



**MODELADO ESTRUCTURAL DEL PIEDEMONTES LLANERO Y FOREDEEP  
ADYACENTE EN EL SECTOR VILLAVICENCIO-ACACIAS (COLOMBIA):  
IMPLICACIONES EXPLORATORIAS**

**CARLOS ANDRÉS BECERRA BAYONA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2016**



**MODELADO ESTRUCTURAL DEL PIEDEMONTES LLANERO Y FOREDEEP  
ADYACENTE EN EL SECTOR VILLAVICENCIO-ACACIAS (COLOMBIA):  
IMPLICACIONES EXPLORATORIAS**

**CARLOS ANDRÉS BECERRA BAYONA**

**Proyecto de grado en la modalidad Investigación para optar al título de  
Geólogo**

**Director:**

**ANDRÉS ROBERTO MORA BOHÓRQUEZ**

**PhD en Geología**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2016**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. LOCALIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO	18
3. MARCO TEORICO	20
3.1 EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS EN ZONAS CON ALTA COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL	20
3.2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	21
3.3 TÉCNICAS DE CONVERSIÓN T/D	27
3.4 TÉCNICAS BALANCEO Y RESTITUCIÓN	32
4. METODOLOGIA	35
4.1 ETAPA 1: CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA ACTUAL	35
4.2 ETAPA 2: RETRODERMACIÓN A DIFERENTES TIEMPOS	37
4.3 ETAPA 3: ANÁLISIS DE DATOS GENERADOS	38
5. RESULTADOS	39
5.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRIA DE LA ESTRUCTURA ACTUAL EN EL SECTOR DE PIEDEMONTE	39
5.1.1 Estructura en el dominio tiempo para el sector del Piedemonte	40

5.1.2 Estructura en el dominio Profundidad para el sector del Piedemonte	44
5.2 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRIA DE LA ESTRUCTURA ACTUAL EN EL FOREDEEP	52
5.2.1 Geometría en el dominio tiempo para el sector del Foredeep adyacente	54
5.2.2 Estructura en el dominio Profundidad para el sector de la Cuenca	56
5.3 INTEGRACIÓN GEOMETRIA EN PIEDEMONTE Y CUENCA DEL DOMINIO FOREDEEP	61
5.4 RESTITUCIÓN CINEMATICA	63
5.4.1 Retrodeformación de la sección CHRVB-105	63
5.4.2 Restitución cinemática de la estructura 3D en el foredeep	68
6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	70
6.1 OBSERVACIONES SOBRE LA ESTRUCTURA EN PROFUNDIDAD DEL MODELO GENERADO	70
6.2 EVALUACIÓN DE LA PROSPECTIVIDAD DE LAS ESTRUCTURAS MÁS PROXIMALES AL PIEDEMONTE EN EL DOMINIO FOREDEEP	74
6.2.1 Reservoirio	74
6.2.2 Trampa	76
6.2.3 Carga de Petróleo	77
6.2.3 Retención después de la acumulación	81
7. CONCLUSIONES	84
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	86
BIBLIOGRAFÍA	96
ANEXOS	106

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización del área de estudio ilustrando (a) el cinturón plegado y fallado andino tipo retroarco y el sistema de cuencas de antepaís asociado, (b) corte esquemático a nivel regional, (c) sección esquemática indicando depocentros y d) mapa geológico de la zona de estudio incluyendo orientación de algunas de las líneas sísmicas a utilizarse y fallas principales: Falla de Naranjal (FN), Falla de Servita (FS), Falla de Mirador (FM) y Falla de Villavicencio (FV).....	19
Figura 2. Mapa de Provincias y Terrenos geológicos de Colombia según el Servicio Geológico Colombiano (2015), en donde se localiza el área de interés del presente estudio, mediante la georeferenciación de las líneas sísmicas a ser interpretadas.....	23
Figura 3. Estratigrafía generalizada para la Cordillera Oriental, el piedemonte y la cuenca Llanos .....	27
Figura 4. Esquema ilustrando el concepto de trazado de rayo imagen, en donde se relaciona la geometría de un reflector en los dominios tiempo y profundidad simultáneamente.....	29
Figura 5. Esquema ilustrando el proceso de conversión de información del dominio tiempo a profundidad mediante el trazado de rayo imagen, desde la construcción del (a) modelo de bloques, (b) modelo de velocidades en tiempo, (c) grilla inicial de transformación, (d) función de transformación corregida y de la (e) sección final resultante. ....	31
Figura 6. Cuatro modos principales de deformación en métodos de restauración estructural. ....	33

Figura 7. Esquema ilustrando la construcción del modelo en profundidad 3D, integrando información en el sector deformado del Piedemonte oriental de Cordillera Oriental y de la Cuenca Llanos. ....37

Figura 8. Localización de las cuatro secciones sísmicas del programa Río Blanco (1993) usadas para definir la geometría de la estructura en el dominio tiempo..... 39

Figura 9. (a) Imagen sísmica CHVRB-1993-105, (b) e interpretación inicial asociada, (c) ilustrando zona imbricada entre las fallas Mirador y Villavicencio. ...40

Figura 10 (a) Imagen sísmica CHVRB-1993-04, (b) e interpretación inicial asociada. ....42

Figura 11. (a) Imagen sísmica CHVRB-1993-102, (b) e interpretación inicial asociada. ....43

Figura 12. (a) Imagen sísmica CHVRB-1993-101, (b) e interpretación inicial asociada. ....44

Figura 13 Información de velocidades del pozo Anaconda-1. ....45

Figura 14. Modelo de velocidad en el dominio tiempo para la sección CHVRB-1993-105. ....45

Figura 15. Trazado de rayo imagen sobre la sección 105 usada para transformar información entre los dominios tiempo y profundidad. ....46

Figura 16. Función de desplazamiento lateral ilustrando desviación de cada punto imagen respecto a su posición vertical en la sección 105. ....47

Figura 17. Sección estructural 105 en estado (superior) deformado y (inferior) no-deformado. ....48

Figura 18. (a) Modelo de velocidad de la sección CHVRB-1993-04 usado para realizar conversión T/D mediante el trazado de rayo imagen en los dominios (b) tiempo, (c) profundidad y (d) función de desplazamiento lateral en profundidad.....49

Figura 19. (a) Modelo de velocidad de la sección CHVRB-1993-102 usado para realizar conversión T/D mediante el trazado de rayo imagen en los

dominios (b) tiempo, (c) profundidad y (d) función de desplazamiento lateral en profundidad.....	50
Figura 20. (a) Modelo de velocidad de la sección CHVRB-1993-101 usado para realizar conversión T/D mediante el trazado de rayo imagen en los dominios (b) tiempo, (c) profundidad y (d) función de desplazamiento lateral en profundidad.....	51
Figura 21. (a) Ilustración de la localización de líneas sísmicas en el Foredeep con (b) mapa geológico proyectado sobre el DEM. Vista desde el Sureste de la zona de estudio.....	53
Figura 22. Interpretación sísmica de la línea V-1980-1236. ....	54
Figura 23. Interpretación sísmica de la línea V-1980-1017. ....	55
Figura 24. Interpretación de la línea sísmica V-1982-6A.....	55
Figura 25. Superficies en el dominio tiempo generadas a partir de horizontes interpretados sobre las secciones sísmicas para las Formaciones (a) León, (b) Mirador, (c) Gacheta y (d) el Basamento. ....	56
Figura 26. Vista desde el (a) Este y (a) Suroeste ilustrando las superficies usadas en la construcción de la grilla 3D. ....	57
Figura 27. Segmento del modelo 3D indicando la configuración de la resolución vertical de la grilla. ....	58
Figura 28 Segmento del modelo de velocidad 3D generado a partir de las superficies interpretadas en tiempo .....	59
Figura 29. Detalle del ajuste entre topes y superficies en profundidad. ....	60
Figura 30. Vista de mapa algunas de las superficies convertidas al dominio profundidad.....	61
Figura 31. Vista desde el Sur de las formaciones (a) León, (b) Mirador, (c) Gacheta, (d) y Basamento y (d) desde el SW de las superficies integradas en el dominio estructural Foredeep.....	62
Figura 32. Compilación de cantidad inferida de material erosionado a través del tiempo (tomado de Mora et al., 2008), ilustrando el incremento en la tasa de exhumación desde el Plioceno. ....	65

Figura 33. Restitución cinemática a diferentes pasos de tiempo de la sección 105. ....	66
Figura 34. Modelo en profundidad en diferentes estados de deformación en función del tiempo.....	69
Figura 35. Comparación de la sección estructural en el dominio profundidad obtenida por (Superior) Chevron en 1996 y (inferior) este trabajo.....	71
Figura 36. Vista en planta y 3D desde el norte en el dominio profundidad, al Tope de la unidad operativa T2, equivalente a las Formación Mirador. ....	72
Figura 37. Vista en planta y 3D desde el norte en el dominio profundidad, al Tope de la unidad operativa K1, equivalente a las Formación Guadalupe. ....	73
Figura 38. Paleogeometría restituida a 25 Ma, al tope de la unidad reservorio K1, ilustrando posibles rutas de migración de hidrocarburos. ....	79
Figura 39. Paleogeometría restituida a 11 Ma, al tope de la unidad reservorio K1, ilustrando posibles rutas de migración de hidrocarburos. ....	80

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Probabilidad de presencia de hidrocarburos a partir de los diferentes factores evaluados para los diferentes prospectos analizados en la zona de estudio.....	82

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. (Izq.) Probabilidades de presencia efectiva de facies reservorio y (der) de existencia de un reservorio de buena calidad. Tomado de CCOP (2000)	106
Anexo B. (Izq.) Probabilidades de presencia efectiva de facies reservorio y (der) de existencia de un reservorio de buena calidad. Tomado de CCOP (2000).	107
Anexo C. Probabilidades de presencia efectiva de facies reservorio y (der) de existencia de un reservorio de buena calidad. Tomado de CCOP (2000)	108
Anexo D, (Izq.) Probabilidades de presencia efectiva de facies reservorio y (der) de existencia de un reservorio de buena calidad. Tomado de CCOP (2000).	109
Anexo E. Parámetros usados en el proceso de de-compactación.	110

## RESUMEN

**TITULO:** MODELADO ESTRUCTURAL DEL PIEDEMONTES LLANERO Y FOREDEEP ADYACENTE EN EL SECTOR VILLAVICENCIO-ACACIAS (COLOMBIA): IMPLICACIONES EXPLORATORIAS\*

**AUTOR:** Carlos Andrés Becerra Bayona\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Interpretación Sísmica, Conversión T/D, Piedemonte, Llanos, Restituciones Cinemáticas.

### CONTENIDO:

Los modelos estructurales son una herramienta importante en las actividades de exploración de recursos energéticos, dado que permiten identificar prospectos y dimensionar el tamaño de reservas potenciales. En zonas que involucran estructuras complejas, como piedemontes y cinturones plegados y fallados, las técnicas tradicionalmente usadas para obtener la geometría de la estructura en profundidad a partir de lo interpretado en tiempo; suelen presentar distorsiones geométricas respecto a las estructuras reales. Este tipo de distorsiones históricamente ha llevado a desastrosos exploratorios muy costosos. En este trabajo se integran técnicas de trazado de rayo imagen y de balanceo de secciones estructurales, para generar secciones con menor incertidumbre en el dominio profundidad. La metodología propuesta es usada para construir la geometría de la estructura del piedemonte Llanero y del foredeep adyacente entre Villavicencio y Acacias. Este proceso ha requerido la construcción de la geometría de la estructura en el dominio tiempo, a partir de la interpretación sísmica de 4 líneas en el Piedemonte y 12 líneas en la cuenca; así como el uso de información de velocidades y topes del Pozo Anaconda-1 y de 7 pozos más localizados en la cuenca. La geometría de la estructura resultante indica la presencia de pliegues anticlinales en el dominio foredeep al nivel de las formaciones de interés. La restitución cinemática de la estructura a estados previos de deformación, ha permitido evaluar posibles rutas de migración de hidrocarburos durante el Oligoceno y el Mioceno medio. Esta información se incorpora en el análisis de los diferentes elementos del sistema petrolífero, la cual ha permitido establecer mejor la prospectividad en las zonas de estudio, sugiriendo además que la presencia de trampa es el factor crítico en este tipo de play estructural. Por lo que la aplicación de la metodología propuesta resulta una herramienta útil en la evaluación del riesgo exploratorio.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Andrés Roberto Mora.

## ABSTRACT

**TITLE:** STRUCTURAL MODELLING OF THE EASTERN FOOTHILLS OF THE EASTERN CORDILLERA AND ITS ADJACENT FOREDEEP IN THE VILLAVICENCIO-ACACIAS AREA (COLOMBIA): EXPLORATORY IMPACTS\*

**AUTHOR:** Carlos Andrés Becerra Bayona\*\*

**KEYWORDS:** Seismic interpretation, T/D Converting, Foothills, Cinematic restitution.

### CONTENT:

Structural models are an instrumental tool during the exploration process. They allow a better definition of prospects and potential resources. In fold and thrust belts and more precisely in Andean foothill settings, traditional techniques for time to depth conversion could generate important distortions compared with the actual structures. This could lead to important exploratory failures. To make better time to depth conversions we integrate image ray tracing depth conversion techniques with structural balancing of geological cross sections. We use this methodology to reconstruct the geometry of the foothills in an area close to Villavicencio and Acacias. During this process 4 time migrated seismic lines (PSTM) in the foothills and 12 in the adjacent Llanos basin has been interpreted. Additionally, velocity and formational tops from the Anaconda exploratory well and 7 additional wells from the Llanos basin has been used. The obtained geometry suggests the presence of anticlinal folds in the deepest parts of the foothills at the level of the reservoir units. The sequential kinematic restoration of the structures allowed to understand possible hydrocarbon migration routes during the Oligocene and mid-Miocene. These information has been used to analyze the petroleum systems and allowed a better definition of prospectivity in the study area, suggesting that trap presence is the critical factor in the structural plays of this region. We demonstrate that the suggested methodology could represent a key tool to reduce exploratory uncertainties and a more precise risk assessment.

---

\* Project of grade

\*\* Faculty of Engineering physicalchemical, School of Geology, Director Andres Roberto Mora

## INTRODUCCIÓN

Los modelos estructurales son una herramienta importante en las actividades de exploración de recursos energéticos, dado que permiten identificar prospectos y dimensionar el tamaño de reservas potenciales. En zonas estructuralmente complejas, como piedemontes y cinturones plegados y fallados las estructuras interpretadas sobre secciones sísmicas en tiempo, suelen presentar distorsiones geométricas respecto a las estructuras reales. Estas distorsiones han sido estudiadas por varios autores, entre ellos: Fagin (1996) y Trincheró (2000) y son comúnmente conocidas como efectos pull-up, pull-down y efectos de sombra de falla. Tales efectos se asocian a alteraciones en del campo de onda a partir del cual se generan las imágenes sísmicas y son causados por cambios súbitos en la velocidad de propagación del medio de estudio. Este tipo de distorsiones históricamente han llevado a desaciertos exploratorios muy costosos. Un ejemplo de ello, para el caso particular de la zona de estudio, localizada en el flanco oriental de la Cordillera Oriental entre Villavicencio y Acacias; se dio en los años noventa, donde Chevron había estimado enormes reservas con base en el modelo estructural propuesto a partir de secciones sísmicas 2D; sin embargo, el pozo Anaconda-1 perforado en 1996 resultó seco y mostró que la geometría de la estructura real era diferente de la que había sido interpretada a partir de imágenes sísmicas en el dominio tiempo.

Este trabajo busca definir con menor incertidumbre la geometría de la estructura en el dominio profundidad, para los niveles de mayor interés exploratorio en el sector del foredeep más proximal al frente deformado. Para ello se propone una metodología en la que se interpretan secciones sísmicas 2D, bajo el precepto de que la geometría en dicho dominio esta distorsionada, luego se usan técnicas de trazado de rayo imagen y de balanceo estructural, para obtener una geometría

más precisa de las estructuras en el dominio profundidad. Operto et al., (2000) ilustran las ventajas del uso del trazado de rayo en la generación de imágenes en zonas complejas; mientras que Iversen y Tygel (2008) explican cómo información en los dominios tiempo migrado y profundidad puede relacionarse a través del concepto de rayo imagen. La incorporación de este tipo de técnica en la metodología propuesta, permite construir secciones estructurales libres de efectos distorsivos; lo que se traduce en resultados más confiables. Los resultados obtenidos en este trabajo permiten analizar modelos previos y realizar inferencias sobre la prospectividad en este tipo de estructuras, las cuales se realizan a partir del análisis de nuevos prospectos identificados en la geometría resultante. La evaluación de dichos prospectos se realiza usando la metodología propuesta por la CCOP (2000) (*The Coordinating Committee for Coastal and Offshore Geoscience Programmes in East and Southeast Asia*), en la cual se cuantifica la probabilidad de existencia de cada uno de los siguientes factores: efectividad del reservorio, de la trampa, del sistema de carga de petróleo y de la retención posterior a la acumulación.

El desarrollo del presente trabajo ha permitido identificar aspectos clave a tener en cuenta durante el análisis de la prospectividad en este tipo de estructuras; el primero se deriva del análisis de los elementos del sistema petrolífero, el cual permitió establecer que es que este tipo de play, la presencia de la trampa es el factor más crítico. El segundo se deriva de las diferencias observadas entre la geometría de las estructuras de interés sobre las secciones sísmicas y su geometría en el dominio profundidad; en general en las imágenes en tiempo suelen presentarse como amplios anticlinales en el sector más proximal al piedemonte en el dominio foredeep, cuando en realidad son pliegues de menor tamaño y que se presentan desplazados decenas de metros hacia el orógeno.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Construcción de la geometría de la estructura en profundidad para el piedemonte llanero y su foredeep adyacente en el sector Villavicencio-Acacias; tal que permita realizar inferencias sobre la prospectividad de este tipo de estructuras con menor incertidumbre.

