplazamiento genera las fallas de cabalgamiento y plegamiento asociado a las mismas; si bien no se observó claramente como en las demás secciones, muy posiblemente ocurre aproximadamente entre 5600 y 5800 pies de profundidad.

Se aprecia un pliegue anticlinal por flexión de falla, que posiblemente desciende hasta el despegue basal (Ver **Figura 39**, parte **A**). Este que se origina al avanzar el despegue, afecta al basamento cristalino, levantando las formaciones La Quinta, La Luna y Molino; es posterior a la deformación cretácica

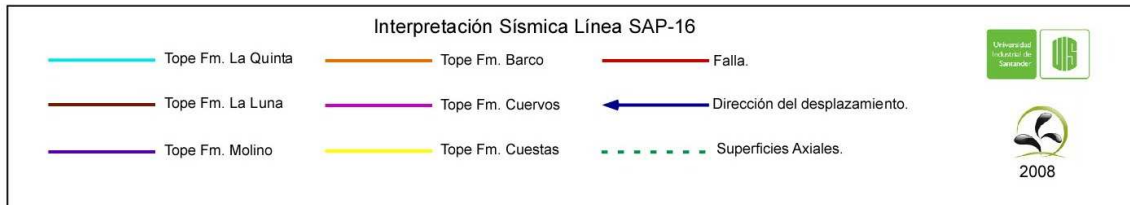
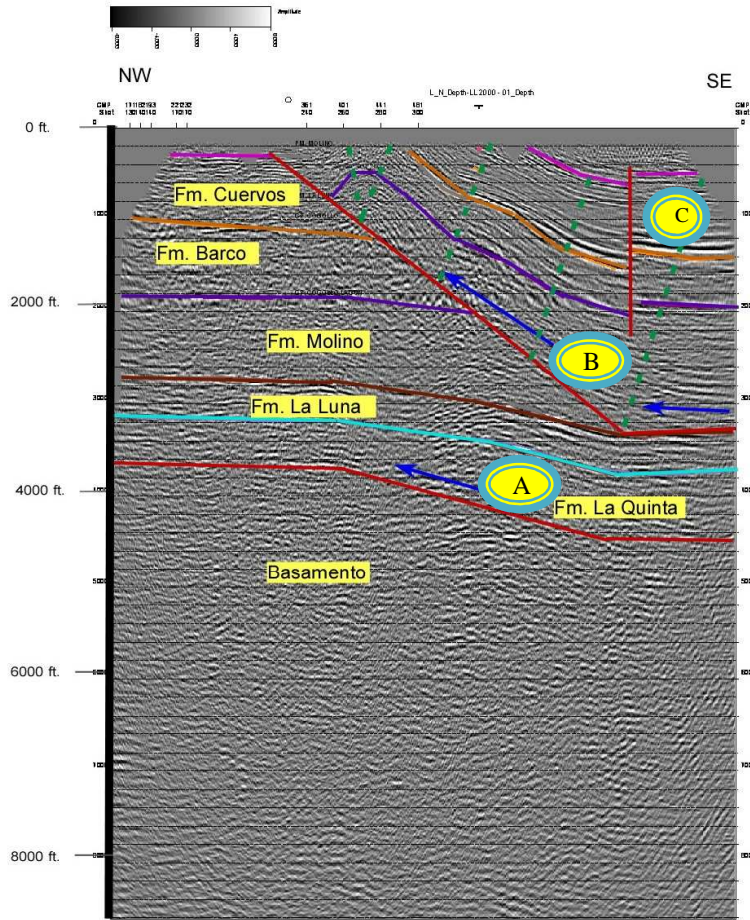
De igual manera se toma a la formación Molino como estrato de crecimiento, de manera sintectónica con la deformación, donde la tasa de depositación es mayor a la tasa de levantamiento.

La cinemática del sinclinal que se aprecia claramente y que deforma a las formaciones Molino, Barco y Cuervos, se explica mediante la propagación de la falla imbricada de rompimiento hacia delante (**Figura 39**, parte **B**); si bien en esta sección no se puede apreciar por la limitación de adquisición, se asocia a la cinemática descrita en las líneas sísmicas anteriores.



De esta manera se forma el pliegue por propagación de falla tipo sinclinal; se aprecia más ancho el eje del sinclinal (Ver **Figura 39**, parte **B**).

Hacia la parte más somera de la sección, en la parte SE, se ve fallamiento de alto ángulo, correspondiente a una estructura de fallamiento de rumbo que corta las formaciones Barco y Cuervos (Ver **Figura 39**, parte **C**).



**Figura 39.** Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea **SAP-16**. Relación escala Horizontal: Vertical = 1:1. **A)** Pliegue Sinclinal-Anticlinal por flexión de falla. **B)** Pliegue Sinclinal por flexión de falla. **C)** Fallamiento de Rumbo local.



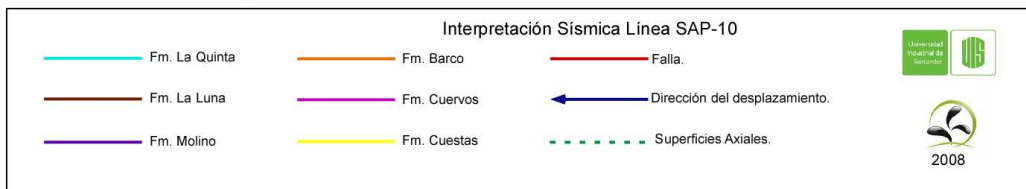
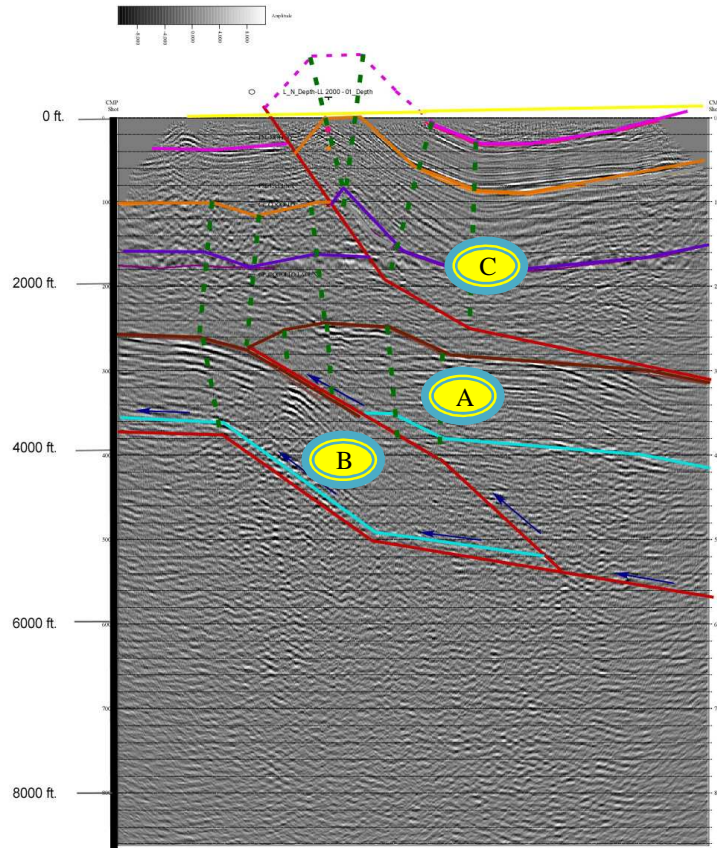
### Sección Sísmica SAP-10.

Esta línea abarca la parte del flanco izquierdo del sinclinal que corta las formaciones Molino, Barco y Cuervos explicado anteriormente. La cinemática del movimiento y desplazamiento de las estructuras se asigna de la misma manera una estructura inicial y más antigua un despegue (Detachment) basal regional con dirección del movimiento de la vergencia y que a medida que se propaga el desplazamiento genera las fallas de cabalgamiento y plegamiento asociado a las mismas; si bien no se observó claramente como en las demás secciones, muy posiblemente ocurre aproximadamente entre 5700 y 5800 pies de profundidad.

Se aprecia un pliegue anticlinal por flexión de falla, que posiblemente desciende hasta el despegue basal (Ver **Figura 40**, parte **A**). Este que se origina al avanzar el despegue, afecta al basamento cristalino, levantando las formaciones La Quinta, La Luna y Molino; es posterior a la deformación cretácica

En la parte NW se identifica un pliegue sinclinal por flexión de falla posterior al pliegue anticlinal por flexión de falla; este desciende hasta la falla e propagación por flexión (Ver **Figura 40**, parte **B**). Afecta al basamento cristalino, levantando las formaciones La Quinta, La Luna y Molino.

La cinemática del sinclinal que se aprecia claramente y que deforma a las formaciones Molino, Barco y Cuervos, se explica mediante la propagación de la falla imbricada de rompimiento hacia delante (**Figura 40**, parte **C**); si bien en esta sección no se puede apreciar por la limitación de adquisición, se asocia a la cinemática descrita en las líneas sísmicas anteriores. De esta manera se forma el pliegue por propagación de falla tipo sinclinal; se aprecia ancho el eje del sinclinal pero con el flanco derecho apretado al igual que el anticlinal que se genera por la propagación de la falla (Ver **Figura 40**, parte **C**).



**Figura 40.** Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea **SAP-10**.  
Relación escala Horizontal: Vertical = 1:1. **A)** Pliegue Anticlinal por flexión de falla.  
Pliegue Sinclinal por flexión de falla. **C)** Pliegue Sinclinal por propagación de Falla.



