



**INTERACCIÓN MECÁNICA Y TECTÓNICA ACTIVA ENTRE LAS FALLAS DE  
CUSIANA Y YOPAL INTERPRETANDO SÍSMICA Y GEOMETRÍA DE  
TERRAZAS**



Universidad  
Industrial de  
Santander

**JUAN SEBASTIAN CARVAJAL TORRES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2014**



**INTERACCIÓN MECÁNICA Y TECTÓNICA ACTIVA ENTRE LAS FALLAS DE  
CUSIANA Y YOPAL INTERPRETANDO SÍSMICA Y GEOMETRÍA DE  
TERRAZAS**



Universidad  
Industrial de  
Santander

**JUAN SEBASTIÁN CARVAJAL TORRES**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Geólogo**

**Director:**

**JORGE EDUARDO PINTO VALDERRAMA**  
Geólogo candidato a PhD.  
Docente Escuela de Geología, UIS

**Co-director:**

**ANDRÉS ROBERTO MORA BOHÓRQUEZ**  
Geólogo PhD.

**Co-director:**

**DIEGO COSTANTINO**  
Geofísico PhD.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA  
2014**



INTERACCIÓN MECÁNICA Y TECTÓNICA ACTIVA ENTRE LAS FALLAS DE CUSIANA Y YOPAL  
INTERPRETANDO SÍSMICA Y GEOMETRÍA DE TERRAZAS-



Universidad  
Industrial de  
Santander

## DEDICATORIA

*A Dios, mis padres Oswaldo Carvajal y Luz H. Torres,  
mis hermanos José Camilo y Julián Felipe, mi abuela  
Dora Pérez y María Alejandra Hernández Laguado.*

*A mis Co-directores, Diego Costantino por su constante apoyo y tiempo de enseñanza a lo largo de este proyecto, Andrés Mora por la oportunidad de trabajar en este proyecto y pertenecer a un tan excelente equipo de trabajo, mi director Jorge Pinto por su gran apoyo y colaboración a lo largo de este proceso. Mónica Zegarra por su confianza y apoyo durante mi formación como geólogo, al grupo de trabajo de UTUP consultorías por su gran colaboración y enseñanzas.*

*A mis padres, hermanos y familia por su incondicional apoyo, y todos esos pequeños detalles que han aportado hasta el día de hoy en mi vida. A María Alejandra Hernández Laguado por su inmenso apoyo, consejos y comprensión durante este proceso.*

*Finalmente a mis amig@s Juan Ordoñez, Fernando Gómez, Oscar Carreño, Diego Uribe, Ludwing Arenas, Cesar Salazar, Luis Serrano, Leidi Castro, Laura Serrano, Giovanni Florián y todos los demás, es grato contar con ustedes.*

## CONTENIDO

Pág.	
	INTRODUCCIÓN..... 18
2.	OBJETIVOS..... 20
3.1.	Objetivo General..... 20
3.2.	Objetivos específicos ..... 20
3.	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO ..... 22
4.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA ..... 22
4.2.	JUSTIFICACIÓN..... 22
4.	MARCO CONCEPTUAL ..... 25
5.1.	Localización: ..... 25
5.2.	Marco geológico regional: ..... 26
5.3.	Geología Estructural: ..... 31
5.4.	Evolución Geológica:..... 34
5.5.	Estratigrafía: ..... 42
5.	MARCO TEÓRICO ..... 50
6.1.	Método Sísmico: ..... 50
6.2.	Principios Básicos: ..... 50
6.3.	Interpretación Sísmica: ..... 52
6.4.	Balanceo Estructural: ..... 54
6.5.	Zonas de transferencia: ..... 58
6.6.	Terrazas Aluviales: ..... 59
6.	METODOLOGÍA ..... 61
7.1.	Recopilación, selección y organización de información. .... 61
7.2.	Reconocimiento del Sistema Coordinado de los datos recolectados. .... 63
7.3.	Carga de las líneas sísmicas 2D: ..... 64
7.4.	Calibración de las líneas sísmicas. .... 65



7.5.	Amarre de los datos de pozo y cálculo de velocidades de intervalo.....	66
7.6.	Conversión tiempo–profundidad.....	69
7.7.	Interpretación sísmica. ....	73
7.8.	Balanceo estructural de la interpretación. ....	78
7.9.	Generación del Modelo 3D.....	82
7.10.	Restitución Cinemática 3D.....	83
7.	Análisis de resultados .....	85
7.1.	. Relación geométrica y tectónica entre fallas Yopal–Cusiana con la creación de terrazas aluviales. ....	85
7.2.	. Interacción tectónica entre las fallas Yopal y Cusiana en la depositación de las terrazas aluviales. ....	87
7.3.	. Modelos Cinemáticos de la evolución en el Pleistoceno tardío de las fallas Yopal y Cusiana en el área de estudio. ....	88
8.	CONCLUSIONES.....	95
	BIBLIOGRAFÍA .....	97

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Secciones estructurales mostrando la variación en el estilo estructural a lo largo del Piedemonte Llanero Colombiano, sección A-A' señalizada en color rojo sobre el mapa y sección M-M' señalizada en color azul. ....	24
<b>Figura 2:</b> Localización Zona de estudio. ....	25
<b>Figura 3.</b> A) Modelo de simulación de caja de arena mostrando el impacto de la erosión y depositación sintectónica comparado con el modelo B) Caso real de los Alpes. ....	27
<b>Figura 4.</b> Distribución de esfuerzos a lo largo de la parte Norte de los Andes. ....	28
<b>Figura 5.</b> Secciones estructurales del piedemonte, A-A' (color amarillo) al sur y M-M' (color rojo), al norte, mostrando la variación en el estilo estructural, pasando de estructuras con prioritariamente con basamento implicado, a estructuras con apilamientos antiformes y estructuras dúplex. ....	29
<b>Figura 6.</b> Evolución 3D esquemática de fallas normales, con gráficas que muestran y comparan el deslizamiento de los segmentos B y Z. (A) es la fase de iniciación de las fallas, con pequeños segmentos, (B) la fase de interacción de los segmentos para formar fallas de mayor extensión y (C) fase final donde los segmentos ya han interactuado y alcanzaron mayores desplazamientos, los segmentos Y y Z no interactuaron, por eso su poco desplazamiento. ....	30
<b>Figura 7.</b> Sección estructural J-J', que muestra la relación espacial entre las fallas y las estructuras. ....	32
<b>Figura 8.</b> Mapa geológico de la Cordillera Oriental, en donde se puede observar la variación Sur-Norte de las estructuras. ....	33
<b>Figura 9.</b> Mapa de clasificación de las principales fallas del Piedemonte Llanero Colombiano. ....	35



**Figura 10.** Modelo evolutivo sobre la evolución geológica y tectónica del Valle Medio del Magdalena, la cuenca de los Llanos Orientales Colombianos y la Cordillera Oriental Colombiana.. ..... 37

**Figura 11.** Muestras de AFT (Apatite Fission Track), usando el software Hefty.. ..... 39

**Figura 12.** Evolución geológica del piedemonte llanero colombiano. .... 41

**Figura 13.** Carta estratigráfica regional, señalando los patrones de llenado de la cuenca desde el Valle del Magdalena Medio hasta los Llanos Orientales Colombianos, como muestra la figura..... 42

**Figura 14** Interpretación de un fragmento de una línea sísmica basado en las definiciones de Sheriff, (2002) en Herron, (2011), en dónde la zona de cizalla se debe a la Falla de Cusiana (color azul), y de esta manera desplaza a la formación León (color ocre), y cerca de la falla los reflectores del bloque colgante se encuentran ligeramente plegados..... 53

**Figura 15** Consistencia de la longitud de las capas..... 55

**Figura 16.** Inconsistencias en secciones estructurales columna derecha(sufijo –e), correcciones en la columna izquierda (sufijo –c), (a) el bloque colgante está sobre el nivel regional, (b) estratos truncados en los correspondientes bloques colgante y yacente, además el número de despegues en el bloque coglante es mayor que en el bloque yacente, (c) la falla inversa corta la sección hacía abajo (estratigráficamente), (d) las capas tienen un incremento en el desplazamiento relativo con las capas adyacentes. ... 57

**Figura 17.** Cambios en el desplazamiento en las estructuras a medida que son relevadas. .... 58

**Figura 18.** Evolución y depositación en tres dimensiones de terrazas aluviales, (A) incisión del río, creando erosión y depositación, (B) aparición de la superficie de inundación, (C) formación del primer par de terrazas aluviales por erosión de la superficie de erosión y (D) aparición de la nueva superficie de inundación..... 60

**Figura 19.** Selección del modelo digital de terreno (DEM, Digital Elevation Model), del área de estudio en el software “Global Mapper”..... 62

**Figura 20.** Proyecto en la plataforma Global Mapper, verificando que todos los datos usen el mismo sistema de coordenadas, en este caso “*Magna Colombia Bogotá*”..... 63

**Figura 21.** Líneas sísmicas importadas en el software Move con su respectiva proyección sobre un mapa del servidor “Google”, donde se aprecia que estas se encuentran correctamente referenciadas..... 65

**Figura 22.** Líneas sísmicas cargadas en el software Move 2013 de Midland Valley, donde se observa en color rojo las líneas punteadas que representan la topografía de cada línea, todas al mismo nivel. .... 66

**Figura 23.** Línea sísmica Cu-92-02 con el amarre de un pozo en la ventana de la izquierda, y a la derecha la localización de la línea (de color amarillo), sobre el mapa del área..... 69

**Figura 24.** Básica y general interpretación sísmica de las líneas en tiempo..... 71

**Figura 25.** Selección de los parámetros para la conversión tiempo profundidad, donde:  $v$  es Velocidad de reemplazamiento y  $k$  es la constante de aumento de la velocidad..... 72

**Figura 26.** Proyecto convertido a tiempo, usando los polígonos creados previamente y la base de datos, donde se puede ver el modelo digital de terrenos y en blanco aparecen los pozos con los que se calibró y corroboró dicha conversión..... 73

**Figura 27.** Líneas sísmicas usadas en el proyecto, de color verde las líneas resultantes y que serán interpretadas con mayor detalle, de color rojo se encuentran las líneas que no lo serán..... 75

**Figura 28.** Modelado final de las fallas Cusiana (color Azul), Yopal (color Rojo) y Guaicaramo (trazo de color fucsia), basados en las líneas sísmicas seleccionadas, los datos de pozo (líneas blancas), y la información cartográfica..... 77

**Figura 29.** Modelo completo, con fallas principales (Falla de Cusiana de color azul, falla de Yopal de **color** rojo y falla de Guaicaramo de color fucsia), además de los principales horizontes (Basamento de color morado, Cretácico Superior a Eoceno medio de color amarillo, Carbonera de color ocre, León de color rosa claro y cuaternario de color gris), las fallas de menor escala se encuentran de color blanco. .... 78

**Figura 30.** Sección CU-92-02 completamente interpretada y balanceada, A) resalta el paralelismo entre el “flat” de la falla de Yopal y las capas suprayacentes mediante los dominios de buzamientos dentro de las bisectrices (líneas rojas), B) expone el paralelismo de las capas en general mediante los dominios de buzamientos dentro de las bisectrices (líneas rojas), y C) muestra la sección completamente restaurada, comprobando que los saltos de las fallas son iguales para todas las unidades afectadas y que estas unidades conservan un mismo espesor a lo largo de la sección. Falla de Cusiana de color azul, falla de Yopal de color rojo y falla de Guaicaramo de color fucsia, Basamento de color morado, Cretácico Superior a Eoceno medio de color amarillo, Carbonera de color ocre, León de color rosa claro y terrazas cuaternarias de color gris, las fallas de menor escala se encuentran de color blanco. .... 80

**Figura 31.** Continuación figura 30..... 81

**Figura 32.** Modelo 3D final desde diferentes perspectivas (A) y (B) con el respectivo DTM, las líneas blancas en el modelo representan los pozos que se usaron para es te estudio. .... 82

**Figura 33.** Parámetros básicos y generales para la realización de la restitución cinemática en tres dimensiones usando el software Move versión 2013..... 83

**Figura 34.** Restitución cinemática del modelo 3D, (A) modelo 3D sin restitución, resaltando el ángulo de inclinación de las terrazas, (B) modelo 3D restituido hasta alcanzar un ángulo de inclinación alrededor de 0°, como muestra la línea amarilla, convenciones ver figura 31. .... 84

**Figura 35.** Análisis geométrico de las fallas Cusiana y Yopal mediante los bisectores de las superficies 3D, (A) muestra el punto de cambio de ángulo de la falla de Cusiana y el área de dominio de buzamientos (color azul) a partir de este bisector, (B) expone el punto



de cambio de ángulo de la falla de Yopal y el área de dominio de buzamientos (color azul)  
desde este punto..... 86

**Figura 36.**Restitución cinemática del modelo 3D asumiendo las fallas de Cusiana y Yopal  
con movimientos simultáneos visto desde diferentes ángulos, donde se observa un  
aplanamiento de las terrazas con respecto a un plano de referencia..... 90

**Figura 37.**Restitución cinemática del modelo 3D con movimiento únicamente en la falla de  
Yopal visto desde diferentes ángulos, donde se observa un aplanamiento de las terrazas  
con respecto a un plano de referencia. .... 92

**Figura 38.**Restitución cinemática del modelo 3D con movimiento inicial de la falla Yopal  
con posterior movimiento de la falla de Cusiana visto desde diferentes ángulos, donde se  
observa un aplanamiento de las terrazas con respecto a un plano de referencia. .... 94

## LISTA DE TABLAS

**Tabla 1.** Velocidades de Intervalo calculadas.

**Tabla 2.** Análisis de relevancia de las líneas, de color rojizo se encuentran las líneas que fueron descartadas y en la columna de la derecha se encuentran las razones (ver figura 27), y de color verde se encuentran las líneas que serán tomadas para la interpretación.



## LISTA DE ANEXOS

**NOTA:** Ver anexos en carpeta adjunta en CD.

**Anexo A.** Sección Cu-92-02.

**Anexo B.** Sección Cu-92-03.

**Anexo C.** Sección Cu-92-04.

**Anexo D.** Sección Cu-92-09.

**Anexo E.** Sección Cu-92-11.

**Anexo F.** Sección Cu-92-12.

**Anexo G.** Sección Cu-92-14.

**Anexo H.** Sección Cu-92-15.

**Anexo I.** Sección Cu-92-16.

**Anexo J.** Sección Cu-92-17.

**Anexo K.** Sección Cu-92-18.



## RESUMEN

**TÍTULO: INTERACCIÓN MECÁNICA Y TECTÓNICA ACTIVA ENTRE LAS FALLAS DE CUSIANA Y YOPAL INTERPRETANDO SÍSMICA Y GEOMETRÍA DE TERRAZAS**

**AUTOR:**

**JUAN S. CARVAJAL TORRES**

### **PALABRAS CLAVE**

Tectónica activa – Terrazas Aluviales Deformadas – Interpretación Sísmica – Interacción Tectónica – Geometría de fallas

### **DESCRIPCIÓN:**

A lo largo del Piedemonte Llanero Colombiano yacen diferentes formaciones rocosas afectadas por los movimientos tectónicos en el área, expresando en superficie cambios geomorfológicos que se asocian a las estructuras del subsuelo (anticlinales y sinclinales), algunas creadas durante los más recientes movimientos tectónicos en el último periodo del tiempo geológico. Esto es evidente al observar el mapa geológico del complejo que se extiende desde la Cordillera Oriental hasta la Cuenca de los Llanos Orientales Colombianos, ya que se observan depósitos Cuaternarios fallados y plegados. Este es el caso de las Terrazas Aluviales en el área de estudio, las cuales se encuentran deformadas debido a la reciente actividad tectónica en la zona, para comprobar esta teoría este estudio intenta generar un modelo cinemático en tres dimensiones con base a la interpretación sísmica y la construcción de secciones estructurales balanceadas y seriadas que permita analizar la geometría de las fallas presentes en el área (Cusiana y Yopal), con la geometría de las terrazas aluviales depositadas durante el Pleistoceno Tardío (ICP, (2009)), y así construir un modelo cinemático que explique la interacción tectónica activa entre las fallas de Cusiana y de Yopal en el área de estudio y su relación con la deformación de los Depósitos Aluviales del Pleistoceno Tardío.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Jorge Eduardo Pinto Valderrama.  
Co-directores: Andrés Roberto Mora Bohórquez y Diego Costantino.



## ABSTRACT

**TÍTULO: ACTIVE TECTONIC AND MECHANIC INTERACTION BETWEEN CUSIANA AN YOPAL  
FAULTS INTERPRETING SEISMIC AND TERRACES GEOMETRY**

**AUTHOR:**

**JUAN S. CARVAJAL TORRES**

## KEYWORDS

Active Tectonic – Deformed Alluvial Terraces – Seismic Interpretation – Tectonic Interaction –  
Faults Geometry

## DESCRIPTION:

Along the Colombian Llanos Foothills lie different rock formations affected by tectonic movements in the area, expressing surface geomorphological changes associated with subsurface geologic structures (anticlines and synclines), some created during the most recent tectonic movements in the last period of geological time. This is evident from the geological map of the complex that extends from the Colombian Eastern Cordillera to the Colombian Llanos Orientales basin since folded and faulted Quaternary deposits are observed. This is the case of alluvial terraces in the study area, which are deformed due to the recent tectonic activity in the area, to test this theory, this study tries to generate a three dimensional kinematic model based on the seismic interpretation and building of balanced structural cross sections, which are serials, with the main objective of analyze the geometry of faults in the area (Cusiana and Yopal), with the geometry of the Alluvial Terraces deposited during the Late Pleistocene (0.2 Ma, ICP, (2009)), and thus build a kinematic model to explain the interaction of active tectonic faults Cusiana and Yopal in the study area and its relationship to the Latest Pleistocene deformation of the Late Pleistocene Alluvial Deposits.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Department of Physic-Cemistry Engineerings. School of Geology. Director: Jorge Eduardo Pinto Valderrama, PhD. Candidate. Sub-diectors: PhD. Andrés Roberto Mora Bohórquez, y PhD. Diego Costantino.

## INTRODUCCIÓN

El flanco oriental de la Cordillera Oriental Colombiana es el resultado de un orógeno de cuencas invertidas (Tesón et al. 2013). Según Mora et al. (2010), durante el Cretácico inferior las cuencas fueron controladas por fallas normales asociadas a un “*rift*”, dónde se depositaron sedimentos marinos y transicionales sobre un basamento Paleozoico, pero a partir del Paleoceno estas cuencas de “*rift*” se invirtieron dando lugar a una cuenca de antepaís.

Estructuralmente autores como Jiménez et al. (2013) y Mora et al. (2013), describen tres dominios, que exponen la transición de zonas con predominio de estructuras de piel gruesa en el Sur a áreas controladas por estructuras de piel delgada con niveles de despegue en rocas Cenozoicas en el Norte.

Este proyecto se desarrolla en el área comprendida entre los municipios de Tauramena y Monterrey, limitada por las fallas de Cusiana y Yopal (ver figuras 1 y 2), las cuales se localizan justo en la zona media de la transición estructural, interpretadas como falla normal invertida (Falla de Cusiana) y falla inversa con despegue en rocas del Cenozoico como escape frontal de la falla de Guaicaramo (Falla de Yopal), (Jiménez et al. 2013). El movimiento de estas fallas exhumió rocas de edades Cenozoicas causando la exposición y erosión de las mismas (Mora et al. 2010; Ramírez et al. 2012).

Este estudio pretende reconocer la relación cinemática entre las fallas de Yopal y Cusiana analizando la geometría de las terrazas depositadas en los últimos 0.2 Ma (ICP, 2009), que se encuentran deformadas y su depositación es asociada a la interacción mecánica y tectónica de las fallas mencionadas. Mediante la interpretación de líneas sísmicas 2D (figuras 19-27), se construyó un modelo 3D



INTERACCIÓN MECÁNICA Y TECTÓNICA ACTIVA ENTRE LAS FALLAS DE CUSIANA Y YOPAL  
INTERPRETANDO SÍSMICA Y GEOMETRÍA DE TERRAZAS-

que muestra la relación cinemática entre las fallas de Yopal y Cusiana con las terrazas aluviales asociadas, que posteriormente fue restituido cinemáticamente para reconocer la cinemática del área durante el último periodo de tiempo geológico.



Universidad  
Industrial de  
Santander

## 2. OBJETIVOS

### 3.1. Objetivo General

Proponer un modelo estructural en dónde se pueda observar la interacción mecánica y tectónica entre las fallas de Cusiana y de Yopal y su relación con la deformación de las terrazas.

### 3.2. Objetivos específicos

- Recopilar la información pertinente, incluyendo líneas sísmicas a usar, datos de pozo y superficie.
- Calibrar la información recopilada, asegurando así que se encuentren referenciadas espacialmente con el mismo sistema de coordenadas.
- Convertir a tiempo la información de pozos suministrada, usando “Chekshots”, para identificar los horizontes de la sísmica.
- Identificar los 6 horizontes y estructuras de interés en las líneas sísmicas aproximadamente.
- Interpretar los 6 horizontes y estructuras de interés de líneas sísmicas 2D localizadas sobre el área de estudio.



- Construir las secciones estructurales en base a la interpretación realizada y basada en las líneas sísmicas 2D.
- Balancear las secciones estructurales construidas.
- Construir un modelo 3D usando los horizontes y fallas de las secciones estructurales seriadas.
- Restituir cinemáticamente en 3D para observar la evolución de la deformación a lo largo del tiempo geológico, y reconocer la cinemática de las fallas Yopal y Cusiana y su relación con la deformación de las terrazas Tauramena y Monterrey.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

#### 4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La deformación a lo largo del Piedemonte Llanero Colombiano se expresa de diferentes formas, puesto que podemos encontrar fallas normales invertidas con basamento implicado, fallas normales no invertidas, cabalgamientos de piel delgada (Thin Skin) y fallas de despegue. Además de ello Jiménez et al. 2013, concluyen que todos éstos sistemas de falla se conectan entre sí y deforman los sedimentos que suprayacen éstas estructuras (estratos de crecimiento), ya que la deformación de estos sedimentos demuestra la interacción que tienen con las estructuras del subsuelo.

Las terrazas de Monterrey y Tauramena son el caso de sedimentos del Cuaternario que han sido deformados por las estructuras generadas en el evento compresivo que comenzó en el Paleógeno y se plantea aún activa. La deformación de las terrazas ha sido asociada a las fallas de Yopal o de Cusiana, así que el fin de este estudio es examinar la relación geométrica y estructural que existe entre las fallas de Yopal y Cusiana con la deformación de las terrazas aluviales.

#### 4.2. JUSTIFICACIÓN

El Piedemonte Llanero Colombiano ha sido constantemente estudiado y cada año se concluyen y refuerzan hipótesis acerca de su evolución geológica, siendo de suma importancia para el conocimiento geológico la comprensión a cabalidad de la evolución tectono-estratigráfica de las rocas y estructuras allí presentes. Incluyendo el interés económico que las empresas petroleras han demostrado y

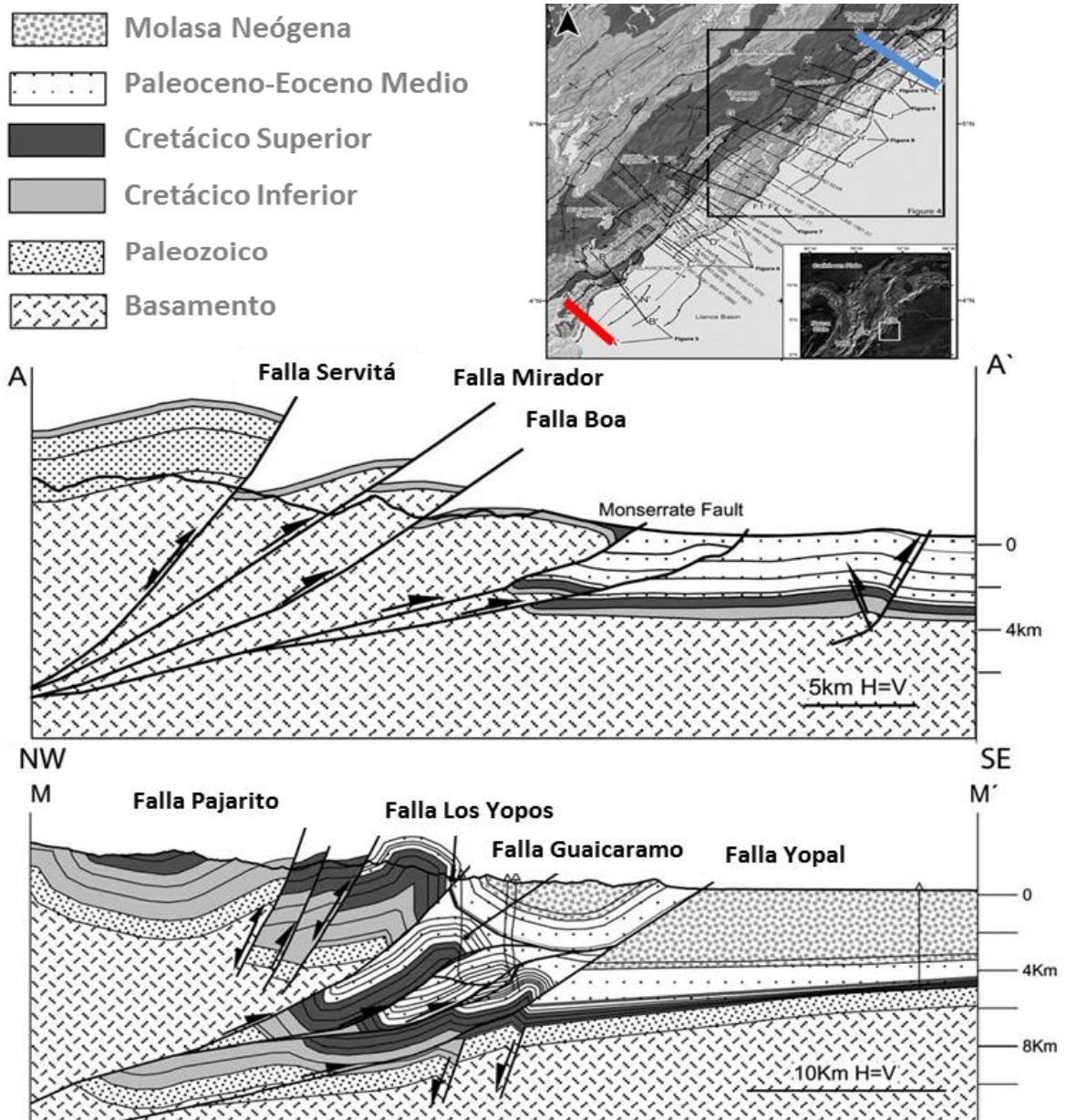


siguen demostrando actualmente aumentando las exploraciones de investigación a lo largo de los Llanos.

El estilo estructural a lo largo del Piedemonte Llanero Colombiano varía de Sur a Norte, a lo largo de los diferentes segmentos, Jiménez et al. (2013), comenzando desde la parte Sur en el segmento Ariari-Guatiquía en dónde la deformación se expresa con fallas normales invertidas que implican basamento, hasta el segmento más Noreste, Piedemonte, dónde la deformación se expresa por medio de apilamientos antiformes y estructuras dúplex” (ver sección estructural M-M’ de la figura 1), de las estructuras por medio de la mezcla de fallas normales invertidas y un sistema de cabalgamientos de piel delgada como el sistema de fallas de Yopal (falla de Yopal y falla de Cusiana), que tienen un despegue justamente sobre las unidades del Cretácico superior-Paleoceno y deforman todos los sedimentos Cenozoicos. Pero en la zona de Tauramena (dónde se exponen las terrazas de Tauramena y Monterrey), la deformación de las terrazas es asociada al sistema de fallas de Yopal, dónde éste se encuentra en zona de despegue.