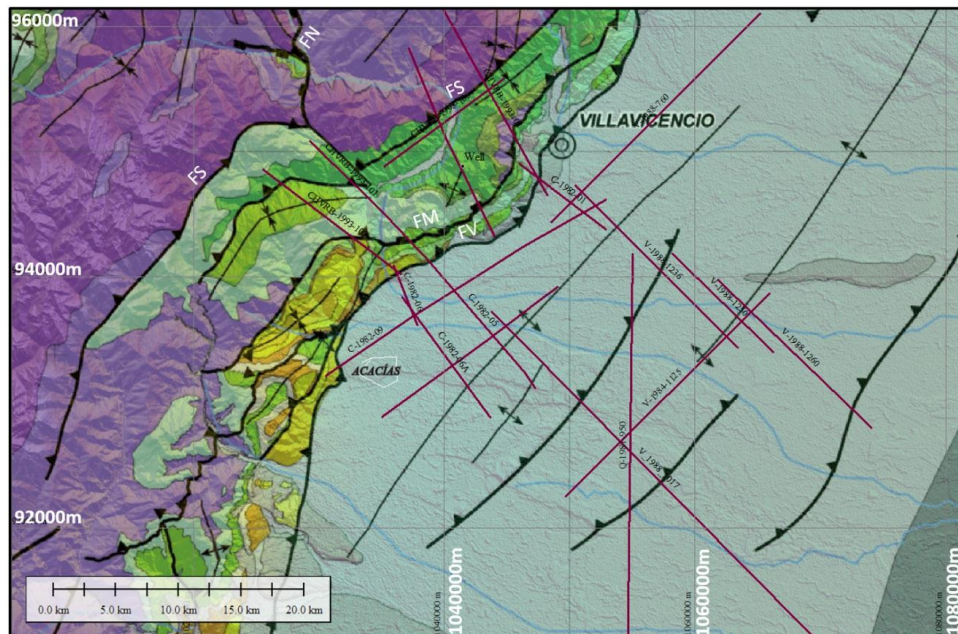
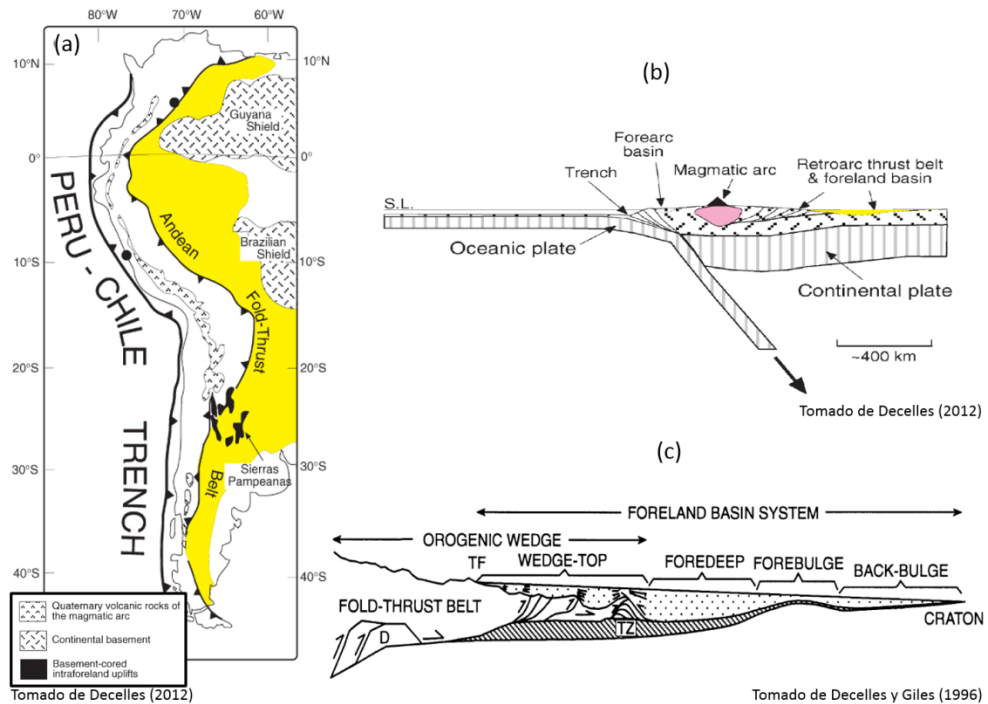
### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Usar información de geología de superficie y datos de pozo en el proceso de construcción de la sección estructural, como control geométrico.
- Emplear secciones sísmicas en sectores donde solo afloran depósitos recientes, tal que pueda establecerse la geometría de la estructura en el dominio tiempo.
- Obtener un modelo estructural 3D en el dominio de la profundidad para el sector del Piedemonte llanero y el sector más proximal de la cuenca Llanos en cercanías a las poblaciones de Villavicencio y Acacias.

## 2. LOCALIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

A nivel regional la zona de estudio hace parte del sistema de cuenca foreland asociada al cinturón plegado tipo retroarco del norte de los Andes (Figuras 1a y 1b); comprendiendo el sector más frontal del frente de deformación y las depozonas *wedge-top* y *foredeep* según definición en DeCelles y Giles (1996) (Figura 1c). La zona de estudio se localiza en el flanco oriental de la Cordillera Oriental de Colombia, en cercanías al Macizo de Quetame, entre Villavicencio y Acacias (Figura 1d). Dos dominios geomorfológicos comprenden la zona de estudio: el piedemonte llanero al Este, altamente deformado, presentando una abrupta topografía y donde de Oeste a Este se destaca la Falla de Naranjal, activa durante el cretácico inferior según Mora et al., (2008), la cual expone un alto de basamento en superficie; la Falla de Servita, la falla frontal invertida de mayor desplazamiento del sistema que pone en contacto rocas del Paleozoico con rocas de la secuencia sedimentaria del cretácico; así como las fallas de Manzanares y Villavicencio que se asocian a la fase de reactivación compresiva en la orogenia Andina. Adyacente al piedemonte, el segundo dominio lo constituye la secuencia sedimentaria levemente deformada de la cuenca Llanos, en donde se destaca la presencia de fallas con vergencia este y una serie de pliegues anticlinales asociados.

**Figura 1. Localización del área de estudio ilustrando (a) el cinturón plegado y fallado andino tipo retroarco y el sistema de cuencas de antepaís asociado, (b) corte esquemático a nivel regional, (c) sección esquemática indicando depocentros y d) mapa geológico de la zona de estudio incluyendo orientación de algunas de las líneas sísmicas a utilizarse y fallas principales: Falla de Naranjal (FN), Falla de Servita (FS), Falla de Mirador (FM) y Falla de Villavicencio (FV).**



### **3. MARCO TEORICO**

#### **3.1 EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS EN ZONAS CON ALTA COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL**

Los cinturones plegados y fallados han sido históricamente objetivo de exploración por parte de la industria del petróleo; estos llegan a extenderse enormes distancias a través de los márgenes de continentes enteros; siendo los pliegues y las fallas que los caracterizan producto de regímenes compresionales predominantemente. En general, para la mayoría de los orógenos las fallas de cabalgamientos pueden presentar desplazamientos individuales de hasta 30 kms y desplazamientos totales mayores de 160 kms; sin embargo, múltiples eventos geológicos y diferentes características reológicas hacen que el desarrollo en cada región sea diferente (Lacombe et al., 2007). El primer descubrimiento comercial de hidrocarburos en un cinturón fallado se produjo en 1913, en el campo Turner Valley, localizado al Oeste de Norte América, en el piedemonte de Alberta, al sur de las Montañas Rocosas Canadienses (Hardebol et al., 2007). Ese mismo año se localizaron en total 32 campos del mismo tipo, los cuales según Powers (1980) contenían 9.3 Tcf de gas natural recuperable, 143 millones de barriles de gas natural líquido y 132 millones de barriles de crudo. En su mayoría estos campos se asociaron a trampas relacionadas con falla de cabalgamiento típicas y fueron descubiertos sin la ayuda de técnicas geofísicas, las cuales para entonces eran de uso y aplicabilidad muy limitados.

Al final de la década de los 50's y principios de los 60's el desarrollo de la computación permitió los primeros avances de los métodos geofísicos, los cuales empezaban a convertirse en herramienta importante para la exploración de recursos en zonas complejas. Ejemplo de ello, es el descubrimiento del campo de

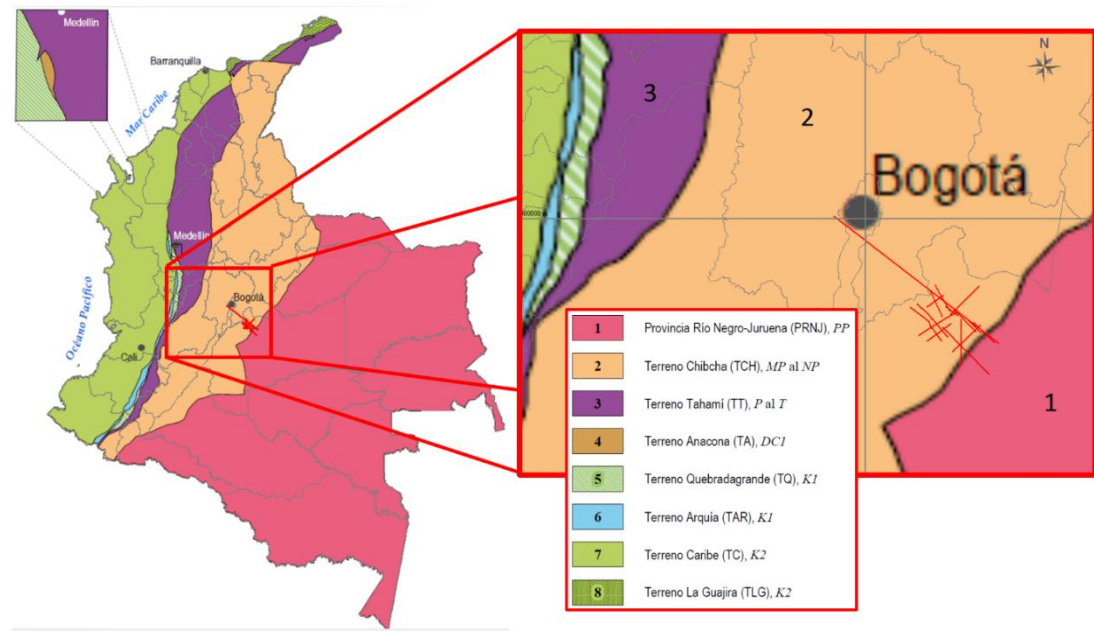
gas Waterton en 1957, el cual se produjo en parte gracias a las extensas campañas sísmicas de Shell Canadá en cinturones fallados y plegados. Sin embargo, no fue hasta 1975 en que se produjo el primer acierto exploratorio de un prospecto definido completamente sobre secciones sísmicas en un cinturón plegado y fallado: el campo Pineview (Loucks, 1975). Para esta época el mejoramiento en las técnicas de disparo, registro, procesamiento computacional e interpretación sísmica; así como el uso del concepto del punto medio común (CDP) y el aumento del cubrimiento (fold) derivó en mejores imágenes sísmicas y por ende en el aumento del número de descubrimientos por pozo perforado. En los años ochenta, por ejemplo en Colombia, el uso de técnicas de Migración en Tiempo en la generación de imágenes sísmicas contribuyó al aumento de la eficiencia exploratoria. En las décadas siguientes la incorporación de las tecnologías de adquisición sísmica 3D y la diversificación de las técnicas de *imaging*, también aparecieron para convertirse en herramientas importantes del proceso de tecnificación de las actividades exploratorias. En la actualidad, las técnicas más avanzadas de generación de imágenes sísmicas ya permiten construir secciones directamente en el dominio de la profundidad; sin embargo, su aplicación no siempre resulta exitosa en el caso de zonas complejas. Por lo que las secciones sísmicas tipo PSTM (Migración preapilado en tiempo) son el producto comúnmente utilizado en la industria, a pesar de que hoy se conoce de sus falencias, en cuanto a la generación de artefactos y estructuras falsas. En la sección 3.3 se discuten las técnicas basadas en trazado de rayo como alternativa para lidiar con la distorsión geométrica que presentan las estructuras en las secciones PSTM.

### **3.2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL**

El borde noroccidental de América del Sur es el producto de la compleja interacción entre las placas Nazca, Caribe y Suramericana a través del tiempo, la

cual ha dado lugar a tres cinturones orogénicos sobre el territorio colombiano, las cordilleras Occidental, Central y Oriental. La Cordillera Occidental es un complejo de acreción en el que predominan fragmentos de corteza oceánica mesozoica, rocas sedimentarias e ígneas asociadas a procesos de subducción (Duque-Caro, 1990); la Cordillera Central compuesta según Julivert (1968) por rocas pre-mesozoicas de edad Cámbrico-Ordovícica principalmente e intruidas por múltiples plutones a través del mesozoico-cenozoico y la cordillera Oriental considerada una cuenca marina extensional cretácica invertida parcialmente durante el cenozoico. Según Suarez (1990) el basamento de Colombia puede dividirse en tres zonas: (1) El escudo Precámbrico de Guyana limitado al Oeste por el Sistema de Fallas del Frente Llanero; (2) La Provincia Central, compuesto por rocas metamórficas de edad Precámbrico a Paleozoico temprano de las Cordilleras Central y Oriental, y limitado al oeste por la sutura de Romeral y (3) una tercera zona compuesta por las rocas de afinidad oceánica de la Cordillera Occidental. En la clasificación más reciente de Provincias y Terrenos geológicos de Colombia según el Servicio Geológico Colombiano (2015), se distinguen siete terrenos y una provincia de los cuales (1) la Provincia Rio Negro-Juruena (PRNJ), denominada anteriormente Provincia Litosférica Continental Paleoproterozoica Amazónica (PLCPA) por Ingeominas (2007) y (2) el terreno Chibcha (TCH), correspondiente a la denominación Provincia Litosférica Continental Mesoproterozoica Grenvilliana (PLCMG) según Ingeominas (2007), son de particular interés para el presente estudio (Figura 2) .

**Figura 2. Mapa de Provincias y Terrenos geológicos de Colombia según el Servicio Geológico Colombiano (2015), en donde se localiza el área de interés del presente estudio, mediante la georeferenciación de las líneas sísmicas a ser interpretadas.**



Respecto a los eventos tectónicos más importantes que han marcado la historia de evolución geológica de las cuencas del bloque nor-andino se destacan según Cediel et al., (2011): (1) el evento Grenviliano (Orogenia Orinoquensis), el cual consistió en una fase de colisión y una posterior fase extensional, que determinaron la configuración estructural de las cuencas sedimentarias del Proterozoico tardío al Cámbrico; (2) el evento Paleozoico temprano (Orogenia Quetame/Caparonensis), que consistió en acreción de Arco y la depositación de las secuencias marinas transgresivas del Ordovícico; (3) un evento extensivo desde el Paleozoico tardío hasta el cretácico temprano en el que se desarrollaron aulacogenos; (4) un posible evento colisional al cual se asocia la orogenia Permo-Triásica y finalmente (5) la Orogenia Andina desde el Mioceno al reciente. Varios autores entre ellos Cooper et al., (2005) y Cediel et al., (2011) consideran que los modelos de evolución tectónica propuestos para edades anteriores al Cretácico tardío son aún muy especulativos. Existen por ejemplo diferentes modelos para

explicar los mecanismos de extensión en Colombia desde el Triásico al Cretácico temprano, que van desde una configuración de retro-arco con componente transtensional asociada a naturaleza oblicua de la subducción según Maze (1984); hasta un territorio afectado periféricamente por la separación de Norte y Sur América en el proto-Caribe según Jaillard et al., (1990); lo cierto es que por uno u otro mecanismo, el ambiente dominante en Colombia para este periodo fue extensional y que los depocentros de dichas paleocuecas se localizaban en la Cordillera Oriental y del Valle superior del Magdalena siendo las cuencas de Llanos y Putumayo cuencas Marginales (Cooper et al., 2005). Según Etayo et al., (1969) un Paleoalto (relacionado con los macizos Santander y Floresta) conformaba dos depocentros en la Cordillera Oriental: las cuencas Cocuy y Tablazo-Magdalena al Este y Oeste respectivamente. El ambiente de sedimentación marino somera que se mantuvo durante la mayor parte del cretácico, indica que la depositación fue coetánea con la subsidencia. Burgl (1961) propuso que luego de la sedimentación en ambientes marino-someros, los ambientes evolucionaron a litorales principalmente, presentándose hiatos estratigráficos y ciclos en la sedimentación. Tales condiciones permitieron la acumulación de una secuencia sedimentaria mesozoica-cenozoica de aproximadamente 10 km de espesor en la parte más central de la cordillera Oriental y que se adelgaza progresivamente hacia el Este. La colisión de Panamá con Suramérica al final del Mioceno se considera la fase de deformación principal causante del levantamiento y erosión de la Cordillera Oriental y del piedemonte Llanero, causando la inversión de antiguas fallas extensionales y el desarrollo de nuevas estructuras compresionales (Cooper et al., 2005).

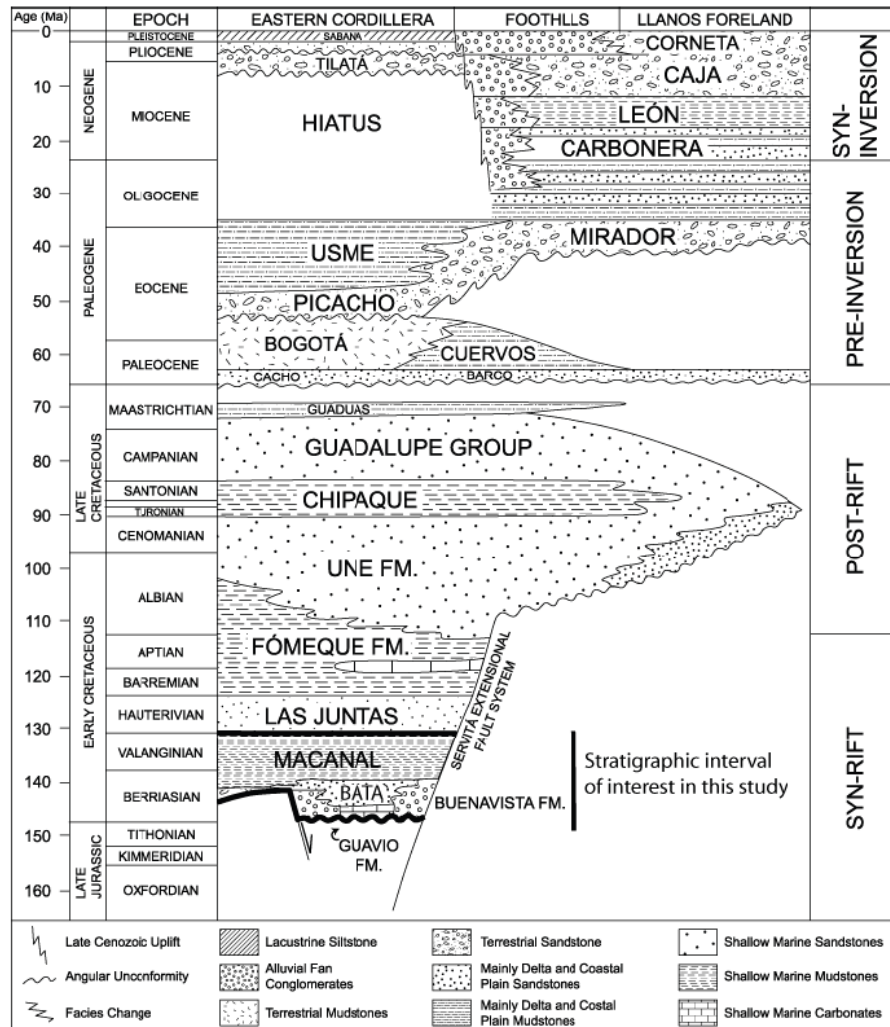
El basamento del área de estudio está compuesto por rocas metamórficas de bajo grado: pizarras, filitas y cuarcitas, aflorantes en el Macizo de Quetame y denominadas Grupo Quetame por Hettner (1892) (Julivert, 1968). Estas rocas infrayacen discordantemente rocas sedimentarias del Grupo Farallones, las cuales según Renzoni (1965) son de edad Carbonífero a Devónico inferior.