## Sección Sísmica SAP-08

Para explicar la cinemática del movimiento y desplazamiento de las estructuras con vergencia hacia el Noroeste y de rumbo SW-NE, se interpretó como estructura inicial y más antigua un despegue (Detachment) basal regional con dirección del movimiento de la vergencia y que a medida que se propaga el desplazamiento genera las fallas de cabalgamiento; ocurre a los 5800 pies de profundidad. (Ver **Figura 41**, parte **A**).

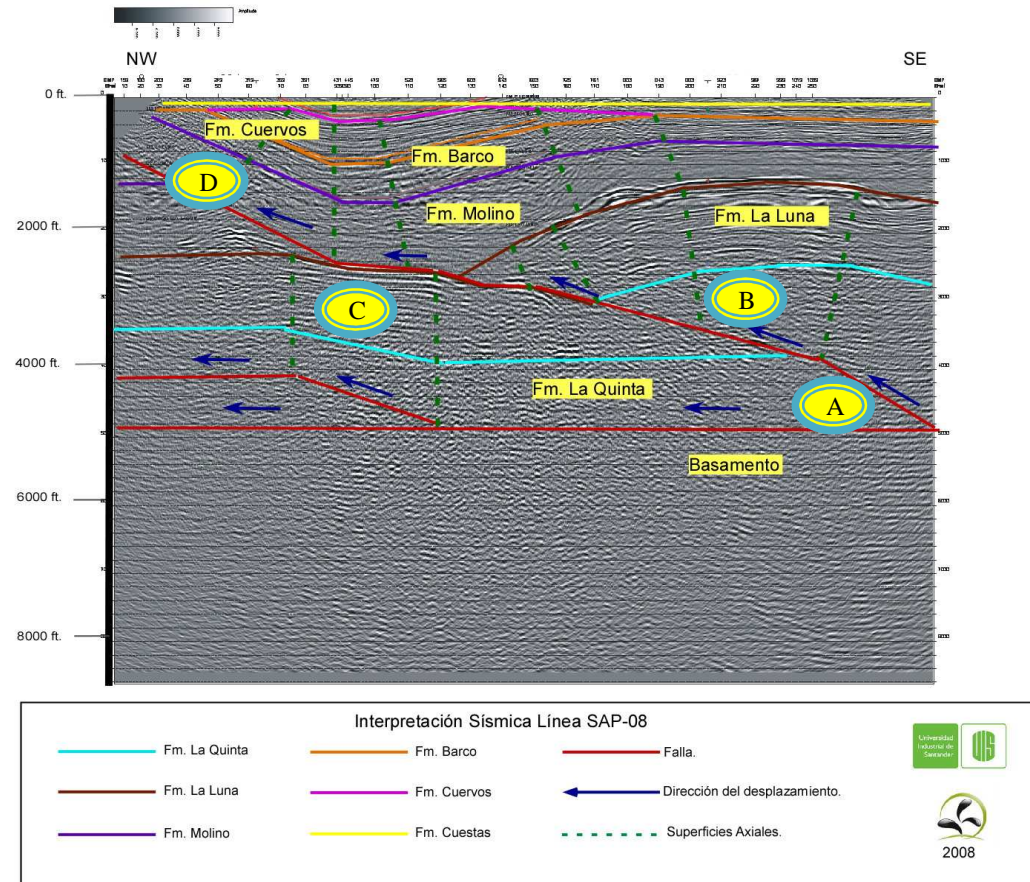
Una vez iniciado el despegue desde el NE de la sección, la falla encuentra una superficie de debilidad donde se flexiona y genera una superficie axial sinclinal, la cual será activa y permitirá el paso del material para generar el pliegue anticlinal por flexión de falla. Al propagarse la falla esta falla de manera inversa las formaciones La Quinta, Grupo Cogollo y La Luna, y como rasgo notable al finalizar el desplazamiento pone en contacto el tope de la formación La luna del bloque yacente con el tope de la Formación La Quinta del bloque colgante (Ver **Figura 41**, parte **B**).

La formación Molino se deposita a modo de estrato de crecimiento, de manera sintectónica con la deformación, donde la tasa de depositación es mayor a la tasa de levantamiento. La geometría de los estratos de crecimiento no se aprecia muy bien debido a las reflexiones difusas que presenta esta formación. El inicio de la deformación corresponde al tope del pre-crecimiento, es decir al tope de la formación La Luna y Base de La formación Molino, es decir que su edad de inicio correspondería a finales del cretácico.

Hacia la parte SW de la sección, se aprecia un pliegue sinclinal-anticlinal por flexión de falla que se origina al avanzar el despegue, este cabalgamiento afecta al basamento cristalino, levantando las formaciones La Quinta, La Luna y Molino; es posterior a la deformación cretácica (Ver **Figura 41**, parte **C**).



La cinemática del sinclinal que se aprecia claramente y que solo ocurre en las formaciones Molino, Barco y Cuervos, se explica mediante la propagación de la falla de deformación cretácica, que no finaliza al deformar el tope de la Formación la Luna, sino que continua emergiendo y afectando estructuralmente, con terminación de pliegue por propagación de falla tipo sinclinal, donde la transición entre la cinemática de flexión a la de propagación se expresa con la generación de una superficie sinclinal activa, que permite el paso del material y lo deforma (Ver **Figura 41**, parte **D**).



**Figura 41.** Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea **SAP-08**. Relación escala Horizontal: Vertical = 1:1. **A)** Despegue basal. **B)** Anticinal por flexión de falla. **C)** Pliegue Sinclinal-Anticinal por flexión de falla. **D)** Sinclinal por propagación de falla.



## Sección Sísmica SAP-06.

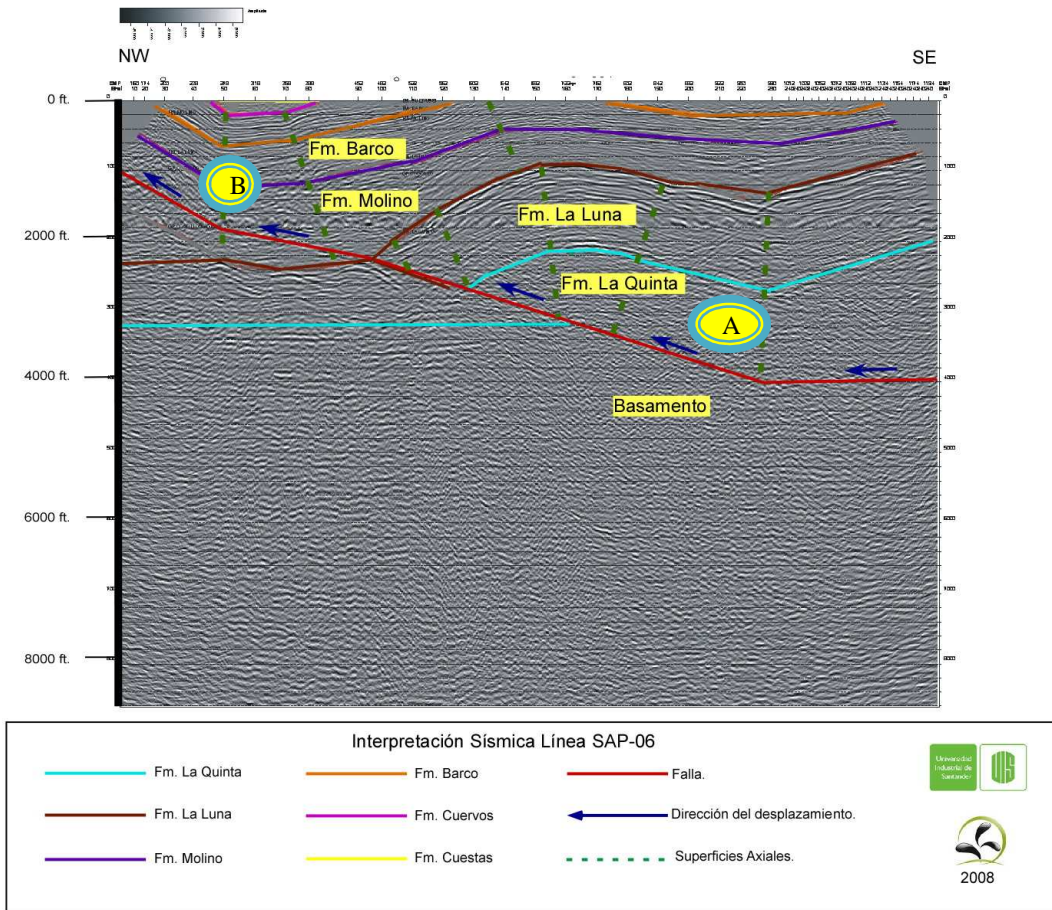
Esta línea es corta y se extiende desde la parte del flanco derecho del sinclinal que corta las formaciones Molino, Barco y Cuervos explicado anteriormente.

La cinemática del movimiento y desplazamiento de las estructuras se asigna de la misma manera una estructura inicial y más antigua un despegue (Detachment) basal regional con dirección del movimiento de la vergencia y que a medida que se propaga el desplazamiento genera las fallas de cabalgamiento y plegamiento asociado a las mismas; si bien no se observó claramente como en las demás secciones, muy posiblemente ocurre aproximadamente a 5600 pies de profundidad.