En este proyecto se plantea el modelamiento 3D por medio de la interpretación sísmica, para la evaluación de la geometría de las terrazas en conjunto con su relación con las estructuras del subsuelo; además de determinar la relación que existe entre las fallas de Yopal y de Cusiana en ésta zona perteneciente al segmento de Tierranegra.

**Figura 1:** Secciones estructurales mostrando la variación en el estilo estructural a lo largo del Piedemonte Llanero Colombiano, sección A-A' señalizada en color rojo sobre el mapa y sección M-M' señalizada en color azul.



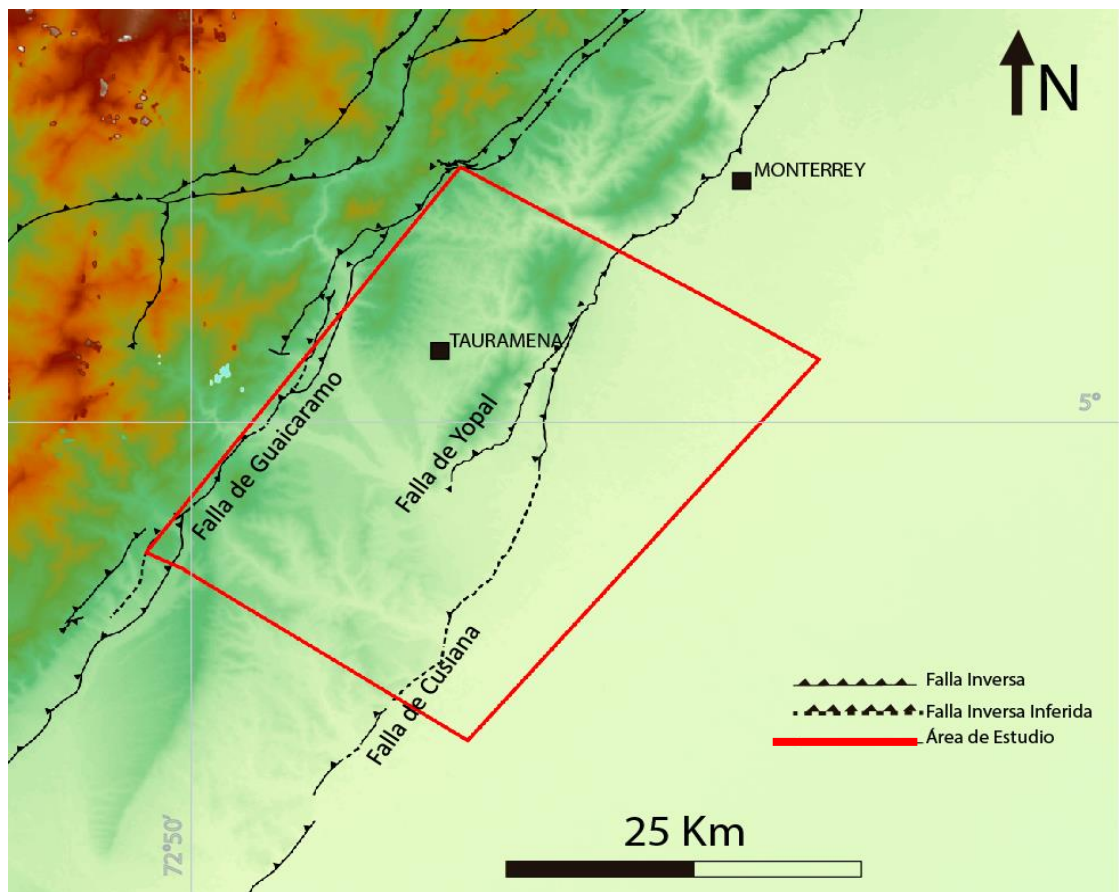
Fuente: Modificado de Jiménez et al, (2013).

## 4. MARCO CONCEPTUAL

### 5.1. Localización:

La zona de estudio se encuentra en la zona central de Colombia, sobre el flanco Este de la Cordillera Oriental, en el segmento Tierranegra del Piedemonte Llanero Colombiano, en las cercanías de los municipios Tauramena y Monterrey, tal como muestra la figura 2.

**Figura 2:** Localización Zona de estudio.

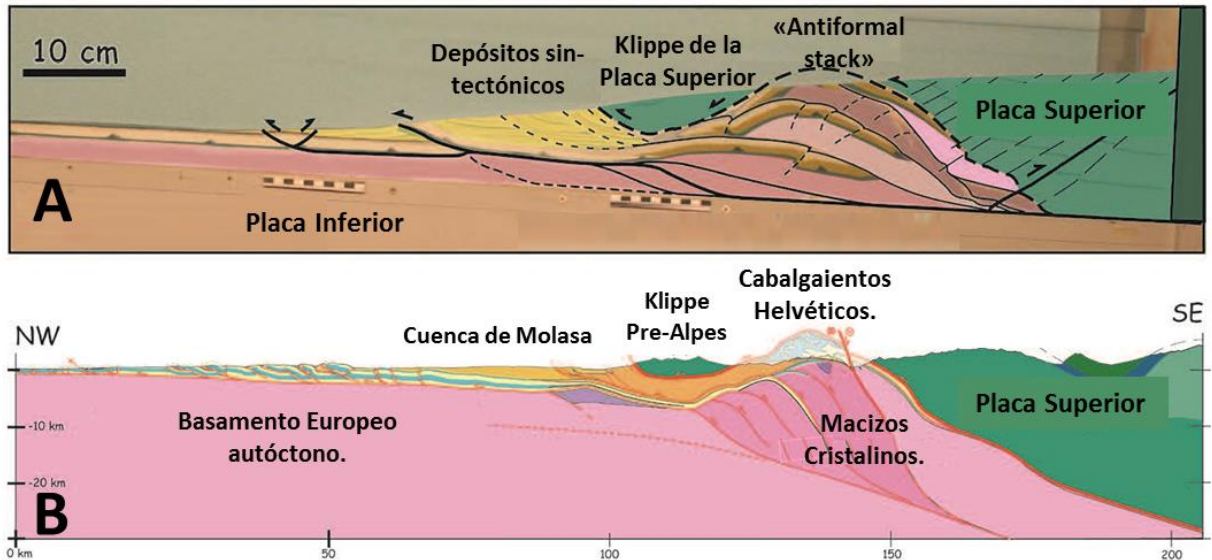


## 5.2. Marco geológico regional:

El relieve Colombiano ha sido modelado por eventos tectónicos a lo largo del tiempo geológico, y estos a su vez están directamente relacionados con la evolución de los Andes Colombianos, incluyendo su margen occidente, actualmente activo, Cooper et al. (1995). Los Andes colombianos se distribuyen en las tres cordilleras que se conocen como Occidental, Central y Oriental. El levantamiento de las mismas no sólo generó los relieves de hoy día, también han sido afectados por diferentes condiciones meteóricas que causaron la erosión de parte de los mismos, depositando grandes cantidades de sedimentos en las diferentes cuencas que existen hoy en día, como la cuenca del Valle del Magdalena (inferior, medio y superior), la cuenca Yarí Caguan y la cuenca de los Llanos Orientales (Mora et al. (2006); Hermeston y Nemcok. (2013); Cooper et al. (1995)).

Bonnet et al. (2007) y Malavieille et al. (2010) muestran la interacción e impacto que causa la erosión y sedimentación en el crecimiento y exhumación de un orógeno en modelos análogos y reales, donde en ambientes compresivos, la exhumación y exposición de un apilamiento antiformal causa su erosión y posterior depositación de estos sedimentos en la cuenca de “foreland” que se forma junto a este, tal como muestra la siguiente figura:

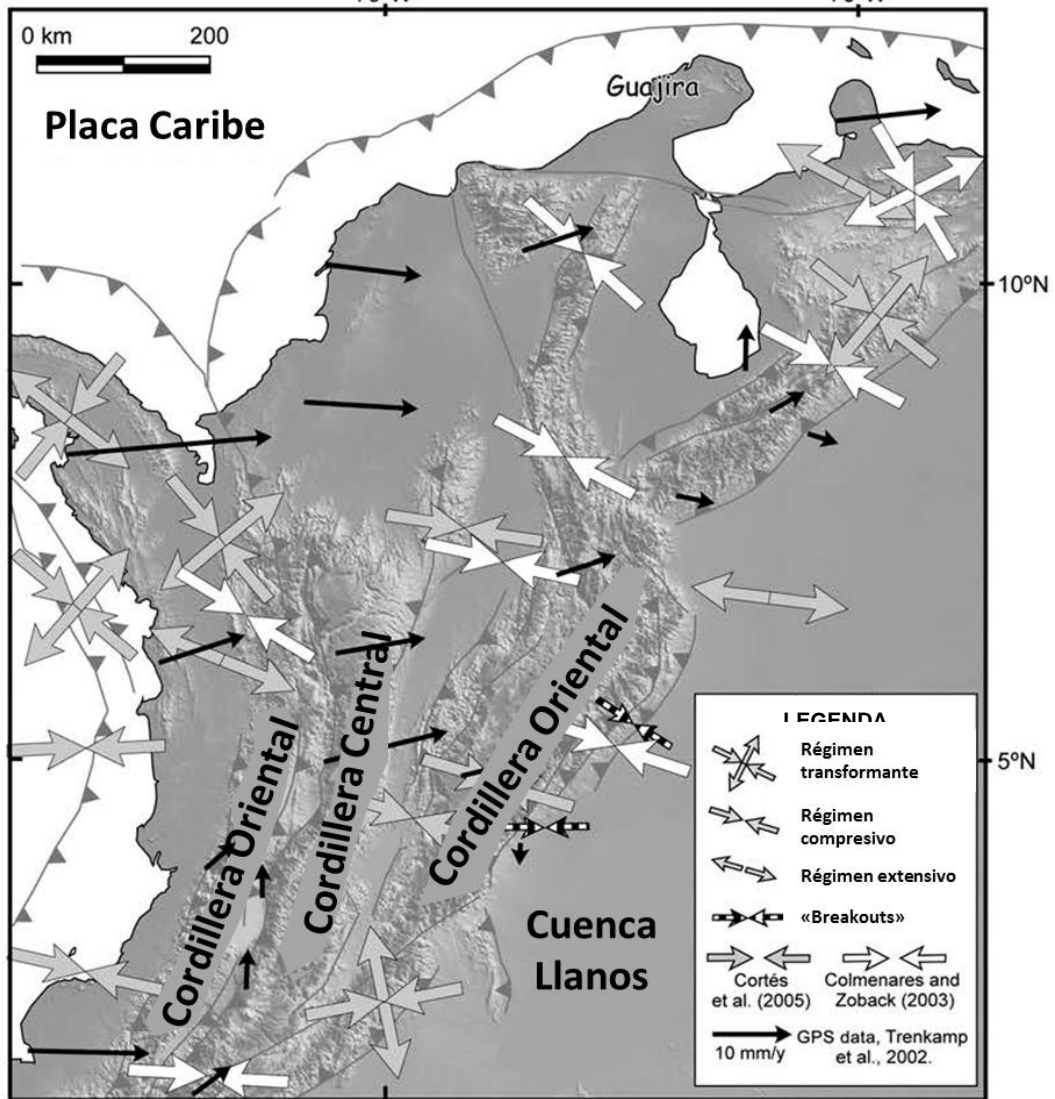
**Figura 3.** A) Modelo de simulación de caja de arena mostrando el impacto de la erosión y depositación sintectónica comparado con el modelo B) Caso real de los Alpes.



Fuente: Modificado de Malavieille et al, (2010).

Un claro ejemplo de cuenca de foreland es la cuenca de los Llanos Orientales Colombianos, la cual ha sido moldeada por varios procesos geológicos, y su historia geológica es compleja. Martínez, (2006); Tesón et al. (2013); y Jiménez et al. (2013) y Mora et al. (2013), muestran que desde el Eoceno tardío lo que hoy conforma la cordillera Oriental y el Piedemonte Llanero Colombiano ha sufrido esfuerzos compresivos, convirtiendo a lo que era una cuenca extensiva de "Rifting", en una cuenca de Foreland, causando erosión de una parte de las unidades depositadas durante el Cretácico Superior, y la depositación de rocas de edades Cenozoicas. Debido a la continua y actual interacción tectónica de las placas Nazca, Caribe y Suramericana aún hay deformación a lo largo de varias áreas del terreno Colombiano, como el Piedemonte Llanero, la figura 4 muestra la distribución de esfuerzos en la parte más norte de los Andes, estos son revelados

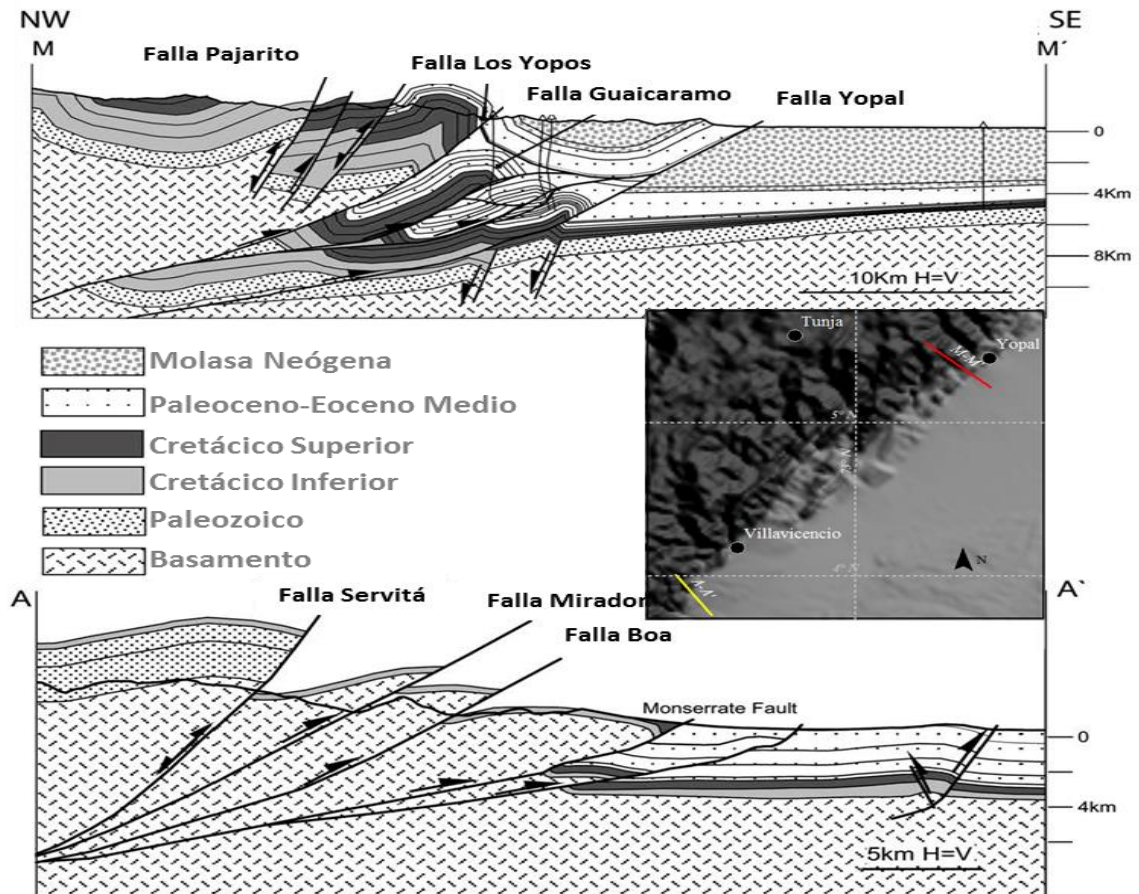
Figura 4. Distribución de esfuerzos a lo largo de la parte Norte de los Andes.



Fuente: Modificado de Tesón et al, (2013).

Mora et al. (2009) y Jiménez et al. (2013) demuestran que este cambio en el régimen de esfuerzos, donde las fallas del Cretácico Inferior formadas inicialmente como fallas normales durante la etapa de “rifting” y posteriormente invertidas a fallas invertidas causa un cambio en el estilo estructural a lo largo del Piedemonte Llanero Colombiano, debido a la herencia estructural, ya que hacía el suroeste las fallas se clasifican primordialmente de piel gruesa, por la implicación del basamento, y hacía el noreste las estructuras encontradas son estructuras dúplex y apilamientos antifórmes, tal como muestra la siguiente figura:

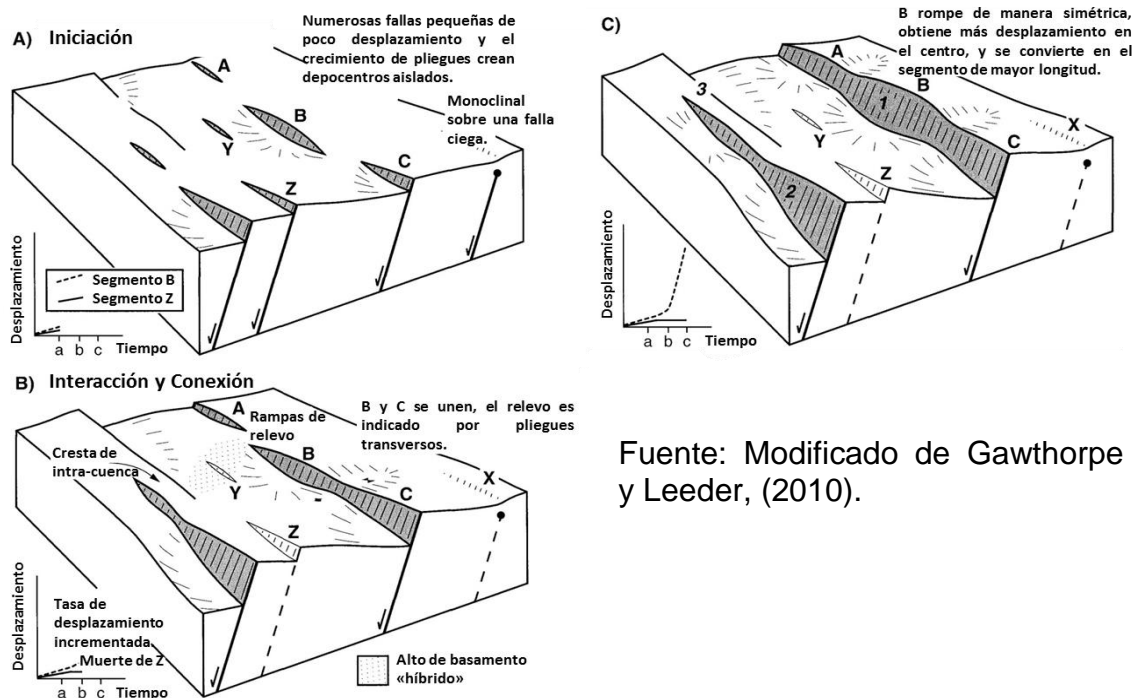
**Figura 5.** Secciones estructurales del piedemonte, A-A' (color amarillo) al sur y M-M' (color rojo), al norte, mostrando la variación en el estilo estructural, pasando de estructuras con prioritariamente con basamento implicado, a estructuras con apilamientos antifórmes y estructuras dúplex.



Fuente: Modificado de Mora et al, (2011).

Este drástico cambio en el estilo estructural, sucede de manera gradual, y es causado por la herencia estructural de las fallas normales Neocomianas, las cuales nacen y se desarrollan por la unión de segmentos, figura 6, quienes interactúan entre ellos, y que a medida que se conectan se hacen más extensos, y acumulan desplazamiento, formando así fallas de mayor extensión que alcanzan su máximo desplazamiento hacia las partes centrales del plano de la falla (Gawthorpe y Leedert, 2001), tal como se muestra a continuación:

**Figura 6.** Evolución 3D esquemática de fallas normales, con gráficas que muestran y comparan el desplazamiento de los segmentos B y Z. (A) es la fase de iniciación de las fallas, con pequeños segmentos, (B) la fase de interacción de los segmentos para formar fallas de mayor extensión y (C) fase final donde los segmentos ya han interactuado y alcanzaron mayores desplazamientos, los segmentos Y y Z no interactuaron, por eso su poco desplazamiento.



Fuente: Modificado de Gawthorpe y Leeder, (2010).

Aunque se puede hacer conjeturas acerca del acortamiento a lo largo del Piedemonte Llanero Colombiano debido al cambio en el estilo estructural, este es

constante a lo largo del mismo, según Mora et al. (2009), este valor es concordante con los expuestos por Silva et al. (2010) y Rowan y Linares (2010) en Jiménez et al. (2013), quienes concluyen un acortamiento cerca de los 22 kilómetros, además de Egbue y Kellogg, (2012) en Jiménez et al. (2013) exhiben valores de acortamiento equivalente a 22997 kilómetros.

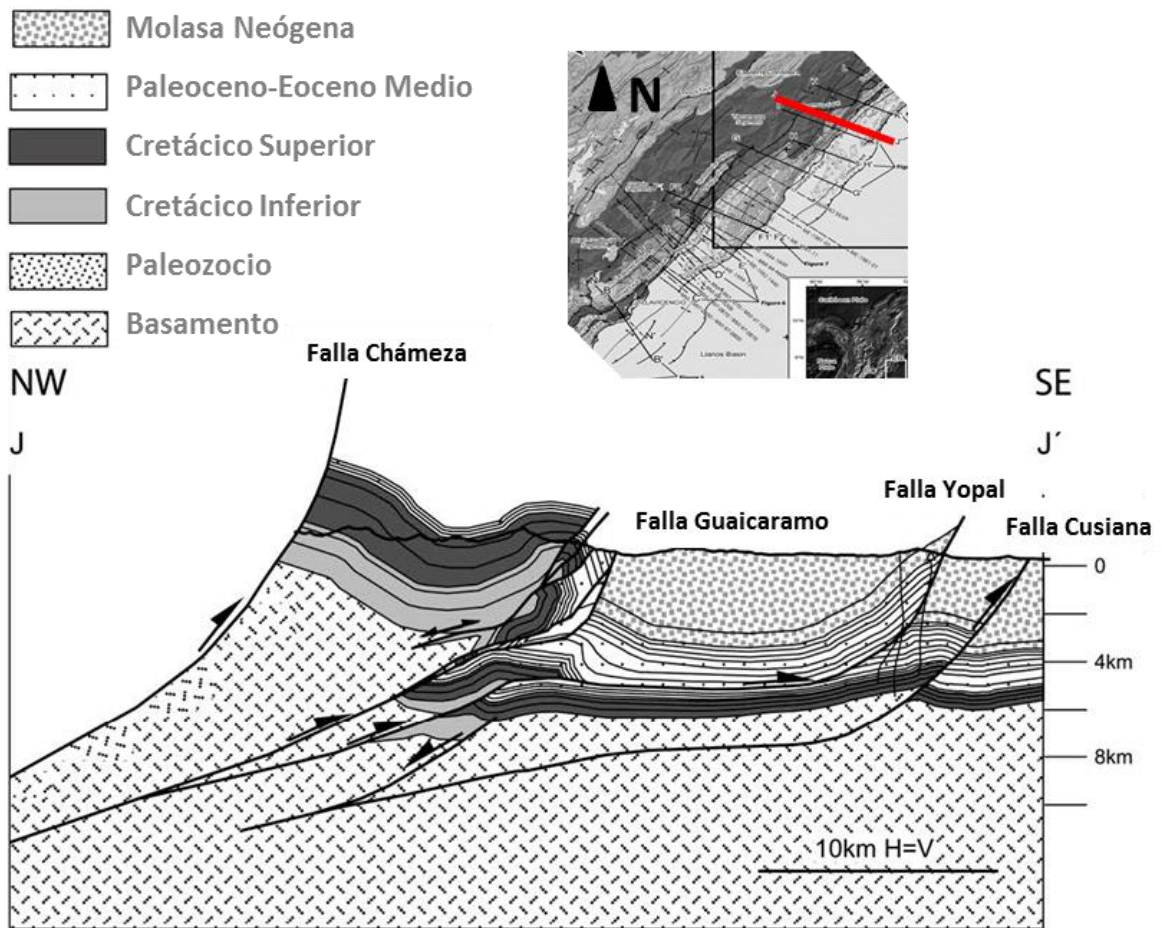
### 5.3. Geología Estructural:

La herencia tectónica es una de las razones que hacen que la geometría y tipos de estructuras cambien de Norte a Sur, Jiménez et al. (2013) basados en 12 secciones estructurales, denota un cambio en las geometrías y la expresión de la deformación, hacía la zona Sur del Piedemonte la exposición de Basamento es más notoria, causada por las fallas tipo piel gruesa, con un déficit de estructuras dúplex y apilamientos antiformes, mientras al Norte se invierte éste patrón, allí la deformación es controlada por las estructuras dúplex y apilamientos antiformes. De esta manera Jiménez et al. (2013), segmentan el Piedemonte Llanero Colombiano de la siguiente manera (figura 8), en:

- ↪ Segmento Guatiquía: donde la deformación implica basamento mayormente, llevando el basamento a superficie, ejemplo: Anticlinal de Farallones.
- ↪ Segmento Guavio: zona en la cual aparece la falla de Guaicaramo (piel gruesa), saliendo a superficie frente al Sinclinal de Medina.
- ↪ Segmento Tierranegra: allí la falla de Guaicaramo se convierte en la estructura más importante.
- ↪ Segmento Piedemonte: en donde la deformación pasa a ser controlada por apilamientos antiformes y estructuras Dúplex.

La zona de estudio se encuentra dentro del segmento Piedemonte, dentro del área de trabajo las fallas principales son las fallas de Yopal y Cusiana en la zona este, y hacia la parte Oeste aflora la falla de Guaicaramo (figuras 2, 5 y 7). Allí la falla Cusiana se muestra como una falla normal invertida y la falla Yopal como una falla que implica ligeramente el basamento y se hace horizontal en un despegue sobre las rocas del Oligoceno, Jiménez et al. (2013) interpretan la falla de Yopal como un escape frontal del acortamiento en subcabalgamientos generado por la falla de Guaicaramo. En la siguiente sección estructural de Mora et al. (2011), se observa la relación espacial que existe entre la falla de Yopal, la falla de Guaicaramo y Cusiana.

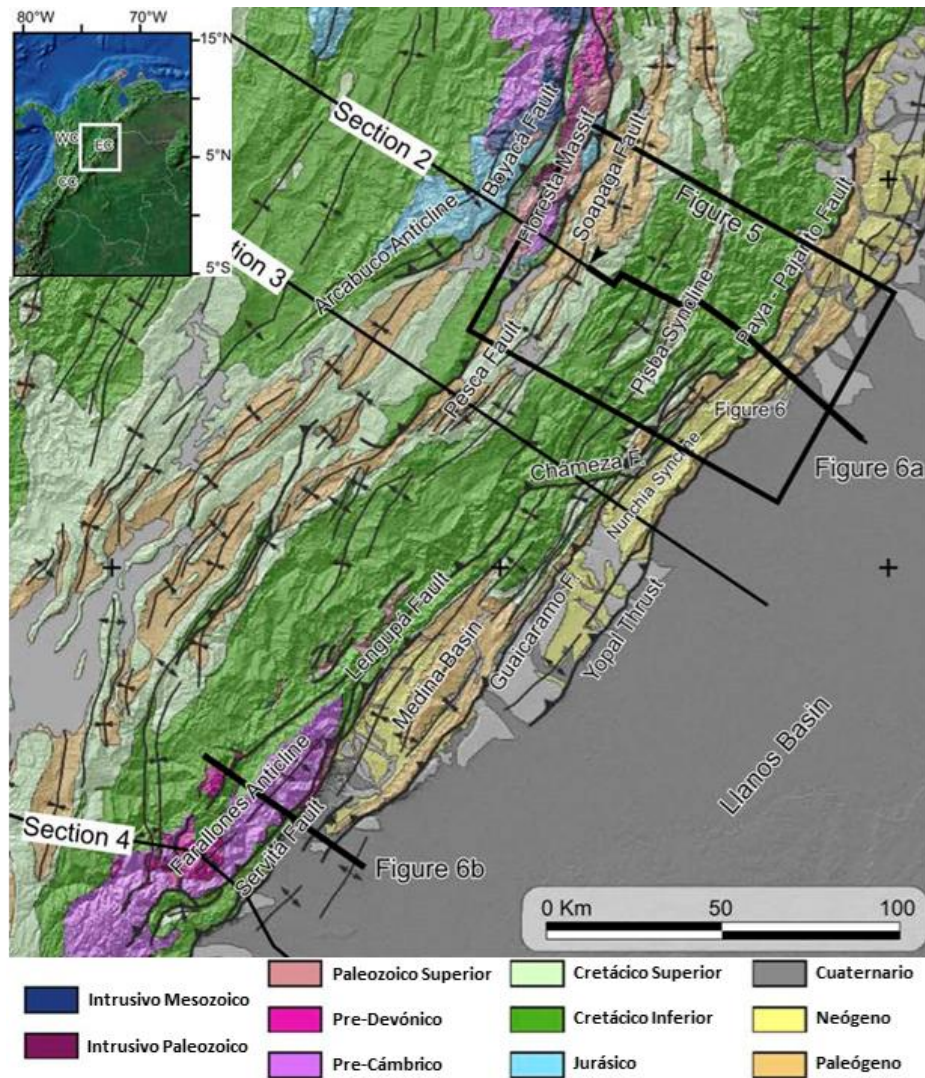
**Figura 7.** Sección estructural J-J', que muestra la relación espacial entre las fallas y las estructuras.