Suprayaciendo el Grupo Quetame yace la formación Brechas de Buenavista, conteniendo abundante fauna de amonitas del Titoniense a Berriasiense en los niveles medio y superior, lo que según Renzoni (1965) permite asignarle edad Jurásico Superior a Cretácico inferior. Sobre la formación Brechas de Buenavista yacen rocas sedimentarias pelíticas, shales negros, margas y areniscas de las formaciones Macanal, Las Juntas y Fomeque respectivamente, las cuales se asocian a sedimentación transgresiva en ambientes marino somero durante el Barremiense al Aptiense inferior. Según estudios paleontológicos y sedimentológicos por Fabre (1985), Colleta et al., (1990), Cooper et al., (1995) y Sarmiento (2001), la sedimentación de las secuencias clasificadas en las formaciones Brechas de Buenavista, Macanal, Las Juntas y Fomeque se consideran coetáneas con el régimen distensivo dominante. Seguido a dicho régimen se depositaron según Sarmiento-Rojas et al., (2006) durante el resto del cretácico, otras secuencias sedimentarias bajo un régimen de subsidencia termal. Inicialmente durante el Albiano-cenomaniano se depositó en un complejo deltaico una secuencia de areniscas conocida como Formación Une (Hubach., 1931 en Julivert., 1968). Esta formación esta suprayacida por shales de la de la formación Chipaque, la cual según Cooper et al., (1995) se depositó bajo condiciones anóxicas durante el Turoniano, siendo la principal roca fuente de hidrocarburos en la cuenca. Finalmente el grupo Guadalupe cierra la secuencia que se considera posterior y no coetánea con el régimen distensivo del cretácico inferior. Este grupo según Mantilla et al., (2002) se depositó durante el Santoniano hasta finales del cretácico en condiciones inicialmente marino someras y que luego variaron a deltaicas y fluviales al final de dicho periodo. Sobre las areniscas de la parte superior del Grupo Guadalupe yace la formación Guaduas, la cual según Bayona et al., (2013) se caracteriza por estratos de grano fino y abundantes mantos de carbón en su parte inferior e intercalaciones de limolitas y areniscas en la parte superior. Discordante sobre la formación Guaduas yace la Formación Barco, compuesta principalmente por areniscas de edad Paleoceno temprano a medio y

que constituye rocas reservorio depositadas, según Cooper et al., (2005) en un ambiente de estuario, bajo un sistema transgresivo.

La formación Los Cuervos yace sobre la formación Guaduas y está constituida según Bayona et al., (2013) por intercalaciones de lodolitas y areniscas granocrecientes con areniscas bioturbadas que presentan estratificación cruzada bidireccional; correspondiendo a un ambiente de planicies costera con influencia mareal. Dataciones en minerales y palinológicas por Bayona et al., (2008) y Parra et al., (2009) sugieren que la formación es de edad Paleoceno a Eoceno temprano. Suprayaciendo la Formación Los Cuervos yace la Formación Mirador, constituida por areniscas de grano grueso que según Bayona et al., (2008) y Parra et al., (2009) son de edad Eoceno inferior a medio. La formación Carbonera suprayace a las formación Los Cuervos, esta corresponde a una secuencia de intercalaciones de areniscas de ambientes regresivos fluviales a marino someros y shales transgresivos la cual se dio desde el Oligoceno al Mioceno inferior. Sobre la formación Carbonera yace la Formación León, siendo una unidad predominantemente lutítica que evidencia el principal evento transgresivo del Mioceno. Sobre la Formación León yace la Formación Guayabo, rocas sedimentarias que según Cooper et al., (1995) se depositaron producto del principal evento de levantamiento de la Cordillera Oriental. En la siguiente figura se presenta un esquema que sintetiza las relaciones estratigráficas descritas entre las diferentes formaciones.

**Figura 3. Estratigrafía generalizada para la Cordillera Oriental, el piedemonte y la cuenca Llanos**



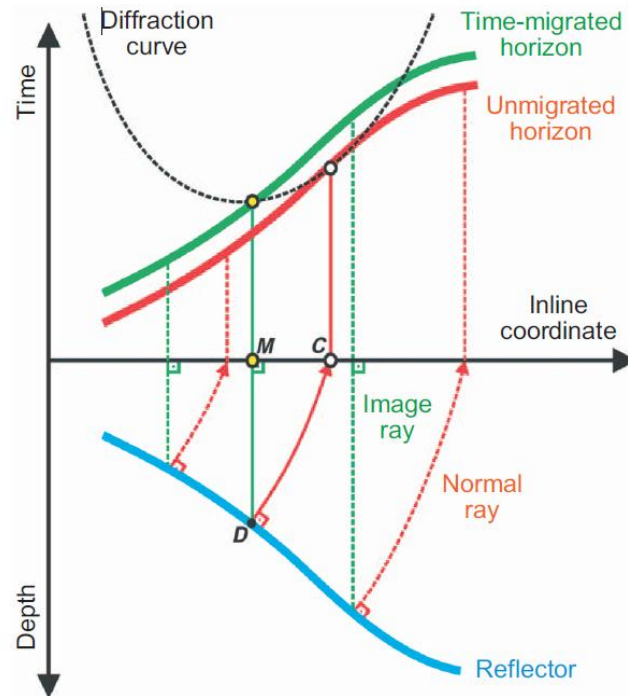
Fuente: Tomado de Mora et al., 2009.

### 3.3 TÉCNICAS DE CONVERSIÓN T/D

La técnica de conversión Tiempo-Profundidad usada actualmente con mayor frecuencia realiza una transformación de dominio como un estiramiento o acortamiento diferencial vertical, según sea el campo de velocidad definido; esta técnica produce buenos resultados en el caso de zonas con complejidad

estructural baja; sin embargo, cuando existen cambios bruscos de velocidad y estructuración importante el estiramiento vertical no produce buenos resultados y en cambio genera secciones en profundidad que están distorsionadas respecto a la geometría de las estructuras reales. Una técnica que evita tales distorsiones se basa en el concepto del rayo imagen, esta fue inicialmente propuesta por Hubral (1977). Luego Larner et al., (1981) propusieron un enfoque dual para realizar migraciones en profundidad, en cual implica el trazado de rayo-imagen para realizar la conversión de información de tiempo a profundidad. Posterior a estos trabajos, Cameron (2007) e Iversen y Tygel (2008) también propusieron metodologías basadas en el trazado de rayo imagen para convertir información de tiempo a profundidad y para estimar velocidades sísmicas. El concepto básico de estas técnicas se ilustra en la figura 4, en donde simultáneamente se representa la geometría de un reflector en los dominios tiempo y profundidad. Como se aprecia la geometría de un reflector cualquiera puede representarse en el dominio del tiempo no-migrado y migrado mediante el trazado de rayos normales e imagen respectivamente. Los primeros siempre cumplen la condición de ser perpendiculares al reflector y los segundos a un datum particular que represente la superficie de tiempo igual a cero.

**Figura 4. Esquema ilustrando el concepto de trazado de rayo imagen, en donde se relaciona la geometría de un reflector en los dominios tiempo y profundidad simultáneamente.**

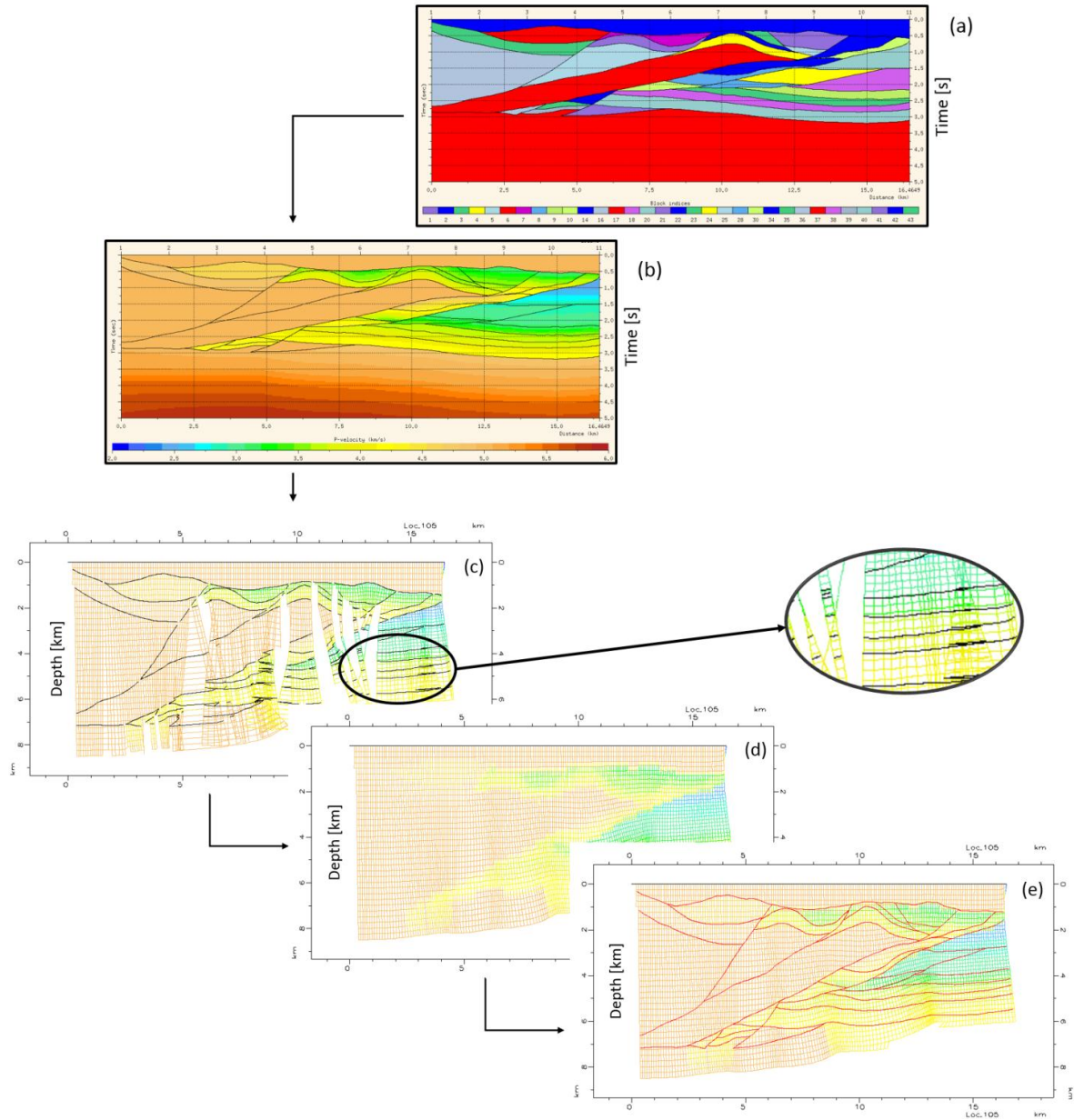


Fuente: Tomado de Iversen y Tygel (2008).

Observando en la figura 4 un punto particular D localizado sobre en reflector en el dominio de la profundidad, se aprecia que en el dominio del tiempo migrado este coincide con el ápice de la hipérbola de difracción; mientras que en el dominio del tiempo no-migrado existe un desplazamiento respecto al ápice. Este hecho a la luz de las técnicas de construcción de imágenes sísmicas (Biondi, 2007) implica que los rayos imagen pueden relacionar información entre ambos dominios sin distorsiones, mientras que en el dominio no-migrado las distorsiones son inevitables. En este trabajo se planea el uso de técnicas basadas en el trazado de rayos imagen, para la estimación de la geometría de las estructuras en el dominio de la profundidad a partir de imágenes PSTM, lo anterior debido a su uso resulta el más adecuado de acuerdo con las condiciones estructurales de la zona de estudio.

El proceso de aplicación de este tipo de técnica a una sección estructural se esquematiza en la Figura 5 . El primer paso es usar la geometría de fallas y horizontes en el dominio tiempo, para generar un modelo de bloques, como el que se ilustra en la figura 5a. Cada bloque en el modelo puede poblarse independientemente con velocidades de tipo intervalo, las cuales se obtienen de registros de pozo ó de campos de velocidad provenientes del procesamiento de las imágenes sísmicas. El modelo de velocidades resultante (Figura 5b) es usado como dato de entrada para el trazado de rayo imagen, el cual permite generar una grilla ó función de transformación como la ilustrada en la Figura 5c. El espaciamiento lateral de la grilla corresponde a la distancia entre rayos imagen, mientras que en la dirección opuesta el espaciamiento esta dado la separación entre frentes de onda. Como se aprecia en la Figura 5c las versiones iniciales de tales grillas suelen presentar zonas de sombra y zonas donde los rayos imagen se cruzan. Estos efectos deben corregirse para lograr una transformación efectiva de información entre los dominios tiempo y profundidad. Respecto a las zonas de sombra, estas corresponden a zonas no iluminadas, las cuales pueden corregirse suavizando localmente la grilla; en cuanto a las zonas donde los rayos imagen se cruzan, estas son causadas por triplicaciones, las cuales también para efectos de lograr una adecuada transformación de información a profundidad deben eliminarse. En estos sectores la grilla puede corregirse mediante interpolación. La Figura 5d representa la grilla o función de transformación libre de los efectos mencionados; por lo que puede ser usada para convertir la información del dominio tiempo al dominio profundidad. La geometría resultante de dicha transformación se aprecia en la Figura 5e.

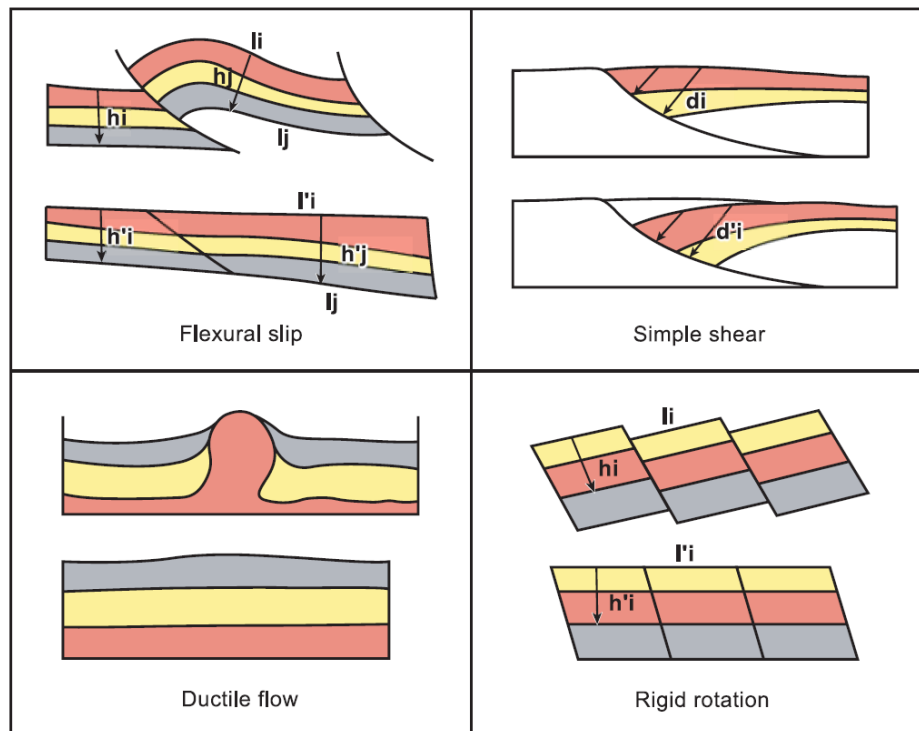
Figura 5. Esquema ilustrando el proceso de conversión de información del dominio tiempo a profundidad mediante el trazado de rayo imagen, desde la construcción del (a) modelo de bloques, (b) modelo de velocidades en tiempo, (c) grilla inicial de transformación, (d) función de transformación corregida y de la (e) sección final resultante.



### 3.4 TÉCNICAS BALANCEO Y RESTITUCIÓN

El objetivo de los métodos de restitución y balanceo es transformar la geometría de una estructura a un estado anterior de deformación, el origen de estas técnicas proviene de los métodos usados para estimar la profundidad de la superficie de despegue usada a principios de 1900 por Chamberlain (1910); las cuales luego evolucionaron a las técnicas de balanceo con los principios claramente establecidos gracias al trabajo de Bally et al., (1966), Dahlstrom (1969), Royse et al., (1975), Lamerson (1982) y Cooper (1983) entre otros. Los principales modos de deformación de los métodos de restitución de estructuras deformadas son desplazamiento flexural, cizalla simple, flujo dúctil y rotación rígida. En el método de desplazamiento flexural (*Flexural Slip*) se preserva la longitud de las líneas en la dirección del plegamiento, se mantiene el área del pliegue y el espesor de las capas debe ser constante. En el método de cizalla simple (*simple shear*) se preserva la distancia en la dirección de la cizalla, como los espesores pueden variar, las áreas no se preservan. En el modo de deformación de flujo dúctil (*ductile flow*) se preserva el área, por lo que resulta ideal para estructuras asociadas a un nivel de despegue. En el modo de deformación rotación rígida (*rigid rotation*), que corresponde a fallamiento en bloques, se conservan los espesores, las longitudes y las áreas. La Figura 6 ilustra los diferentes modos de deformación, donde  $h$  representa el espesor,  $l$  la longitud de las capas y  $d$  la distancia en la dirección de cizalla. Letras con apostrofe indican geometría en el estado deformado (Moretti et al., 2007 en Lacombe et al., 2007).

**Figura 6. Cuatro modos principales de deformación en métodos de restauración estructural.**



Fuente: Tomado de Moretti et al., (2007) en Lacombe et al., (2007).

El proceso de balaceo y restitución estructural puede requerir el uso de más de uno de los modos de deformación mencionados; así como el uso de algoritmos de decompactación y desplegado. Los algoritmos de decompactación permiten modelar el cambio de volumen asociado a la disminución de la carga litoestática. El cambio de volumen es función de la porosidad, la cual según Sclater y Christie (1980) disminuye al aumentar la profundidad (enterramiento) y aumenta al disminuir la profundidad (exhumación) según la siguiente expresión:

$$f = f_0 (e^{-cy})$$

Donde  $f$  es la porosidad a la profundidad actual,  $f_0$  es la porosidad en la superficie,  $y$  es la profundidad en metros y  $c$  es el coeficiente porosidad-profundidad que depende de la litología.

En cuanto a los algoritmos de desplegado, estos permiten llevar la estructura a un estado de deformación anterior usado como referencia un datum plano ó la geometría de una superficie dada. Uno de los algoritmos disponibles es el desplazamiento flexural, útil en el caso de pliegues concéntricos con capas paralelas, el cual funciona mediante rotación de los flancos del pliegue, preservando áreas, longitudes de las líneas y manteniendo espesores entre capa constante. Otro método conocido de desplegado es el de cizalla vertical, el cual consiste en un procedimiento de aplanamiento punto a punto en el que se modifica solo la coordenada vertical en el espacio de transformación (Moretti et al., 2007 en Lacombe et al., 2007).