Se aprecia un pliegue sinclinal por flexión de falla, que posiblemente desciende hasta el despegue basal (Ver **Figura 42**, parte **A**). Este que se origina al avanzar el despegue, afecta al basamento cristalino, cortando y levantando las formaciones La Quinta, La Luna y Molino; es posterior a la deformación cretácica

La cinemática del sinclinal que se aprecia claramente y que deforma a las formaciones Molino, Barco y Cuervos, se explica mediante la propagación de la falla imbricada de rompimiento hacia delante (**Figura 42**, parte **B**); si bien en esta sección no se puede apreciar por la limitación de adquisición, se asocia a la cinemática descrita en las líneas sísmicas anteriores.

De esta manera se forma el pliegue por propagación de falla tipo sinclinal; se aprecia muy apretado el eje del sinclinal pero con el flanco derecho apretado al igual que el anticlinal que se genera por la propagación de la falla (Ver **Figura 42**, parte **C**).



**Figura 42.** Interpretación Estructural en profundidad (pies) de la línea **SAP-06**. Relación escala Horizontal:Vertical = 1:1. **A)** Pliegue anticlinal por flexión de falla; **B)** Pliegue Sinclinal por propagación de falla.



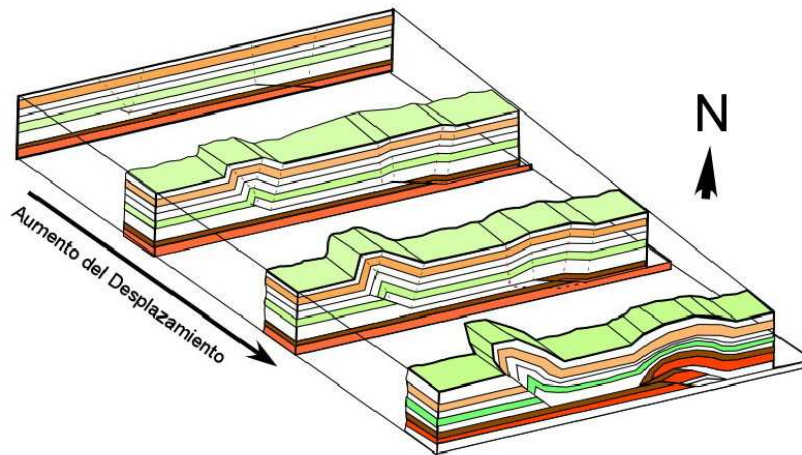
## **RESUMEN INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL.**

El carácter tectónico que se desarrollo corresponde a un régimen compresivo, ya que las estructuras observadas y modeladas mediante la interpretación sísmica permitieron reconocer un despegue basal regional que tiene la tendencia de dominio compresivo y desplaza al material que está por encima de este.

La formación La Luna se encuentra afectada tectónicamente por el régimen compresivo, donde la estructura actual presenta plegamiento asociado a fallamiento inverso, de tipo pliegue por flexión de falla tipo imbricado. Este fallamiento genera una estructura anticlinal – sinclinal donde muy posiblemente ocurre formación de cocinas de generación y en las elevaciones estructurales falladas acumulación de hidrocarburos. Esto debe corroborarse con el modelamiento geoquímico.

El inicio de la deformación de la formación La Luna es del Cretácico tardío, la cual genera las estructuras anticlinales por el fallamiento inverso. El levantamiento orogénico del Perijá influenció en la reactivación del sistema compresivo, formándose fallamiento emergente que genera la estructura de sinclinal asociado a fallamiento inverso, el cual es parte del thrust actual que se observa en los datos de geología de superficie.

Los mapas estructurales en tiempo y profundidad del tope de la Formación La Luna realizados con base en todas las secciones sísmicas interpretadas, se aprecian cabalgamientos con vergencia Noroeste que generan las elevaciones de la formación La Luna. Los altos estructurales del centro del área de estudio, pueden constituir un objetivo con interés exploratorio, ya que son anticlinales de cabalgamiento fallados.



**Figura 43.** Esquema del desarrollo estructural y aumento del desplazamiento, el cual es mayor en el Sureste del área de estudio.

### 8.3. Modelado Geoquímico

Se usa para extrapolar información dentro de áreas y donde la información es escasa, estudiando la compactación y decompactación de las rocas, la conductividad térmica de las rocas, y el flujo de calor.

Se evaluó en el pozo X-1 y en la sección SAP2-13 el comportamiento individual de los indicadores de madurez, los procesos de generación, migración y expulsión de los fluidos; generando un modelo 1D y 2D, tomando la historia de subsidencia de acuerdo a datos de pozo para calibrar algunos factores requeridos en los modelos 2D.

Se emplearon las estimaciones elaboradas por García- González et al., 2008 de las condiciones de paleo profundidad basadas en los ambientes de depósito de cada una de las Formaciones (*PWD - Paleo Water Depth*), paleo temperatura (*SWIT - Sedimentary Water Interface temperatura*) y flujo de calor (*HF - Heat Flow*) El flujo de calor actual empleado es **50.5 mW/m<sup>2</sup>**, el cual fue calculado por García

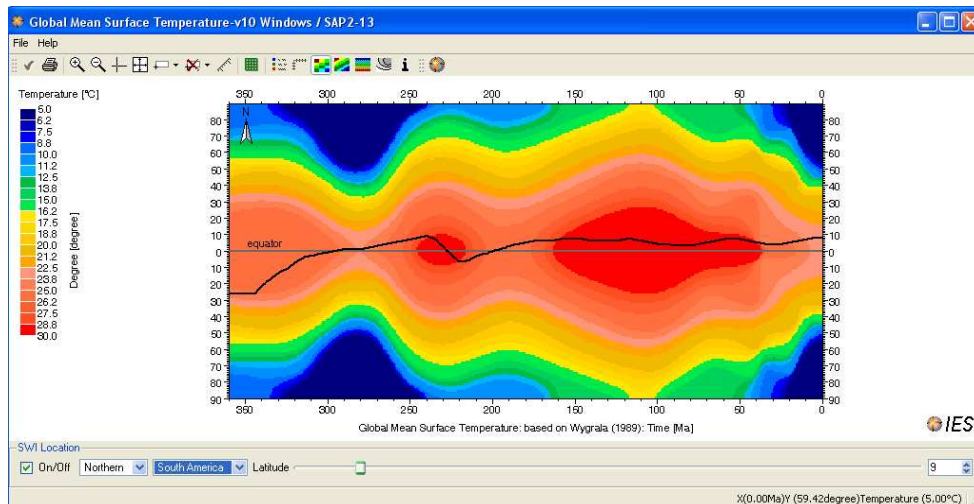


González, et al., 2008. Para PWD, se tuvo en cuenta la profundidad al momento de depositación de las formaciones con respecto al tiempo; para SWIT 35 °C, temperatura actual en la subcuenca como base.

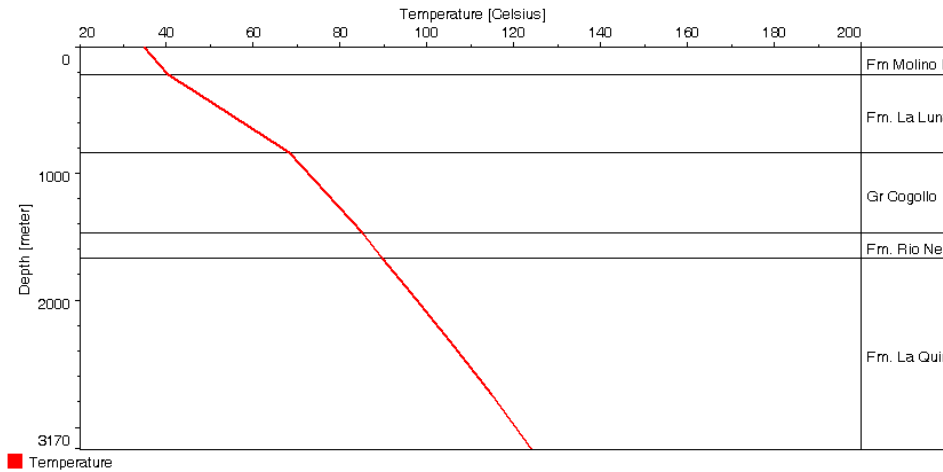
### 8.3.1 Historia de Subsistencia

Se elaboraron las gráficas de profundidad contra temperatura de fondo (**Figura 45**) y reflectancia de vitrinita (**Figura 46**) respectivamente, las cuales se calibraron con los datos registrados de la perforación del pozo, y, con los análisis geoquímicos realizados a las muestras en trabajos anteriores.