Fuente: Modificado de Mora et al, (2011).

La figura 8 muestra como varía la disposición de las rocas en superficie, producto de las estructuras en el subsuelo que expresan la deformación durante la última era de tiempo geológico observando como en la zona Sur del flanco Este de la Cordillera Oriental un bloque de basamento fue levantado, exhumado y expuesto en superficie, formando el Anticlinal de Farallones y también la zona de mayor relieve topográfico, mientras que hacia el Norte se encuentra la mayor densidad de unidades rocosas Cretácicas expuestas en superficie de la Cordillera Oriental.

**Figura 8.** Mapa geológico de la Cordillera Oriental, en donde se puede observar la variación Sur-Norte de las estructuras.



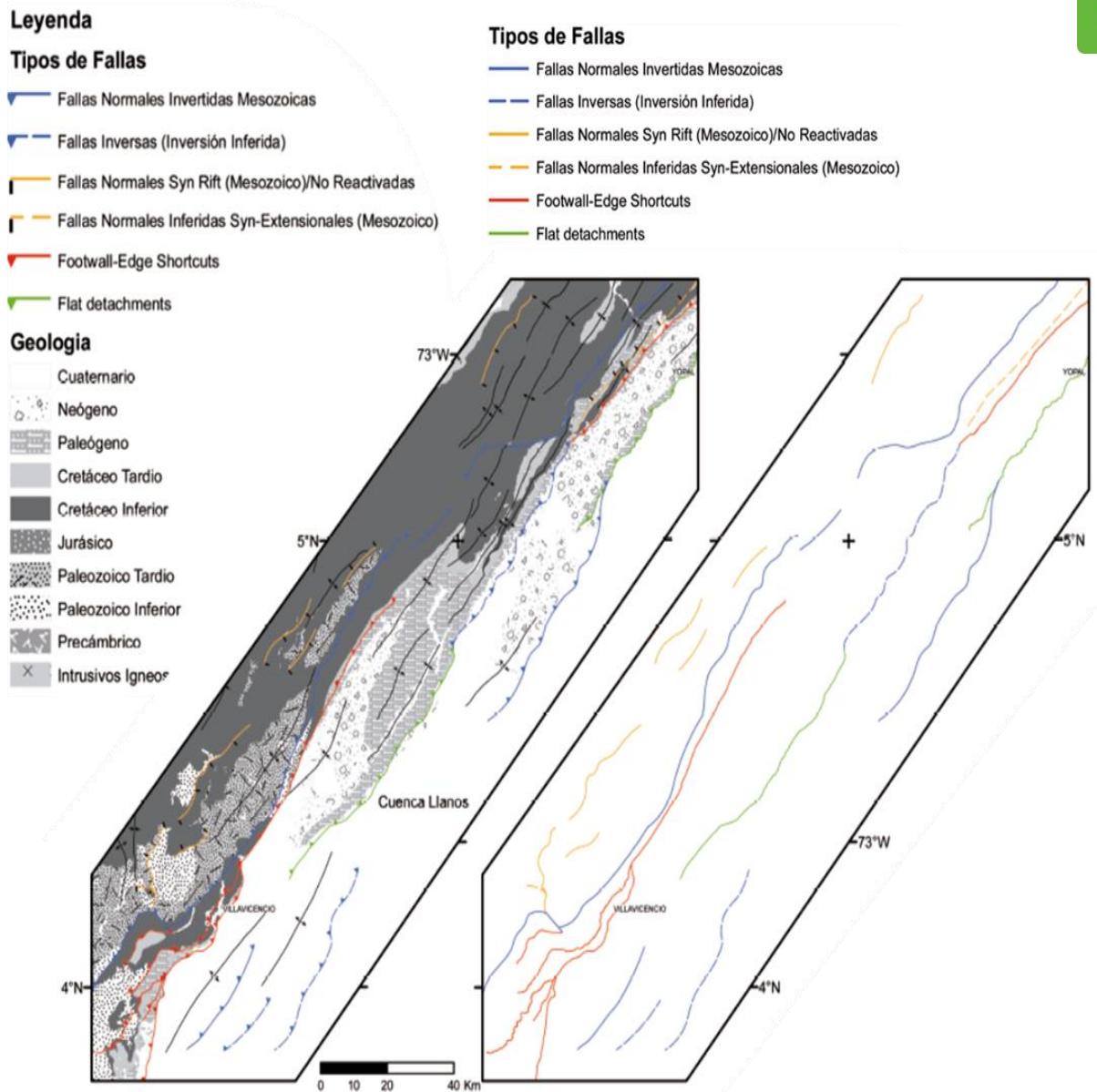
Fuente: Modificado de Tesón et al, (2013).

#### 5.4. Evolución Geológica:

El ambiente tectónico del Piedemonte Llanero Colombiano tuvo un drástico cambio de ambiente extensional a compresivo, que tardó cerca de 40 millones de años (Martínez J. (2006), esta inversión tectónica comenzó hace aproximadamente 30 millones de años, Parra et al. 2009, invirtiendo las fallas del Cretácico Inferior (ej. falla Cusiana, Guaicaramo, Servitá, Chameza, y Pajarito, figura 9). Se ha demostrado gran interés por la comprensión de la inversión de estas fallas, además de la aparición de nuevas fallas (ej. Falla de Yopal, Tesalia, Mirador y Boa), que se encuentran a lo largo del frente de deformación del Piedemonte Llanero Colombiano (Cooper et al. 1995; Shaw et al. 1999; McQuartie y Decelles 2001; Allmendinger et al. 2004; Parra et al. 2009; Mora et al. 2009), sumando los varios estudios realizados por el Instituto Colombiano del Petróleo (Mora et al. 2010; Ramírez-Arias et al. 2012; Mora et al. 2013; Jiménez et al. 2013; Tesón et al. 2013).

Sabiendo esto Cooper et al. (1995), calcularon un acortamiento de 68 kilómetros a lo largo de la Cordillera Oriental Colombiana, y argumentan que durante el Jurásico hasta el Cretácico temprano, el territorio colombiano desde el Valle del Magdalena hasta la cuenca de los llanos Orientales Colombianos fue afectado por un “*rift*” regional, que depositó consigo una mega-secuencia estratigráfica “*syn-rift*”, seguida por una subsidencia termal durante el Cretácico temprano, figura 10. Posteriormente durante el Cretácico temprano hasta el Campaniano argumenta una subsidencia “*Back-Arc*”, aunque la colisión de la placa Nazca con la Suramericana seguía activa. Durante el Maastrichtiano hasta el Paleoceno, una acreción en el oeste colombiano trajo consigo la Cordillera Occidental, como un arco de isla que venía sobre la placa de Nazca, asimismo apareció una serie de esquistos azules sobre el complejo de la Cordillera Central, y el flanco este de la misma cordillera cabalgó sobre el límite oeste del Valle del Magdalena, figura 10.

**Figura 9.** Mapa de clasificación de las principales fallas del Piedemonte Llanero Colombiano.



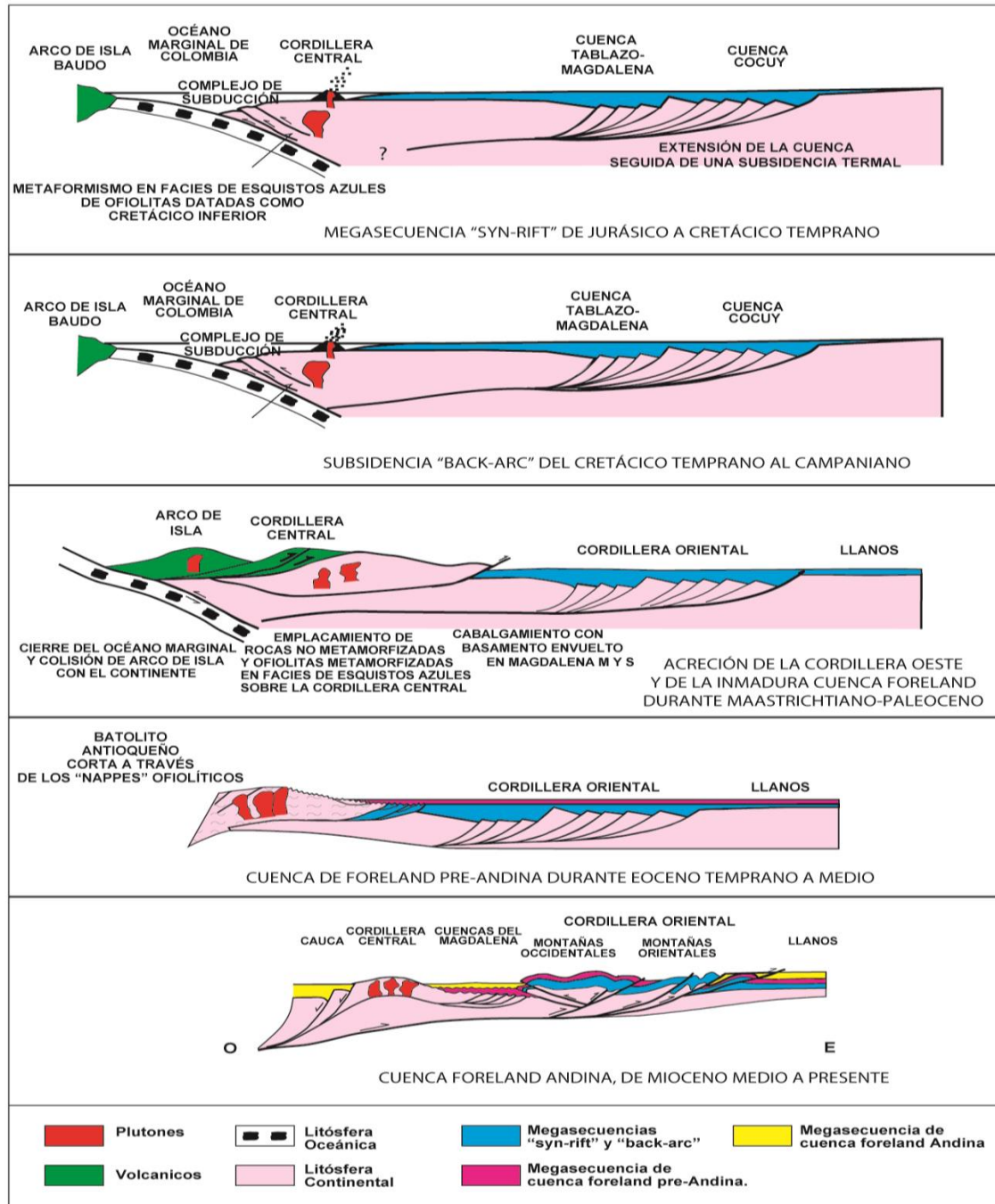
Fuente: Modificado de Moreno et al, (2013).

Seguido de la acreción, durante el Eoceno medio a Mioceno temprano, comienza a aparecer la cuenca de foreland, que se extiende desde el Valle del Magdalena hasta los Llanos Orientales Colombianos, es la precesión del levantamiento Andino (Cooper et al. 1995), figura 10. Y finalmente desde el Mioceno medio la



inversión tectónica apareció con un rápido levantamiento de la Cordillera Oriental, y la separación de la cuenca del Valle del Magdalena y de los Llanos Orientales, figura 10. Cooper et al. (1995), fue el inicio para una mejor comprensión de la evolución geológica, la figura 10 muestra un corte regional donde se puede observar el modelo evolutivo planteado en ese estudio, dónde los esfuerzos tardaron cerca de 15 millones de años para lograr la inversión de las fallas normales, creadas durante el “*rift*” de edad Jurásico-Cretácico temprano (Cooper et al. 1995). Es evidente también que el levantamiento de la Cordillera Oriental, provocó el frente de deformación en sus dos flancos, cuenca Valle del Magdalena y Llanos Orientales Colombianos, Mora y Parra (2008), mostraron que los flancos este y oeste de la Cordillera Oriental de Colombia se comportan como imágenes espejo, y una serie de secciones estructurales (Colleta et al. (1990); Dengo y Covey. (1993); Roeder y Chamberlain. (1994) en Tesón et al. (2013); Cooper et al. (1995); Tesón et al. (2013)), lo demuestran.

**Figura 10.** Modelo evolutivo sobre la evolución geológica y tectónica del Valle Medio del Magdalena, la cuenca de los Llanos Orientales Colombianos y la Cordillera Oriental Colombiana.



Fuente: Modificado de Cooper et al, (1995).

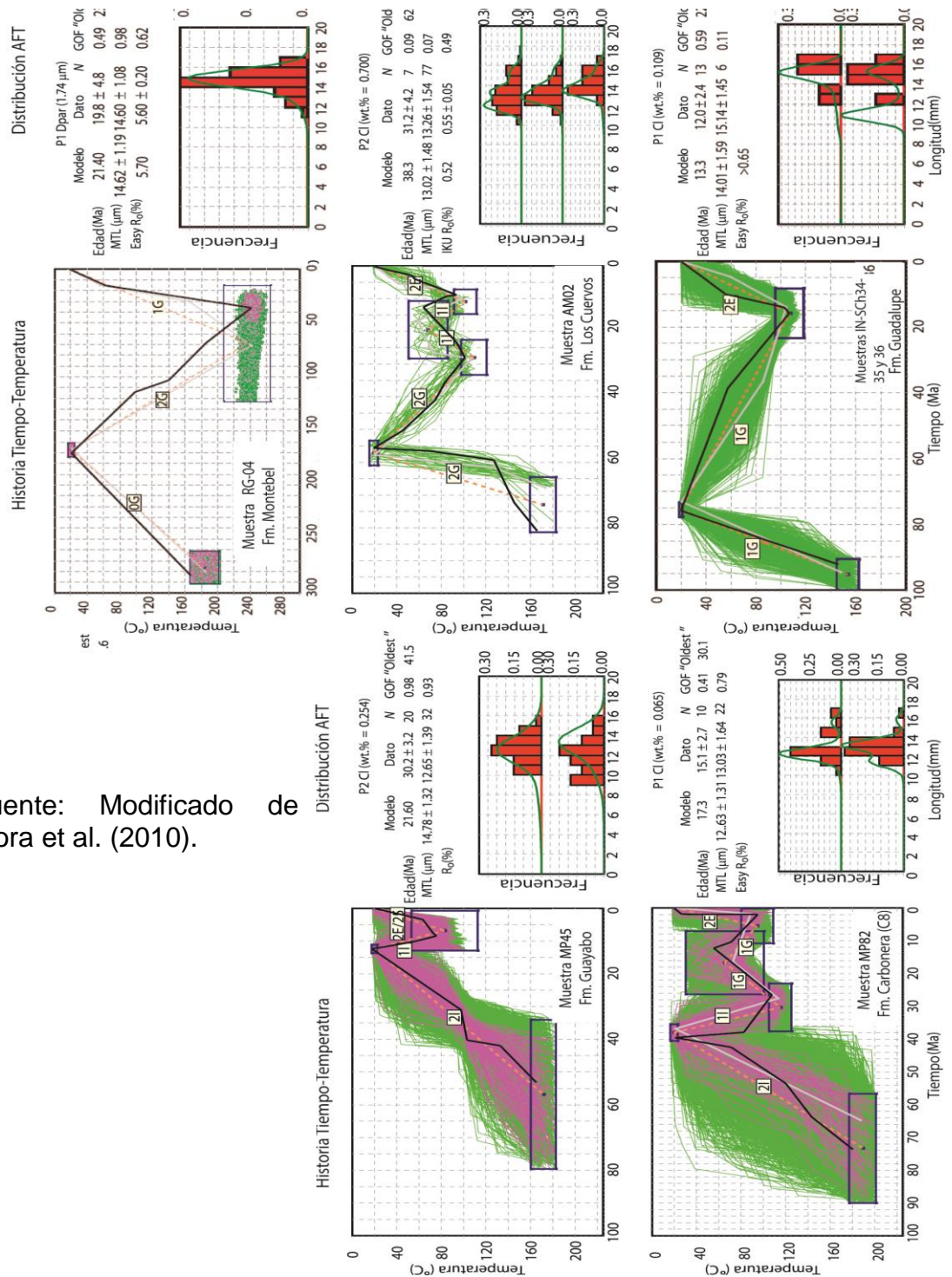
El modelamiento evolutivo del Piedemonte Llanero Colombiano ha sido calibrado a lo largo de los años, gracias al uso de nuevas técnicas más precisas para datar el momento y velocidad de exhumación de los bloques colgantes de fallas como Guaicaramo, Martínez, (2006), Servitá, Chámeza, y Pajarito. Mora et al. (2010), Mora et al. (2011), Parra et al. (2012), Ramírez-Arias et al. (2012) y Moreno et al. (2013), plantean modelos evolutivos sobre la Cordillera Orienta Colombiana y Piedemonte Llanero Colombiano calibrados con diferentes datos, palinológicos, geoquímicos y termocronológicos.

La figura 10 muestra la evolución regional del territorio Colombiano, específicamente del Valle del Magdalena medio y de los Llanos Orientales Colombianos, de esta manera Cooper et al. (1995), inició una campaña por la comprensión de los eventos geológicos que causan el relieve que hoy conocemos, además del interés por calibrar los tiempos en que la deformación ocurrió debido a su prospectividad petrolífera. Usando muestras de diferentes lugares a lo largo del Piedemonte Llanero Colombiano, figura 11, Mora et al. (2010), aplica un análisis de AFT (Apatite Fission Track), para crear una historia geológica desde el momento de depositación a lo largo del tiempo geológico, basada en su historia termal, figura 12.

Las muestras RG04 (Formación Montebel, figura 11), IN-SCh34-35 y 36 (Grupo Guadalupe, figura 11), AM02 (Formación Los Cuervos, figura 11), MP82 (Formación Carbonera, figura 11), y MP45 (Formación Guayabo, figura 11) de Mora et al. (2010), corroboran y cuantifican de forma precisa las edades geológicas de los eventos del modelo evolutivo de la figura 10, de Cooper et al. (1995); mostrando que justo después de la depositación de la formación Guayabo, comienza una rápida exhumación de los bloques que hoy forman lo que conocemos como Piedemonte Llanero Colombiano y Cordillera Oriental, por medio

de fallas como Yopal, Guaicaramo, Pajarito, y Tesalia-Servitá, Jiménez et al. (2013), y Mora et al. (2010), las muestras revelan que desde el Jurásico Tardío al

**Figura 11.** Muestras de AFT (Apatite Fission Track), usando el software Hefty.



Fuente: Modificado de Mora et al. (2010).

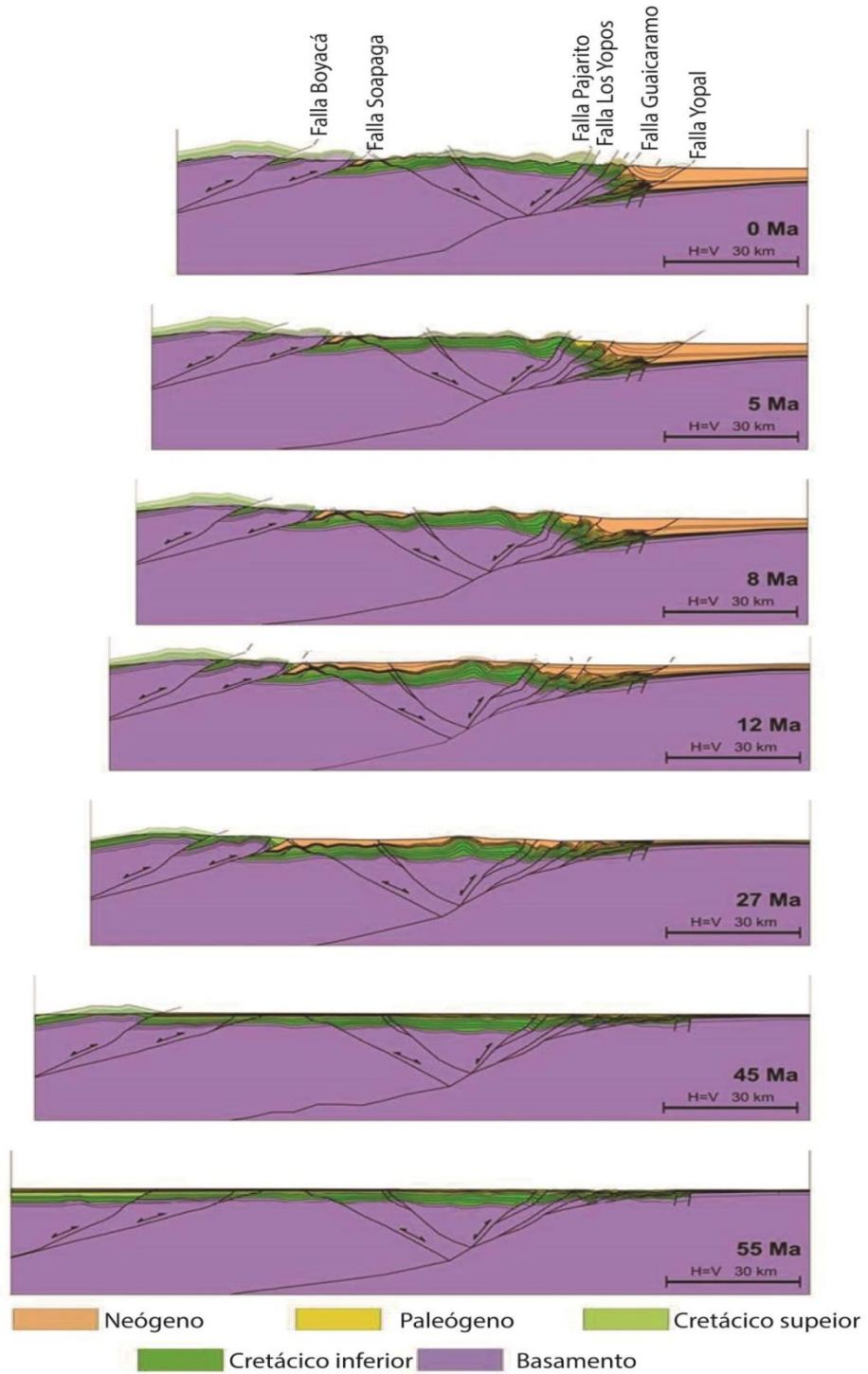
Mioceno Medio los bloques y rocas estuvieron en un constante enterramiento, pero durante el Oligoceno a Mioceno inferior hubo un leve levantamiento de los bloques, tal como corroboran las muestras nombradas previamente.

En base a estos datos termocronológicos, Ramírez-Arias et al. (2012), restituyeron cinemáticamente, desde el Eoceno temprano hasta el presente, una sección que se extiende desde el Anticlinal de Arcabuco hasta la falla de Yopal, figura 12, la cual expone la inversión de las fallas, la erosión de unidades antiguas, la depositación de nuevas unidades rocosas y la exposición del basamento.

La localización de la sección restituida se encuentra dentro del Segmento Piedemonte (explicado previamente), allí la densidad de apilamientos antiformes y de estructuras en dúplex aumenta, y la figura 12 permite una clara visión del rápido levantamiento, figura 11, y la inversión de las fallas que eran de tipo normal.

En la zona de estudio, figura 1. Se encuentran las fallas de Yopal y Cusiana, primordialmente, pero en algunas partes, al Oeste, aparece la parte terminal de la falla de Guaicaramo, se localiza sobre el segmento Tierranegra, que es la transición de geometrías dominantes de piel gruesa a piel delgada. Las fallas de Yopal y Cusiana, forman un sistema de fallas que limitan un depocentro del Cenozoico, Jiménez et al. (2013), infiere que éstas fallas aparecieron luego del Mioceno Medio, como respuesta la fuerte deformación, siendo un escape frontal de la falla de Guaicaramo

Figura 12. Evolución geológica del piedemonte llanero colombiano.

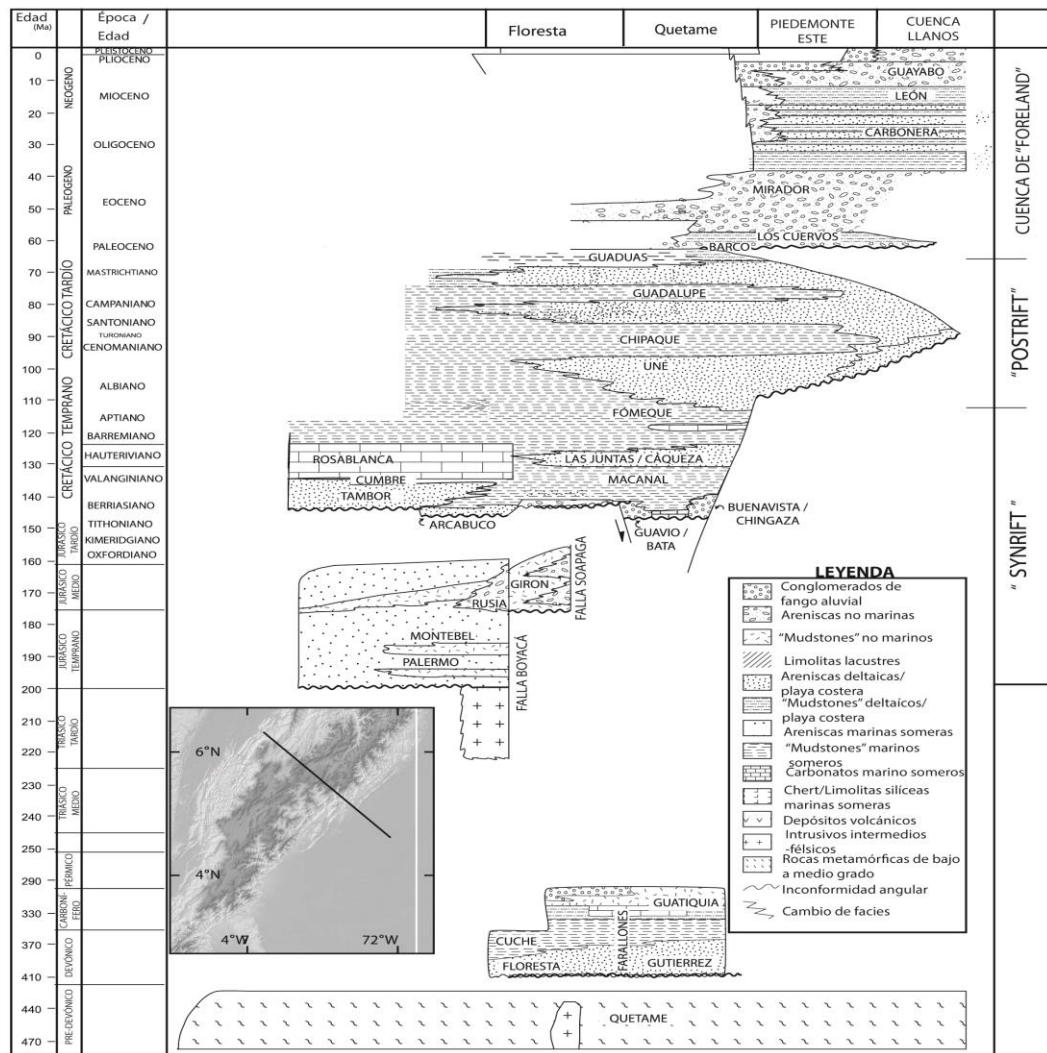


Fuente: Modificado de Ramírez-Arias et al, (2012).