## 4. METODOLOGIA

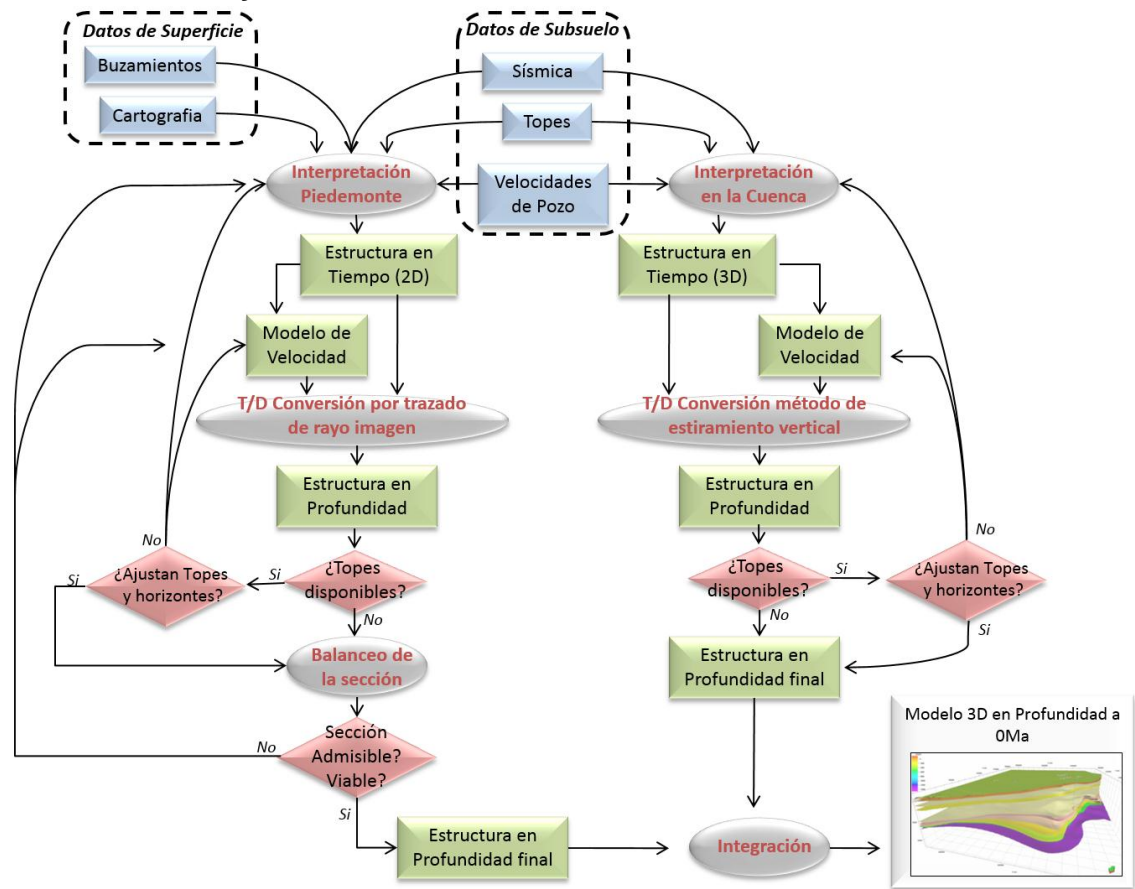
El desarrollo del presente trabajo puede dividirse en tres etapas principales, la primera de ellas consiste en la construcción de la geometría actual de la estructura del piedemonte llanero y su foredeep adyacente, para ello se usan diferentes tipos de datos y métodos resumidos en el esquema de la Figura 7. Luego, el modelo resultante de la primera etapa y que representa el estado deformado de la estructura actual, es usado para obtener aproximaciones de la paleo-geometría de la estructura en estados de deformación anterior; finalmente los datos obtenidos se usan para realizar inferencias sobre la prospectividad de este tipo de *play* en términos del análisis de los diferentes elementos del sistema petrolífero. A continuación se describe cada etapa:

### 4.1 ETAPA 1: CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA ACTUAL

En términos generales esta etapa implica la generación de la geometría en el dominio tiempo, su conversión al dominio de la profundidad y la integración de los datos generados en uno solo modelo. Dadas las diferencias morfológicas entre los dos dominios: Piedemonte y Cuenca, la aplicación de los procesos descritos resulta diferente en cada caso. En la siguiente figura se ilustra la metodología propuesta para la construcción del modelo 3D en profundidad integrando datos en los dos dominios. Como se observa la interpretación de la estructura en tiempo, para el sector del Piedemonte involucra no sólo el uso de datos del subsuelo (sísmica y pozo); sino además datos de superficie (buzamientos, contactos y relaciones estructurales cartografiadas). Otra diferencia importante es que en el sector del Piedemonte se requiere el uso de método de conversión del tiempo a

profundidad más sofisticado, en el que pueda lidiarse con las distorsiones presentes en las imágenes sísmicas en tiempo. Razón por la cual se usa la técnica trazado del Rayo imagen en vez del método de estiramiento vertical empleado en la cuenca. En ambos casos sin embargo, se usa un esquema iterativo para la conversión tiempo/profundidad, en el que los resultados obtenidos en cada iteración se validan mediante el ajuste entre horizontes convertidos al dominio profundidad y topes de Pozo. Adicionalmente, para el caso del Piedemonte se usan técnicas de balanceo; tal que la geometría de la estructura obtenida en el dominio de la profundidad, corresponda a una sección viable y admisible. De igual manera este proceso se integra a la metodología de forma iterativa, tal que inconsistencias observadas en el estado no-deformado puedan corregirse realizando cambios en la geometría en el dominio tiempo o en el modelo de velocidades generado. Una vez se obtiene la geometría de la estructura final en profundidad para el Piedemonte y la cuenca respectivamente, estas se integran en un solo modelo, que es el dato de entrada para las etapas posteriores.

**Figura 7. Esquema ilustrando la construcción del modelo en profundidad 3D, integrando información en el sector deformado del Piedemonte oriental de Cordillera Oriental y de la Cuenca Llanos.**



## 4.2 ETAPA 2: RETRODERMACIÓN A DIFERENTES TIEMPOS

En esta etapa se usa la geometría de la estructura obtenida en la etapa anterior para restituir la estructura a estados de deformación anterior. Para ello se realiza el proceso sobre la sección 2D correspondiente a la línea CHVRB-105 y sobre el modelo 3D que integra las superficies de interés bajo el frente de deformación en el piedemonte y las del dominio foredeep. En ambos casos, la geometría se ha retrodeformado mediante la aplicación de los algoritmos: *decompaction*, *fault parallel flow* y *flexural slip unfold* en el software 2DMOVE y 3DMOVE, para los

casos 2D y 3D respectivamente. Información sobre la evolución geológica, la secuencia de activación de fallas, tasa de exhumación, ambientes y edades de depositación, incluidos durante el proceso de restitución fueron extraídos de trabajos publicados por Fabre (1985), Cooper et al., (1995), Mora et al., (2006); Mora *et al.*, (2008), Parra et al., (2009), Mora *et al.*, 2010; Parra et al., (2010) y Ramírez *et al.*, (2012). Restricciones sobre la paleo-topografía, se derivaron de la suposición de que la elevación promedio de la Cordillera Oriental antes del plioceno fue menor a 1km, de acuerdo con el trabajo de Van der Hammen (1973) y Wijjinga (1996).

### **4.3 ETAPA 3: ANÁLISIS DE DATOS GENERADOS**

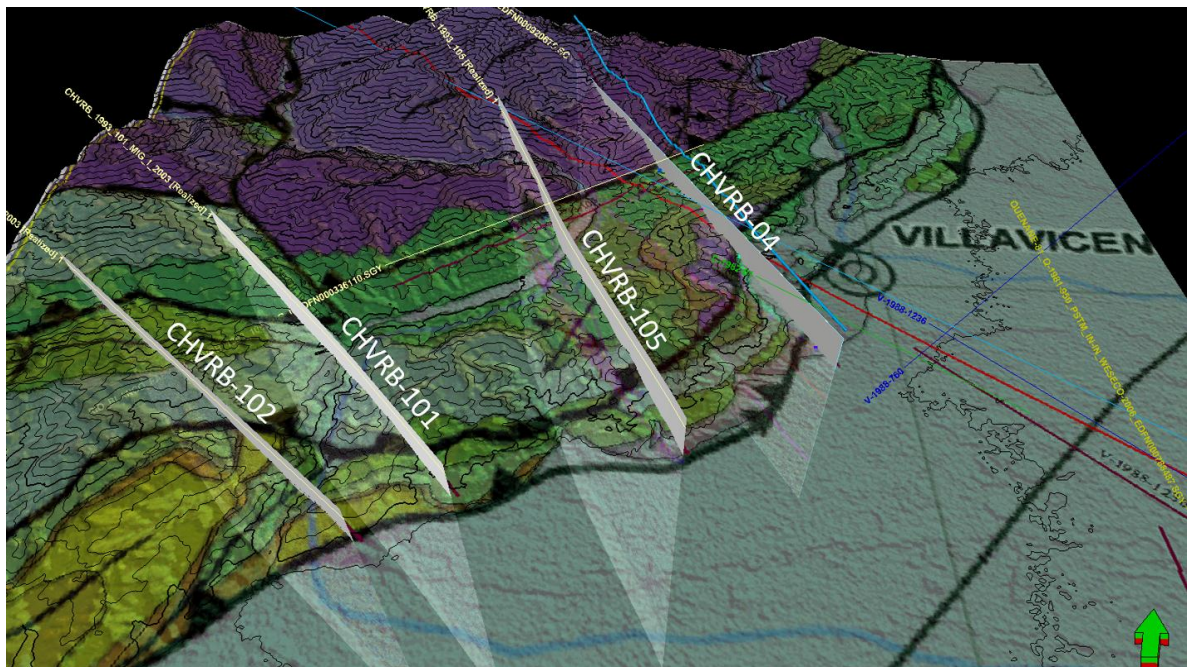
En esta etapa se analiza la geometría de la estructura obtenida en el dominio de la profundidad, identificando las morfologías resultantes al nivel de los horizontes de interés. El modelo generado se compara con el propuesto por Chevron (1996) y se usa para proponer nuevos prospectos, cuyo análisis en términos de los diferentes elementos del sistema petrolífero permite realizar inferencias sobre la prospectividad en este tipo de estructuras.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA ACTUAL EN EL SECTOR DE PIEDEMONTE

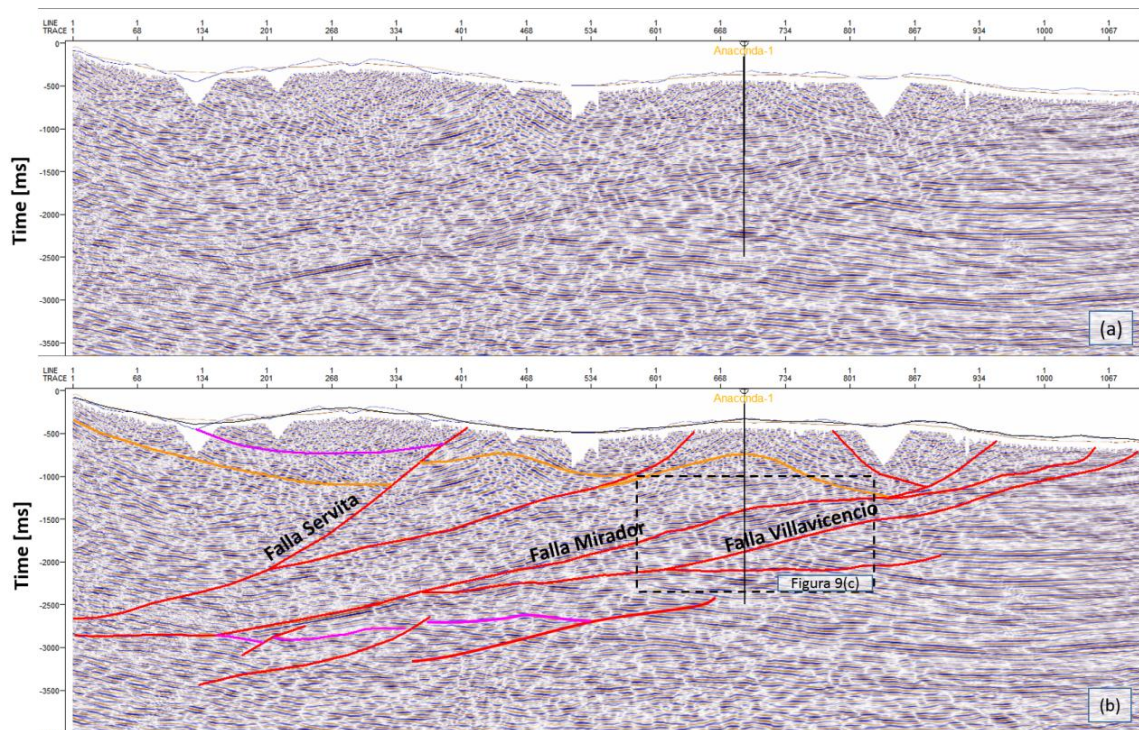
La definición de la geometría del sector de Piedemonte en el área de estudio se realizó a partir de cuatro secciones sísmicas del programa Río Blanco (1993) orientadas NNW entre Villavicencio y Acacias (Figura 8). Cada una de la secciones fue interpretada en el dominio tiempo y posteriormente convertida al dominio profundidad usando un enfoque iterativo; en el que progresivamente se realizan cambios hasta lograr que la geometría de la estructura sea consistente con datos de superficie y de topes en pozos.

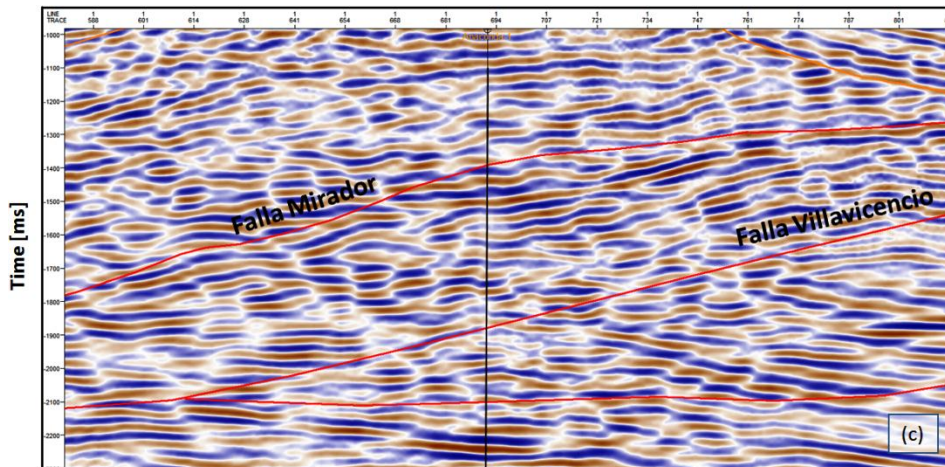
**Figura 8. Localización de las cuatro secciones sísmicas del programa Río Blanco (1993) usadas para definir la geometría de la estructura en el dominio tiempo.**



**5.1.1 Estructura en el dominio tiempo para el sector del Piedemonte** Con base en los patrones de reflectividad se identificaron sobre las secciones sísmicas del programa Río Blanco la geometría de fallas y horizontes. De acuerdo con la metodología propuesta el proceso de interpretación sísmica se realiza bajo el precepto de que la geometría en el dominio tiempo esta distorsionada por efecto del proceso involucrado en la construcción de la imagen misma, por tanto se sigue fielmente la geometría de las reflexiones observadas. En las figuras 9, 10, 11 y 12 se presenta la interpretación de las secciones CHVRB-1993-105, CHVRB-1993-04, CHVRB-1993-102 y CHVRB-1993-101 respectivamente.

**Figura 9. (a) Imagen sísmica CHVRB-1993-105, (b) e interpretación inicial asociada, (c) ilustrando zona imbricada entre las fallas Mirador y Villavicencio.**





En cada una de las secciones interpretadas se identificaron tres dominios estructurales: (1) el primero corresponde al bloque colgante de la Falla Mirador, caracterizado por grandes desplazamientos que involucran rocas de basamento y que exponen en superficie rocas del cretácico inferior y del basamento mismo, asociadas al grupo Quetame. Este dominio incluye la Falla de Servita, así como una falla no cartografiada pero identificada en las secciones sísmicas como un *shortcut* de la Falla Servita, localizado entre las Fallas Servita y Mirador. (2) El segundo dominio se localiza entre las Fallas Mirador y la falla más frontal del sistema del piedemonte Oriental (Falla de Villavicencio en este Sector), en este dominio predominan las imbricaciones, como se ilustra en detalle en la Figura 9. (3) El tercer dominio corresponde al bloque yacente del sistema de fallas más frontal del piedemonte, falla de Villavicencio en el sector más somero para este caso; este dominio se caracteriza por presentar una deformación leve, en la cual se distinguen plegamientos suaves y fallamiento de desplazamiento corto, en algunos casos intraformacionales. En este dominio los horizontes interpretados no corresponden a Formaciones, simplemente representan la geometría de la estructura en tiempo.

Figura 10 (a) Imagen sísmica CHVRB-1993-04, (b) e interpretación inicial asociada.