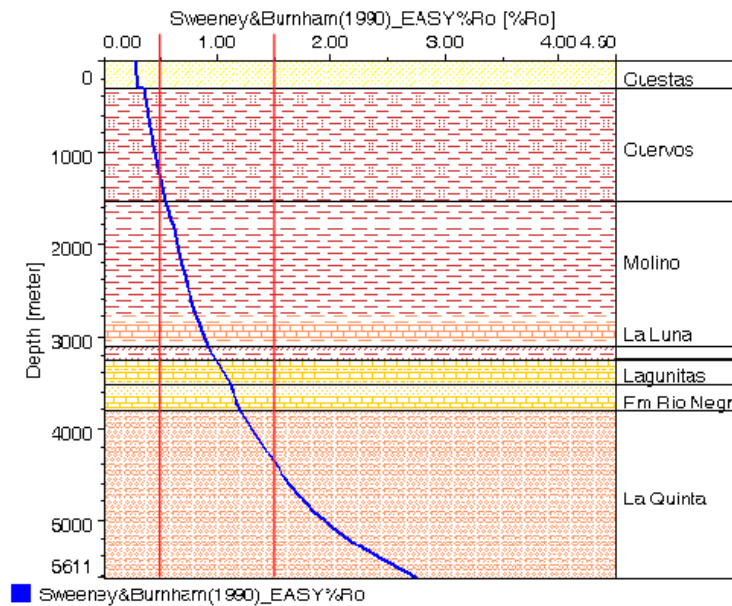
A nivel de madurez se tienen tres rangos basados en el porcentaje de Ro: madurez media (pico de madurez), Ro entre 0.7% y 1%; madurez tardía, Ro entre 1 y 1.35%; y, sobremadurez, Ro desde 1.35% en adelante. De acuerdo con los rangos establecidos, la Formación La Luna se encuentra en ventana de generación de petróleo, mientras el Grupo Cogollo se encuentra en una fase de sobremadurez (Ver **Figura 46**).



**Figura 44.**Gráfico para calcular la temperatura de superficie según la latitud 9°, en el hemisferio Norte. Basado en el software Petromod 10 1D.



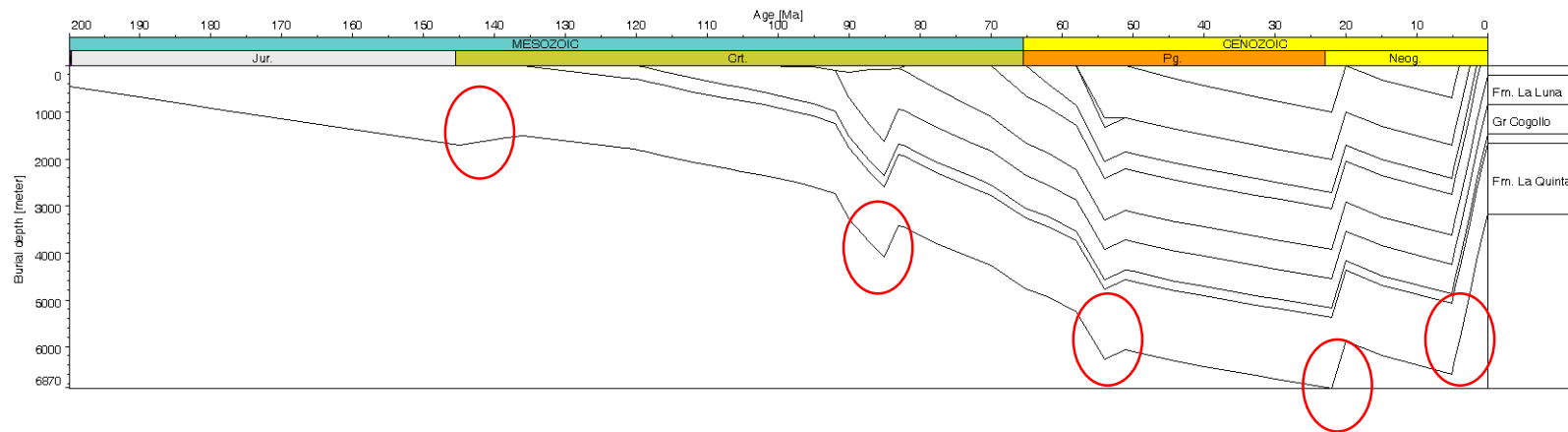
**Figura 45.** Diagrama de Profundidad (m) vs. Temperatura de Fondo (°C - Celsius).  
La línea roja indica la temperatura.



**Figura 46.** Profundidad (m) vs. Reflectancia de Vitrinita (%Ro). La línea azul indica los valores de reflectancia de vitrinita; La formación La Luna presenta un %Ro en el rango de 0,5 a 1,1 aproximadamente, indicando madurez termal en estado de madurez temprana a madurez avanzada y se encuentra en ventana de generación de aceite.



En los diagramas de soterramiento se muestran las variables, temperatura (**Figura 49**), Reflectancia de vitrinita (**Figura 50**), y por último el diagrama de soterramiento (**Figura 48**), en función de la profundidad de enterramiento y la edad de depósito de cada una de las unidades de roca.



**Figura 47.** Diagrama de soterramiento con respecto a la profundidad y la edad. Los círculos en rojo muestran los eventos erosivos.

El diagrama de soterramiento muestra que la Formación La Quinta inició su depositación hace 200 Ma, y se va profundizando con el tiempo; esta Formación sufre un evento erosivo alrededor de los 145 Ma, donde ocurre un ligero levantamiento, pero al iniciarse la depositación del Grupo Cogollo la Formación La Quinta continúa profundizándose. Al iniciarse la depositación de la Formación La Luna, aproximadamente a 92 Ma, se observa una



subsistencia de la cuenca que posteriormente es acompañada de un evento erosivo aproximadamente desde 85 Ma a 83 Ma que afecta a la formación La Luna, generando un levantamiento de las unidades en ese entonces depositadas. A medida que se depositan las Formaciones La Luna Molino y Barco, la cuenca continúa profundizándose. Otro evento Erosivo se observa desde 58 MA a 51 Ma aproximadamente afectando a la Formación Barco. La cuenca alcanza su máxima profundidad en el Cenozoico entre 20 a 25 Ma, pero esta profundización fue acompañada con el evento erosivo del Eoceno – Oligoceno, el cual somerizó las formaciones aproximadamente en 1000 mts. Finalmente la Erosión del Plioceno que afectó a la formación Cuestas desde 5 a 1.8 Ma de años aproximadamente, generó una somerización de la cuenca hasta las profundidades actuales.

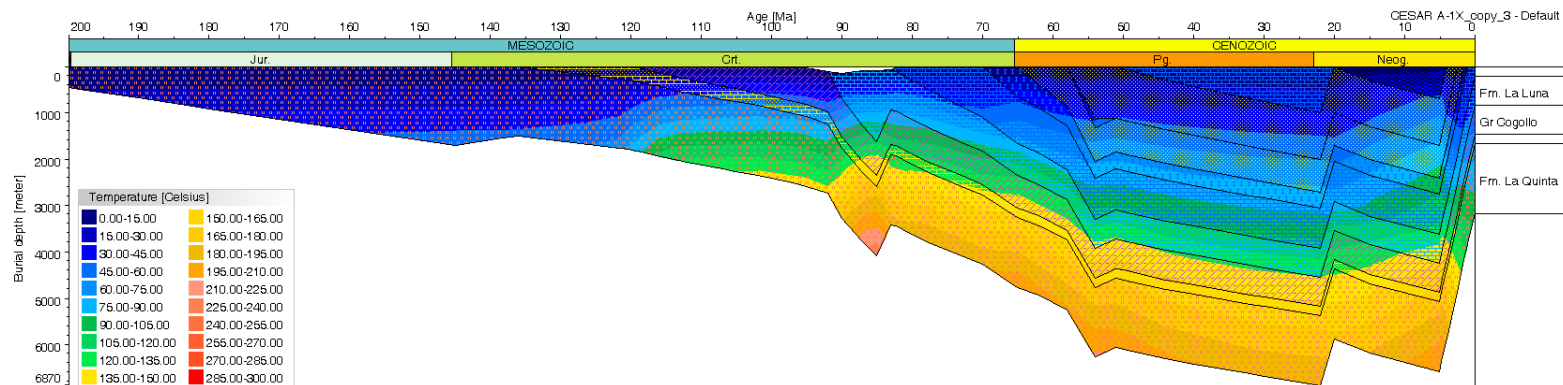
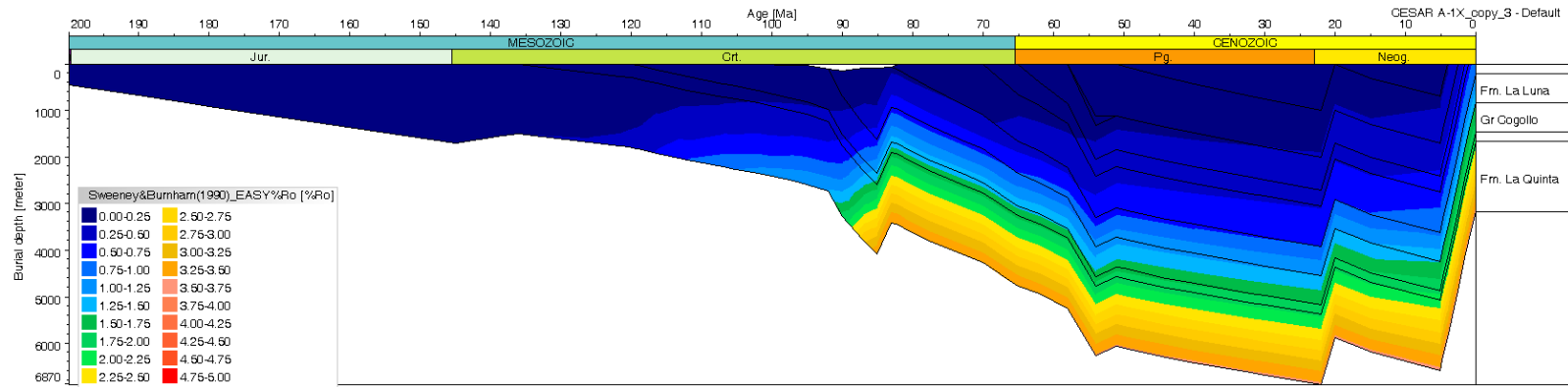


Figura 48. Diagrama de soterramiento. Variación de la temperatura (°C) con respecto a la profundidad y la edad.