5.5. Estratigrafía:

Mediante un corte que se extiende desde el flanco occidental de la Cordillera Oriental hasta la cuenca de los Llanos Orientales Colombiano, y basado en estudios anteriores (Cooper et al. (1995), Mora et al. (2006), y Parra et al. (2009)), Mora et al. (2010), expone la secuencia de rocas que registran aproximadamente los últimos 500 millones de años, figura 13.

**Figura 13.** Carta estratigráfica regional, señalando los patrones de llenado de la cuenca desde el Valle del Magdalena Medio hasta los Llanos Orientales Colombianos, como muestra la figura.



Fuente: Modificado de Mora et al, (2010).

La Cordillera Oriental expone más de 4 kilómetros de sección de basamento filítico, cubierto por cerca de 3 kilómetros de rocas no metamórficas (areniscas y lodolitas), del Paleozoico superior, estas unidades del paleozoico superior no han sido reportadas aún en los pozos que se encuentran a lo largo del piedemonte Llanero Colombiano, (Mora et al. 2010). La descripción de las formaciones mostradas en la figura 13, es:

- Rocas Pre-Devónico: se encuentran las rocas del grupo Quetame, la cual pertenece a la secuencia Pre-rift, figura 13. Cooper et al. (1995), lo definieron como el producto de un cinturón compresivo, datado como Cámbrico? Silúrico? por Hettner, (1892) y definido como Grupo por Hettner, (1982), Renzoni, (1968), Cortés y De la Espriella, (1984), en Prössl y Grösser, (1994).
- Paleozoico medio a superior: conformado por el Grupo Farallones, compuesto por las formaciones Gutierrez, Floresta, Cucho y Guatiquia, definido por Renzoni, (1968), quien lo determinó como una sucesión de sedimentos de edades entre Devónico a Carbonífero inferior, formado por lodolitas tipo “*shale*”, estas lodolitas pertenecen al Ordovícico tardío.
- Triásico a Jurásico Medio: este grupo de formaciones rocosas comienzan la secuencia “*syn-rift*” del Mesozoico, figura 13, donde aparecen las formaciones Palermo, Montebel, Rusia y Girón, dónde:
  - ↳ Formación Palermo: esta formación está compuesta por conglomerados, lodolitas tipo shale de color negro y areniscas de grano fino a medio de colores rojizos, verdes y tonalidades violeta, según Langenheim (en Renzoni, (1981)).

- ↪ Formación Montebel: arcillolitas y lodolitas tipo shale de colores negros y grises oscuros alternadas con limolitas grises, verduscas, ocre a rojizas, (Ulloa y Rodríguez, (1976).
  - ↪ Formación Girón: la formación está compuesta por conglomerados polimícticos de colores rojizos a violáceos, contiene algunos clastos de rocas ígneas y metamórficas, algunos de ellos alcanzan hasta los 5 centímetros de diámetro; la matriz de estas rocas está compuesta por arena media a gruesa, contiene una alta densidad de óxidos de hierro, a los que se les atribuye su color rojizo, según Cediell, (1968).
  - ↪ Formación Rusia: compuesta por conglomerados polimícticos de color rojo-verdoso, intercalados con areniscas conglomeráticas y limolitas silíceas de color rojo-violeta, (Ulloa y Rodríguez, (1976).
- Cretácico inferior: las rocas depositadas en este periodo de tiempo (Berriasiano-Albiano), marcan la transición de “*syn-rift*” a “*post-rift*”, las formaciones encontradas allí son:
    - ↪ Formación arcabuco: según Ulloa y Rodríguez, (1976) esta formación está compuesta principalmente por cuarzoarenitas de color blanco-amarillo, presenta algunas intercalaciones de arcillolitas y lodolitas rojizas.
    - ↪ Formación Guavio: Ulloa y Rodríguez, (1979), la dividen en 5 miembros: Conglomerado de Miralindo, Lutitas de Miralindo, Caliza de Malacara, Lutitas de las Mercedes y Caliza de las Mercedes.
    - ↪ Formación Buenavista: según Renzoni, (1968) en Dorado-Galindo, (1990), la formación Brechas de

Buenavista es un conglomerado compuesto de guijos y guijarros con bloques de esquistos, cuarcitas y filitas. Dorado-Galindo, (1990) la divide en dos litofacies, inferior y superior.

- ↪ Formación Macanal: Esta asociación es caracterizada por capas laminadas de espesor variable con “*mudstones*” arenosos, limolitas, y areniscas de grano fino que están expuestas en la parte superior, su nombre fue propuesto por Ulloa y Rodríguez, (1976).
- ↪ Formación Rosablanca: compuesta en su base por capas de calizas dolomíticas y de calizas evaporíticas con intercalaciones de rocas de origen terrígeno, según Wheeler, (1929) en Ulloa y Rodríguez, (1976).
- ↪ Formación las Juntas: su nombre fue propuesto por Ulloa y Rodríguez, (1976), estudios recientes (Moreno et al, (2009)), la describen como una sucesión areno arcillosa, y la divide en tres miembros, 1) miembro el Volador, compuesto de capas de 1,3 a 3 milímetros de espesor, constituidas en la base por arcillolitas de color gris oscuro, pasan al techo a cuarzoarenitas de textura fina con cemento silíceo, 2) miembro Lutitas Intermedias, hacía el techo compuesto por arcillolitas de color gris oscuro, ligeramente bioturbadas, se encuentran intercalaciones delgadas de limolitas arcillosas de cuarzo, y 3) miembro Almeida, capas gruesas de arenitas.
- ↪ Formación Fómeque: según Ulloa y Rodríguez, (1976), corresponde a lutitas grises oscuras a negras y areniscas cuarzosas grises claras, con contenido

- micáceo y de grano fino, su nombre fue dado por Hubach, (1957).
- ↪ Formación Une: Hubach, (1957) nombró de esta manera a una sucesión de areniscas blancas a amarillentas, con cemento silíceo o ferruginoso, intercaladas con lodolitas negras y limolitas silíceas, Ulloa y Rodríguez, (1976) la correlacionan con la formación Aguardiente de la cuenca de Santander y la formación Caballos de la cuenca del Putumayo.
- Cretácico superior: este paquete de rocas marcan el final de la secuencia “*post-rift*”, usualmente este paquete de rocas es registrado por los registros de los pozos a lo largo del piedemonte Llanero Colombiano, estas rocas son:
    - ↪ Formación Chipaque: definida por Hubach (1931), y redefinida por Renzoni, (1962), como lutitas negras con restos de plantas intercaladas con calizas, Montoya y Reyes, (2003) en Moreno et al., (2009), la redefinen en 4 segmentos, segmento A) compuesto por arcillolitas grises oscuras, segmento B) liditas de color gris oscuro, segmento C) compuesto por tres intercalaciones de paquetes arcillosos con dos bancos arenosos, y segmento D) predominante por niveles arcillosos, compuesta intercalaciones limolíticas y areniscas con intervalos de arcillolitas.
    - ↪ Grupo Guadalupe: definido como grupo por Pérez y Salazar, (1978) en Informe Geología de la Sabana de Bogotá- Ingeominas,(2005), propusieron formalmente las siguientes formaciones: I) formación Arenisca dura,

- sucesión monótona de lutitas físisles y grises, II) formación Plaeners, compuesta por arcillolitas, liditas, limolitas y un ligero contenido de areniscas de grano muy fino, III) formación Arenisca Labor-Tierna: la arenisca labor contiene capas muy gruesas de areniscas que se intercalan con capas de muy delgadas de arcillolitas, y la arenisca tierna se diferencia por presentar capas muy gruesas de areniscas de tamaño más grueso.
- ↪ Formación Guaduas: esta formación se extiende desde el Cretácico más tardío hasta el Paleoceno muy temprano, figura 13. Interpretada como depósitos de ambiente fluvial, estuarino y planicie costera, compuesta por una predominancia de lodolitas de color gris con intercalaciones de areniscas de grano medio a grueso, hacia el tope predominan las cuarzoarenitas (Sarmiento, (1992)).
  - Paleoceno-Eoceno: este grupo de unidades comenzó a ser depositada con la aparición de la cuenca de Foreland, (Cooper et a. (1995)), en dos de las formaciones depositadas durante este periodo de tiempo (Barco y Mirador) se encuentran las principales acumulaciones de hidrocarburos, (Martínez, (2006)), siendo:
    - ↪ Formación Barco: es una formación altamente madura, rica en contenido arenoso y se considera un depósito derivado del escudo Guyanés, con fuerte influencia marina en el área de Cusiana (Cooper et al. 1995).
    - ↪ Formación Cuervos: definida como formación Arcillas del Limbo por Hubach, (1941), en Van Der Hammen, (1960),

aunque posteriormente fue denominada formación Cuervos por las Industrias petroleras, quienes denominaron Formación Cuervos a unas lodolitas con desarrollo de paleosuelos con intercalaciones de areniscas, limolitas y algunas capas de carbón, según Copper et al. (1995), fue depositada en un ambiente pantanoso y regresivo, en planicie costera.

- ↪ Formación Mirador: Hubach, (1941), en Van Der Hammen, (1960), inicialmente denominó Formación Areniscas del Limbo a un grupo de conglomerados con cantos subredondeados de cuarzo, cementados con matriz arenosa, que presentan estratificación cruzadas, las industrias petroleras la denominaron formación Mirador debido a su correlación con la formación Mirador de la cuenca de Maracaibo, y según ANH, (2012), la formación Mirador del Eoceno Tardío, constituyen el reservorio más importante de la cuenca de los Llanos Orientales de Colombia.
  
- Oligoceno-Plioceno: durante el Oligoceno temprano el efecto de subsidencia incrementó el espacio de acomodación de los sedimentos (Formaciones Carbonera y León), en la cuenca de los Llanos Orientales, lo que dio paso a un rápido ingreso del mar, (Sarmiento, (1992)). Las unidades que se registran en este periodo de tiempo para el Piedemonte Llanero Colombiano son:
  - ↪ Formación Carbonera: propuesta como Formación San Fernando por Renz, (1938) en Van Der Hammen, (1960), descrita posteriormente como una alternancia de rocas arcillosas, limosas y de areniscas, a veces con niveles de carbón por Charitat et al, (1985) en ANH, (2012), nombrada

- formación Carbonera por las industrias petroleras por su correlación Carbones de la cuenca de Maracaibo, (Ulloa y Rodríguez, (1976). Recientemente Mora y Parra, (2008); y Mora et al (2010), proponen que los miembros de la formación Carbonera (C1 (tope), a C8 (base)), fueron depositados en dos configuraciones estructurales: 1) como cuenca de “*piggyback*” los miembros más basales de C8-C6 y 2) un ambiente tectónico estable que depositó los miembros C5-C1.
- ↪ Formación León: Notestein et al. (1944) publicaron originalmente este nombre para reemplazar el término inadecuado de "Formación Lutita Superior", la Formación León corresponde a paquetes de lodolitas que se hacen más arenosas en la parte oeste del Piedemonte Llanero Colombiano Cooper et al. (1995), Martínez, (2006), plantean que el ambiente tectónico estable continuó, desde la depositación de los miembros superiores de la formación Carbonera hasta la depositación de la Formación León.
  - ↪ Formación Guayabo: Renz, (1938), en Van Der Hammen, (1960), la describe como areniscas cuarzosas, grises verdosas, de grano fino a grueso, estratificadas en la base, arcillolitas y limolitas grises verdosas a rojizas en medio y areniscas intercaladas con arcillolitas rojizas de grano fino a medio en el tope, Cooper et al, (1995), argumentan que la erosión de la Cordillera Este dio paso a la formación Guayabo, que actuó como un depocentro desde el Mioceno más tardío, siendo un depósito de molasa.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 6.1. Método Sísmico:

La interpretación sísmica es una de las herramientas más importantes desarrolladas por la industria del petróleo como método de detección indirecta de las características del subsuelo.

Las ondas sísmicas son un tipo de onda elástica, que se propaga a lo largo de un cuerpo causando perturbaciones y vibraciones, para la adquisición de líneas sísmicas se generan estas ondas de forma artificial y al reflejarse son captadas por geófonos (para adquisiciones sobre el continente) o hidrófonos (para exploraciones “*offshore*”), posteriormente estas imágenes son procesadas para poder ser interpretadas. Durante la fase de interpretación se hace el seguimiento de los reflectores que representan las unidades rocosas y de manera general a medida que aparecen cambios y anomalías se analizan estructuras asociadas y cambios litológicos, Herron. (2011).

### 6.2. Principios Básicos:

Para realizar una interpretación sísmica se deben conocer ciertos conceptos, como:

**Amplitud (A):** máxima amplitud de la cresta de una onda sísmica.

**Dirección Cross-Line:** es la dirección perpendicular a las líneas receptoras.

**Dirección In-Line:** es la dirección paralela a las líneas receptoras.

**Frecuencia (f):** número de ondas que pasan por un punto en un segundo.

**Impedancia Acústica:** es la multiplicación del valor local de la velocidad de la onda P con la densidad de la roca.

**Líneas receptoras:** es la línea a lo largo de la cual son plantados los receptores, distanciados regularmente.

**Longitud de Onda ( $\lambda$ ):** distancia entre los dos puntos equivalentes más próximos.

**Periodo (T):** tiempo que tarda una onda en pasar por un punto.

**Reflector Sísmico:** es una interface entre capas de propiedades acústicas, ópticas o electromagnéticas contrastantes, un reflector sísmico podría representar un cambio litológico, una falla o una discordancia.

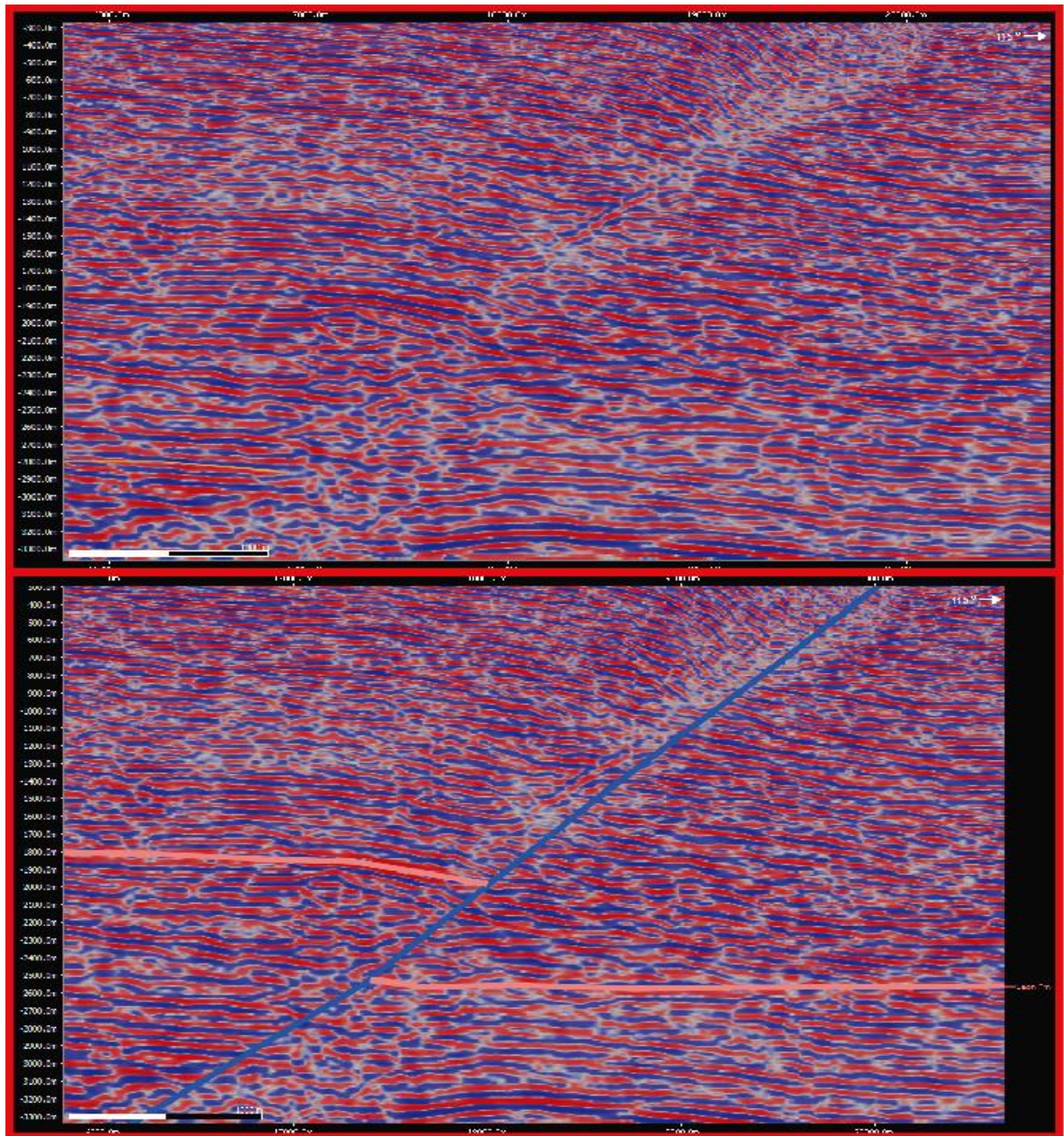
**Traza Sísmica:** representa un registro de la respuesta de la tierra a la energía sísmica que pasa a través de las capas del subsuelo, desde la fuente y de regreso al receptor.

### 6.3. Interpretación Sísmica:

Es importante tener claro que la sísmica es una medida indirecta del subsuelo, el carácter de los reflectores dependerá de la geometría y las propiedades de las rocas que reflejen estas ondas y a pesar de los múltiples procesamientos que recibe un perfil sísmico este siempre estará distorsionado, sino fuese de esa manera no se requerirían intérpretes, Herron, (2011).

Como se expresó anteriormente, según Herron. (2011), hay tantas interpretaciones como intérpretes, y además estas interpretaciones no dejan de ser modelos, modelos que se acercan a la realidad pero que probablemente no sean como la realidad. De forma general durante la interpretación sísmica se reconocen patrones para asociarlos con modelos análogos conocidos o representaciones esquemáticas de la geología real y de forma básica se interpretan dos tipos de superficies primarias: Horizontes y Fallas, Herron. (2011), según Sheriff, (2002) en Herron. (2011), un horizonte es la superficie que separa dos capas de rocas y una falla es el desplazamiento de dos rocas a lo largo de un plano de cizalla, concluyendo que los reflectores representan las rocas y están separados por horizontes sísmicos, y a su vez pueden estar afectados por fallas que desplazan estos reflectores y horizontes dependiendo del carácter de la falla (normal o inversa), incluyendo plegamientos asociados tal como muestra la figura:

**Figura 14** Interpretación de un fragmento de una línea sísmica basado en las definiciones de Sheriff, (2002) en Herron, (2011), en dónde la zona de cizalla se debe a la Falla de Cusiana (color azul), y de esta manera desplaza a la formación León (color ocre), y cerca de la falla los reflectores del bloque colgante se encuentran ligeramente plegados.

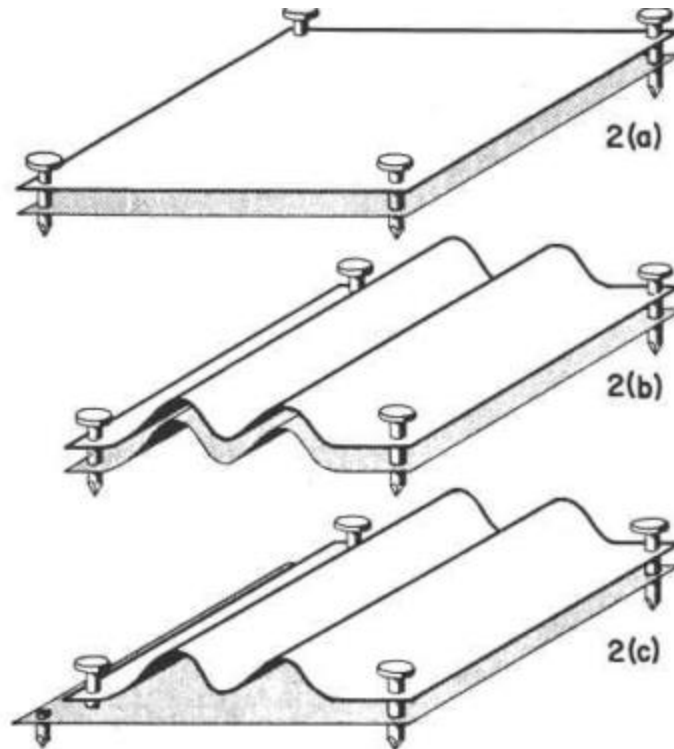


#### 6.4. Balanceo Estructural:

Durante años los geofísicos han usado diferentes técnicas y métodos para la construcción de secciones estructurales balanceadas, para poder precisar sus interpretaciones con las normas básicas estructurales y con más datos; durante este proceso la calidad de la interpretación es fundamental, y esta a su vez depende de la calidad de los datos que fueron usados para realizar la interpretación (la calidad y resolución de la sísmica directamente). Autores como Dahlstrom, (1969), Suppe, (1983) y Wilkerson y Dicken, (2001), exponen los principios para la construcción de secciones estructurales balanceadas, las razones para hacerlo y diferentes técnicas para llevarlo a cabo, aunque todos estos ajustes son en su mayoría geométricos.

Para hacer este proceso los diferentes autores han intentado esquematizar todo de manera general, Dahlstrom, (1969), agrupa las diferentes principales características en los arreglos estructurales para diversos ambientes tectónicos y expone normas básicas que se deben cumplir en el balanceo de longitudes de líneas, como la conservación del volumen planteada por Goguel, (1952) en Dahlstrom, (1969), quien la denomina equivalente a la ley de la conservación de la materia de los físicos, Dahlstrom, (1969) demuestra que la extensión areal de las capas de roca debe ser consistente cuando se trabaja con varias secciones secuenciadas, y la longitud de las capas debe ser igual para todas las secciones con excepción de la existencia de una discontinuidad incluyendo una falla o un despegue, tal como muestra la figura:

**Figura 15** Consistencia de la longitud de las capas.



Fuente: Modificado de Dahlstrom, (1969).

Además de la conservación del volumen y de la longitud de las capas hay reglas que también se deben cumplir durante la construcción de un modelo geológico, como la consistencia en el desplazamiento de las fallas, ya que el desplazamiento de una falla debe ser el relativamente el mismo para las capas rocosas afectadas por la falla.

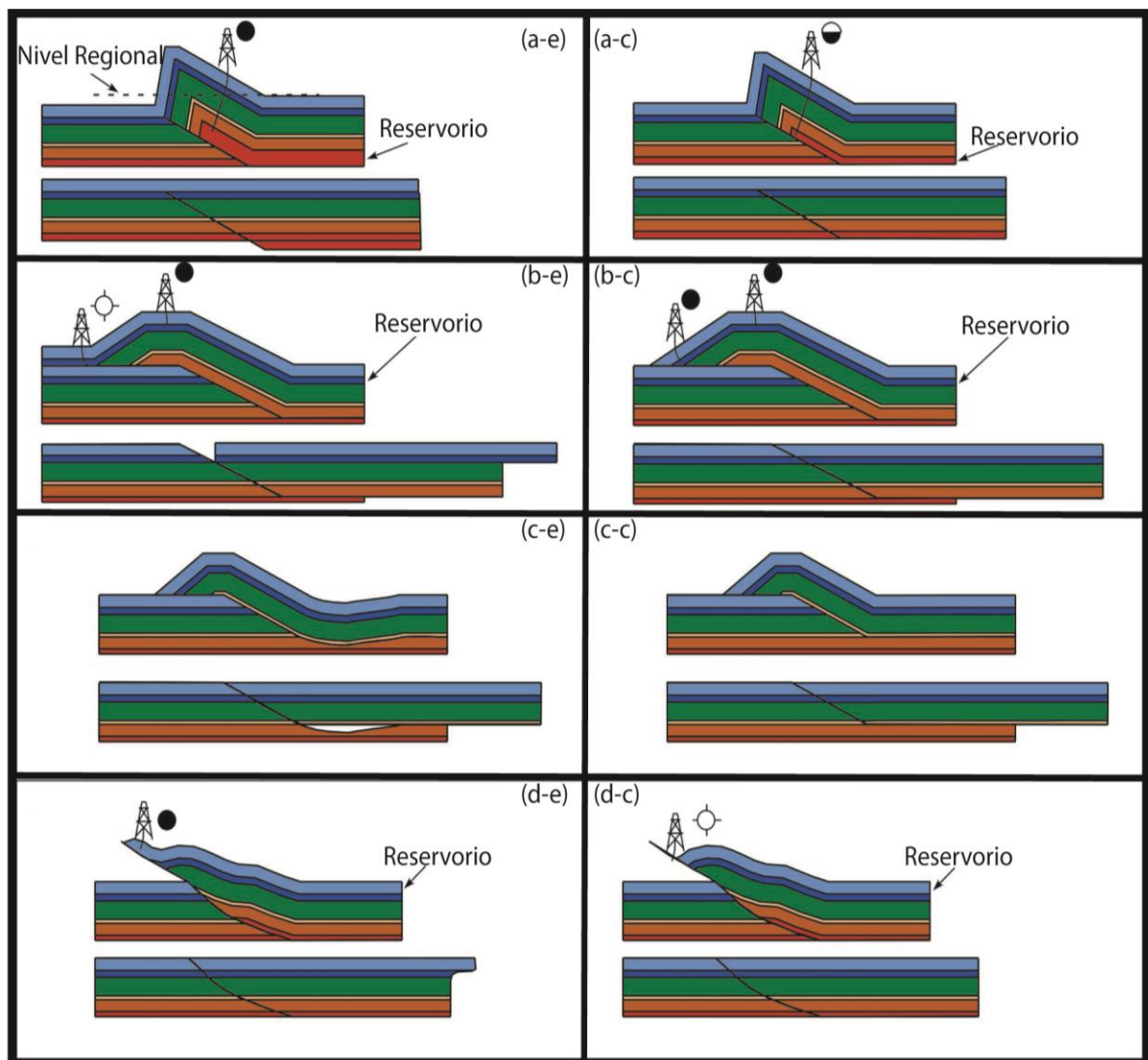
A pesar de parecer un proceso complicado y tedioso, Wilkerson y Dicken, (2001) formulan un una metodología más aplicable y rápida para comprobar que una sección estructural está balanceada, de igual manera clarifican la adaptación que estas técnicas deben llevar dependiendo de la complejidad estructural que se tenga en la zona de trabajo, para comenzar con este proceso se deben asumir los siguientes criterios:



- No hay movimiento fuera del plano de la sección estructural.
- El área de la sección es constante, no se pierde el volumen o hay compactación diferencial.
- El plegamiento está relacionado con fallas.
- No hay cizalla simple distribuida a lo largo de una sección, ya que todas las unidades deben sufrir el mismo acortamiento.
- El número de rampas y despegues en el bloque colgante debe ser igual al número de rampas y despegues en el bloque yacente.
- La longitud de rampas y despegues en bloques colgante y yacente debe ser la misma.
- Las fallas siempre cortan estratigráficamente hacia arriba en la dirección del transporte tectónico.