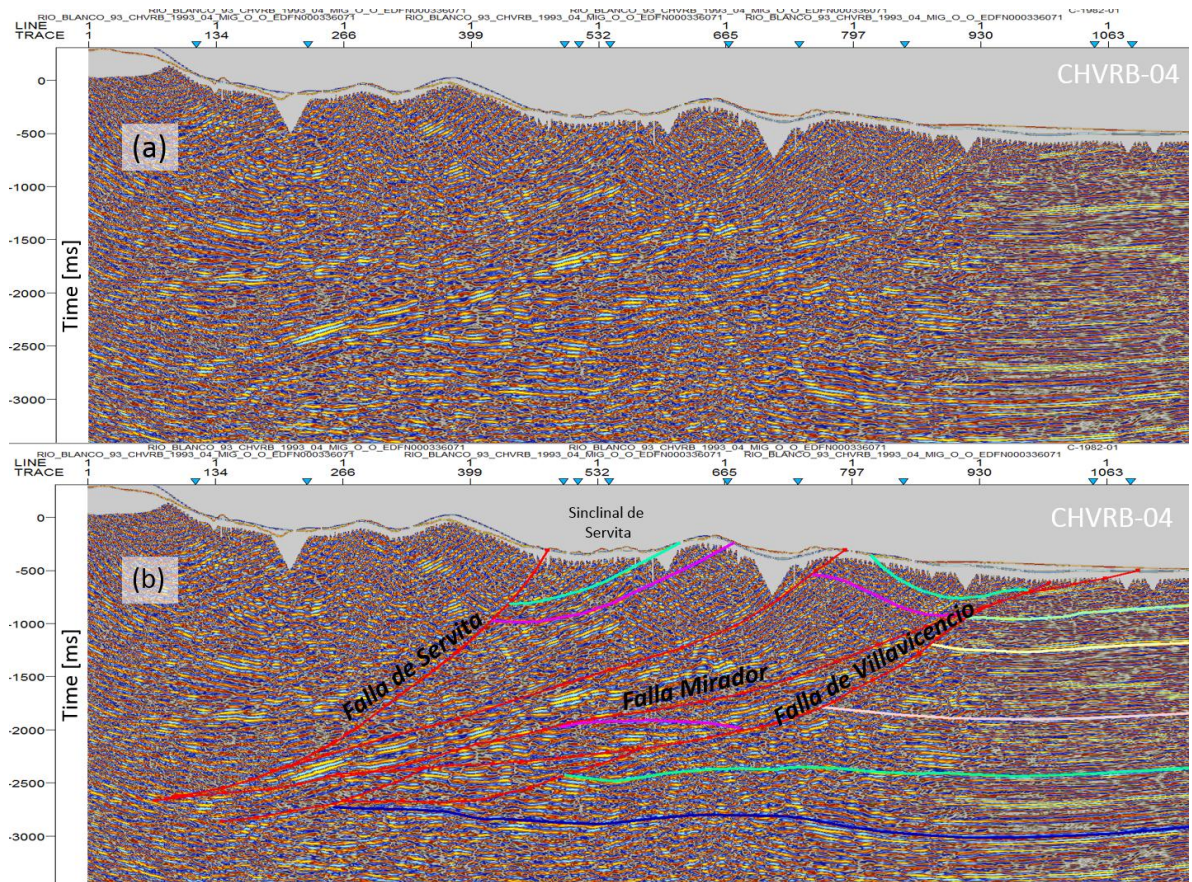
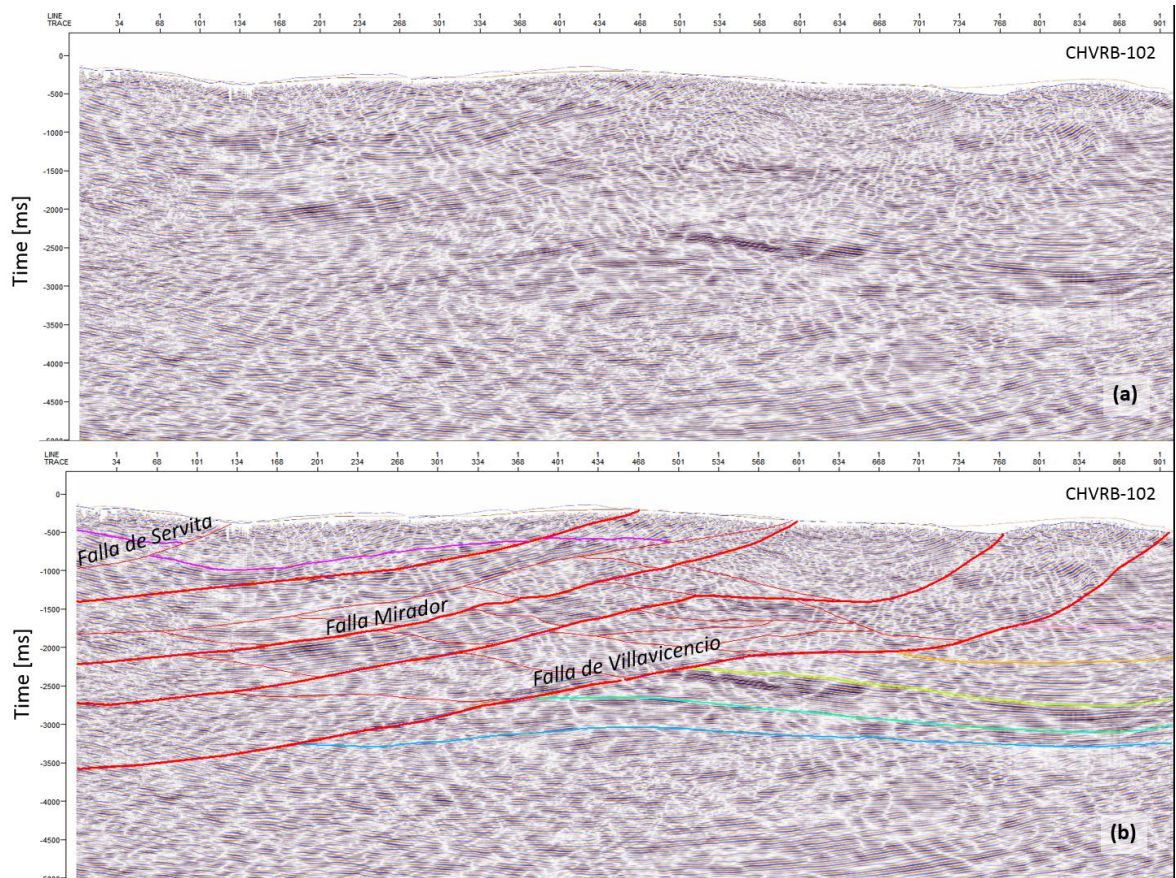
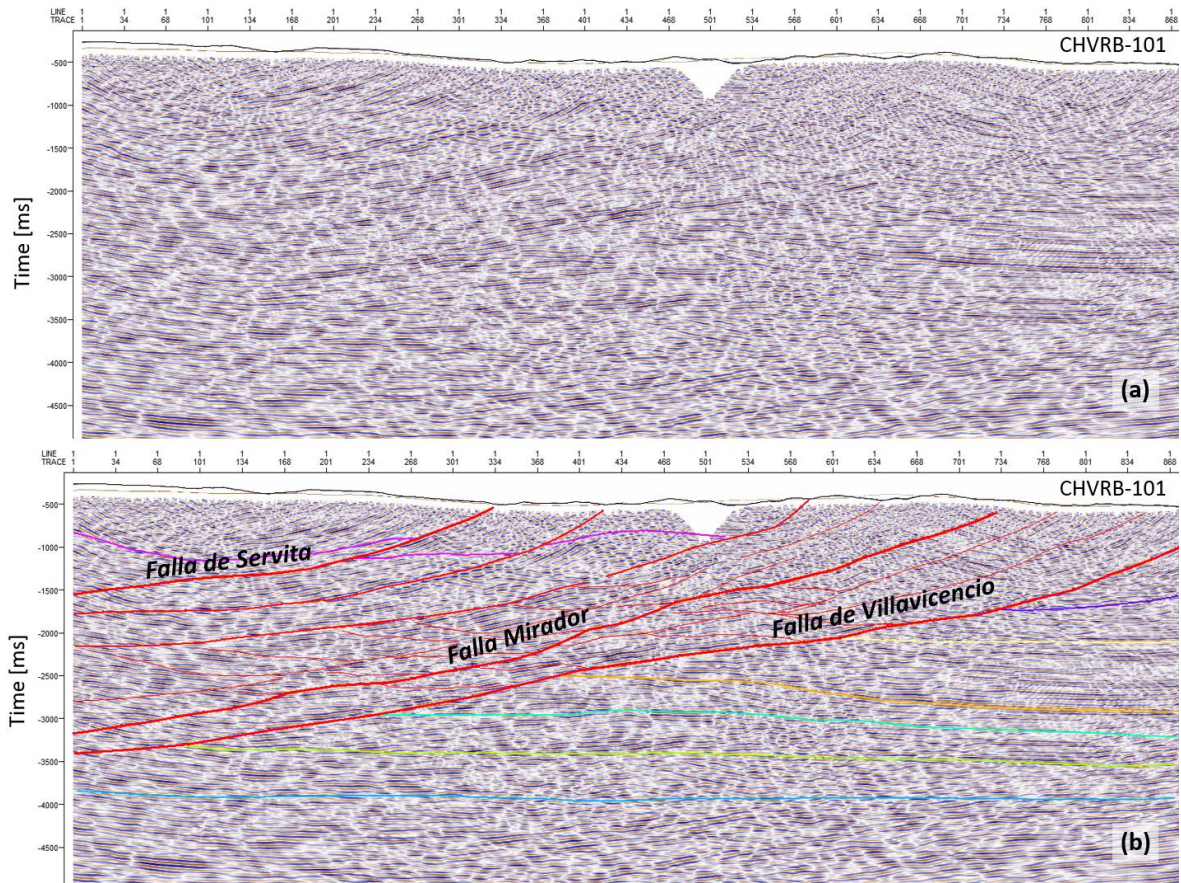


Figura 11. (a) Imagen sísmica CHVRB-1993-102, (b) e interpretación inicial asociada.



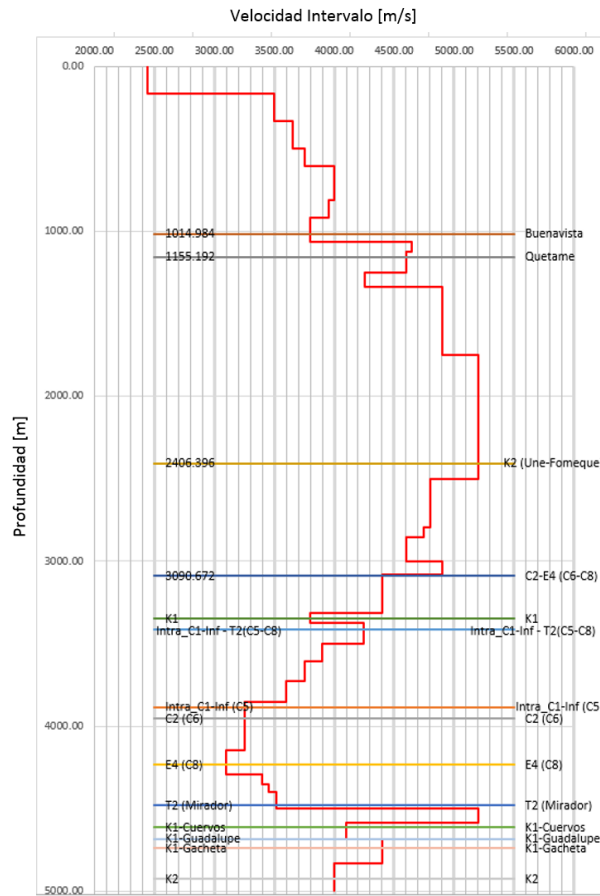
**Figura 12. (a) Imagen sísmica CHVRB-1993-101, (b) e interpretación inicial asociada.**



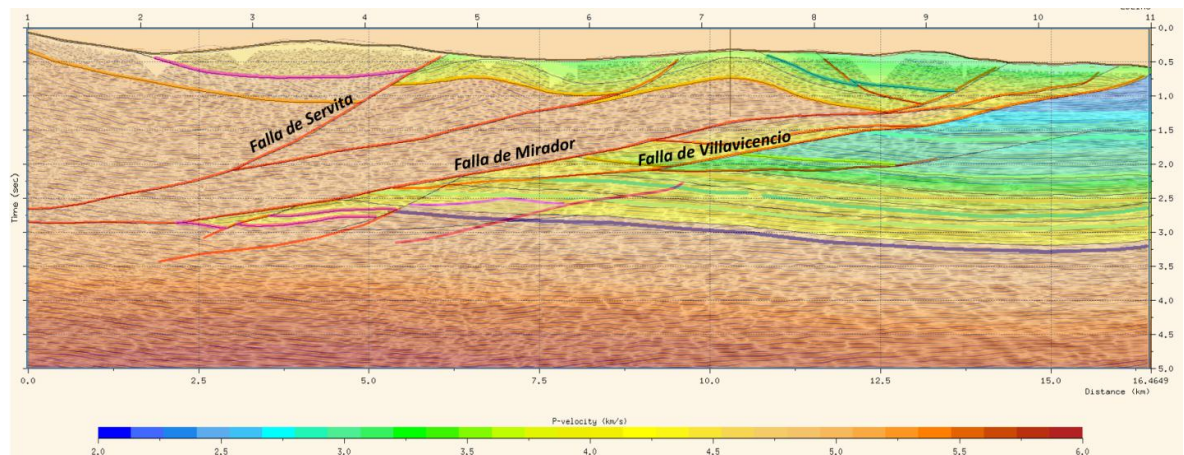
### 5.1.2 Estructura en el dominio Profundidad para el sector del Piedemonte

Dado que el mapeo de la estructura del dominio tiempo al dominio profundidad es un proceso crítico en estructuras típicas de cinturones plegados y fallados, en este trabajo se usa una técnica basada en el trazado de rayo imagen, la cual como se mencionó en la sección 3.3, permite relacionar información entre los dominios: tiempo migrado y profundidad. El primer paso consiste en asignarle al modelo construido en el dominio tiempo, velocidades intervalo adecuadas. Para este propósito se usa información de velocidades del pozo Anaconda-1 (Figura 13). En la Figura 14 se ilustra el modelo de velocidad resultante.

**Figura 13 Información de velocidades del pozo Anaconda-1.**

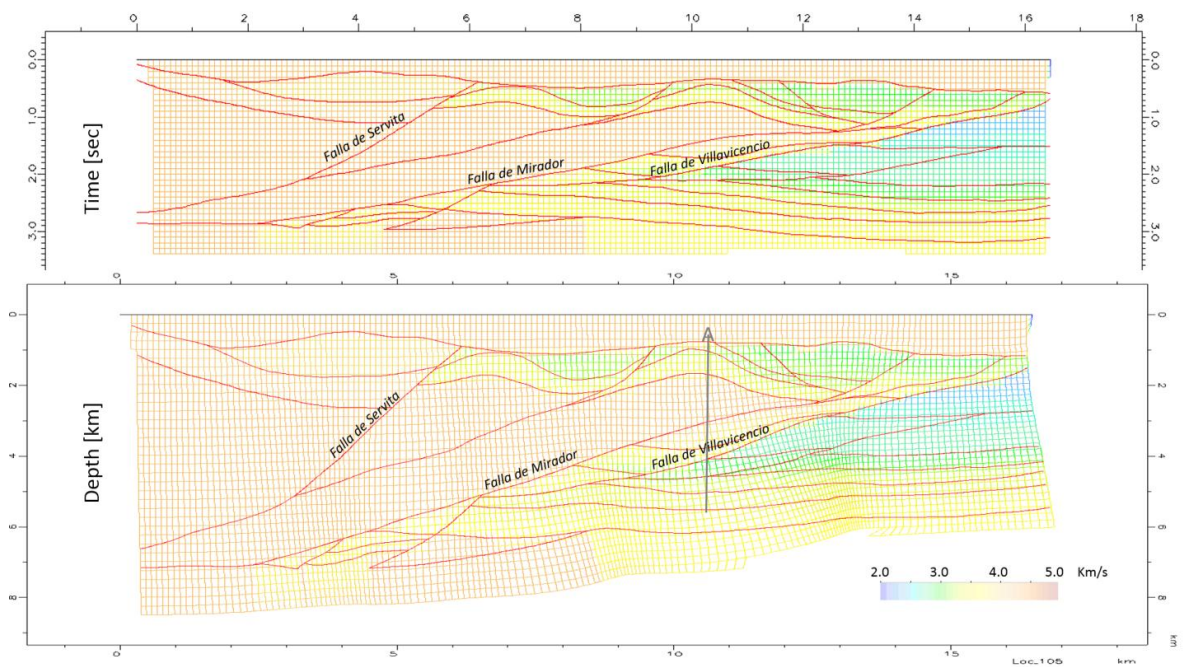


**Figura 14. Modelo de velocidad en el dominio tiempo para la sección CHVRB-1993-105.**

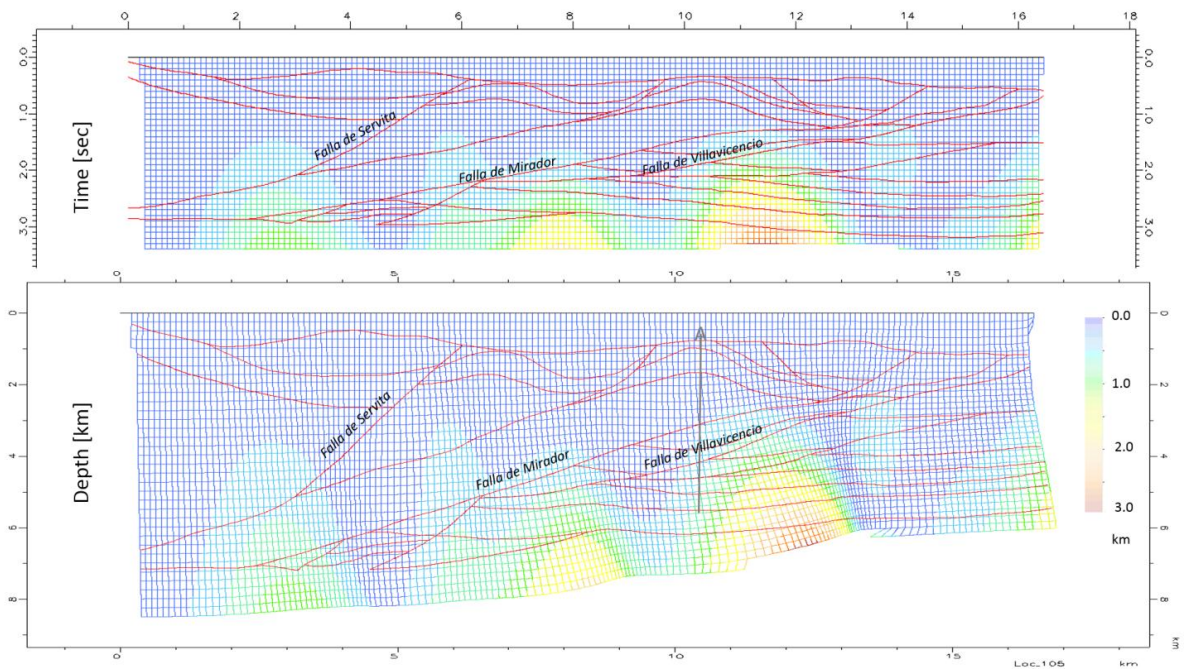


Usando el modelo de velocidad de la Figura 14, se realiza sobre la sección el trazado de rayo imagen, el cual se representa en la Figura 15 para el caso de la sección CHVRB-1993-105 en los dominios tiempo y profundidad respectivamente. En cada caso las líneas horizontales representan frentes de onda a diferentes tiempos. La desviación lateral de los rayos en el dominio profundidad representa las trayectorias que producen el correcto posicionamiento de los eventos en dicho dominio. En la Figura 16 se representa la desviación lateral de tales trayectorias respecto a su posición vertical en cada punto; como lo indican los colores cálidos, las mayores desviaciones se asocian a zonas bajo los cabalgamientos de basamento, donde se localizan los contrastes en velocidad más altos.

**Figura 15. Trazado de rayo imagen sobre la sección 105 usada para transformar información entre los dominios tiempo y profundidad.**



**Figura 16. Función de desplazamiento lateral ilustrando desviación de cada punto imagen respecto a su posición vertical en la sección 105.**

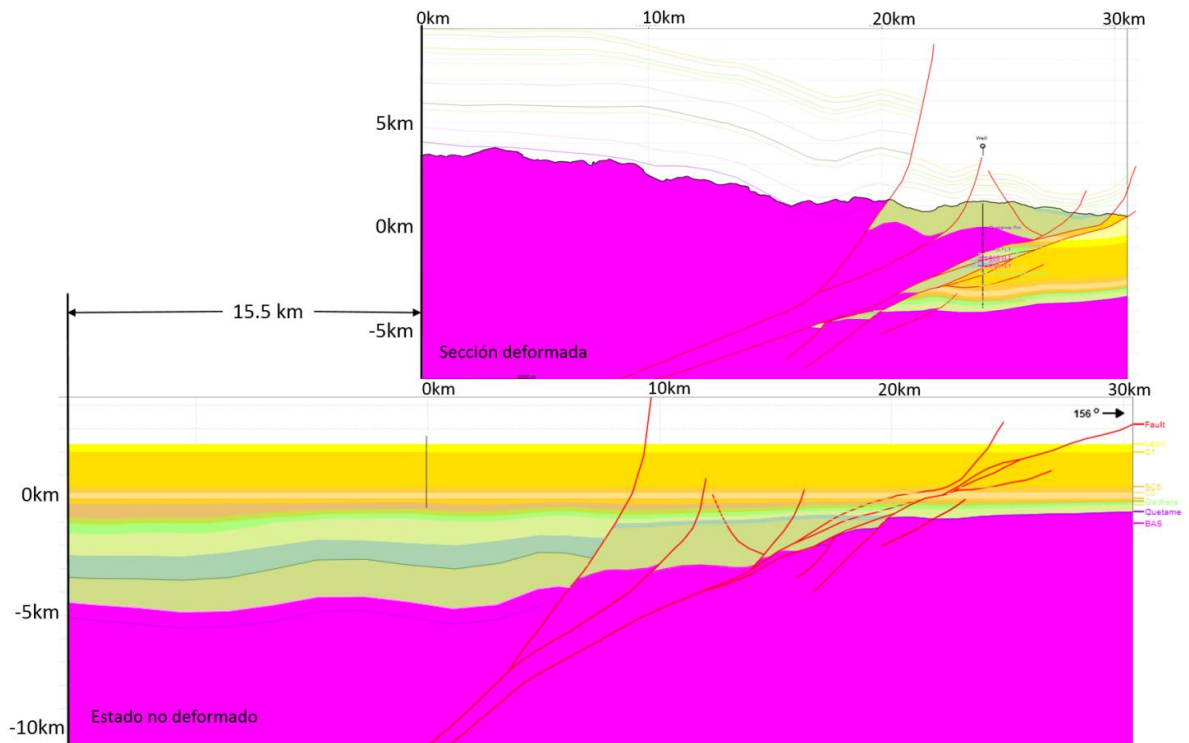


El modelo de profundidad resultante para la sección CHVRB-1993-105 se evalúa en términos del ajuste de los horizontes y fallas correspondientes con los topes del pozo Anaconda-1, las diferencias encontradas son usadas para realizar cambios en la geometría de la interpretación en tiempo y/o en el modelo de velocidades empleado para el trazado de rayo imagen durante el proceso de conversión tiempo a profundidad. Una serie de ajustes sistemáticos permite obtener una sección consistente con los datos de pozo.