**FIGURA 49.** Diagrama de soterramiento. Variación de la reflectancia de vitrinita (%Ro) con respecto a la profundidad y la edad.



Para el diagrama de soterramiento se establecieron cinco eventos erosivos asociados a levantamientos:

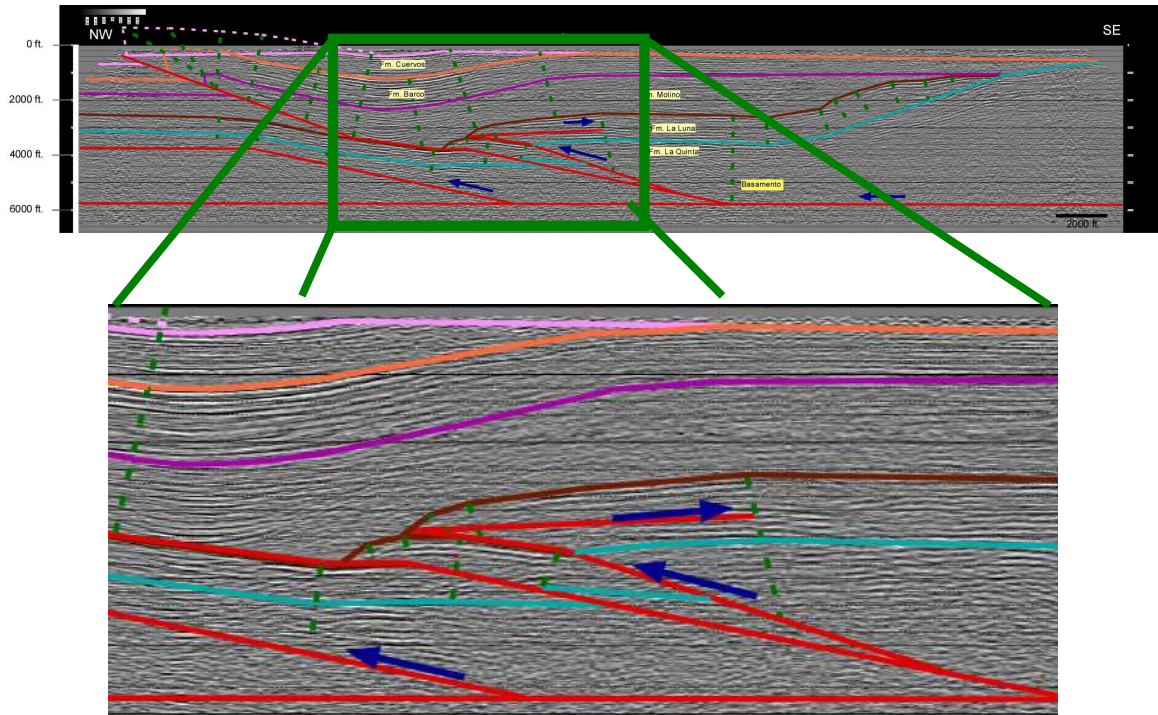
<b>Eventos erosivos</b>	
<b>Formación</b>	<b>Edad de levantamiento (Ma)</b>
Cuestas	10-1,8
Formación Sin Nombrar Eoceno-Oligoceno	22-20
Barco-Cuervos	58-51
La Luna	85-83
La Quinta	145-136

**Tabla 5.** Eventos erosivos.

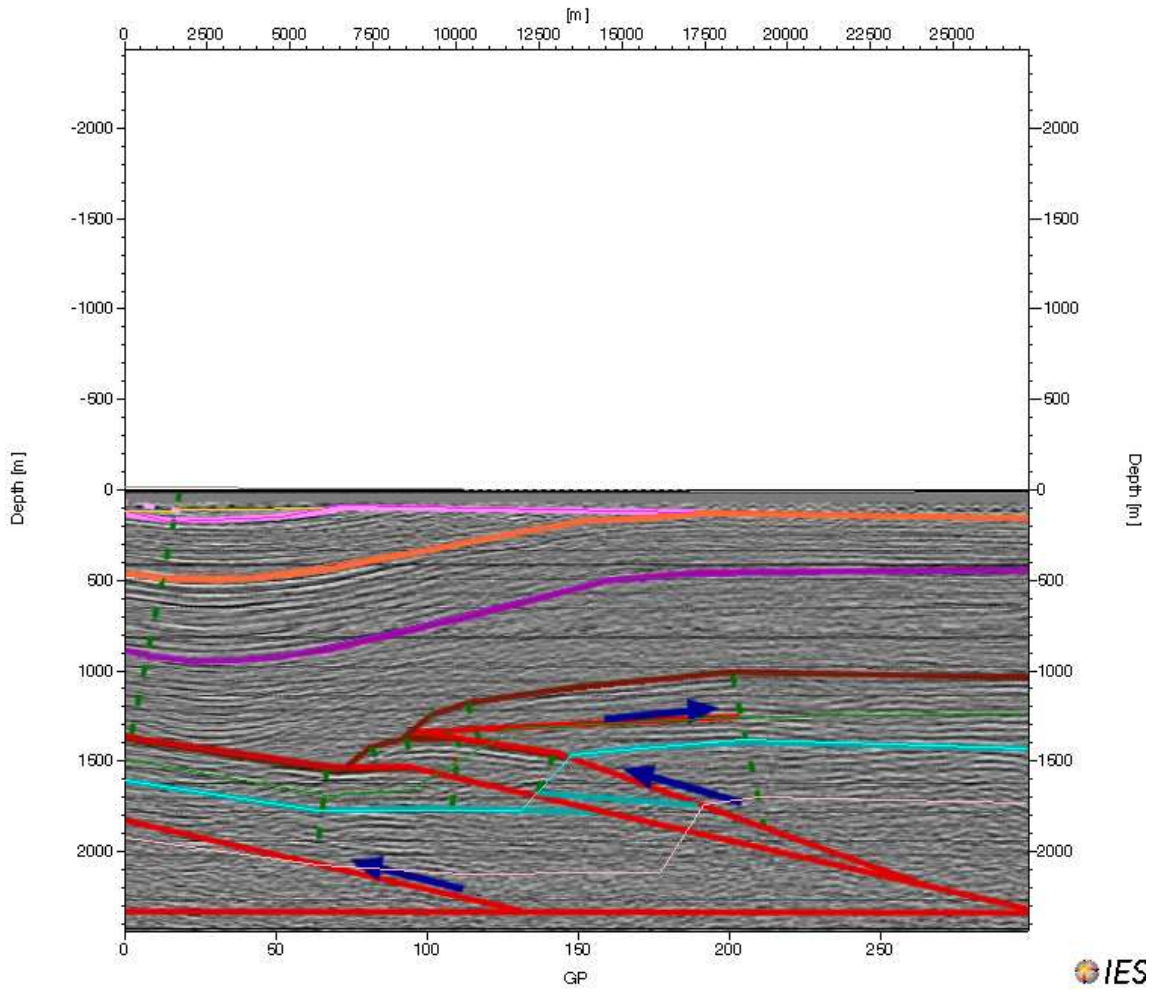
### 8.3.2 Modelado 2D Línea Sísmica SAP2-13.

La línea sísmica SAP2-13 interpretada en profundidad, se seleccionó para el modelado 2D ya que presenta las geometrías más relevantes identificadas y es una línea regional de buzamiento.