Todos estos criterios se asumirán dependiendo de la zona y complejidad del área, como se expresó anteriormente, ya que en este caso el hecho de no asumir reactivación de fallas podría hacer que las secciones creadas no pudiesen ser balanceadas, puesto que el desplazamiento de la falla de Cusiana no se tendría en cuenta al ser una falla normal invertida (ver figura 9), la figura 16 muestra ejemplos básicos de errores con sus respectivas correcciones de los criterios nombrados previamente.

**Figura 16.** Inconsistencias en secciones estructurales columna derecha (sufijo -e), correcciones en la columna izquierda (sufijo -c), (a) el bloque colgante está sobre el nivel regional, (b) estratos truncados en los correspondientes bloques colgante y yacente, además el número de despegues en el bloque colgante es mayor que en el bloque yacente, (c) la falla inversa corta la sección hacia abajo (estratigráficamente), (d) las capas tienen un incremento en el desplazamiento relativo con las capas adyacentes.

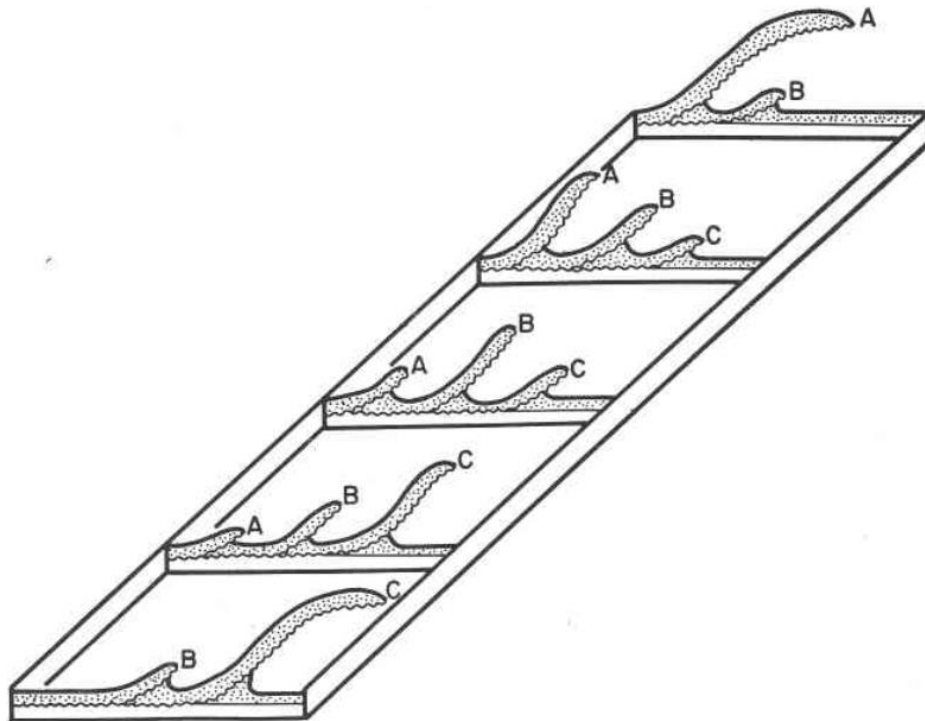


Fuente: Modificado de Wilkerson y Dicken, (2001).

### 6.5. Zonas de transferencia:

Dahlstrom, (1969), basado en el efecto que ocurre en “*The Lewis Thrust*” de USA, donde en el sur el desplazamiento es equivalente a 37 Km y aproximadamente 217 Km al Norte el desplazamiento de la falla es 0 pero el acortamiento del sistema sigue siendo 37 Km, argumenta un mecanismo para compensar el acortamiento regional, y manifiesta la interacción de las estructuras, las cuales transfieren movimiento entre ellas, figura 17, donde las fallas que van perdiendo desplazamiento son reemplazadas por nuevas fallas, mientras el complejo de estructuras comparten una misma “raíz”, Dahlstrom, (1969). El Piedemonte Llanero Colombiano es un claro ejemplo análogo, donde el acortamiento promedio es aproximadamente 23 kilómetros (Jiménez et al. 2013), a pesar de los cambios en el estilo estructural que se presentan de Sur a Norte.

**Figura 17.** Cambios en el desplazamiento en las estructuras a medida que son relevadas.



Fuente: Dahlstrom, (1969).

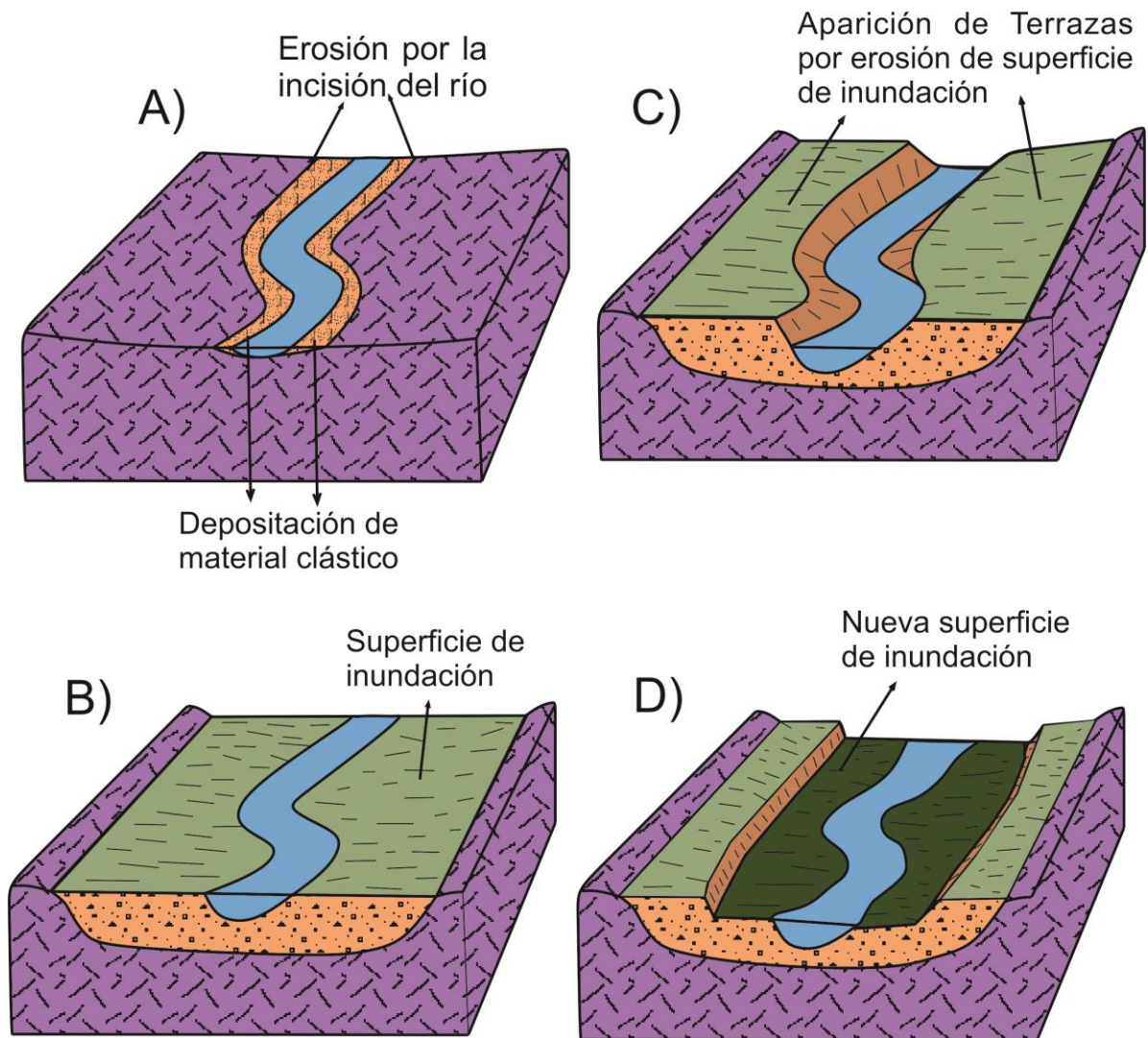
## 6.6. Terrazas Aluviales:

Son geoformas que integran procesos climáticos, tectónicos y geomorfológicos de diferentes escalas, (Pazzaglia, (2010)), las terrazas aluviales se encuentran distribuidas a lo largo de todo el mundo, y han sido fuertemente explotadas a lo largo de los últimos años por los seres humanos, ya que son altamente útiles para la agricultura, aunque geológicamente pueden usarse como marcadores estratigráficos y/o geodésicos para interpretar tasas de sedimentación, (Pazzaglia, 2010).

Usualmente las terrazas aluviales se encuentran rellenas de depósitos aluviales, figura 18; Blum, (1993), y Pazzaglia y Brandon, (2001) en Pazzaglia. (2010), describen las terrazas aluviales como unidades aloestratigráficas, las cuales están limitadas por inconformidades, estas superficies se denominan “tread”; la base erosionada es llamada “strath”, y la superficie con pendiente localizada de manera que conecta la terraza con la superficie de inundación recibe el nombre de “riser”, figura 18.

La evolución de una terraza comienza con la incisión de un río, el cuál luego de un prolongado período causa erosión para formar su cauce, y a su vez comienza con la depositación de depósitos clásicos asociados a ríos (partículas de tamaño grueso), creando una superficie de inundación que será erosionada por el mismo río para crear un primer par de terrazas, ver figura 18; y finalmente de manera cíclica y en relación al tiempo de acción del cauce del río se generarán nuevos pares de terrazas.

**Figura 18.** Evolución y deposición en tres dimensiones de terrazas aluviales, (A) incisión del río, creando erosión y deposición, (B) aparición de la superficie de inundación, (C) formación del primer par de terrazas aluviales por erosión de la superficie de erosión y (D) aparición de la nueva superficie de inundación.



## 6. METODOLOGÍA

Para la realización de este proyecto de manera organizada y estructurada, se llevaron a cabo diferentes fases de trabajo enlazadas, pasando de manera ordenada de una a otra. Las fases son:

### 7.1. Recopilación, selección y organización de información.

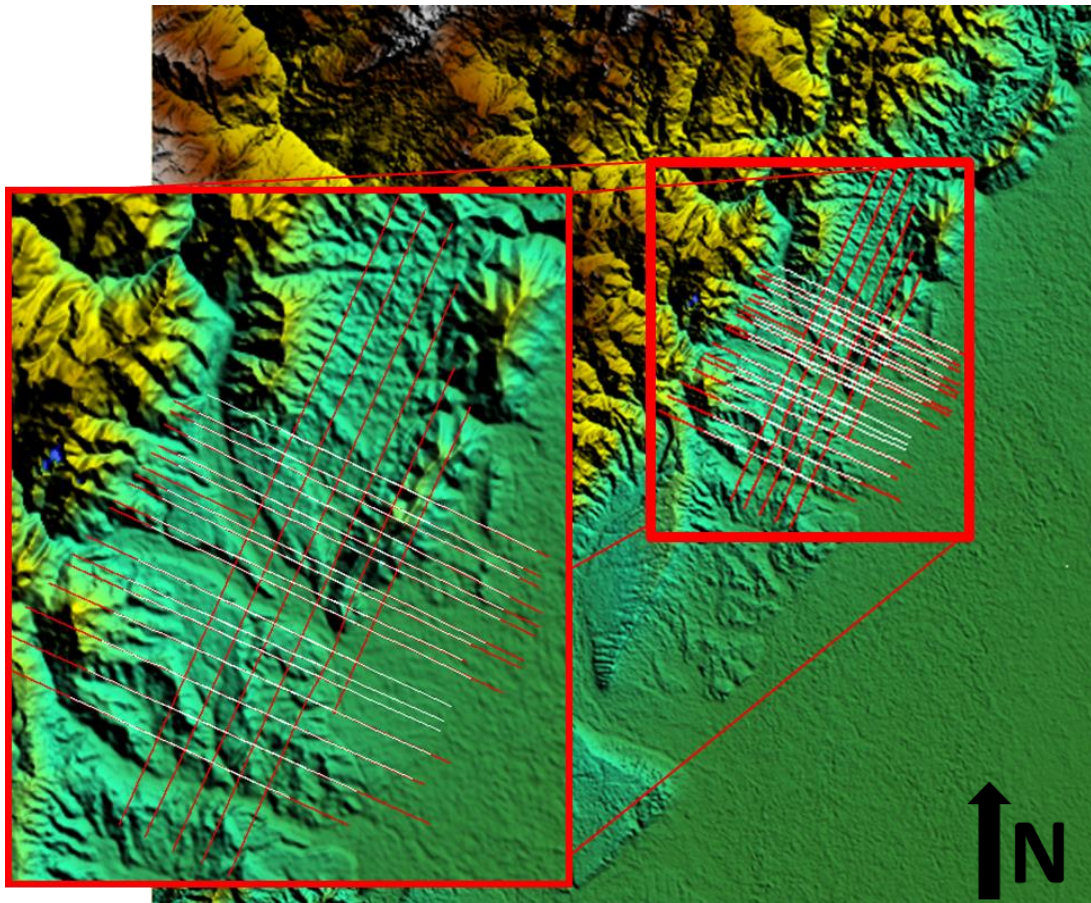
En esta fase se recolectó la mayor cantidad de información posible y disponible, incluyendo información bibliográfica para la comprensión de conceptos y la información geológica que tenía relación directa con el proyecto.

- Consulta bibliográfica: Analizando los estudios geológicos realizados en la zona, desde lo más regional hasta lo más local de la zona de estudio (ver figura 19), se tomaron en cuenta artículos científicos, tesis, revistas, boletines y libros que tuvieran relación con el marco geológico del área. Dicha recopilación se realizó en primera fase desde las bases de datos de la Universidad Industrial de Santander por medio de la consulta de los Catálogos Bibliográficos desde la página web de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander. Además de usar el Centro de Información Técnica (CIT), perteneciente al Instituto Colombiano del Petróleo de Ecopetrol S.A.
- Recopilación geológica: Se realizó la selección del material que estuviera relacionado con el área de estudio y fuese relevante para la realización de este proyecto. Obteniendo así: el mapa geológico del área (desarrollado por el Grupo de Geología Estructural-Proyecto de cuencas Subandinas del ICP en el año 2009), se obtuvo el modelo digital de terreno (DEM, digital elevation model), las 52 líneas sísmicas (en *Two Way Time*), en las que sería basado el estudio en formato \*.seg, y la información de los pozos encontrados dentro del área,

incluyendo el perfil sísmico vertical (VSP, Vertical Seismic Profile), de algunos de ellos, ya que serían de gran utilidad para realizar la conversión Tiempo-Profundidad.

- Selección de información: De las 52 líneas sísmicas obtenidas se seleccionaron únicamente 24 líneas, las cuales se encontraban dentro del área de interés del estudio, ver figura 19. Además en la fase de recopilación de información geológica se obtuvo un modelo digital de terreno muy amplio que se resumió únicamente a la extensión de las líneas, ver figura 19, añadiendo que se realizó una selección estricta de los pozos que serían más útiles y relevantes para este estudio, ya que algunos de ellos no tenían la información geológica necesaria.

**Figura 19.** Selección del modelo digital de terreno (DEM, Digital Elevation Model), del área de estudio en el software “Global Mapper”.



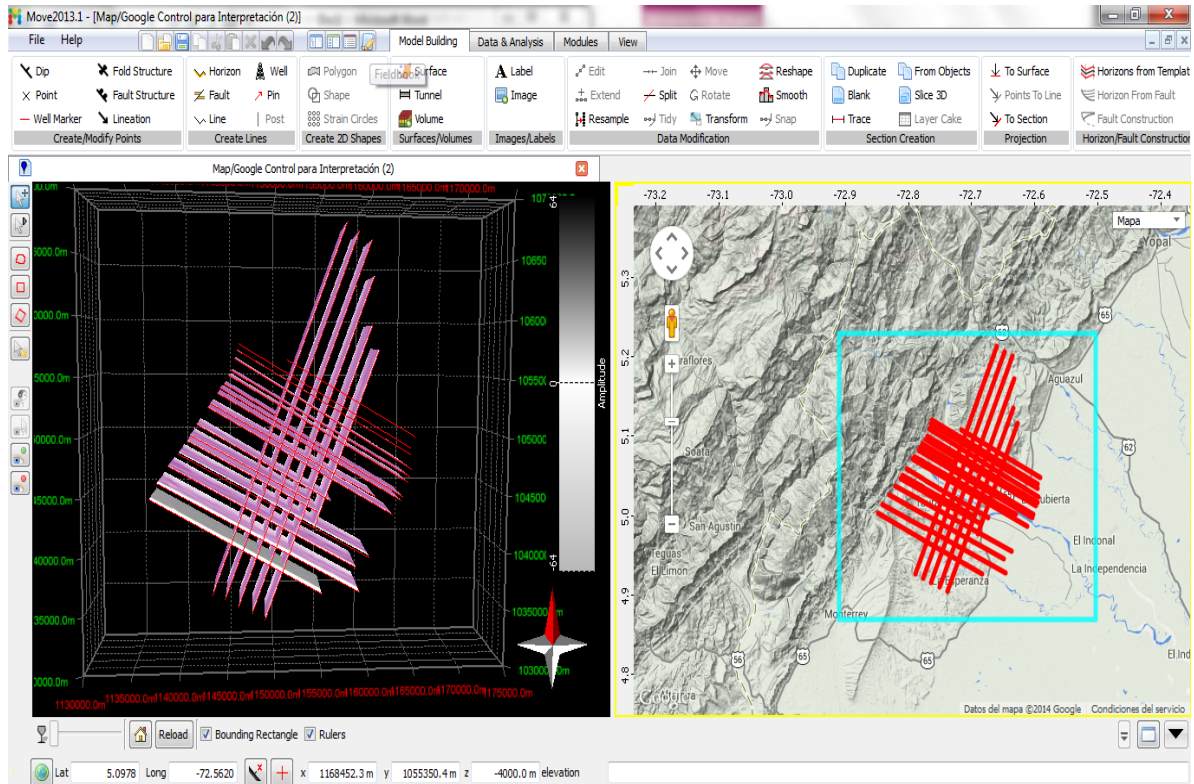


### 7.3. Carga de las líneas sísmicas 2D:

En esta fase se examinaron las líneas sísmicas usando el software SeiSee, para poder determinar qué valores tienen los diferentes factores de la sísmica, especialmente el factor de escalamiento, para posteriormente montar cada una de éstas líneas en el software Move 2013 de Midland Valley. Se importaron usando el formato de carga de archivos “Segy”, y definiendo parámetros iguales para todas, donde el tipo de datos de la sísmica estaba en “*IEEE Floating Point*”, determinando que las líneas sísmicas se encontraban en 2D y el número de trazas fuese el mismo que aparecía en la plataforma Seisee para finalmente especificar que de haber un valor de escalamiento, se ignora.

Igualmente al cargar las líneas sísmicas se aprovechó el nuevo módulo del software Move, que al tener todo con el mismo sistema coordinado, proyecta todos los objetos en un mapa del servidor de “Google”, para observar que todas las líneas estaban bien localizadas espacialmente; ya que de haber un inconveniente todo lo que se interprete no estaría localizado bien y su objetividad se vería afectada. La siguiente figura muestra la proyección de las líneas sobre el mapa del servidor “Google” usando el nuevo módulo del software Move:

**Figura 21.** Líneas sísmicas importadas en el software Move con su respectiva proyección sobre un mapa del servidor “Google”, donde se aprecia que estas se encuentran correctamente referenciadas.



#### 7.4. Calibración de las líneas sísmicas.

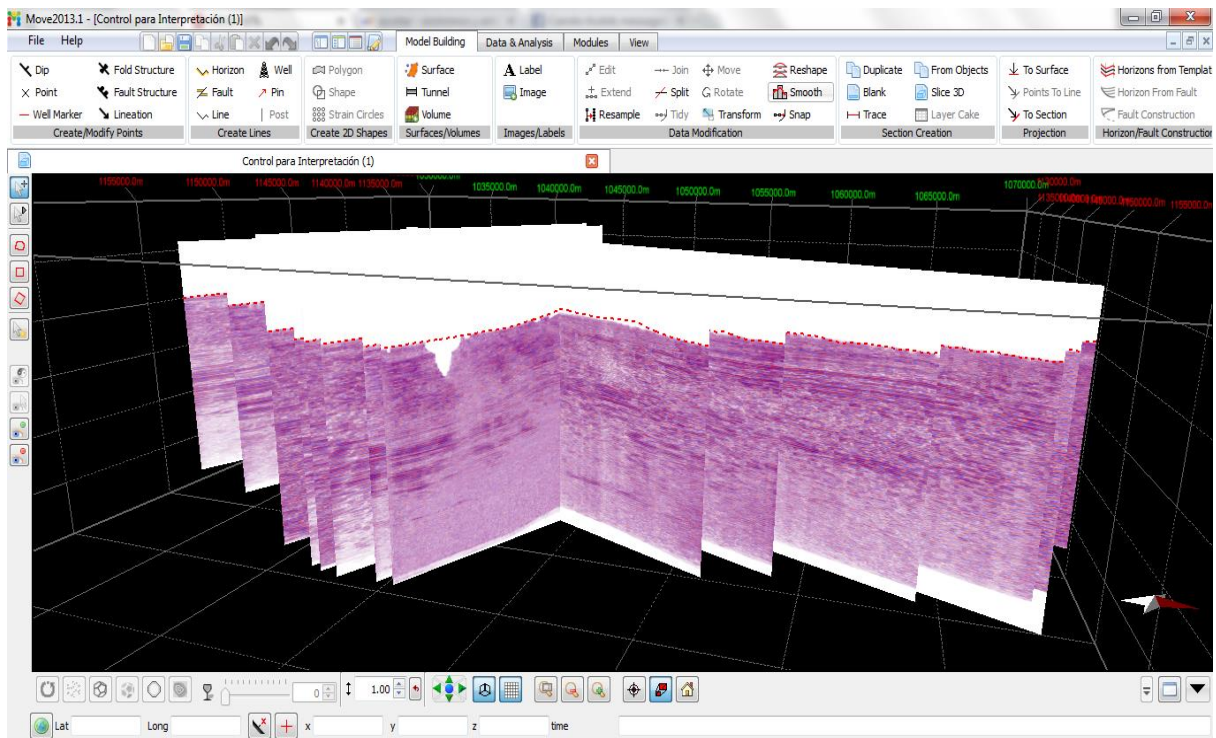
Ya que todas las líneas sísmicas fueron tomadas en el año 1992 por el servicio CUSIANA SUR-92, todas fueron tomadas y procesadas con los mismos parámetros, como el *Datum* y *Velocidad de Reemplazamiento* para estar seguro de ello, se realizó la calibración de cada línea con la topografía, usando el modelo digital de terreno obtenido previamente, y las líneas sísmicas exportadas como formato “\*.dxf y/o \*.shp”, para proyectarlas a la topografía, exportarlas como un archivo tabulado y en el software Excel realizar la conversión del valor de elevación obtenido a tiempo, usando la fórmula:

$$t = \left( \frac{\text{Datum} - \text{Topografía}}{\text{Velocidad de Reemplazamiento}} \right) * 2000$$

Dónde: Datum= 1400 metros Velocidad de Reemplazamiento= 2450 metros/segundo.

Luego se cargó cada uno de estos archivos tabulados a cada sección, para verificar que las líneas estaban localizadas en la misma elevación. La figura 22 muestra algunas de las líneas sísmicas que fueron calibradas con la topografía en tiempo:

**Figura 22.** Líneas sísmicas cargadas en el software Move 2013 de Midland Valley, donde se observa en color rojo las líneas punteadas que representan la topografía de cada línea, todas al mismo nivel.



### 7.5. Amarre de los datos de pozo y cálculo de velocidades de intervalo.

Y ya que las líneas sísmicas proveídas se encuentran en tiempo, los datos que se importen al proyecto deben estar en tiempo también, mientras se realiza la conversión a profundidad, para importar los datos de pozo se usaron los perfiles

sísmicos verticales y los checkshots de algunos de ellos y hacer más efectiva la interpretación, y además para calcular velocidades de intervalo y poder usarlas para realizar la conversión tiempo profundidad del proyecto. Realizar todo lo mencionado fue hecho de manera secuencial, y organizado, de la siguiente manera:

- Selección de pozos con VSP y/o Checkshot:

Al realizar la recolección de los datos se encontraron varios pozos dentro del área, ya que el área se encuentra dentro del campo Cusiana, el yacimiento Colombiano más grande encontrado en los últimos años, hay una gran densidad de datos allí, muchos de ellos privados, pero algunos de ellos se pudieron obtener para soportar la realización de este proyecto. Al final se obtuvo un total de 6 pozos, todos con VSP o Checkshot.

- Cálculo de velocidades de intervalo

Usando el software Excel, se realizó el cálculo de las velocidades de intervalo, explicadas previamente, las siguientes formaciones mencionadas de más superficial a más profunda: Guayabo, Charte, León, Carbonera, Mirador, Cuervos, Barco, Guadalupe (grupo), Gachetá, Une y Basamento eran las unidades a las cuales se debía hacer el cálculo de velocidades. Para realizar el cálculo de las velocidades se simplificó al máximo la cantidad de horizontes, ya que no todos los pozos contaban con la misma cantidad de marcadores y además porque estos datos serán usados para realizar una modesta interpretación y convertir el modelo. Se calculó entonces velocidades únicamente para las formaciones Guayabo, León, Carbonera, Cretácico a Mirador y Basamento, donde León contiene a la formación Charte, y las formaciones Une, Gachetá, Guadalupe (grupo), Barco, Cuervos y Mirador se tomaron en un solo paquete, debido a la necesidad de simplificar la primera interpretación (preliminar), que se realizaría únicamente para

convertir de tiempo a profundidad el proyecto. La siguiente tabla muestra las velocidades encontradas para cada uno de los horizontes:

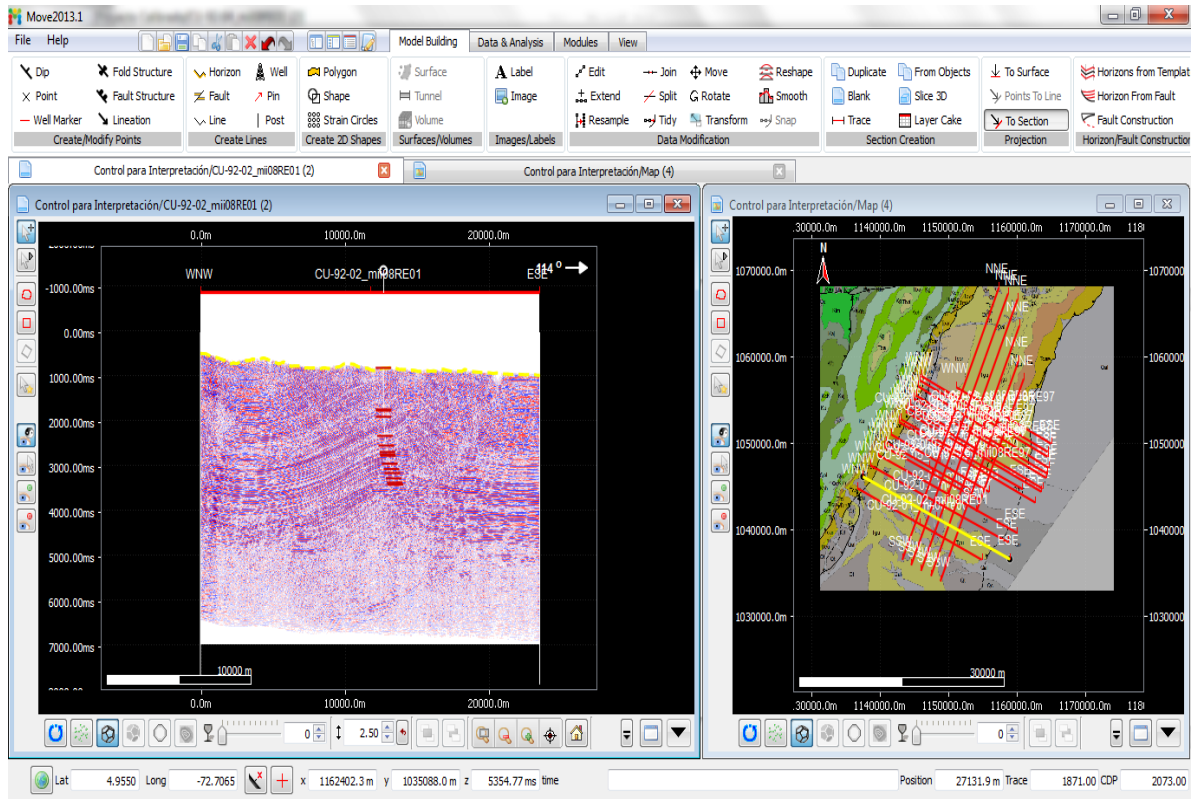
**Tabla 1.** Velocidades de intervalo calculadas para los horizontes definidos.