Adicionalmente, se realizó el balanceo de la sección generada en el dominio profundidad mediante el método de restitución: *fault parallel flow* en el software 2DMOVE. Este proceso permitió realizar ajustes y definir con mayor precisión un estilo de deformación para la sección estructural. Como se aprecia en la Figura 17 el acortamiento de la sección modelada es 15.5 aproximadamente, lo que resulta consistente con datos publicados por Mora et al., (2008) en este sector de la

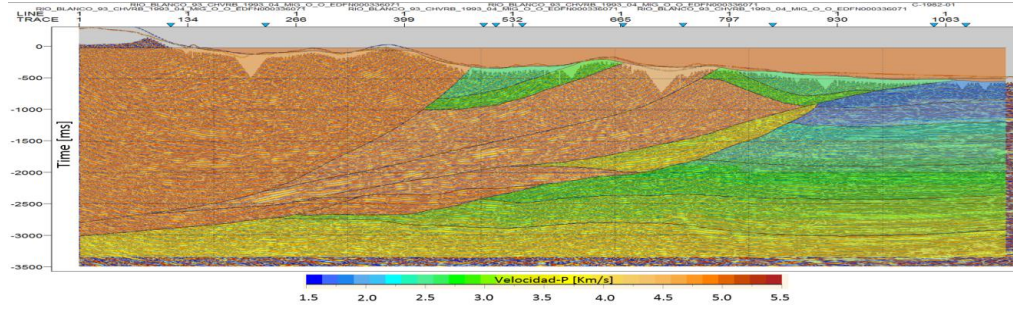
Cordillera, considerando que en este caso solo se modelo el sector más oriental de la misma.

**Figura 17. Sección estructural 105 en estado (superior) deformado y (inferior) no-deformado.**

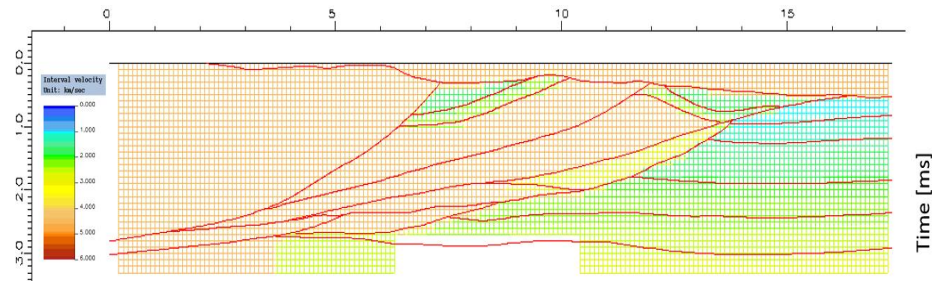


En las Figura 18, 19 y 20 se ilustran los modelos de velocidad empleados en el trazado de rayo imagen y las funciones de transformación resultantes para las secciones CHVRB-1993-04, CHVRB-1993-102 y CHVRB-1993-101 respectivamente.

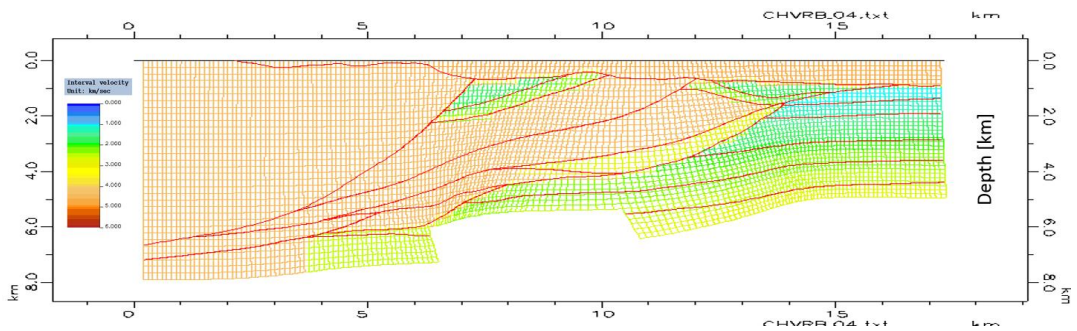
Figura 18. (a) Modelo de velocidad de la sección CHVRB-1993-04 usado para realizar conversión T/D mediante el trazado de rayo imagen en los dominios (b) tiempo, (c) profundidad y (d) función de desplazamiento lateral en profundidad.



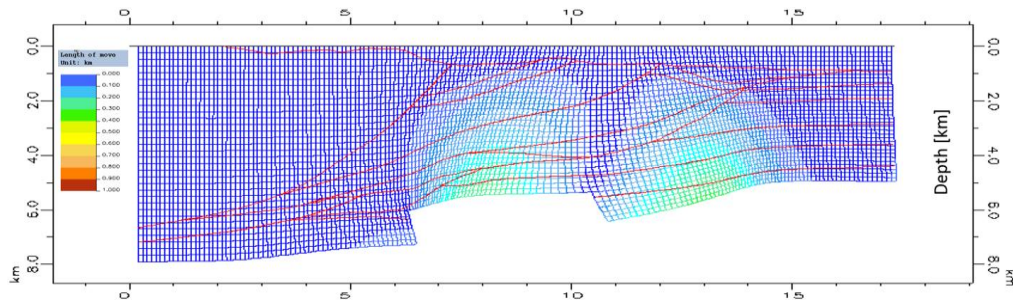
(a)



(b)

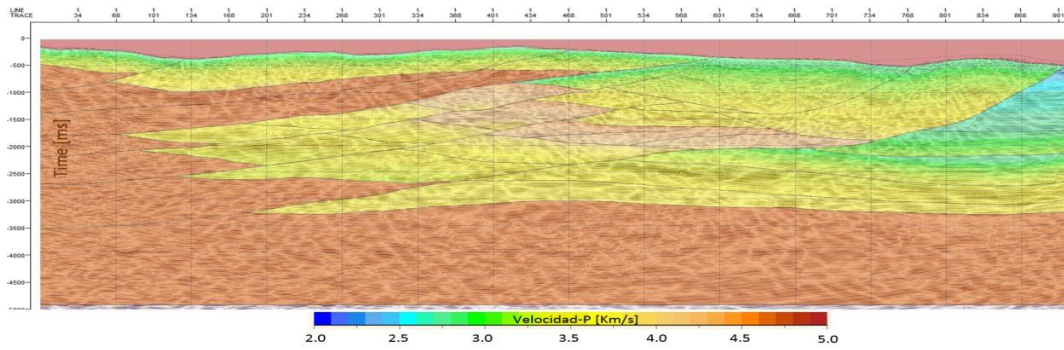


(c)

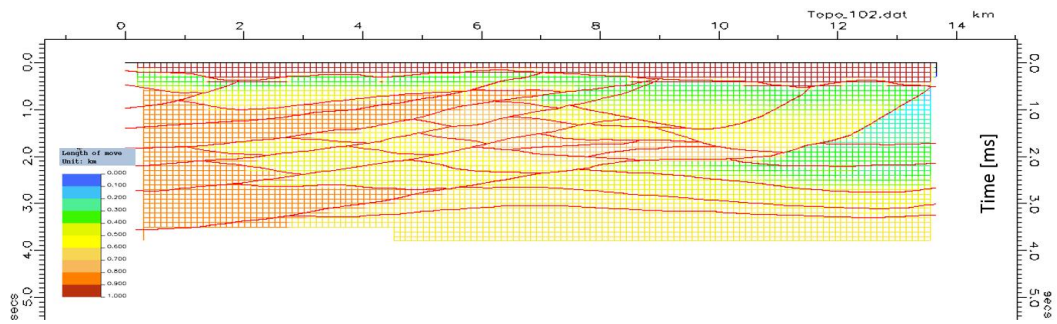


(d)

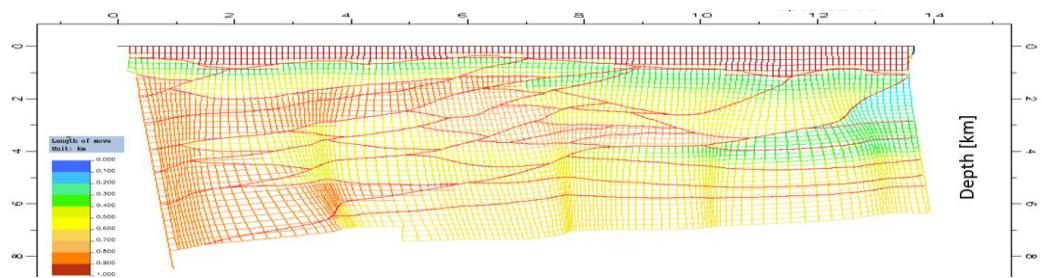
Figura 19. (a) Modelo de velocidad de la sección CHVRB-1993-102 usado para realizar conversión T/D mediante el trazado de rayo imagen en los dominios (b) tiempo, (c) profundidad y (d) función de desplazamiento lateral en profundidad.



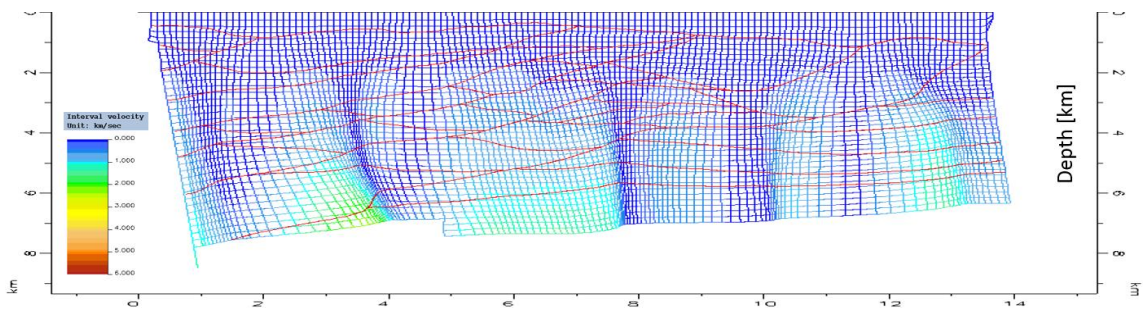
(a)



(b)

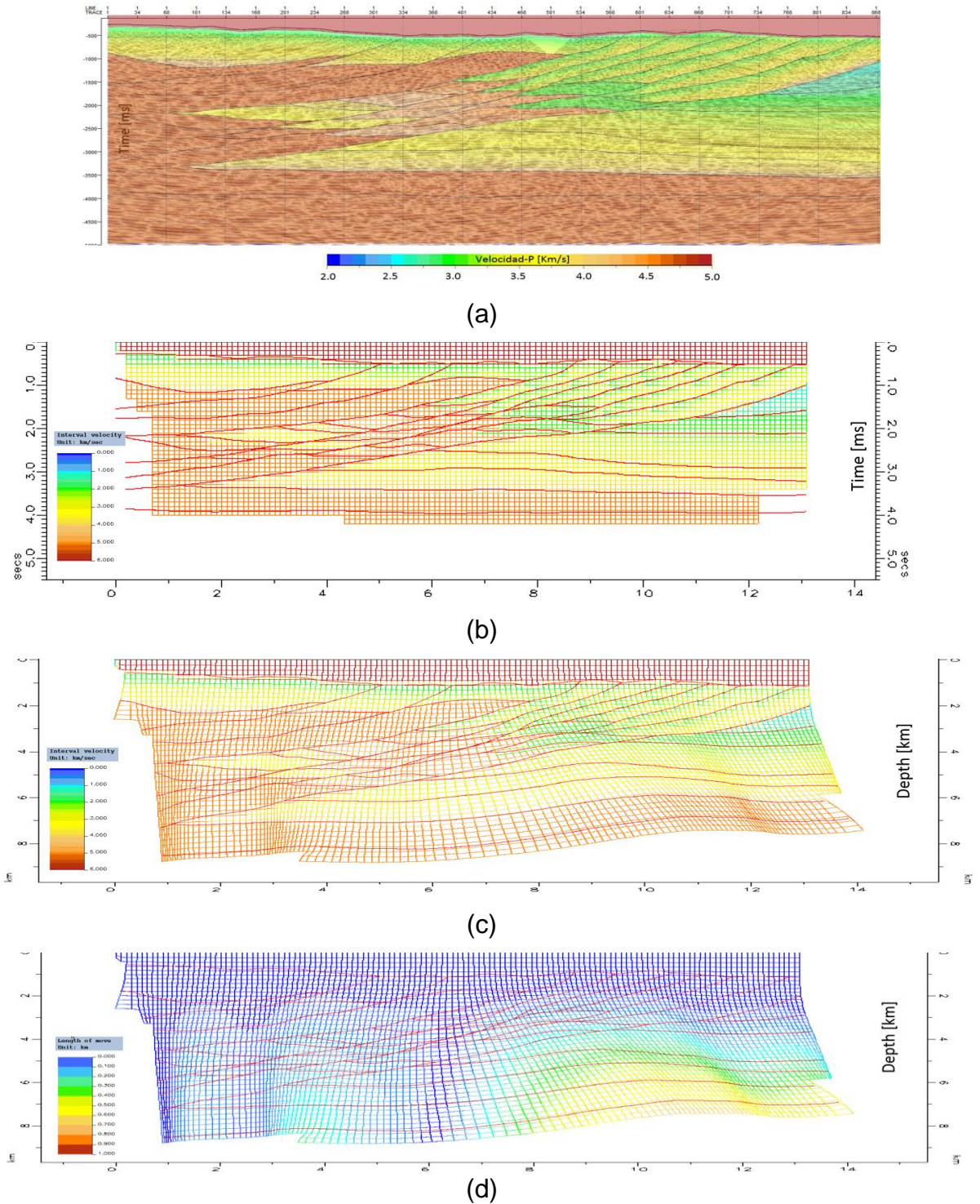


(c)



(d)

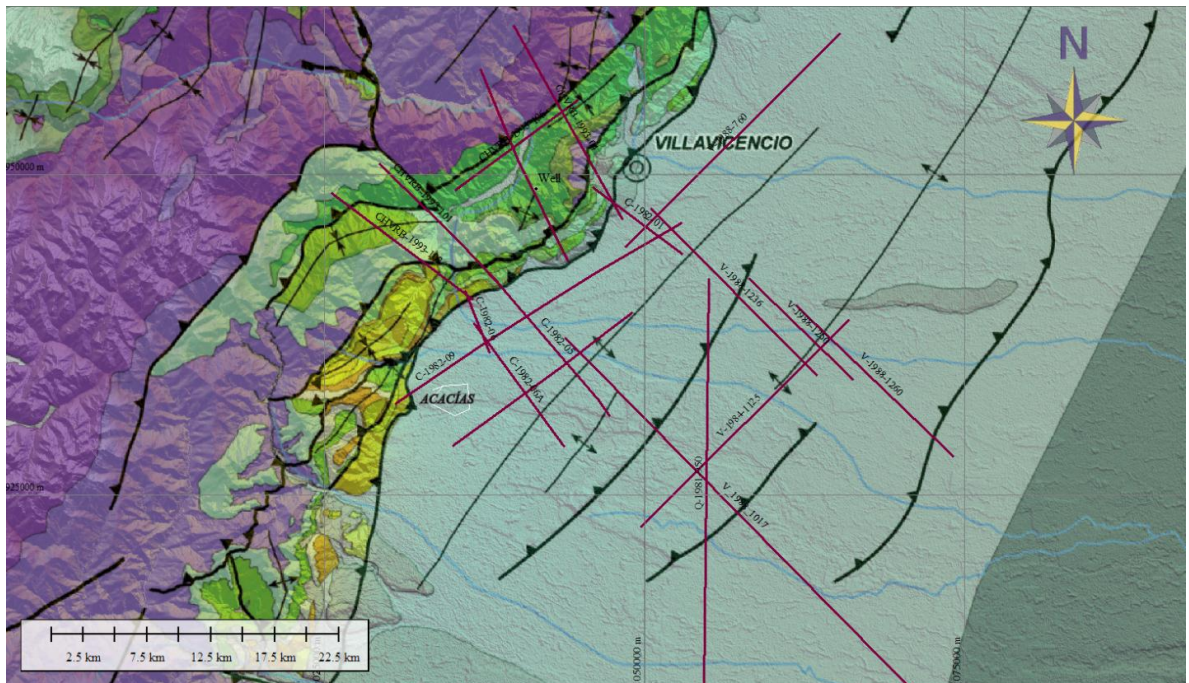
Figura 20. (a) Modelo de velocidad de la sección CHVRB-1993-101 usado para realizar conversión T/D mediante el trazado de rayo imagen en los dominios (b) tiempo, (c) profundidad y (d) función de desplazamiento lateral en profundidad.



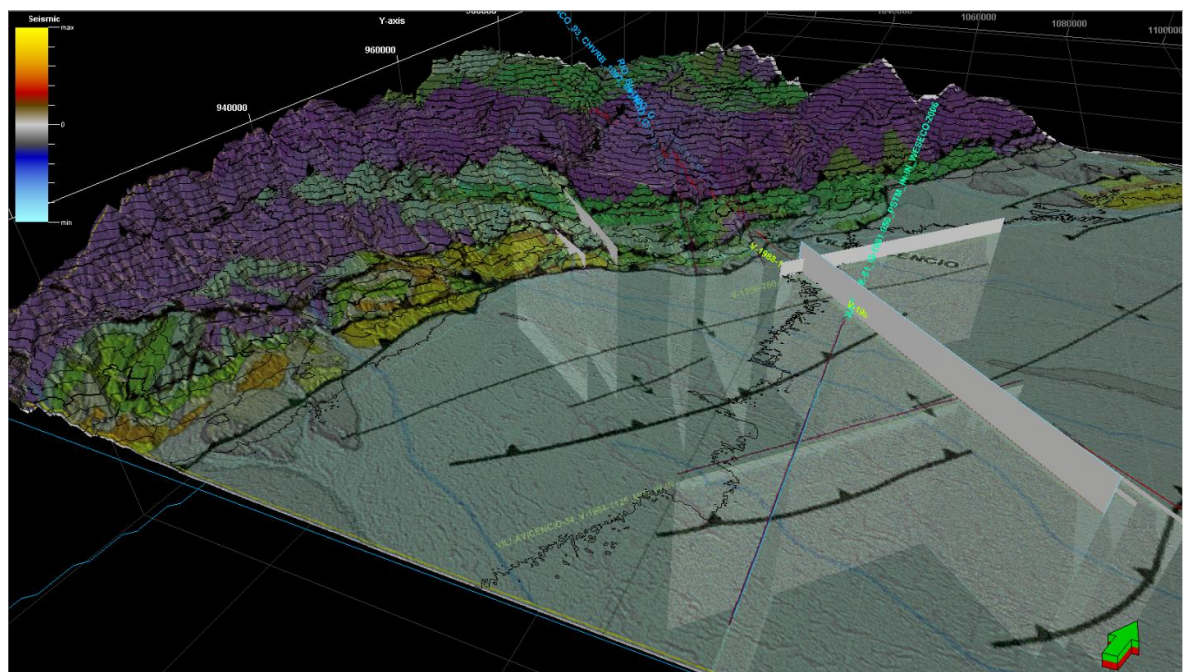
## 5.2 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRIA DE LA ESTRUCTURA ACTUAL EN EL FOREDEEP

En el sector adyacente al piedemonte oriental, en la cuenca, la definición de la geometría en el dominio tiempo se llevó a cabo mediante la interpretación de 13 líneas sísmicas; siete de las cuales (V-1988-760, V-1988-1236, V-1988-1250, V-1988-1260, V-1984-1125, V-1984-1017 y Q-1981-950) corresponden a secciones PSTM y seis (C-1982-01, C-1982-03, C-1982-05, C-1982-06, C-1982-6A, y C-1982-09) a secciones apiladas de buena calidad. Como se aprecia en la siguiente figura las secciones apiladas conectan información de las secciones sísmicas de la cuenca con las del Piedemonte.