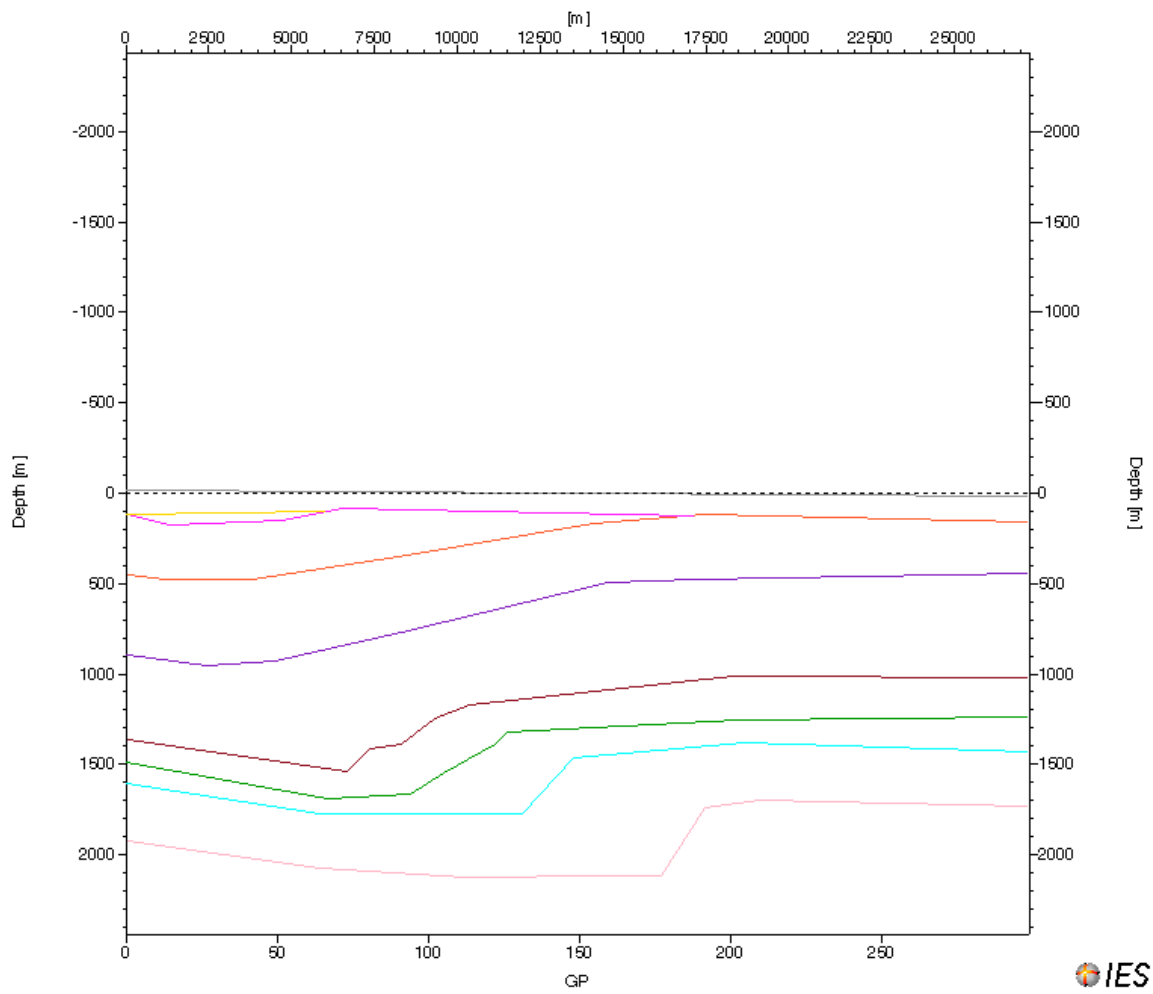
En esta se diferencian los horizontes correspondientes a la columna tipo de la Subcuenca Cesar; de base a tope las formaciones La Quinta, Grupo Cogollo, La Luna, Molino, Barco, Los Cuervos, Cuestas y Cuaternario.



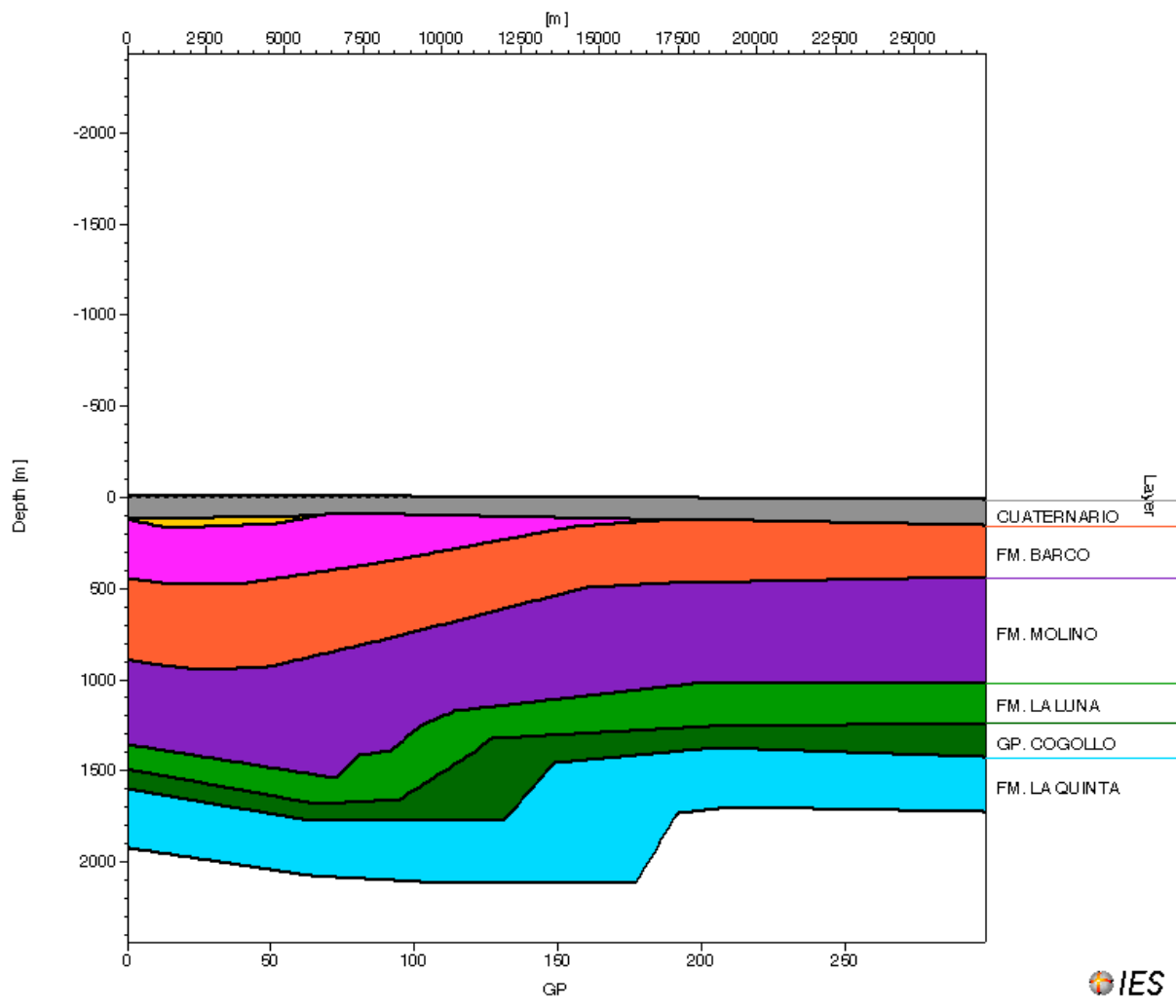
**Figura 50.** Parte de la sección SAP2-13 Interpretada en profundidad que se tomó para realizar el modelamiento geoquímico.



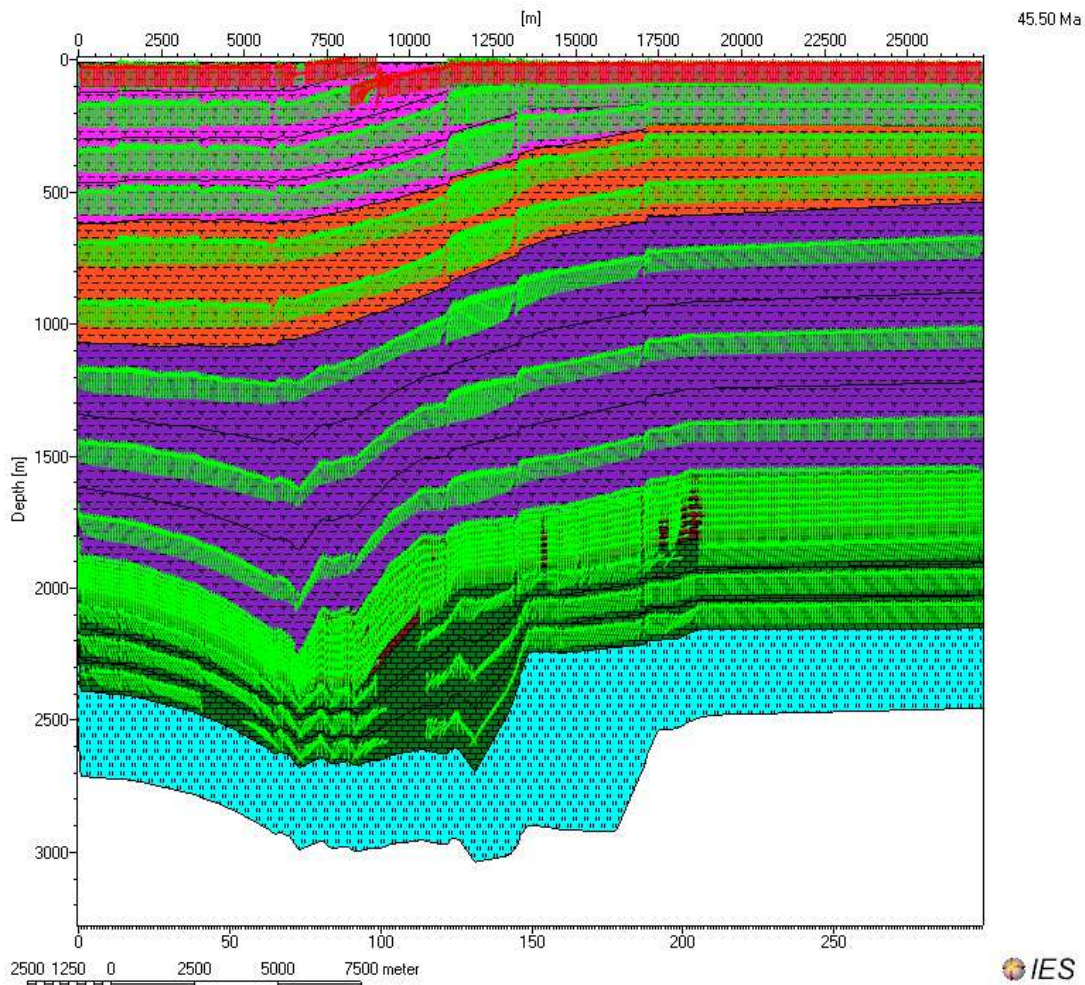
**Figura 51.** Parte de la sección SAP2-13 cargada en el software PETROMOD 10. 2D. Interpretada en profundidad y que se tomó para realizar el modelamiento geoquímico. Profundidad Máxima 3000 mts.