<b>Horizonte</b>	<b>Velocidad de Intervalo (metros/segundo)</b>
<b>Guayabo</b>	2449.9705
<b>León</b>	3051.86385
<b>Carbonera</b>	3410.50218
<b>Cretácico a Mirador</b>	3722.98093
<b>Basamento</b>	4514.72211

- Carga de los pozos en tiempo a las líneas sísmicas:

Usando el formato importador “Ascii Well Data”, se insertaron los pozos en tiempo al proyecto en tiempo en extensión (\*.txt), para comenzar a realizar la interpretación preliminar, la cual se usaría para la conversión tiempo profundidad. De esta manera se amarraron las líneas sísmicas a los datos de pozo, tal como muestra la figura 23, donde se aprecia una de las líneas sísmicas amarrada con datos de pozo, para posteriormente realizar la interpretación.

**Figura 23.** Línea sísmica Cu-92-02 con el amarre de un pozo en la ventana de la izquierda, y a la derecha la localización de la línea (de color amarillo), sobre el mapa del área.



## 7.6. Conversión tiempo-profundidad.

Para realizar la conversión tiempo profundidad se realizó una interpretación preliminar, en la cual, a pesar de tener calibrada la interpretación con datos de pozo ni se interpretan las estructuras más locales, ni tampoco se respetan las normas de balanceo de secciones estructurales en su totalidad y poco se guarda el mismo espesor de las unidades en toda su extensión, ya que siempre se fue objetivo con lo que se quería en cada nivel, y que se necesitaba para ello en cada fase, y en esta, una interpretación detallada perfectamente balanceada no era lo que se necesitaba. Siendo así, para llevar a cabo la conversión del proyecto con las 24 líneas sísmicas se hizo:

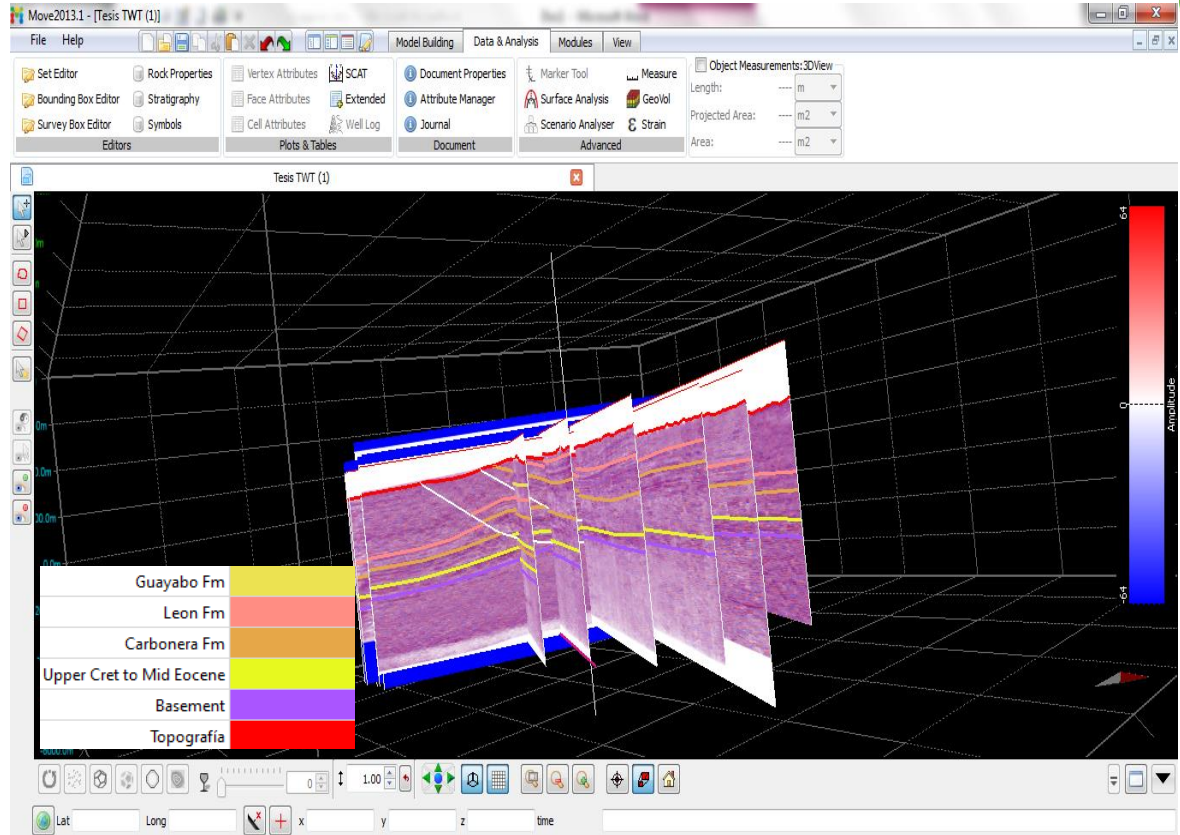
- Creación de la base de datos:

Para hacer de manera más eficaz la interpretación y construcción del primer modelo se creó una base de datos en el software Move 2013, donde no solo se establecieron los horizontes a interpretar (formaciones Guayabo, León, Carbonera, Cretácico a Mirador y Basamento), también se definieron las velocidades de intervalo de cada uno de los horizontes a interpretar, para ello esta nueva versión del software solicita ciertos datos como el porcentaje de material que tiene el horizonte (arena, lodo y calcáreo), ya que con este el mismo hace el cálculo de las velocidades de intervalo para cada horizonte, de esta manera se establecieron los parámetros necesarios para cada horizonte, en donde las velocidades coincidieran con las velocidades obtenidas con los cálculos anteriores.

- Interpretación básica de las líneas sísmicas:

Usando la base de datos previamente creada, se interpretó cada horizonte (formaciones Guayabo, León, Carbonera, Cretácico a Mirador y Basamento), añadiendo únicamente las dos estructuras principales del área de estudio, la falla de Yopal y la falla de Cusiana. Esta interpretación se calibró en gran parte con los datos de superficie, usando el mapa geológico del área, la figura 24 muestra la interpretación realizada.

**Figura 24.** Básica y general interpretación sísmica de las líneas en tiempo.



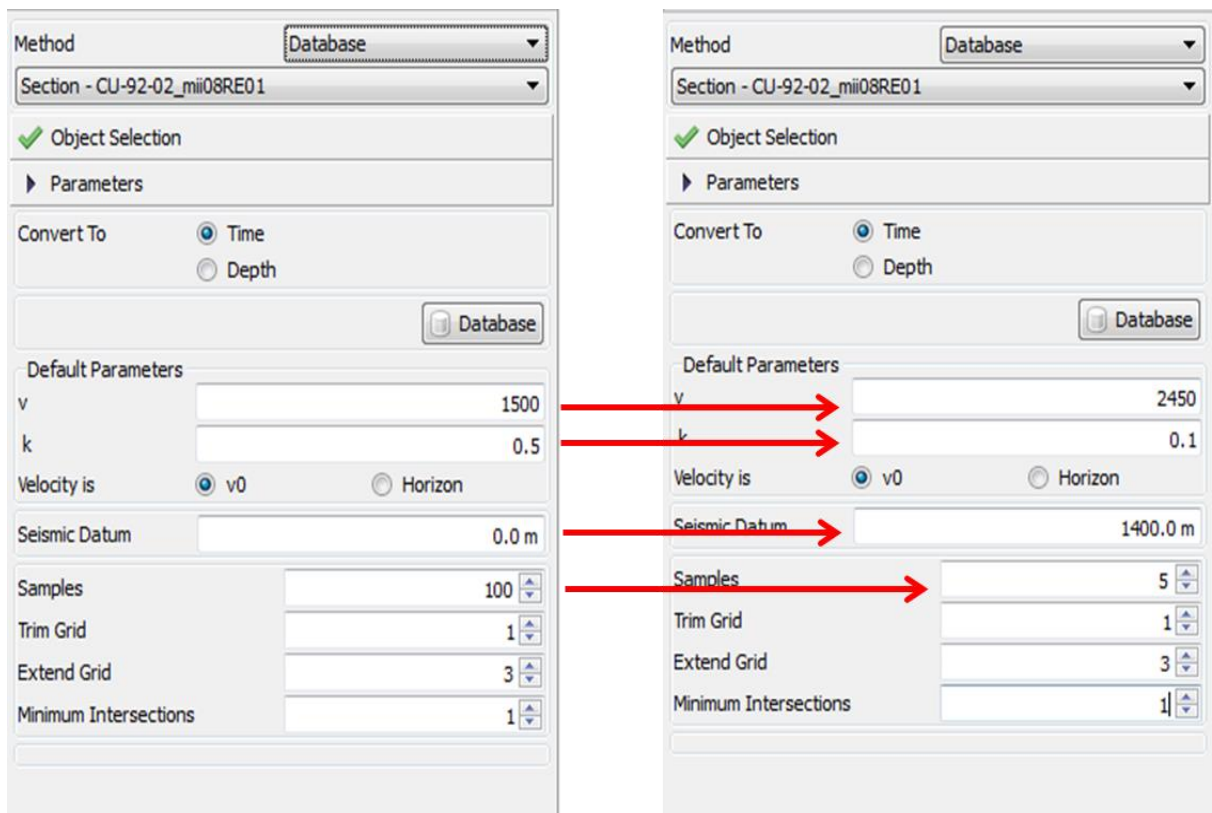
- Construcción de polígonos:

Basándose en las líneas previamente creadas, se crearon polígonos que representarían cada horizonte, de esta manera los atributos definidos en la base de datos se aplicarán dentro del área de cada polígono, la creación de los polígonos se realizó con la opción “Merge Segments”, seleccionando cada horizonte de la base de datos. La figura 25 muestra los polígonos creados cuando ya se realizó la conversión.

- Conversión tiempo-profundidad:

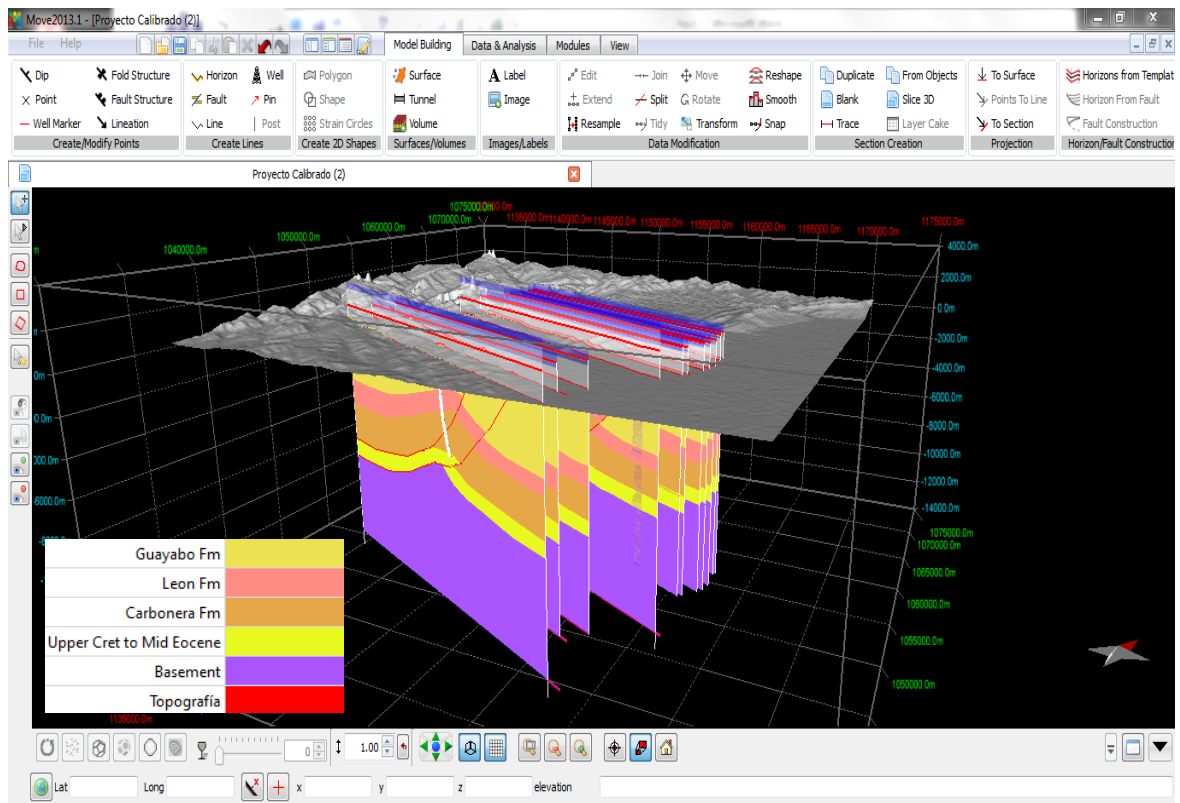
La conversión tiempo profundidad se realizó a cada sección por aparte, y se calibró con la topografía en elevación y el DEM (*Digital Elevation Model*), además de la inclusión de los datos de pozo en profundidad, comprobando así que los horizontes se encuentran en la profundidad real y el modelo quedó bien convertido. Para dicho proceso es necesario conocer parámetros extra, como la velocidad de reemplazamiento y el datum de referencia sísmico, además de definir la constante que determina la variación de la velocidad en la profundidad (k) tal como muestra la siguiente figura:

**Figura 25.** Selección de los parámetros para la conversión tiempo profundidad, donde: v es Velocidad de reemplazamiento y k es la constante de aumento de la velocidad.



Una vez establecidos los parámetros se procedió a convertir cada línea por aparte (usando los mismos parámetros), hasta convertir el proyecto completo. También se insertó de nuevo el DEM en elevación y los pozos en profundidad para comprobar la confiabilidad del proceso.

**Figura 26.** Proyecto convertido a tiempo, usando los polígonos creados previamente y la base de datos, donde se puede ver el modelo digital de terrenos y en blanco aparecen los pozos con los que se calibró y corroboró dicha conversión.



### 7.7. Interpretación sísmica.

Una vez convertidas todas las líneas sísmicas, se procede a realizar una nueva interpretación, más detallada, basada en secciones de estudios previos como Mora et al, (2010). Para ello se insertan nuevamente pozos del área, en este

proceso se usaron cerca de 8 pozos, seleccionados estratégicamente para comenzar una nueva interpretación, ya que la interpretación previa se usó únicamente para aplicar velocidades y realizar la conversión, como se explicó anteriormente.

La interpretación llevada a cabo en esta fase contó con las mismas horizontes expuestos previamente (Basamento, Cretácico Superior a Eoceno Medio, Carbonera, León y Guayabo), añadiendo la unidad Cuaternaria, que equivale únicamente a las terrazas Cuaternarias objeto de este estudio. En cuanto a estructuras el estudio se centró en las principales estructuras que son la Falla Yopal y la Falla Cusiana, añadiendo al Oeste un trazo de la Falla de Guaicaramo, aunque con líneas discontinúas de color blanco se muestran las fallas de menor escala presentes e interpretadas en cada línea sísmica.

Este proceso fue llevado a cabo en dos fases:

- Selección de Líneas Sísmicas relevantes a interpretar:

Debido a factores expuestos en la tabla 2 se descartó un total de 13 líneas, la figura 27 muestra de color verde las líneas que son relevantes y cumplen los principales requisitos de la tabla 2, y de color rojo las líneas que se descartaron y a pesar de haber sido interpretadas durante la primera fase, no serán interpretadas con mayor detalle.



**Tabla 2.** Análisis de relevancia de las líneas, de color rojizo se encuentran las líneas que fueron descartadas y en la columna de la derecha se encuentran las razones (ver figura 27), y de color verde se encuentran las líneas que serán tomadas para la interpretación.

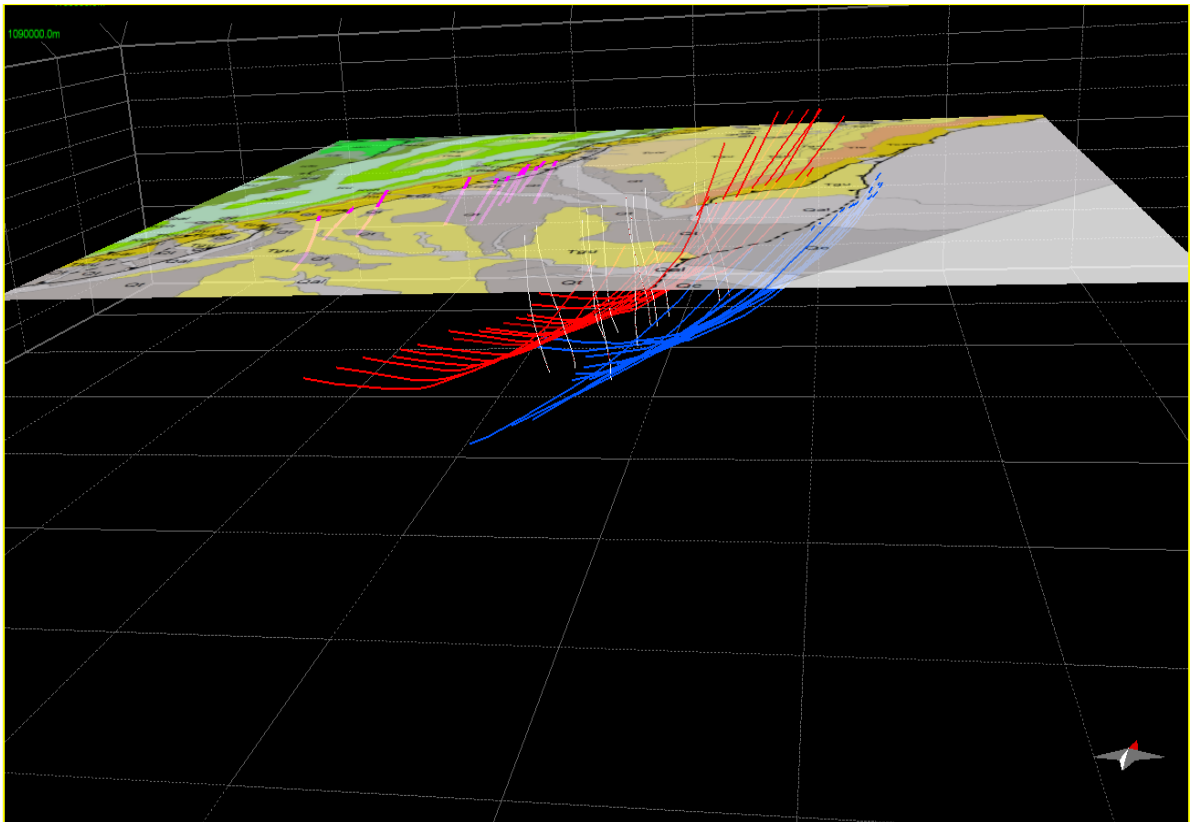
Línea Sísmica	Requisitos		Descartada		Anotaciones
	Sí	No	Sí	No	
CU-92-01		X	X		No toma las estructuras principales a lo largo de su longitud, la línea es demasiado corta.
CU-92-02	X			X	
CU-92-03	X			X	
CU-92-04	X			X	
CU-92-05		X	X		No toman las estructuras principales a lo largo de su longitud, las líneas son demasiado cortas.
CU-92-06					
CU-92-07					
CU-92-09	X			X	
CU-92-10		X	X		No toma las estructuras principales a lo largo de su longitud, la línea es demasiado corta.
CU-92-11	X			X	
CU-92-12	X			X	
CU-92-14	X			X	
CU-92-15	X			X	
CU-92-16	X			X	
CU-92-17	X			X	
CU-92-18	X			X	
CU-92-19		X	X		
CU-92-25		X	X		Las líneas se encuentran orientadas en una dirección paralela a subparalela de las estructuras principales y no permiten una buena visibilidad y análisis de las mismas.
CU-92-26					
CU-92-27					
CU-92-28					
CU-92-29					
CU-92-30					

- Interpretación de las principales fallas (Yopal, Cusiana y Guaicaramo):

En primer lugar fue realizada la interpretación y análisis de las principales fallas en el área, a lo largo de las líneas seleccionadas, apoyando este modelamiento con

un mapa cartográfico y datos de pozo, para finalmente llegar al modelado geométrico de estas fallas, tal como muestra la figura:

**Figura 28.** Modelado final de las fallas Cusiana (color Azul), Yopal (color Rojo) y Guaicaramo (trazo de color fucsia), basados en las líneas sísmicas seleccionadas, los datos de pozo (líneas blancas), y la información cartográfica.

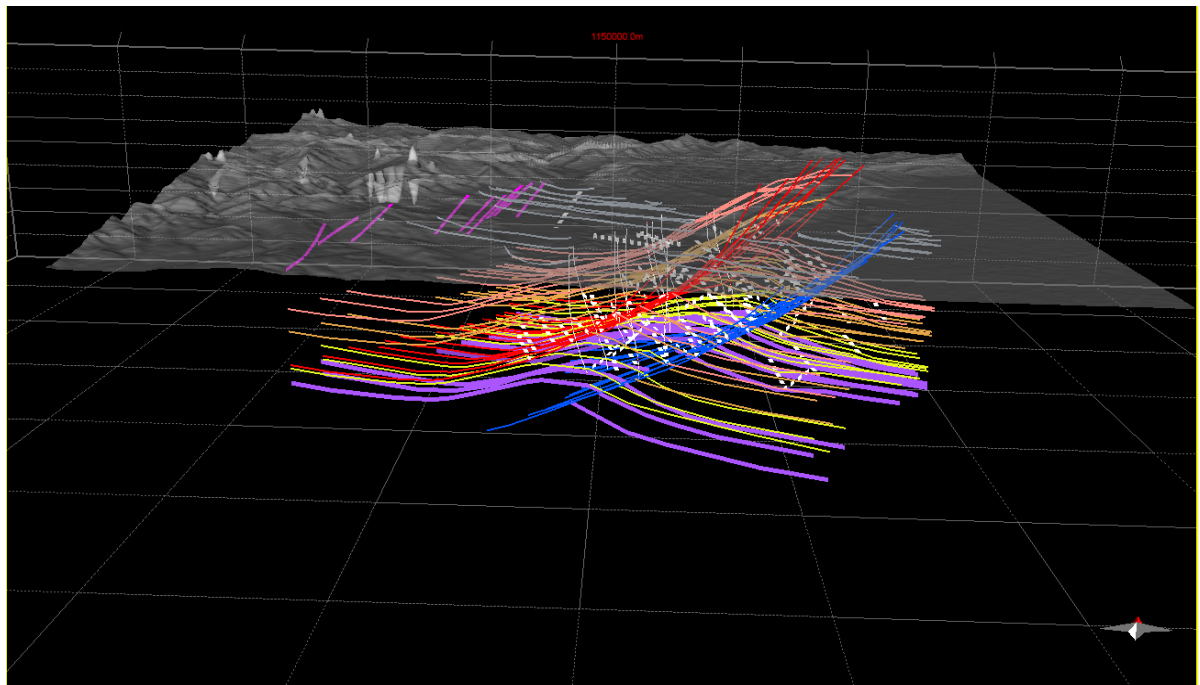


- Interpretación total de Horizontes previamente definidos y estructuras de menor escala:

Una vez se interpretaron las principales estructuras se procedió a realizar la interpretación de los horizontes (Basamento, Cretácico Superior a Eoceno Medio, Carbonera, León, Guayabo, Terrazas Cuaternarias), además de las estructuras de menor escala encontradas en cada línea sísmica, que fueron interpretadas pero no se tomaron en cuenta para la construcción de las secciones estructurales balanceadas ya que su desplazamiento es mínimo y no tienen continuidad a lo

largo de toda el área. La interpretación fue basada en pozos que se cargaron en una fase previa, para poder seguir de manera precisa los reflectores que representaban los topes de los horizontes de interés, además de usar el mapa cartográfico para conocer los contactos en superficie. Finalmente se modeló cada uno de estos horizontes y estructuras de menor escala tal como muestra la siguiente figura:

**Figura 29.** Modelo completo, con fallas principales (Falla de Cusiana de color azul, falla de Yopal de **color** rojo y falla de Guaicaramo de color fucsia), además de los principales horizontes (Basamento de color morado, Cretácico Superior a Eoceno medio de color amarillo, Carbonera de color ocre, León de color rosa claro y cuaternario de color gris), las fallas de menor escala se encuentran de color blanco.



### 7.8. Balanceo estructural de la interpretación.

Con base a los conceptos mencionados en el capítulo anterior, se realizó el balanceo de longitudes de líneas para cada sección creada con base a la

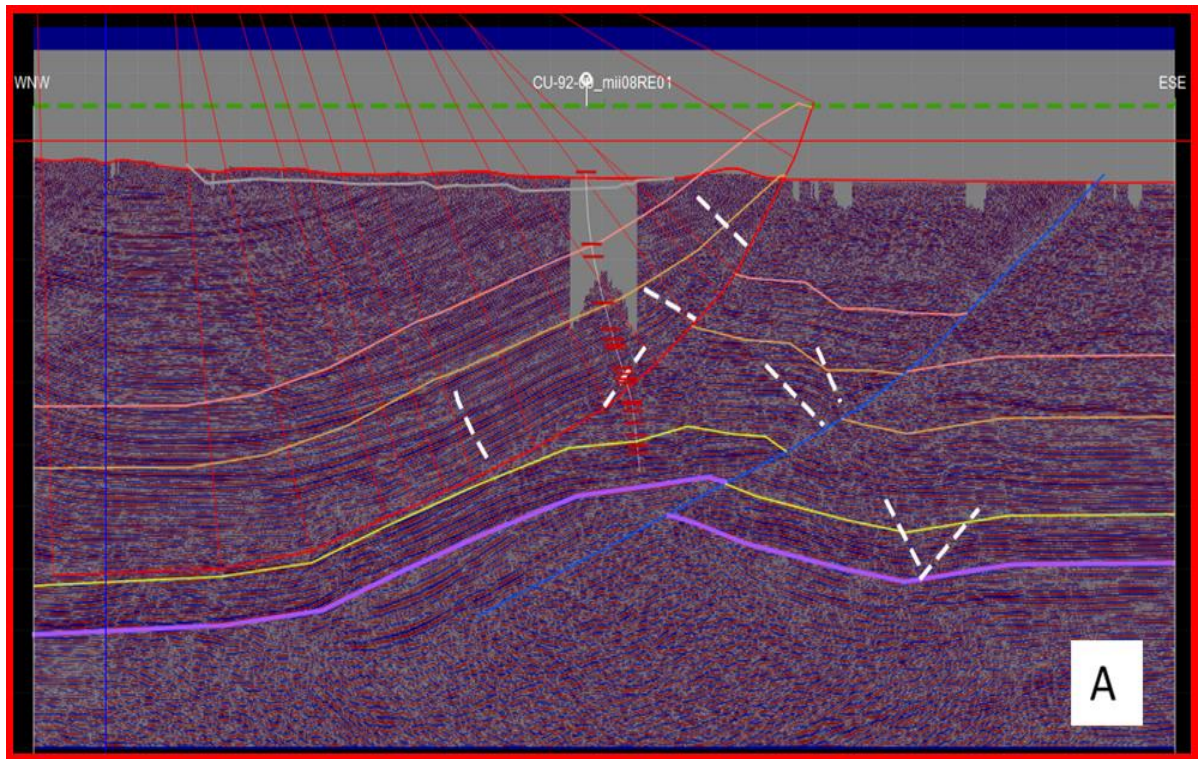


interpretación previa. Usando el algoritmo de movimiento de falla en 2 dimensiones “*Fault Parallel Flow*” del software Move, se corroboró que el salto de falla fuese igual para los horizontes de una misma sección, además de la consistencia en el espesor de las unidades para las secciones.