Figura 21. (a) Ilustración de la localización de líneas sísmicas en el Foredeep con (b) mapa geológico proyectado sobre el DEM. Vista desde el Sureste de la zona de estudio.



(a)

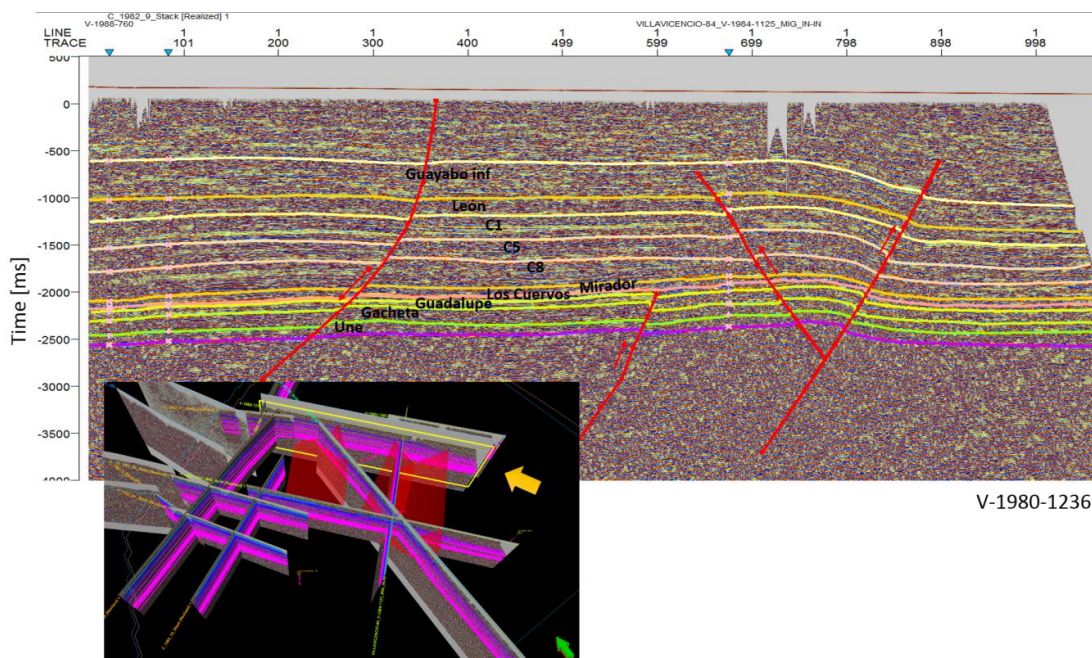


(b)

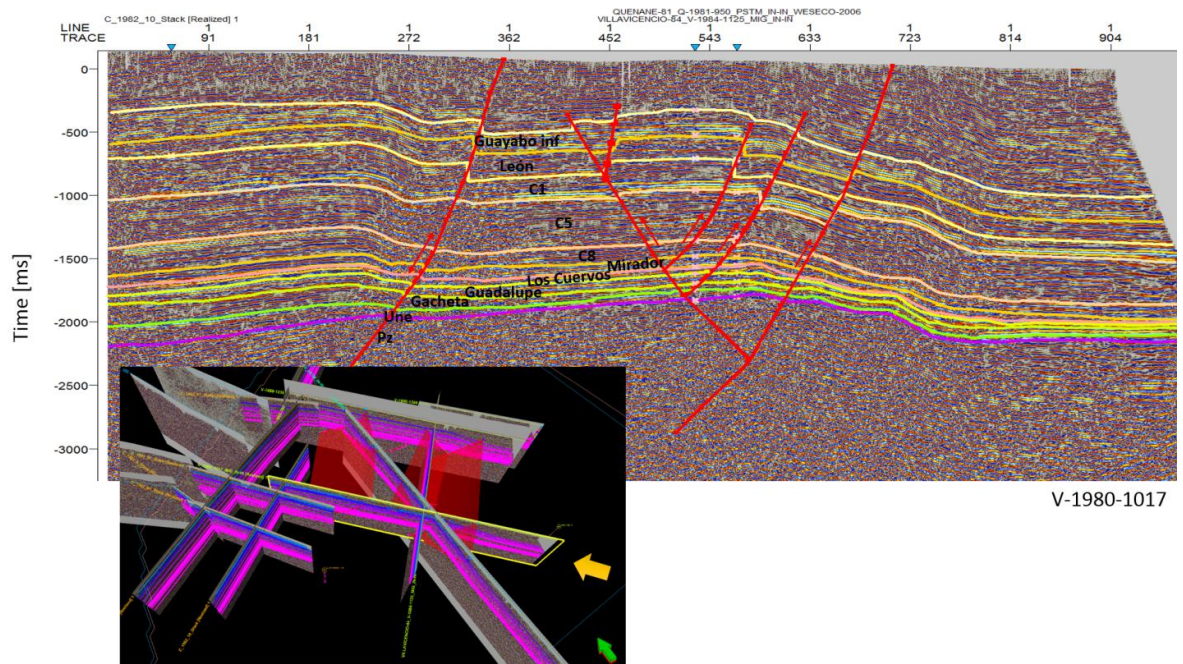
### 5.2.1 Geometría en el dominio tiempo para el sector del Foredeep adyacente

Sobre las secciones sísmicas del foreland se han interpretado tres fallas principales con vergencia Este, a las cuales se asocian pliegues anticlinales cuyos rumbos de planos axiales se orientan NNE. Otros sistemas de fallas tipo *backthrust* también ha sido identificadas sobre las secciones sísmicas (Figura 22 y Figura 23). Usando información de topes estratigráficos en pozos y patrones de reflectividad asociados a las diversas litologías se han interpretados sobre las líneas sísmicas las siguientes formaciones y discontinuidades: Basamento, Une, Gacheta, Guadalupe, Los Cuervos, Mirador, los miembros C8, C5 y C1 de Carbonera, León y Guayabo medio.

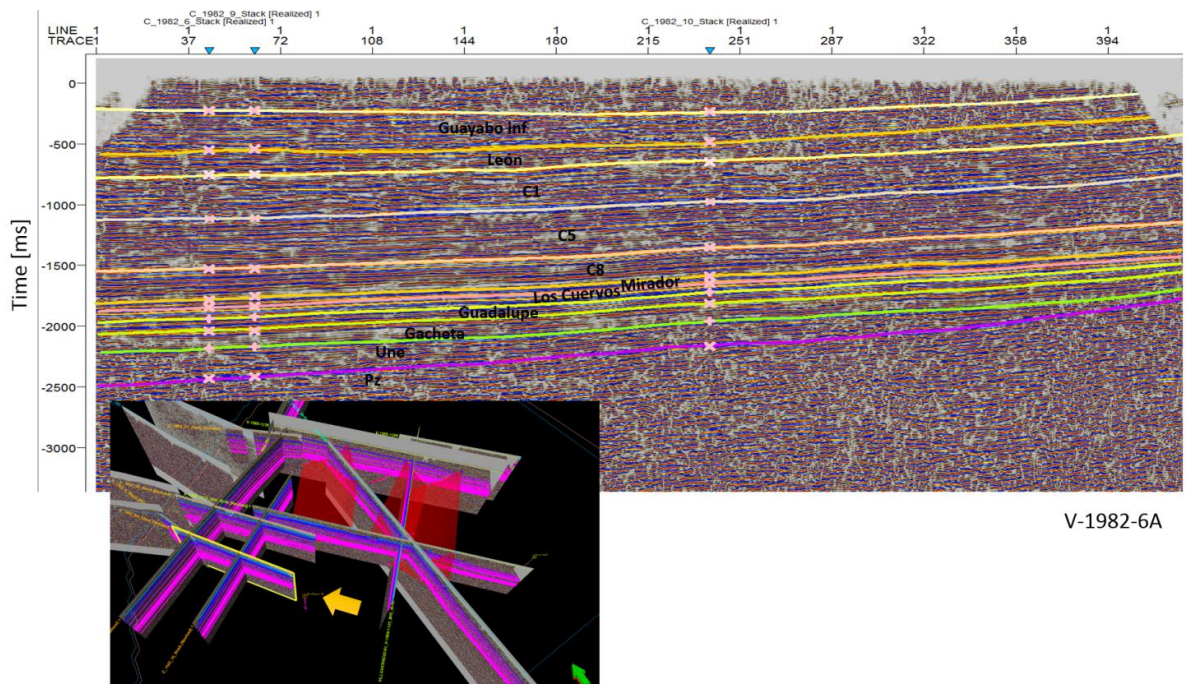
**Figura 22. Interpretación sísmica de la línea V-1980-1236.**



**Figura 23. Interpretación sísmica de la línea V-1980-1017.**

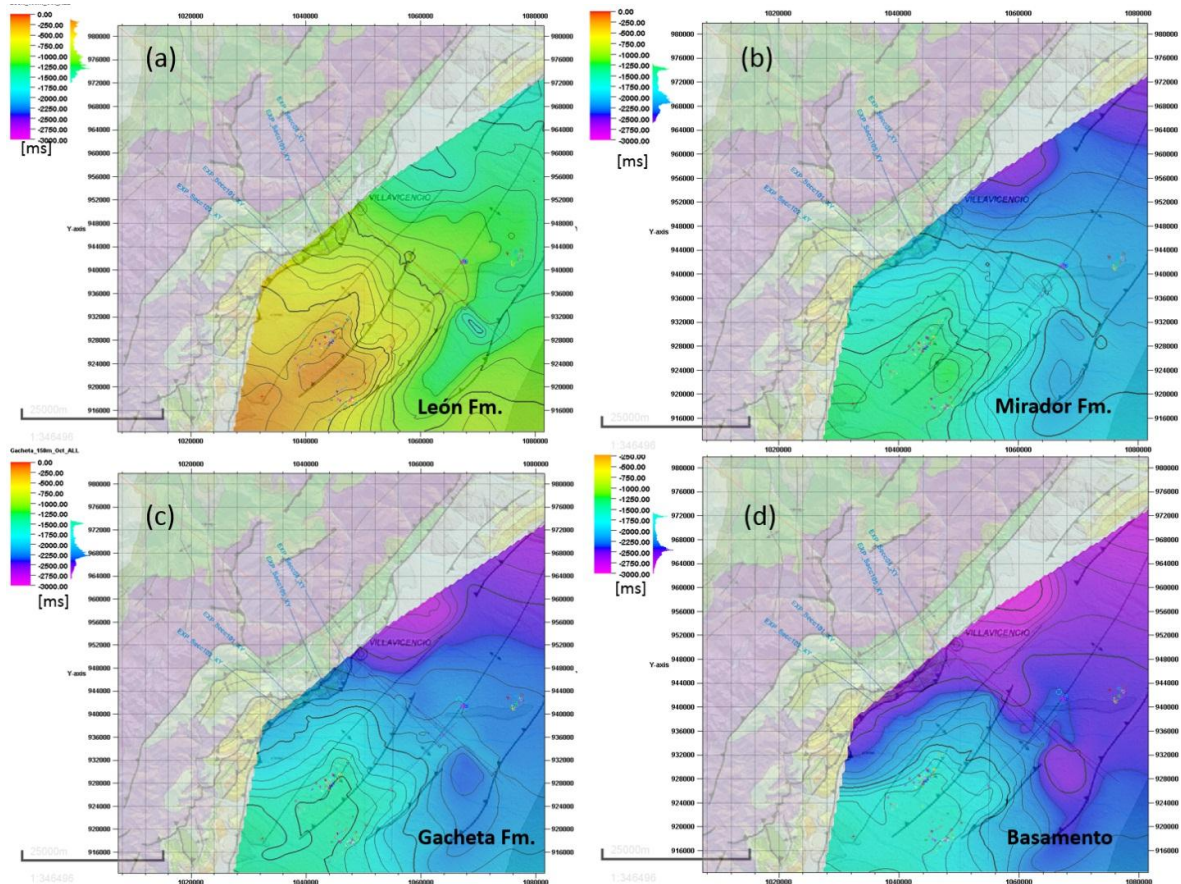


**Figura 24. Interpretación de la línea sísmica V-1982-6A.**



Los horizontes interpretados sobre las secciones sísmicas han sido usados para generar superficies en tiempo que representen la geometría de la estructura en dicho dominio, en la Figura 25 se ilustran algunas de estas superficies generadas.

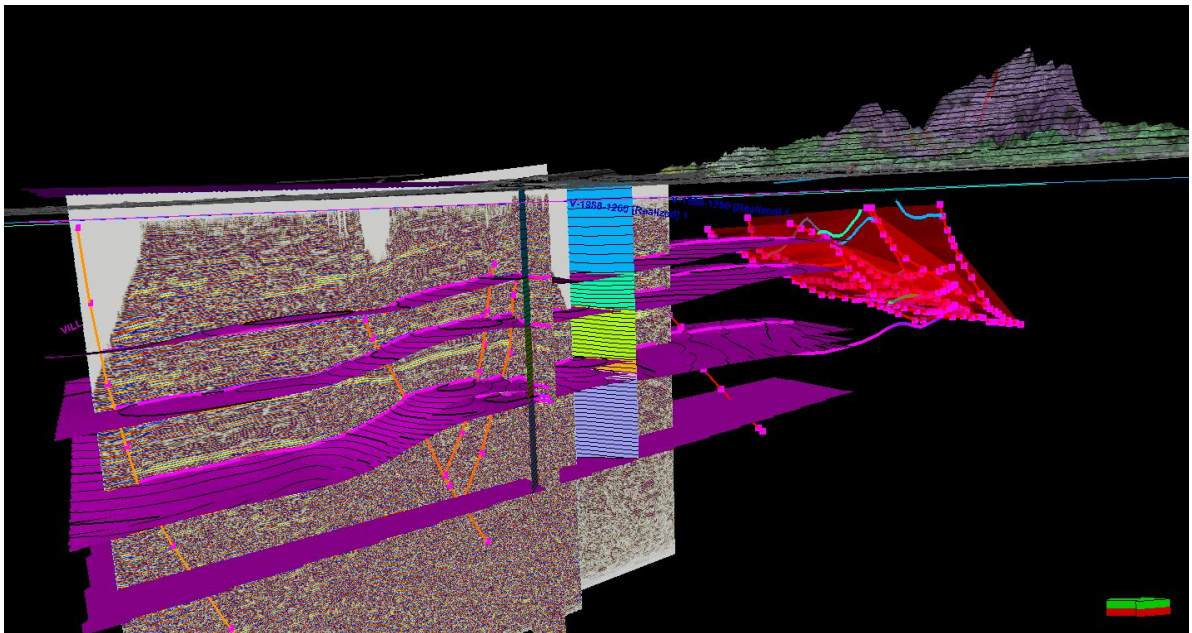
**Figura 25. Superficies en el dominio tiempo generadas a partir de horizontes interpretados sobre las secciones sísmicas para las Formaciones (a) León, (b) Mirador, (c) Gacheta y (d) el Basamento.**



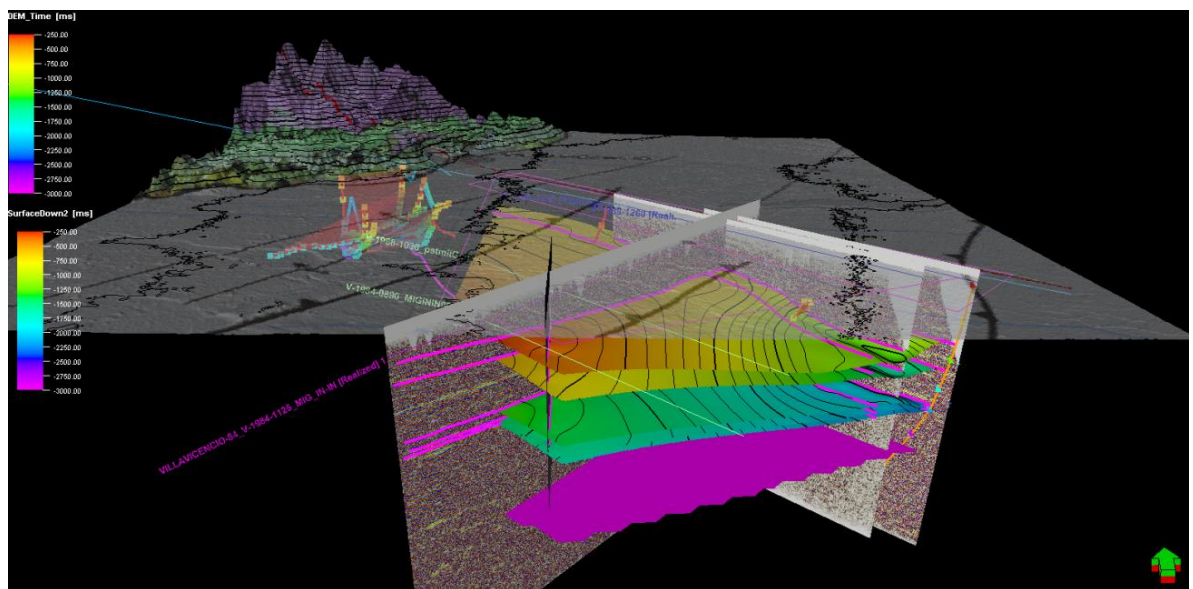
**5.2.2 Estructura en el dominio Profundidad para el sector de la Cuenca** Una vez interpretada la geometría de la estructura en el dominio tiempo, esta debe convertirse al dominio profundidad; para ello se ha generado un modelo de velocidad 3D usando los horizontes interpretados en tiempo en el software PETREL. Como se aprecia en la Figura 26 el espacio entre superficies es discretizado en bloques, en donde cada bloque puede representarse mediante una

grilla cuya resolución horizontal está definida por la separación entre nodos en la dirección X (Este-Oeste) y Y (Norte-Sur), siendo 150 metros para este caso.