**Figura 52.** Parte de la sección SAP2-13 cargada en el software PETROMOD 10. 2D. Pre grilla que se trazó para realizar el modelamiento geoquímico. Profundidad Máxima 3000 mts.



**Figura 53.** Parte de la sección SAP2-13 cargada en el software PETROMOD 10.  
2D. Sección Grillada que se trazó para realizar el modelamiento geoquímico.  
Profundidad Máxima 3000 mts.

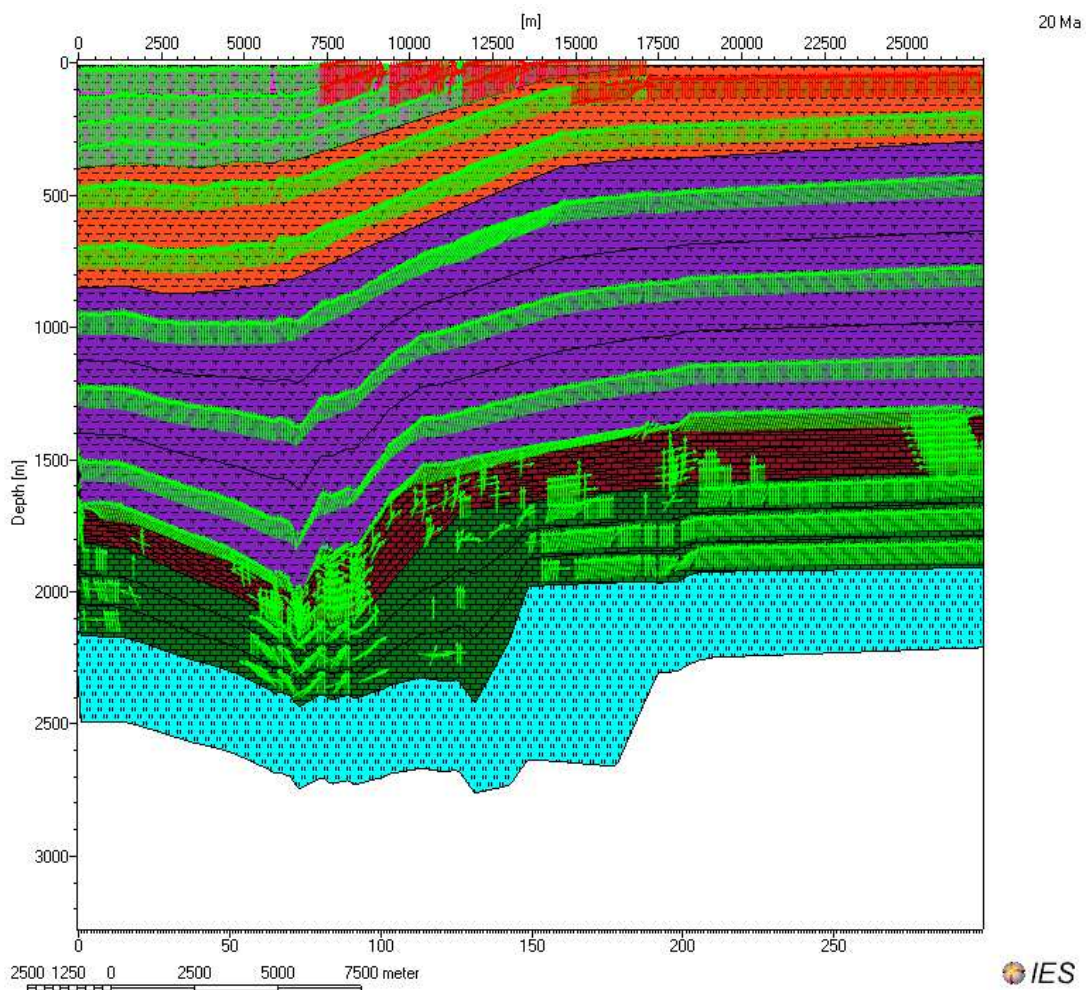


**Figura 54.** Resultado del Modelo geoquímico 2D de la línea sísmica SAP2-13. Se ilustra de la secuencia evolutiva en 45.5 Ma donde se habían depositado las formaciones La Quinta, La Luna y el Grupo Cogollo, Formaciones Molino, Barco y Cuervos. Las rutas de migración de aceite se indican con flechas verdes, las rutas de migración de gas se indican con flechas rojas.

En esta parte de la sección y en este tiempo, ocurre generación de hidrocarburo en el Grupo Cogollo, al igual que en los miembros inferiores de la formación La Luna, donde hay migración vertical y horizontal hacia las zonas laterales. En la Formación La Luna es donde se aprecia que está la mayor cantidad de



acumulaciones; estas acumulaciones migran hacia la formación Molino. El modelo muestra generación de aceite. La Formación Barco está en ventana de generación, ya que genera gas y aceite que migran verticalmente hacia la Formación Barco y Los Cuervos. El modelo indica que el gas se ha escapado hacia la superficie. La generación es posterior a la formación de las estructuras pero no muestra acumulaciones por que no hay sello.



**Figura 55.** Resultado del Modelo geoquímico 2D de la línea sísmica SAP2-13. Se ilustra de la secuencia evolutiva en 20 Ma donde se habían depositado las formaciones La Quinta, La Luna y el Grupo Cogollo, Formaciones Molino, Barco,

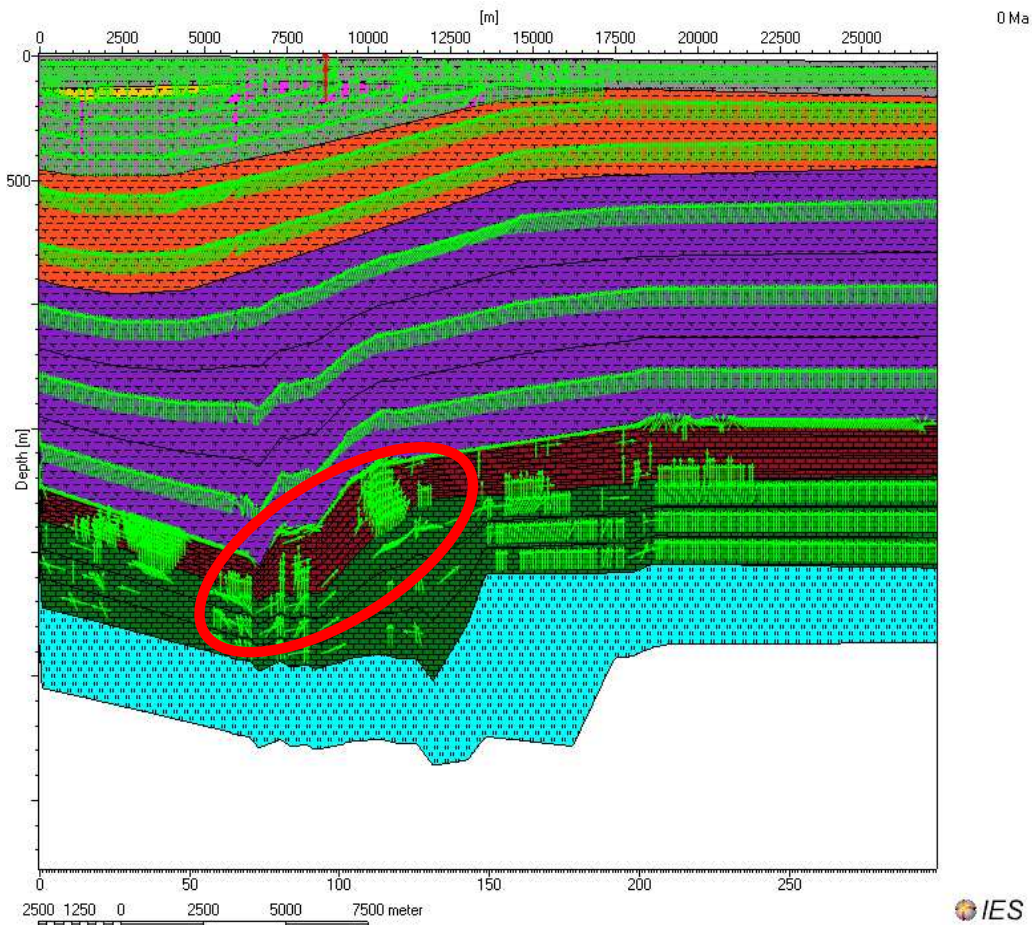


Cuervos y Cuestas. Las rutas de migración de aceite se indican con flechas verdes, las rutas de migración de gas se indican con flechas rojas.

En esta parte de la sección y en este tiempo, ocurre generación de hidrocarburo en el Grupo Cogollo, al igual que en los miembros inferiores de la Formación La Luna, donde hay migración vertical y horizontal hacia las partes laterales.