Además se realizó una inspección del número de rampas y despegues asociadas a la fallas de Yopal y Cusiana en sus respectivos bloques colgantes y yacentes, teniendo en cuenta también factores como el paralelismo que existe entre las capas de un bloque colgante y el “*flat*” infrayacente al mismo, los dominios de buzamientos limitados por bisectrices y el paralelismo de las capas. Como ejemplo de ello la figura 30 muestra la línea CU-92-09 completamente balanceada en estado deformado, y también su respectiva restitución cinemática usando el algoritmo “*Fault Parallel Flow*” para comprobar que los saltos de las fallas y los espesores de las unidades son constantes.

Las secciones interpretadas y balanceadas se encuentran en los anexos, en la carpeta adjunta en el CD.

**Figura 30.** Sección CU-92-02 completamente interpretada y balanceada, A) resalta el paralelismo entre el “flat” de la falla de Yopal y las capas suprayacentes mediante los dominios de buzamientos dentro de las bisectrices (líneas rojas), B) expone el paralelismo de las capas en general mediante los dominios de buzamientos dentro de las bisectrices (líneas rojas), y C) muestra la sección completamente restaurada, comprobando que los saltos de las fallas son iguales para todas las unidades afectadas y que estas unidades conservan un mismo espesor a lo largo de la sección. Falla de Cusiana de color azul, falla de Yopal de color rojo y falla de Guaicaramo de color fucsia, Basamento de color morado, Cretácico Superior a Eoceno medio de color amarillo, Carbonera de color ocre, León de color rosa claro y terrazas cuaternarias de color gris, las fallas de menor escala se encuentran de color blanco.



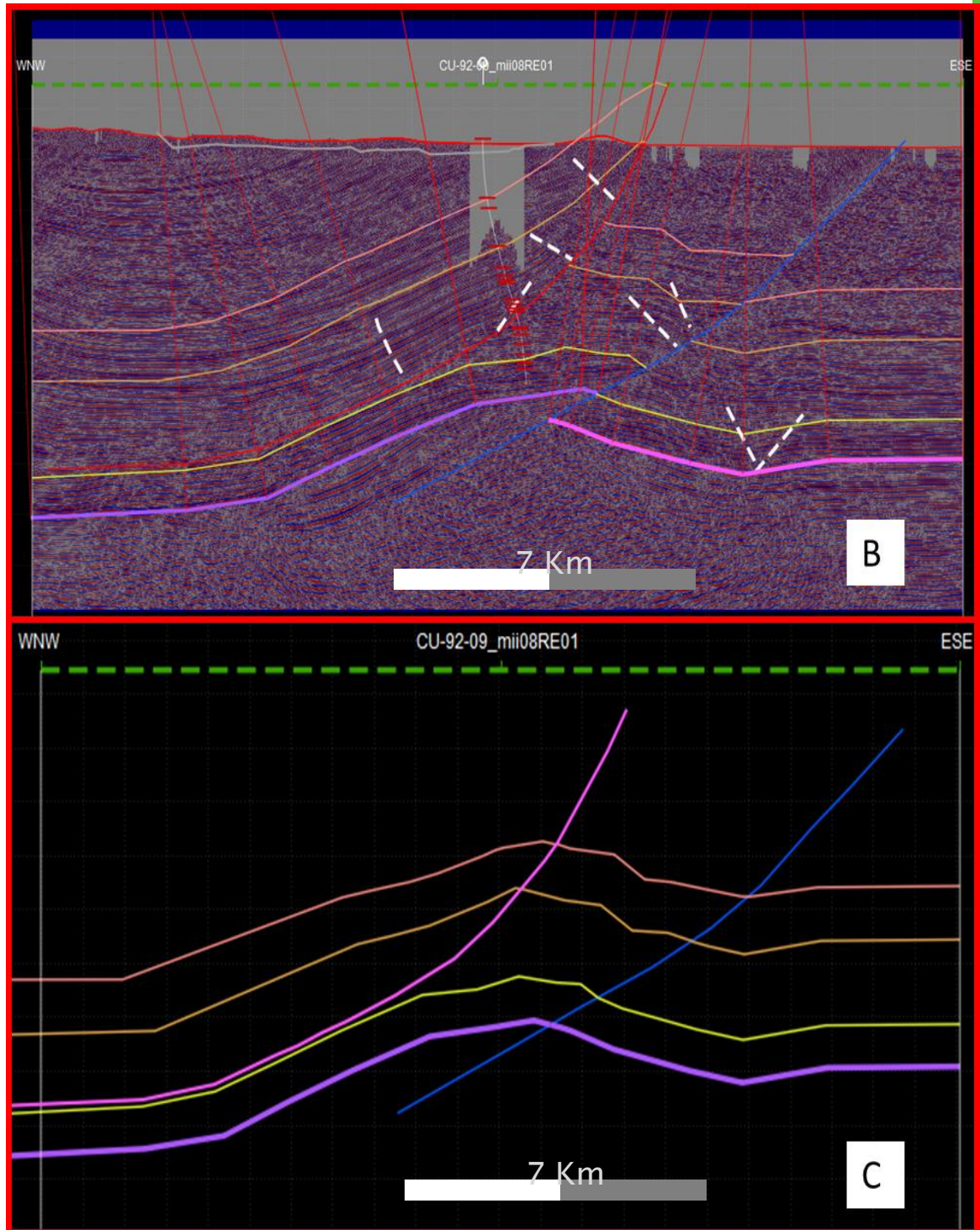
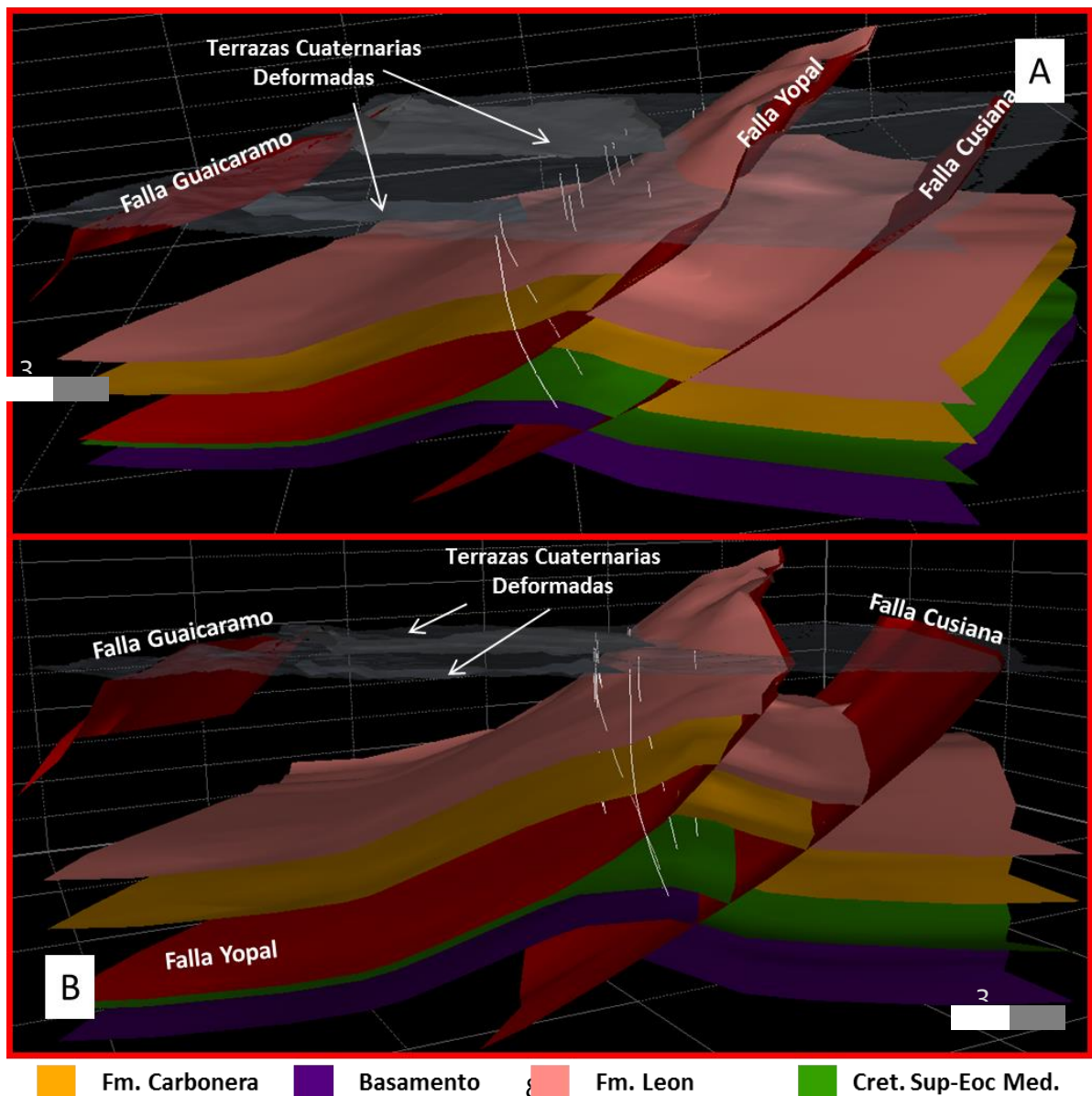


Figura 31. Continuación.

### 7.9. Generación del Modelo 3D

Usando el algoritmo de construcción de superficies 3D el cuál por medio del método de extrapolación de y horizontes creados en 2 dimensiones crea las superficies, se creó una superficie para cada uno de los horizontes principales y fallas principales (explicadas anteriormente), tal como muestra la figura:

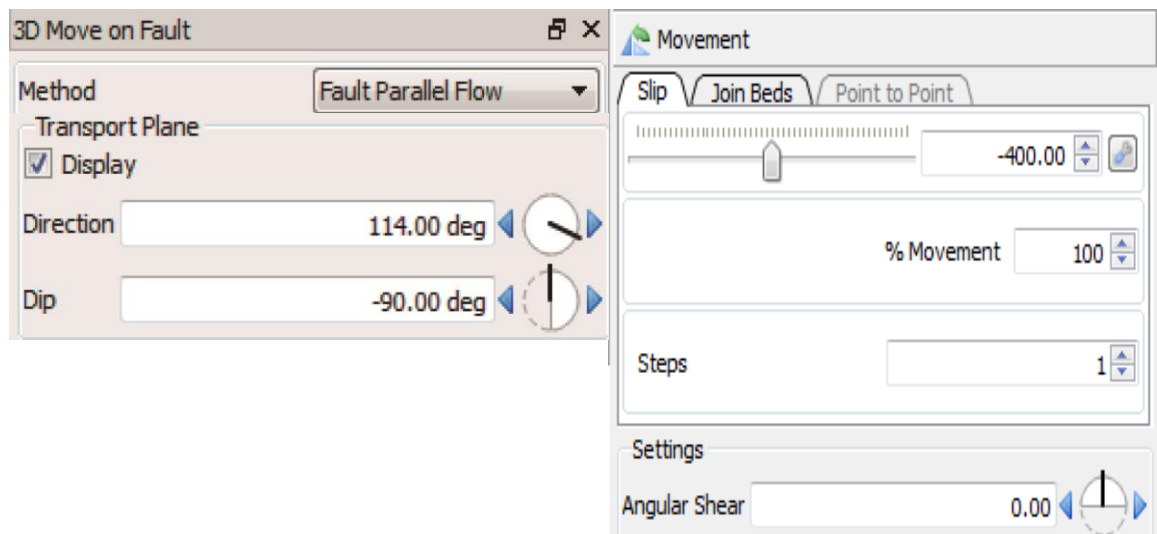
**Figura 32.** Modelo 3D final desde diferentes perspectivas (A) y (B) con el respectivo DTM, las líneas blancas en el modelo representan los pozos que se usaron para es te estudio.



### 7.10. Restitución Cinemática 3D

Sin olvidar el objetivo principal de este estudio, se realizó la restitución cinemática en 3D de las terrazas deformadas (figura 31), y las capas de rocas asociadas hasta conseguir el aplanamiento de la superficie representativa de las terrazas. Para llevar a cabo esta restitución se realizaron diferentes pruebas en la cinemática del movimiento de las fallas Yopal y Cusiana usando los siguientes parámetros:

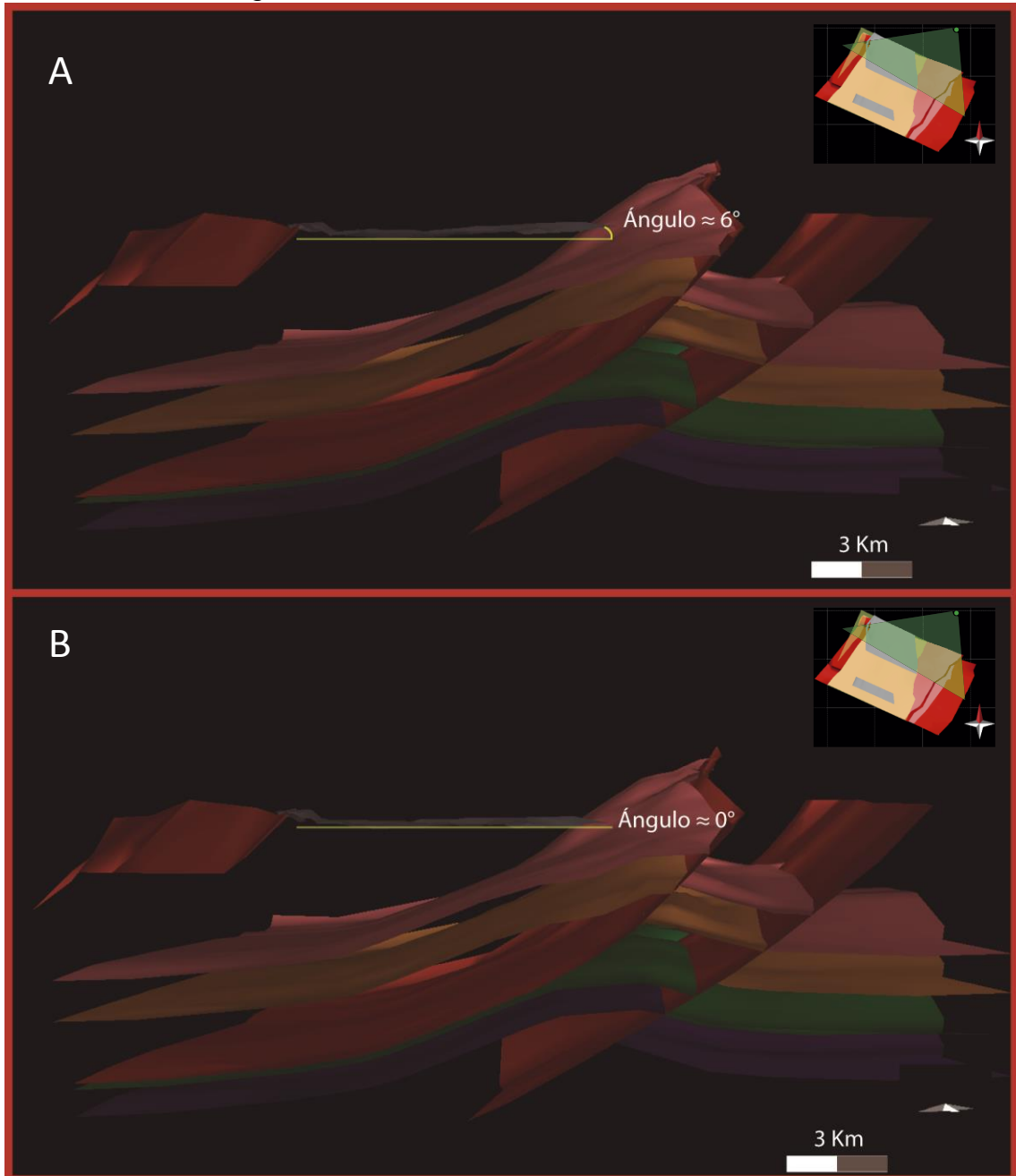
**Figura 33.** Parámetros básicos y generales para la realización de la restitución cinemática en tres dimensiones usando el software Move versión 2013.



Usando el módulo “*Move on Fault*” en 3D en la plataforma Move 2013, por medio del método “*Fault Parallel Flow*” se desplazó la Formación Carbonera, la Formación Mirador, el tramo de la Falla de Guaicaramo y las Terrazas Aluviales hasta lograr el mayor aplanamiento posible de las terrazas, definiendo un plano de movimiento de la falla con dirección S66E, siendo 90° el ángulo vertical de movimiento sobre el plano de las fallas (nota: estos parámetros son necesarios definirlos para el movimiento de las fallas, se hicieron pruebas con diferentes direcciones y ángulos verticales, y la más ajustada ha sido la nombrada previamente). Para este movimiento se asumió una cizalla equivalente a 0 (nula),

ver figura 32. A continuación se muestra la restitución cinemática realizada comparada con el estado sin restituir.

**Figura 34.** Restitución cinemática del modelo 3D, (A) modelo 3D sin restitución, resaltando el ángulo de inclinación de las terrazas, (B) modelo 3D restituído hasta alcanzar un ángulo de inclinación alrededor de  $0^\circ$ , como muestra la línea amarilla, convenciones ver figura 31.



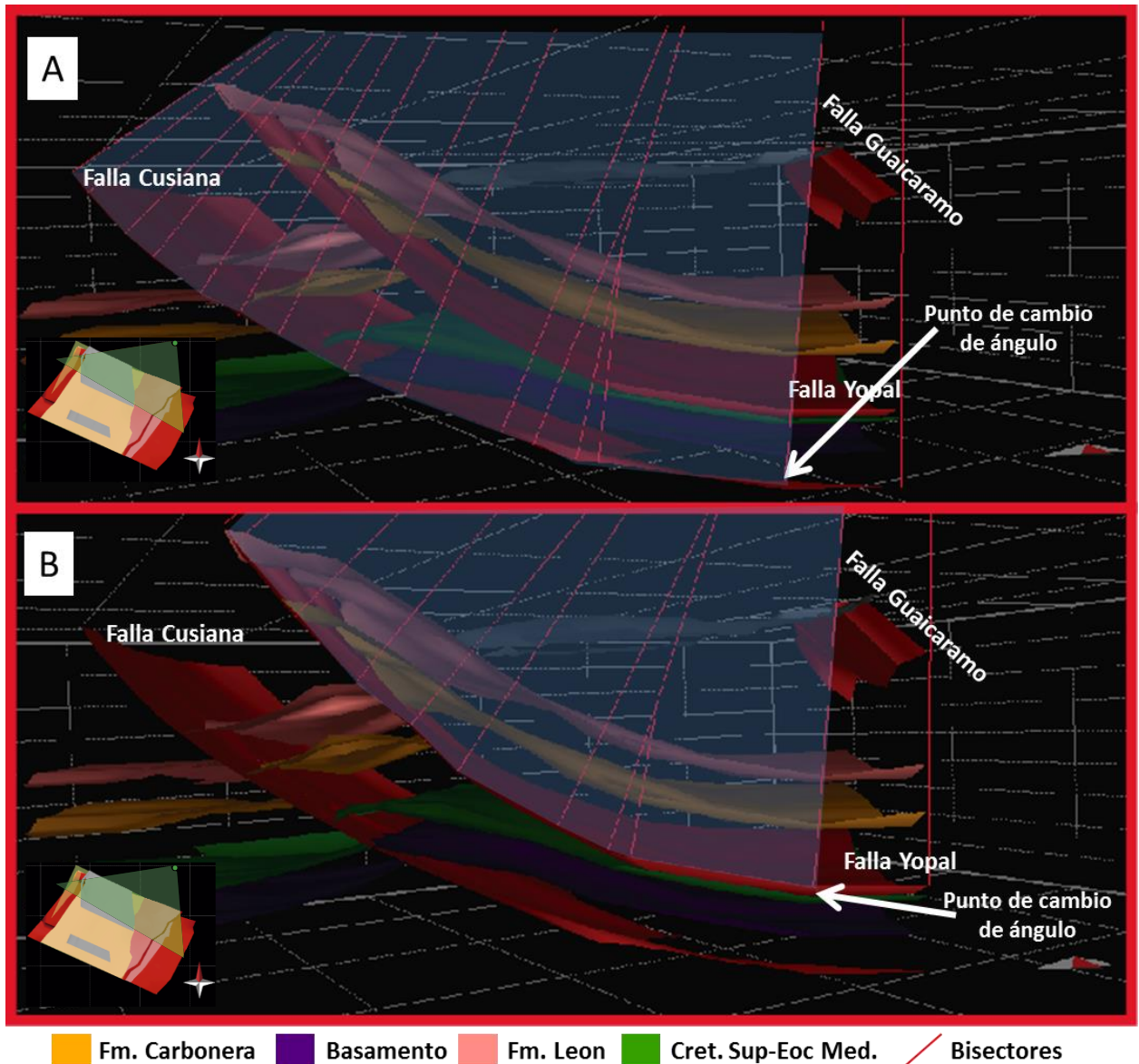
## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.1. . Relación geométrica y tectónica entre fallas Yopal-Cusiana con la creación de terrazas aluviales.

La formación de terrazas aluviales está asociada principalmente a eventos tectónicos, (Pazzaglia, 2010), los cuales implican levantamientos de bloques de roca y permiten la incisión de los ríos (figura 18). Cuando se trata de fallas con despegues como las fallas de Yopal y Cusiana (figuras 7 y 33), las terrazas aluviales se desarrollan en el bloque colgante sobre los segmentos de rampa buzantes. Partiendo de esta premisa se podría determinar si las terrazas aluviales (Tauramena y Monterrey), están o no relacionadas con las fallas de Yopal y de Cusiana.

Geoméricamente la falla de Yopal yace relativamente horizontal sobre las rocas del Oligoceno que se comportan como un despegue (Martínez. 2006; Mora et al 2010 y Jiménez et al. 2013), mientras la falla de Cusiana interpretada como una falla normal invertida (Mora et al. 2011; Jiménez et al. 2013 y Moreno et al. 2013), desarrolla un despegue en la parte más norte del área de estudio, esto es concordante con lo expuesto por Mora, (2011), ver figura 7. Realizando un análisis de bisectrices de las superficies 3D se determinó que las fallas de Cusiana y Yopal están estrechamente asociadas con la formación de las terrazas aluviales del área (figuras 30, 31 y 33), ya que las terrazas se encuentran dentro del dominio de buzamientos creado en el punto en el cual las fallas pasan de ser horizontales a inclinadas (figura 35), esto quiere decir que la deformación de las terrazas de edad Pleistoceno Medio-Tardío, (ICP,2009), es causa de la reciente actividad tectónica (Pleistoceno más tardío) de las fallas de Cusiana y de Yopal.

**Figura 35.** Análisis geométrico de las fallas Cusiana y Yopal mediante los bisectores de las superficies 3D, (A) muestra el punto de cambio de ángulo de la falla de Cusiana y el área de dominio de buzamientos (color azul) a partir de este bisector, (B) expone el punto de cambio de ángulo de la falla de Yopal y el área de dominio de buzamientos (color azul) desde este punto.



## 7.2. . Interacción tectónica entre las fallas Yopal y Cusiana en la depositación de las terrazas aluviales.

Después de realizar este análisis geométrico se concluyó que las terrazas fueron depositadas después del periodo de movimiento inicial de las fallas de Cusiana y de Yopal y luego fueron nuevamente plegadas. Según ICP, (2009) la edad de los horizontes más superiores datados dentro de la formación Guayabo es aproximadamente 2 Ma. Estos horizontes se encuentran plegados y con un ángulo de buzamiento mayor que el de las terrazas. Puesto que las terrazas aluviales se depositaron hace aproximadamente 0.2 Ma, estas relaciones indican que después de 2 millones de años y antes de 200 mil años las fallas de Cusiana y Yopal tuvieron un periodo de actividad tectónica que implicó la deformación de las unidades depositadas, incluyendo la formación Guayabo.

Sin embargo en lo mencionado anteriormente, las terrazas aluviales dentro del área de estudio se encuentran deformadas, argumentando la existencia de un periodo de actividad tectónica a lo largo de las fallas de Cusiana y Yopal después de 0.2 Ma. Este estudio concluye probables periodos de intermitencia en las fallas de Cusiana y de Yopal, en los cuales luego de un periodo de actividad tectónica, las fallas permanecen inactivas hasta un nuevo periodo de actividad, ya que la deformación y el levantamiento a lo largo del Piedemonte Llanero Colombiano está actualmente activo de manera periódica (Cooper et al. 1995), y la deformación presente en las terrazas aluviales de la zona no es de altas magnitudes.

### 7.3. . Modelos Cinemáticos de la evolución en el Pleistoceno tardío de las fallas Yopal y Cusiana en el área de estudio.

Como se expresó anteriormente para conocer la cinemática de las fallas de Yopal y Cusiana a lo largo del Pleistoceno al reciente (edad deposicional de las terrazas según ICP, 2009), se realizaron restituciones de prueba usando los parámetros descritos en la figura 32; hasta conseguir el mayor aplanamiento de las terrazas, por consiguiente modelos que se ajustan son:

#### 7.3.1. Movimiento simultáneo de las fallas Yopal y Cusiana:

Se asumió un movimiento simultáneo de las fallas, debido a su relación con la depositación de las terrazas (ver figura 34) Usando el módulo de movimiento de falla en 3D de Move 2013, se movió de manera coetánea las fallas de Yopal y de Cusiana con desplazamientos similares y/o equivalentes intentando conseguir el aplanamiento de las terrazas. Seguido de realizar las pruebas con los parámetros expuestos en la figura 32 se obtuvo un modelo que se ajusta a lo que se busca, en el cuál las fallas actúan de manera simultánea y tienen un desplazamiento equivalente a 200 metros.