El modelo no muestra acumulaciones por la carencia de sello; las cantidades generadas migran lateralmente y verticalmente hacia la Formación Molino y demás formaciones sobreyacentes.

La formación Barco en este tiempo de 20 Ma tiene generación de hidrocarburo y expulsión de este, donde el gas generado principalmente se acumula en la Formación Los Cuervos. La estructura sinclinal interpretada que afecta a estas formaciones se generó previamente, en el Terciario Superior, donde el fallamiento posiblemente facilitaría las acumulaciones de gas.



**Figura 57.** Modelo geoquímico 2D de la línea sísmica SAP2-13. Las rutas de migración de aceite se indican con flechas verdes, las rutas de migración de gas se indican con flechas rojas. El círculo rojo encierra la parte anticlinal de la Formación la Luna donde muy posiblemente se acumuló el hidrocarburo líquido.

Este es el resultado para el tiempo actual del modelo realizado a la parte central de la sección SAP2-13, zona donde ocurre el plegamiento del Grupo Cogollo y las Formaciones La Luna, Molino, Barco, Cuervos. Permite reconocer que el Grupo Cogollo y La Formación La Luna se encuentran generando aceite que tuvo migración vertical y lateral hacia los costados de la sección. No se aprecian acumulaciones mayores ya que en las secciones interpretadas se ha desarrollado



completamente el estilo estructural propuesto de plegamiento asociado a fallas de cabalgamiento. La versión utilizada del software no reconoce las fallas inversas, no las considera como trampa estructural, al igual que las estructuras de pliegues como reservorios estructurales. No hay acumulaciones por que no hay presencia de sello.

## **RESUMEN MODELADO GEOQUÍMICO**

El diagrama de soterramiento muestra que al iniciarse la depositación de la Formación La Luna, aproximadamente a 92 Ma, se observa una subsidencia de la cuenca que posteriormente es acompañada de un evento erosivo aproximadamente desde 85 Ma a 83 Ma que afecta a la formación La Luna, generando un levantamiento de las unidades en ese entonces depositadas. A medida que se depositan las Formaciones La Luna Molino y Barco, la cuenca continúa profundizándose. Otro evento Erosivo se observa desde 58 MA a 51 Ma aproximadamente afectando a la Formación Barco. La cuenca alcanza su máxima profundidad en el Cenozoico entre 20 a 25 Ma, pero esta profundización fue acompañada con el evento erosivo del Eoceno – Oligoceno, el cual somerizó las formaciones aproximadamente en 1000 mts. Finalmente la Erosión del Plioceno que afectó a la formación Cuestas desde 5 a 1.8 Ma de años aproximadamente, generó una somerización de la cuenca hasta las profundidades actuales.

El modelo geoquímico 1D del pozo X1 fue calibrado con los datos de Ro y BHT. Los resultados indican que las secuencias Cretácicas y Terciarias se encuentran en ventana de generación de hidrocarburos.

La generación de hidrocarburos iniciado hace 45.5 Ma, es posterior a la formación de las estructuras de plegamiento por fallamiento inverso, pero el modelo no muestra acumulaciones.



La formación Barco hace 45.5 Ma tiene generación de hidrocarburo y expulsión de este, donde el gas generado principalmente se acumula en la Formación Cuervos. La estructura sinclinal interpretada que afecta a estas formaciones se generó previamente, en el Terciario Superior, donde el fallamiento posiblemente facilitaría las acumulaciones.

El modelo no muestra acumulaciones mayores ya que en las secciones interpretadas se ha desarrollado completamente el estilo estructural propuesto de plegamiento asociado a fallas de cabalgamiento. La versión utilizada del software no reconoce las fallas inversas, no las considera como trampa estructural, al igual que las estructuras de pliegues como reservorios estructurales.



## 9. CONCLUSIONES

La Formación La Luna en el área de estudio de la cuenca Cesar, se encuentra afectada tectónicamente por el régimen compresivo, en donde se postula que la estructura actual, el Anticlinal HT-1 fue formado por flexión del plano de falla inversa de bajo ángulo (tipo *Fault Bend Fault* según la terminología de Shaw, J., y otros, 2005).

Las estructuras interpretadas y propuestas en este estudio son:

Plegamiento anticlinal tipo Pliegue por flexión de falla imbricado con rompimiento hacia delante, que involucra a las Formaciones La Luna, La Quinta y Grupo Cogollo. A esta estructura se le ha llamado Anticlinal HT-1.

Plegamiento sinclinal que deforma Las formaciones Molino, Barco y Los Cuervos. Este sinclinal es formado por plegamiento por propagación de falla. Esta estructura se le ha llamado Sinclinal HT-1.

En los mapas estructurales del tope de la Formación La Luna y en todas las secciones sísmicas interpretadas se aprecian cabalgamientos con vergencia Noroeste que generan las elevaciones de la formación La Luna en el área de estudio. Los altos estructurales del centro del área de estudio, pueden constituir un objetivo con interés exploratorio, ya que son anticlinales de cabalgamiento fallados.

El modelo geoquímico 1D del pozo X1 fue calibrado con los datos de Ro y BHT. Los resultados indican que las secuencias Cretácicas y Terciarias se encuentran en ventana de generación de hidrocarburos.



El modelo geoquímico 2D de la sección SAP2-13, indica que las secuencias Cretácicas y Terciarias entraron a la ventana de generación de hidrocarburos desde hace 45.5 Ma. El modelo no muestra acumulaciones debido a que no hay trampas estructurales ni sellos eficientes. Sin embargo en otras áreas donde haya trampas estructurales y sellos es posible encontrar acumulaciones de hidrocarburos.



## 10. REFERENCIAS CITADAS

Brigaud, F., Chapman, D., Le Douaran, S. 1990. *Estimating Thermal Conductivity in Sedimentary Basins Using Lithologic Data and Geophysical Well Logs*. Boletín de American Association of Petroleum Geologists AAPG, v. 74, pp. 1459 – 1477.

Chajín, P., Martínez, A. 2007. Interpretación sísmica, estructural y modelamiento geoquímico de dos líneas sísmicas en la subcuenca Cesar (Cuenca Cesar-Ranchería). Tesis de Grado.

De Porta, J., Julivert, M., Etayo, F., y otros. 1974. Léxico Estratigráfico de Colombia. Décima Parte, v. 5, Fascículo 4b. pp. 68 – 522.

García-González, M., Mier, R., y otros. 2008. Informe Prospectividad de la Cuenca Cesar-Ranchería. Informe interno Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones.

Gerencia de Estudios Regionales ECOPETROL, 1998. Potencial Petrolífero de la Cuenca Cesar – Ranchería. Informe Interno.

Grupo de Investigación en Geología de Hidrocarburos y Carbones. 2007. Inventario, Interpretación y Evaluación Integral de la Información Geológica, Geofísica y Geoquímica adquirida por la ANH en la Cuenca Cesar – Ranchería y el Área Especial Cesar-Ranchería. Contrato Interadministrativo 027 de 2007.

Julivert, M., Barrero, D., Duque-Caro, H., y otros. 1968. Léxico Estratigráfico de Colombia. Primera Parte, v. 5, Fascículo 4a. pp. 117-496.



Kellogg, J. N., Bonini, W. E. 1982. Subduction of the Caribbean Plate and Basement Uplifts in the overriding South American Plate. Department of Geological Sciences, Princeton University, Princeton, New Jersey 08540. *Tectonics*, v. 1. No 3. pp. 251-272.

McKenzie, D. P., Jarvis, G. T. 1980. *Sedimentary basin formation with finite extension rates: Earth and Planetary Science Letters*, v. 48, pp. 42–52.

Shaw, J., Connors, C., Suppe, J. 2005. *Seismic Interpretation of Contractional Fault-Related Folds. Publicación Especial de American Association of Petroleum Geologists AAPG. AAPG Seismic Atlas, Studies in Geology N° 53.*

Suppe, J., 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. *Publicación de American Journal of Science*, v. 283, pp. 684-721.

Suppe, J., Medwedeff, D.A., 1990. *Geometry and kinematics of fault-propagation folding.* Artículo de la revista *Eclogae geologicae Helveticae*, v. 83, pp. 409-454.

Tissot, B. P., 1984. *Recent Advances in Petroleum Geochemistry Applied to hydrocarbon Exploration.* Boletín de American Association of Petroleum Geologists AAPG, v. 70, N° 5, pp. 545 – 563.

Tissot B. P., and D. H. Welte, 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*, Segunda Edición: Nueva York, Editorial Springer Verlag, 699 p.

Tissot, B. P., Pelet, R., 1987. *Thermal History of Sedimentary Basins and Kinetics of Oil and Gas Generation.* Boletín de American Association of Petroleum Geologists AAPG, v. 71, N° 12, pp. 1445 – 1466.



Van Hinte, J.E., 1978. *Geohistory Analysis – Application of Micropaleontology in exploration Geology*. Boletín de *American Association of Petroleum Geologists AAPG*, v. 62, Nº 2, pp. 201 – 222.

Vargas, C., Pardo, A., Barrero, D., y otros. 2007. *Colombian Sedimentary Basins; Nomenclatures, Boundaries, and Petroleum Geology, a New Proposal*. Publicación Especial Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH. 92 p.

Welte, D. H., 1981. *Petroleum Origin and Accumulation in Basin Evolution - A Quantitative Model*. Boletín de *American Association of Petroleum Geologists AAPG*, v. 65, Nº 8, pp. 1387 – 1396.