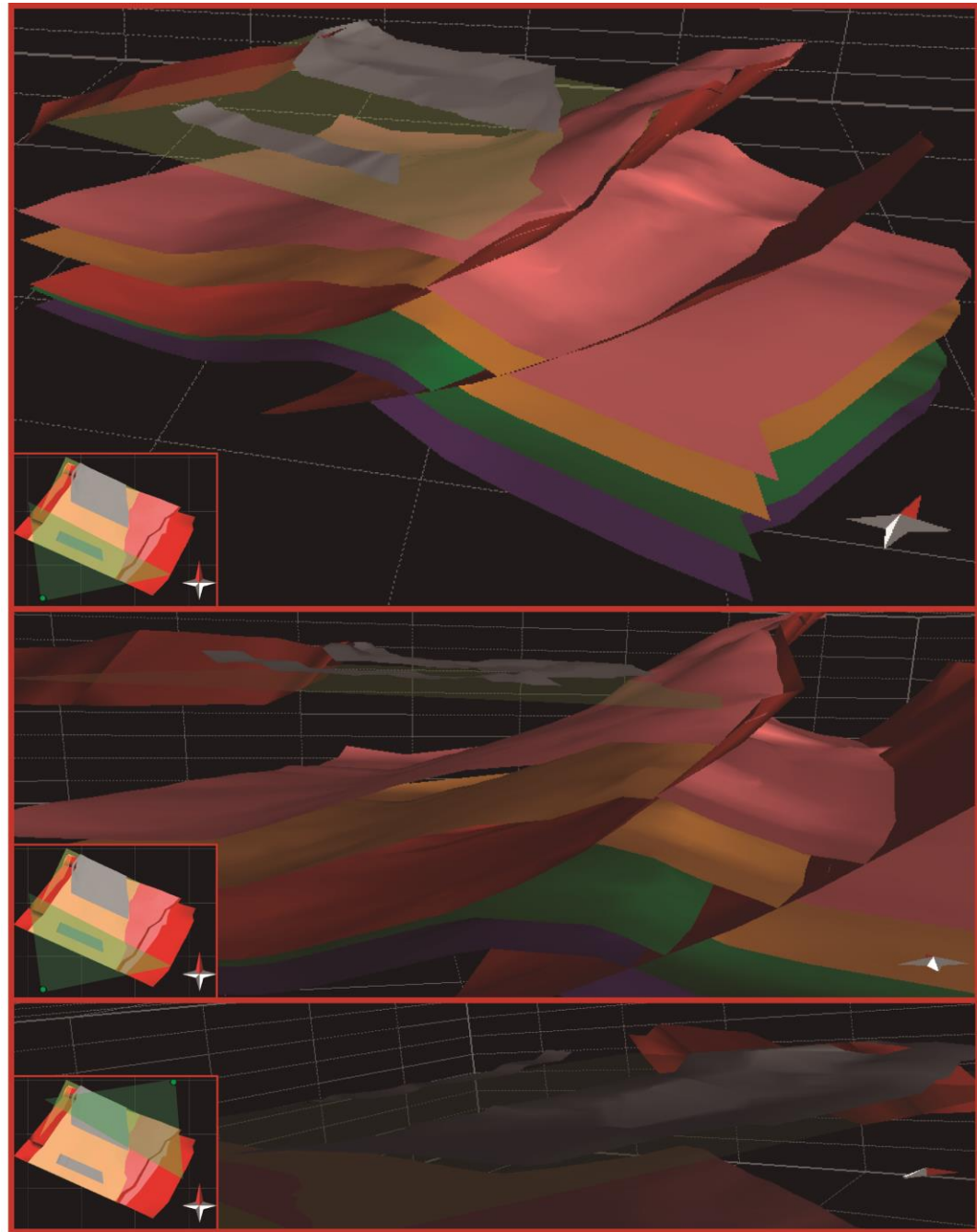
Por lo tanto se interpreta que las fallas de Cusiana y Yopal en el área de estudio causaron 200 metros de desplazamiento en sus respectivos bloques (colgante y yacente) desde el Pleistoceno-tardío, deformando así las terrazas aluviales que para ese momento se habían depositado (ICP, 2009). Cambiando su contexto de sedimentos post-cinemáticos a sedimentos syn-cinemáticos. El desplazamiento promedio obtenido de las fallas de Cusiana y Yopal en este estudio es de 1259.1022 (Cusiana) y 3077.90556 (Yopal), aproximadamente, y en este modelo las fallas sólo causan 200 metros de desplazamiento lo que quiere decir que estas fallas estuvieron activas desde el Pleistoceno tardío, y según Cooper et al, (1995), Martínez, (2006); Delgado, (2013) y Mora et al, (2013), este margen aún sigue



activo, incluyendo su actividad desde hace menos de 2 Ma aproximadamente (ICP, 2009).

La siguiente figura muestra el modelo 3D de las figuras 33 y 34 restituído con los parámetros descritos en la figura 32 asumiendo que las fallas de Yopal y Cusiana fueron activas al mismo tiempo:

**Figura 36.** Restitución cinemática del modelo 3D asumiendo las fallas de Cusiana y Yopal con movimientos simultáneos visto desde diferentes ángulos, donde se observa un aplanamiento de las terrazas con respecto a un plano de referencia.



Fm. Carbonera
  Basamento
  Fm. Leon
  Cret. Sup-Eoc Med.
  Plano de referencia



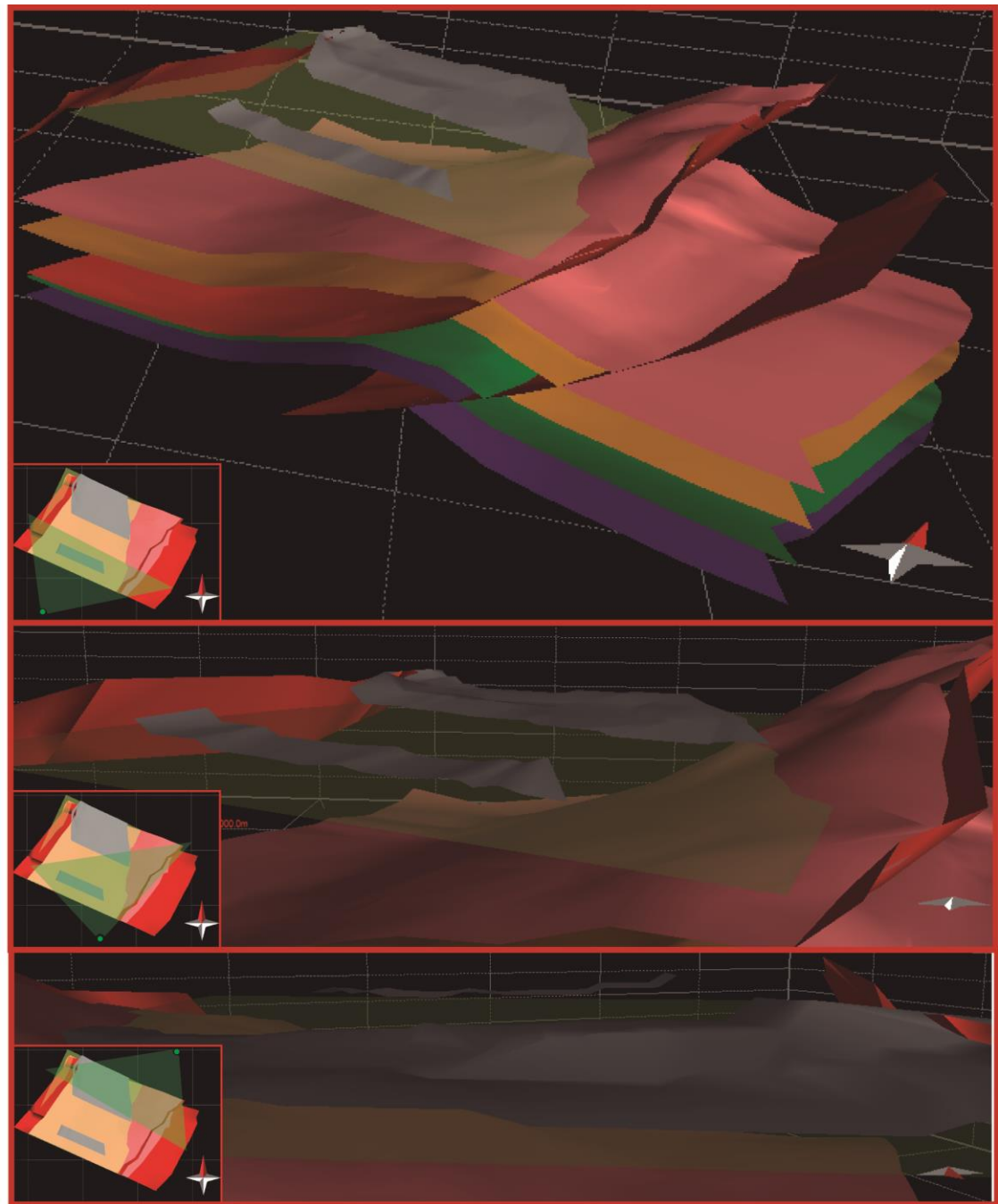
### 7.3.2. **Movimiento único de la falla de Yopal con movimiento nulo de la falla de Cusiana:**

Debido a que las terrazas se encuentran localizadas sobre el bloque colgante de la falla de Yopal se asume aquí este escenario, suponiendo que la falla de Cusiana tiene un movimiento nulo, mientras la falla de Yopal genera un desplazamiento de los bloques equivalente a 350 metros.

Por consiguiente con base en este modelo y en los estudios internos del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), se interpreta que desde el Gelasiano las fallas de Cusiana y de Yopal deformaron las secuencias rocosas de edades Paleozoicas a Cenozoicas (ver figuras 30, 31, 3 y 34), pero aproximadamente desde el Pleistoceno tardío la falla de Cusiana no siguió causando deformación, por el contrario la falla de Yopal causó movimiento aproximado a los 350 metros.

Este modelo implica también un cambio en el régimen de depositación en donde los sedimentos pasan de post-cinemáticos se convierten en pre-cinemáticos justo antes de la deformación, la figura 37 muestra el modelo 3D restituído que más se ajusta:

**Figura 37.** Restitución cinemática del modelo 3D con movimiento únicamente en la falla de Yopal visto desde diferentes ángulos, donde se observa un aplanamiento de las terrazas con respecto a un plano de referencia.



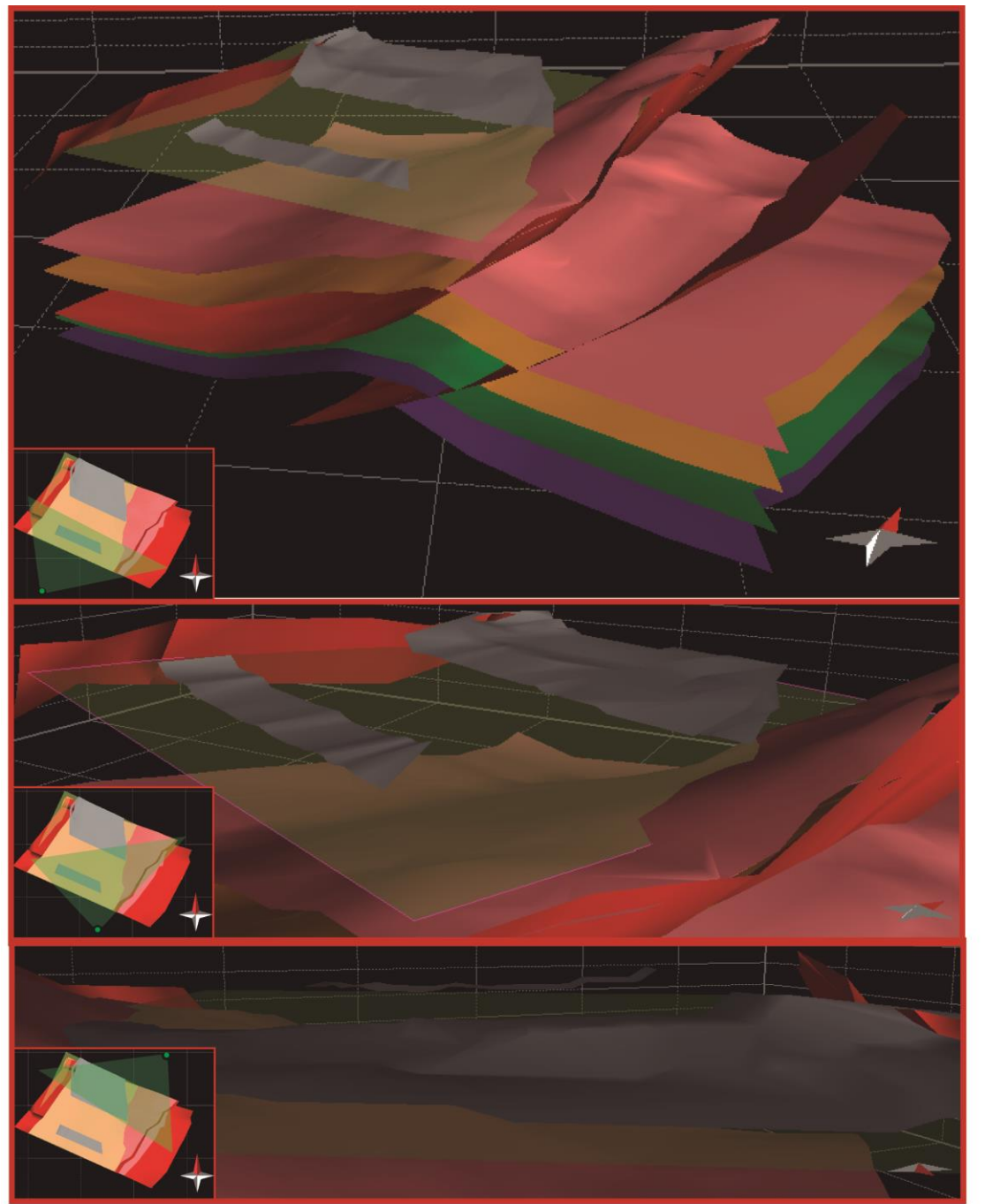


### 7.3.3. Previo movimiento de la falla de Yopal con posterior movimiento en la falla de Cusiana

Finalmente se estableció este modelo donde la falla de Cusiana y Yopal generan movimiento, pero no de manera simultánea. Se realizaron diferentes pruebas con diferentes magnitudes de movimiento hasta conseguir un modelo que se cumpla las expectativas de este estudio, el mayor aplanamiento de las terrazas, se obtuvo finalmente un modelo en el cual justo después de los últimos  $\approx 0.19$  Ma la falla de Yopal causa un movimiento equivalente a 200 metros, seguido por un movimiento en la falla de Cusiana con un valor de 100 metros.

Con base a los estudios previos del área, donde Jiménez et al, (2013) interpretan la falla de Yopal como un escape frontal de la falla de Guaicaramo y Quintero, (2010) reconoce un movimiento de la falla de Guaicaramo durante el Plioceno, se asumió para este modelo un movimiento previo de la falla de Yopal como el escape frontal del movimiento del Plioceno de la falla de Guaicaramo, con un posterior movimiento de la falla de Cusiana. De esta manera se obtuvo el siguiente modelo:

**Figura 38.** Restitución cinemática del modelo 3D con movimiento inicial de la falla Yopal con posterior movimiento de la falla de Cusiana visto desde diferentes ángulos, donde se observa un aplanamiento de las terrazas con respecto a un plano de referencia.



Fm. Carbonera
  Basamento
  Fm. Leon
  Cret. Sup-Eoc Med.
  Plano de referencia

## 8. CONCLUSIONES

- Se recopilieron 24 líneas sísmicas a lo largo del área de estudio, de las cuales fueron descartadas 13 debido a su orientación, longitud, localización y calidad de imagen.
- Se recopiló datos de 14 pozos dentro del área de estudio, de los cuales 2 de ellos contaban con Chekchots y los demás únicamente con Perfiles Sísmicos Verticales (VSP), los cuales fueron usados para calcular velocidades de intervalo de las capas rocosas encontradas allí, y esta incrementa su magnitud con la profundidad y parece ser constante a lo largo del área de estudio.
- Los horizontes de interés se definieron estratégicamente, ya que son de fácil identificación en las líneas sísmicas, por los cambios de impedancia presentes en los contactos geológicos representados por los reflectores sísmicos.
- Los depósitos aluviales de las terrazas del área de estudio se depositaron luego de un periodo de movimiento de las fallas de Yopal y de Cusiana y por lo tanto son inicialmente sedimentos post-cinemáticos.
- La interacción mecánica y tectónica entre las fallas de Yopal y de Cusiana es intermitente, con momentos de inactividad, causando cambios en los contextos de depositación de las terrazas aluviales del área, pasando de sedimentos post- a pre-cinemáticos, los cuales se convierten en cambios cíclicos durante cada período de movimiento.



- Los últimos pulsos de movimiento de las fallas de Yopal y Cusiana son causa de la deformación de las terrazas aluviales del área de estudio, las cuales se han levantado con respecto al nivel base desde el Pleistoceno tardío.
- El movimiento de las fallas de Cusiana y de Yopal es evidente analizando la geometría de las terrazas aluviales del área de estudio ya que se encuentran deformadas y levantadas con respecto al nivel base.
- La erosión de los estratos superiores de la formación Guayabo, León y Carbonera en el área de estudio está asociada al levantamiento de los bloques colgantes de las fallas Cusiana y Yopal que ha ocurrido desde el Gelasiano y se encuentra actualmente activa.
- Los 3 modelos planteados son soluciones válidas para explicar la evidente deformación de las terrazas aluviales en el área de estudio, se necesitan estudios con más información para poder aceptar y/o plantear una única solución.
- Las terrazas aluviales del área de estudio durante este periodo de tiempo se comportan como sedimentos post-cinemáticos y ya que la tectónica de las fallas de Yopal y de Cusiana sigue activa de manera intermitente, en un nuevo movimiento de estas estructuras las terrazas continuarán su deformación.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

ALLMENDINGER, R. W., ZAPATA, T., MANCEDA, R., Y DZELALIJA, F. Trishear Kinematic Modeling of Structures, with Examples from the Neuquen Basin, Argentina. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, OK, 2004. Memoirs, 82, 356-371.

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (ANH). Integreación Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos, Cuenca de Llanos Orientales Colombianos. 2012.

BONNET, C., MALAVIEILLE, J., Y MOSAR, J., Interactions between tectonics, erosion, and sedimentation during the recent evolution of the Alpine orogen: Analogue modeling insights. Tectonics. 2007, v26

CEDIEL, F., El Grupo Girón, una molasa Mezosoica de la Cordillera Oriental. Boletín Geológico, 1968 v. XVI, pp.5-96

COLLETA, B., HEBRARD, F., LETOUZEY, J., WERNER, P., AND RUDKIWEICZ, J. L., Tectonic style and crustal structure of the Eastern Cordillera, Colombia from a balanced cross section, in Letouzey.. Petroleum and Tectonics in Mobile Belts, Paris, Editions Technip, 1990 p. 81-100.

COOPER, M. A, ADDISON, F. T., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R. H., HAYWARD, A. B., HOWE, S., MARTÍNEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHMA, J., Y TABORDA, A., Basin development and tectonic history of the llanos Basin, Eastern cordillera, and MMV, Colombia. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1995, v. 79, no. 10, p. 1421-1443.



DAHLSTROM, C. Balanced cross section. Canadian Journal of Earth Sciences. Revue Canadienne des Sciences de la Terre, 1969, v. 6, p. 743-757.

DELGADO, A., MORA, A. Y HARKER, A. Deformation partitioning in the Llanos Foreland basin during the Cenozoic and its correlation with deformation, uplift and surface processes in the hinterland. Journal of South American Earth Sciences, 2012, v. 39. 228-244.

•DENGO, C. A., Y COVEY, M. C., Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: implication for trap styles and regional tectonics, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1993, v. 77, p. 1315-1337.

DORADO-GALINDO, J., Contribución al Conocimiento de la Estratigrafía de la Formación rechas de Buenavista (Límite Jurásico-Cretácico). Región Noroeste de Villavicencio, Meta. Geología Colombiana, 1990, v. 17, pp. 7-39.

DUEÑAS, H., Y VAN DER HAMMEN, T., Significado geológico y asociaciones palinológicas de las formaciones Diablo Inferior (Mioceno Tardío) y San Fernando Superior (Mioceno Medio), Piedemonte cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. Ciencias de la tierra, 2007, v. XXXI (121).

GAWTHORPE, R., Y LEEDERT, M.,. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins. Basin Research, 2012, v. (12), pp.195-218.

HERMESTON, S., Y NEMCOK, M., Thick-skin orogen – foreland interactions and their controlling factors, Northern Andes of Colombia. Geological Society, London, Special Publications Online First, 2013.



HERRON, D. A., First Steps in Seismic Interpretation. 16th ed. United States of America, Society of Exploration Geophysicists, 2011.

HETTNER, Die Kordillere von Bogotá-Ergänzungsheft, 1982.

HUBACH, E., Exploración en la región de Apulo, San Antonio-Viotá. Bol. Min. Petr, 1931, pp. 41-60.

HUBACH, E., Contribución a las unidades estratigráficas de Colombia. Inst. Geología Nacional, 1957, Informe 121:166.

ICP-Reportes internos, Reporte final Proyecto Cronología de la Deformación en las Cuencas Subandinas. 2009, Piedecuesta.

JIMENEZ, L., MORA, A., CASALLAS, W., SILVA A., TESÓN, E., TAMARA, J., NAMSON, J., HIGUERA-DÍAZ, I. C., LASSO, A., Y STOCKLI, D., Segmentation and growth of foothill thrust-belts adjacent to inverted grabens: the case of the Colombian Llanos foothills. Geological Society London, Special Publications, first published July 11, 2013; doi 10.1144/SP377.11.

JULIVERT, M., Lexique Stratigraphique International, Amerique Latine, 1968, Pp. 651.

MALAVIEILLE, J., Impact of erosion, sedimentation, and structural heritage on the structure and kinematics of orogenic wedges: Analog models and case studies. GSA Today. 2010, v, 20 (1), pp.4-10.



Martínez, J., Structural evolution of the Llanos foothills, Eastern Cordillera, Colombia, *Journal of South American Earth Sciences*, 2006, v. 21, no. 4, p. 510-520.

MCQUARRIE, N., y DECELLES, P. Geometry and structural evolution of the central Andean Backthrust Belt, Bolivia. *Tectonics*, 2001, v. 20, p. 669–692.

MORA, A., M. PARRA, M. R. STRECKER, A. KAMMER, C. DIMATÉ, AND F. RODRIGUEZ, Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the eastern Cordillera of Colombia, *Tectonics*, 2006, v. 25, p. TC2010, doi:10.1029/2005TC001854.

MORA, A., Y M. PARRA, The structural style of footwall shortcuts along the eastern foothills of the Colombian eastern Cordillera: Differences with other inversion- related structures, *Revista Ciencia Tecnologia & Futuro*, 1407, 2008, v. 3, p. 7–21.

MORA, A., GAONA, T., KLEY, J., MONTOYA, D., PARRA, M., QUIROZ, L.I., REYES, G., Y STRECKERN, M.R., The role of inherited extensional fault segmentation and linkage in contractional orogenesis: a reconstruction of Lower Cretaceous inverted rift basins in the Eastern Cordillera of Colombia. *Basin Research*. 2009, v. 21, p. 111-137.

MORA, A., HORTON, B., MESA, A., RUBIANO, J., KETCHAM, R., PARRA, M., BLANCO, V., GARCÍA, D., Y STOCKLI, D., Migration of Cenozoic deformation in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: Implications for petroleum systems. *Geological Society, London*. 10, 2010, v. (10), pp.1543-1580.



MORA, A., Reporte interno ICP-Ecopetrol para el proyecto de Crudos Pesados de la Cuenca de los Llanos Orientales Colombianos, 2011.

MORA, A., REYES-HARKER, A., RODRÍGUEZ, G., TESÓN, E., RAMÍREZ-ARIAS, J., PARRA, M., CABALLERO, V., MORA, J. P., QUINTERO, I., VALENCIA, V., IBAÑEZ, M., HORTON, B., Y STOCKLI, D., Inversion tectonics under increasing rates of shortening and sedimentation: Cenozoic example from the Eastern Cordillera of Colombia. Geological Society, London, 2013.

MORENO, N., SILVA, A., MORA, A., TESÓN, E., QUINTERO, I., ROJAS, L.E., LÓPEZ, C., BLANCO, V., STOCKLI, D., Y CASALLAS, W., Interaction between thin- and thick-skinned tectonics in the foothill areas of an inverted graben. The Middle Magdalena Foothill belt. Geological Society, London, Special Publications Online First, 2013.

MORENO, G., TERRAZA, R., Y MONTOYA, D., GEOLOGÍA DEL CINTURÓN ESMERALDÍFERO ORIENTAL (CEOR). Boletín Geológico. 2009, v. 31 (2).

NOTESTEIN, F. B., HUBMAN, C. W., Y BOWLER, J. W., Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. Bull., Geolog. Soc. America, 1946 v. 55, pp. 1162-1215.

PARRA, M., MORA, A., JARAMILLO, C., STREECKER, M. R., SOBEL, E. R., QUIROZ, L., RUEDA, M., Y TORRES, V., Orogenic wedge advance in the northern Andes: Evidence from the Oligocene-Miocene sedimentary record of the Medina Basin, Eastern Cordillera, Colombia. Geological Society of America Bulletin, 2009.



PARRA, M., MORA, A., LÓPEZ, C., ROJAS, L. E., Y HORTON, B. K.,  
Detecting earliest shortening and deformation advance in thrust belt  
hinterlands: Example from the Colombian Andes. Geological Society of  
America Bulletin. 2012 v. 2, p.175-178.

PAZZAGLIA, F. J., Fluvial Terraces. Lehigh University, Department of Earth  
and Environmental Sciences. 2010, p. 9-23.

PRÖSSL, K. F., Y GRÖSSER, J. R., Some new Palynomorphs from the  
Silurian of the Quetame Massif, Cordillera Oriental, Colombia, South America.  
Boletín de Geología, v. 34.

PULIDO, G., GÓMEZ, S., Geología de la Plancha 266-Villaviencio. Ingeominas,  
Bogotá, 1997.

RAMÍREZ-ARIAS, J. C., MORA, A., RUBIANO, J., DUDDY, I., PARRA, M.,  
MORENO, N., STOCKLI, D., Y CASALLAS, W., The asymmetric evolution of  
the Colombian Eastern Cordillera. Tectonic inheritance or climatic forcing? New  
evidence from thermochronology and sedimentology. Journal of South  
American Earth Sciences. 2012, v. 39, p.112-138.

RENZONI, G., Apuntes acerca de la litología y tectónica de la zona al este y  
sureste de Bogotá. Boletín Geológico, Bogotá, 1962 v. 10, p. 59-79.

RENZONI, G., Geología del Macizo de Quetame. Geología Colombiana. 1962,  
p. 75-127.



RENZONI, G., Geología del cuadrángulo J-12 Tunja. Boletín Geológico. 1981, v. 24 (2), p.31-48.

SARMIENTO, G., Estratigrafía y medios de depósito de la Formación Guaduas. Boletín Geológico. 1992 v. 31(1), pp. 3-44.

SHAW, J. H., BILOTTI, F. Y BRENNAN, P. A. Patterns of imbricate thrusting. Geological Society of America Bulletin, 1999 v. 111, p. 1140–1154.

SILVA, A., Cinemática De La Deformación Frágil En El Área De Medina (Cordillera Oriental, Colombia); Relación De Temporalidad Entre La Deformación Frágil y Los Sistemas Petrolíferos. Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander. 2010.

SUPPE, J., Geometry and kinematics of fault-bend folding: American Journal of Science, 1983, v. 283, p. 684–721.

TESÓN, E., MORA, A., SILVA, A., NAMSON, J., TEIXELL., A., CASTELLANOS, J., CASALLAS, W., JULIVERT, M., TAYLOR, M., IBAÑEZ-MEJÍA, M., Y VALENCIA, V. A. Geological Society, London, Special Publications Online First Relationship of Mesozoic graben development, stress, shortening magnitude and structural style in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes Relationship of Mesozoic graben development. Geological Society, London, 2013.

ULLOA C., Y RODRÍGUEZ, E, Geología del Cuadrángulo K13-Tauramena. Boletín Geológico, INGEOMINAS, 1976, v. XXII, p. 3-56.



VAN DER HAMMEN, T., Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiano continentales y tectogénesis de los Andes Colombianos. Servicio Geológico Nacional, Bogotá, Informe 1279, 1960, pp. 73-126.

WILKERSON, M., & DICKEN, C, Quick-look techniques for evaluating two-dimensional cross sections in contractional settings. AAPG Bulletin, 2001, v. 85, N°10, pp. 1759-1770.