**Figura 26. Vista desde el (a) Este y (a) Suroeste ilustrando las superficies usadas en la construcción de la grilla 3D.**



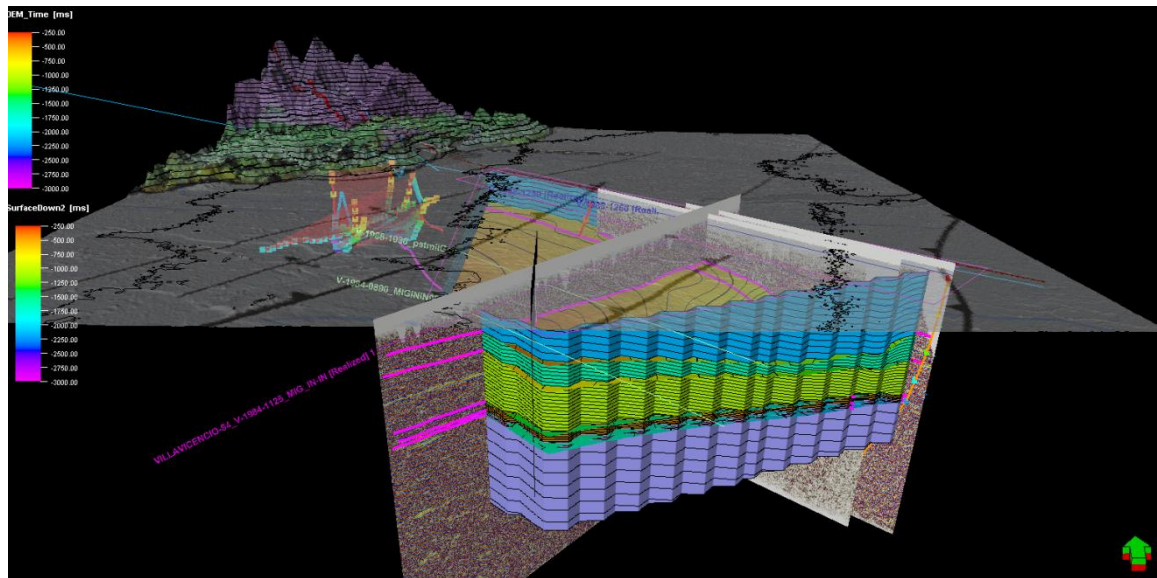
(a)



(b)

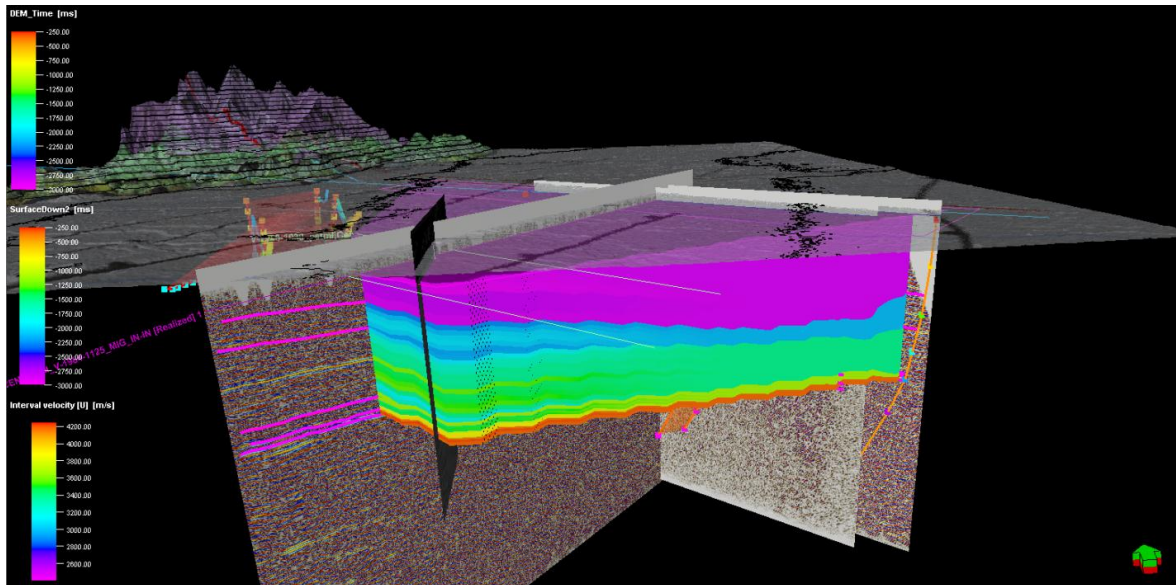
En cuanto a la resolución vertical, esta puede definirse para cada bloque entre superficies, en este caso se usa 25 ms sobre la superficie de la formación Guayabo y bajo la superficie del Paleozoico (Basamento) y 15 ms para el resto de los bloques (Figura 27).

**Figura 27. Segmento del modelo 3D indicando la configuración de la resolución vertical de la grilla.**



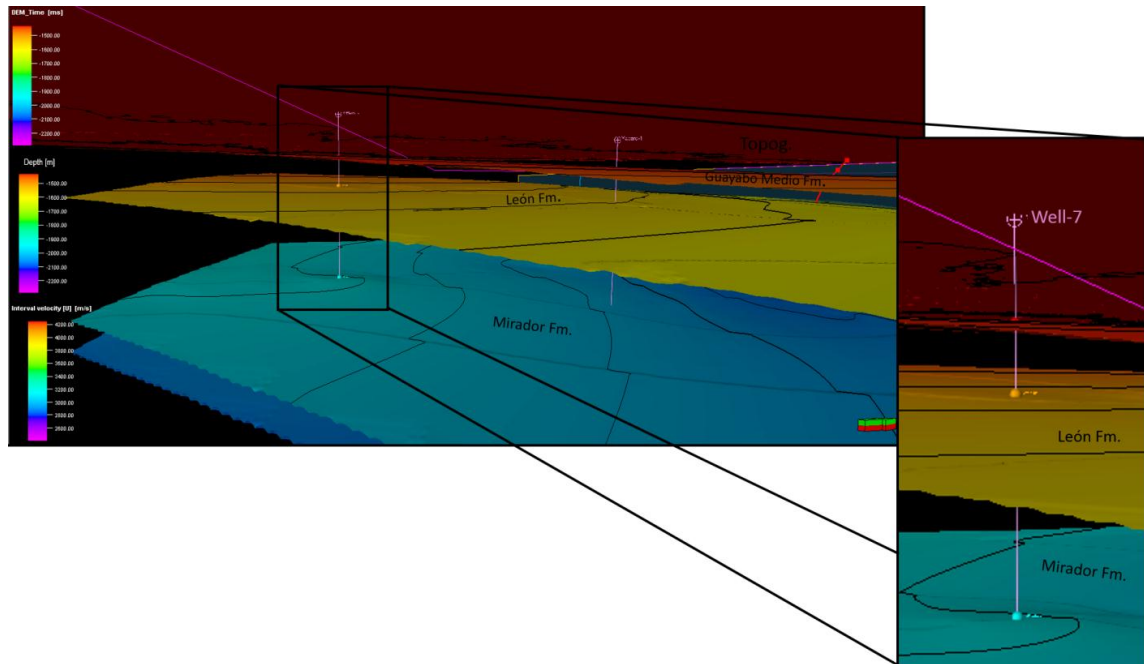
La grilla debe poblarse con velocidades de pozo, para ello se usa un algoritmo de extrapolación tipo Kriging Ordinario, en el cual las superficies en tiempo se usan como guía en dicho proceso. En la siguiente figura se ilustra un segmento del modelo de velocidad intervalo resultante, en general se observa que la velocidad aumenta con la profundidad, aunque se aprecian algunas inversiones de velocidad.

**Figura 28 Segmento del modelo de velocidad 3D generado a partir de las superficies interpretadas en tiempo**



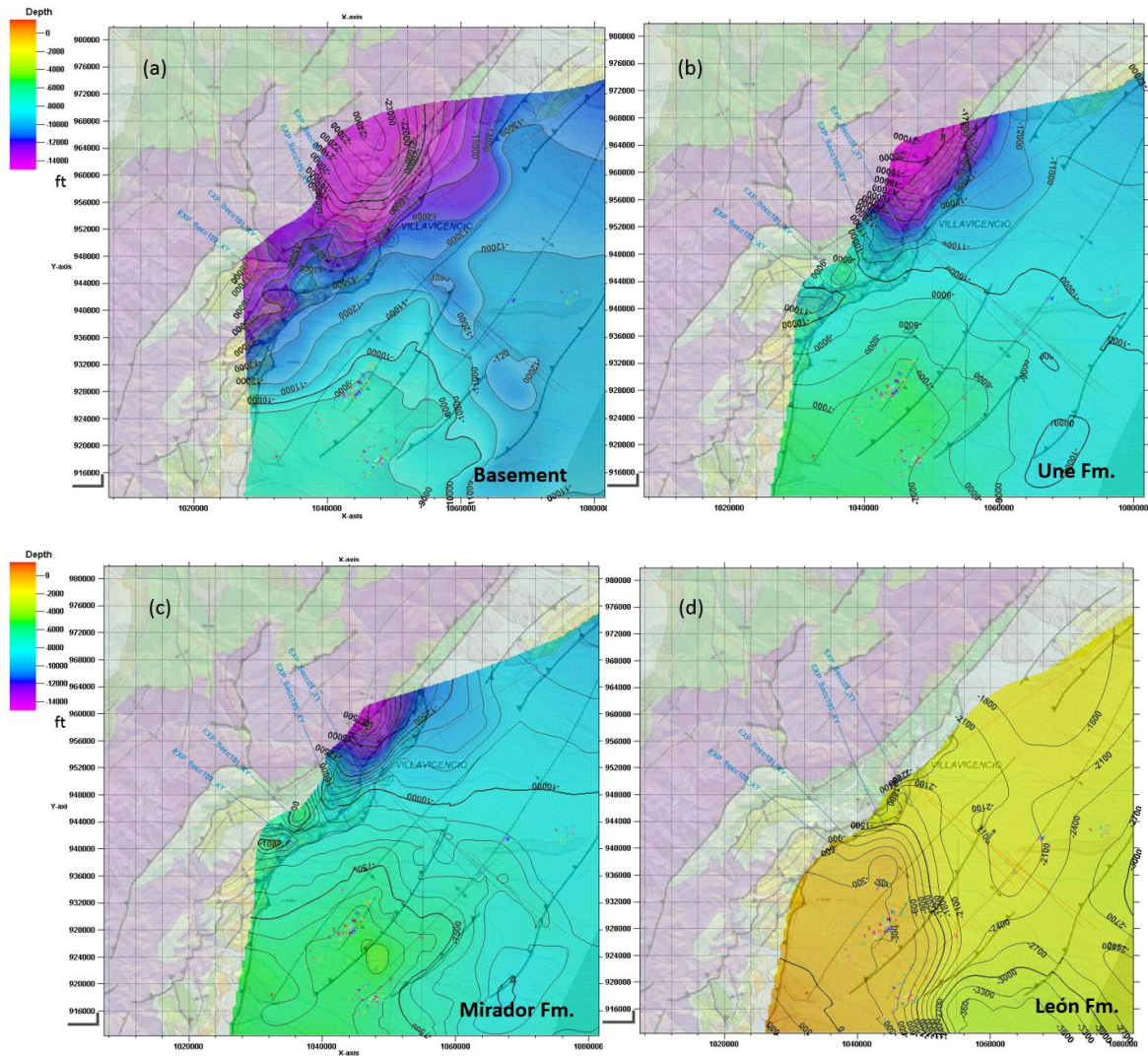
Finalmente el modelo de velocidad generado es usado para convertir las superficies interpretadas en tiempo al dominio profundidad, en este caso dicha conversión se realiza mediante un estiramiento vertical y como control de calidad se usan los topes de pozos; tal que desajusten entre estos y las superficies en profundidad generan actualizaciones iterativas al modelo de velocidad empleado. Una vez se cumple la condición de tolerancia las superficies se consideran correctamente posicionadas; en la siguiente figura se ilustra el detalle del ajuste entre topes y superficies en profundidad.

Figura 29. Detalle del ajuste entre topes y superficies en profundidad.



En la siguiente figura se ilustra en vista de mapa algunas de las superficies convertidas al dominio profundidad.

**Figura 30. Vista de mapa algunas de las superficies convertidas al dominio profundidad.**

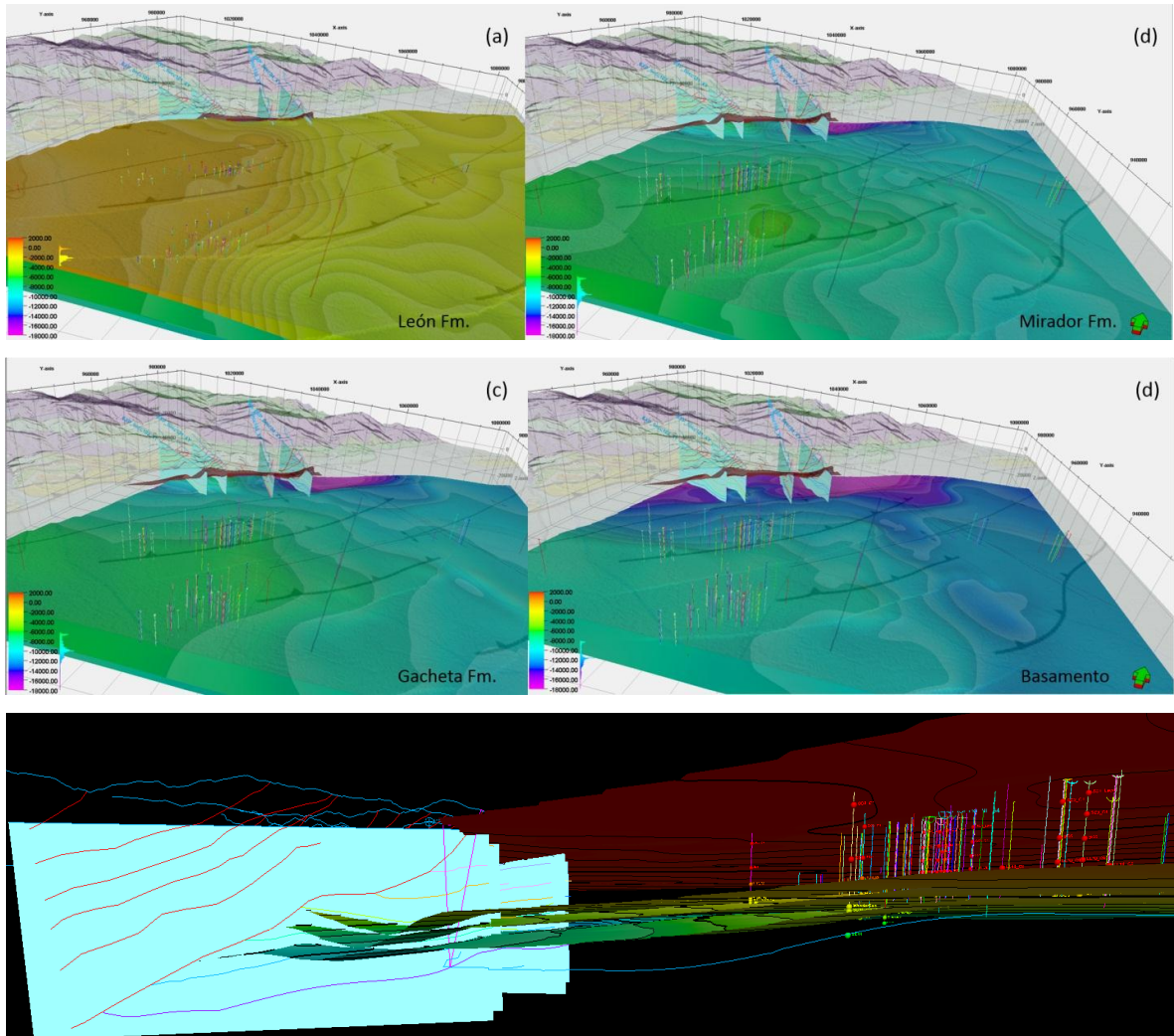


### 5.3 INTEGRACIÓN GEOMETRIA EN PIEDEMONTE Y CUENCA DEL DOMINIO FOREDEEP

Como se observa en el mapa de localización de sísmica interpretada (Figura 21a), las líneas en la cuenca no pasan el límite morfológico del Piedemonte, por esta razón las superficies convertidas a profundidad no contienen completamente

el dominio estructural denominado previamente Foredeep; sino que existe una parte de dicho dominio que ha sido interpretada solo en las secciones 2D del Piedemonte y que ha sido convertido a profundidad por un método diferente. Esto hace necesario la generación de superficies a partir las secciones 2D y su integración con cada superficie correspondiente en la cuenca. Los resultados de este proceso se ilustran en la Figura 31 para las superficies que representan las formaciones: Guayabo, Mirador, Guadalupe y Une.

**Figura 31. Vista desde el Sur de las formaciones (a) León, (b) Mirador, (c) Gacheta, (d) y Basamento y (d) desde el SW de las superficies integradas en el dominio estructural Foredeep.**



(d)

## 5.4 RESTITUCIÓN CINEMÁTICA

La geometría y disposición de fallas observadas en la estructura resultante (Figura 17 y Figura 31); así como los pliegues y los desplazamientos de falla en la secuencia sedimentaria, son indicadores de la cinemática de la deformación en la zona de estudio. Con el objetivo de reconstruir la geometría de las estructuras a estados anteriores de deformación, se usa información sobre la secuencia de activación de fallas, la edad de sedimentación de horizontes estratigráficos e inferencias sobre la exhumación a partir de termocronómetros publicados por Mora et al., (2006), Mora et al., (2010) y Ramírez et al., (2012) para la zona de estudio. En las siguientes secciones se describe el proceso de restitución de una sección 2D (CHVRB-105) y de la estructura 3D del foredeep en la cuenca.

**5.4.1 Retrodeformación de la sección CHVRB-105** Para realizar la restitución cinemática de esta sección se han seleccionado 8 pasos de tiempo, los cuales corresponden a la edad de depositación de las siguientes unidades litoestratigráficas: Formación Los Cuervos (55 Ma), Formación Mirador (40 Ma), miembro C8 de la Formación Carbonera (33 Ma), miembro C5 de la Formación Carbonera (25 Ma), Formación León (11 Ma), Formación Guayabo medio (5 Ma), Formación Guayabo superior (3 Ma) y actualidad (0 Ma).

La sección del estado de deformación inicial a finales del Paleoceno (55 Ma), representa un sistema de planicie costera en el que lodolitas de la formación Los Cuervos se depositaban sobre facies arenosas de la Formación Barco (Cooper et al., 1995). Para este tiempo la falla de Servita estaba inactiva, pero espesas secuencias sintectónicas del cretácico inferior en su bloque colgante (Fm Macanal, Las Juntas y Fomeque), reflejan su actividad durante dicho periodo como falla normal. El siguiente paso en la restitución se representa mediante la sección a 40 Ma, en la que se destaca la depositación de la formación Mirador, la cual consistió inicialmente en depósitos de planicies aluviales, seguidas por facies asociadas a

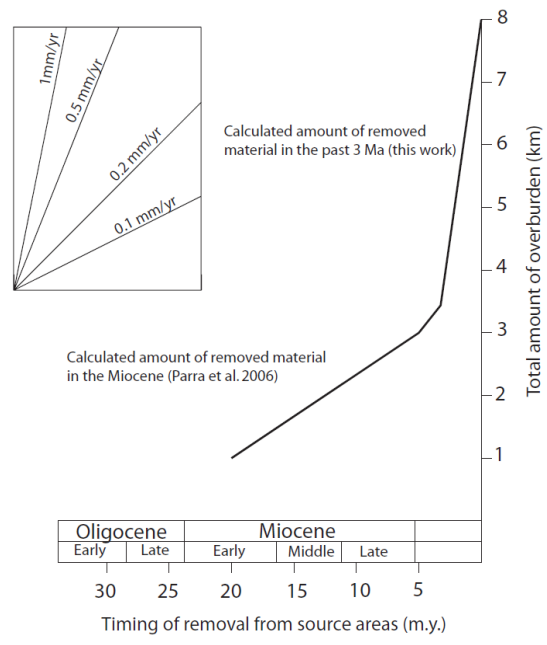
ambientes marino somero (Cooper et al., 1995). A esta edad la falla de Servita aún permanece inactiva y la configuración estructural es muy similar a la del estado anterior. A 33 Ma, el miembro basal C8 de la formación Carbonera se depositaba en un ambiente de influencia marina bajo un régimen transgresivo; desde esta edad según Fabre (1985) la cuenca está sometida a un régimen compresivo en dirección NW-SE, lo cual se traduce en la formación de pliegues. En el estado siguiente a 25 Ma, durante el Mioceno temprano se depositaban las areniscas del miembro C5 de la Formación Carbonera (Parra et al., 2010), a partir de esta edad la inversión de fallas se activa progresivamente (Parra et al., 2009 y Mora et al., 2010); este hecho se ilustra en la sección de 11 Ma por el movimiento a lo largo de la falla Servita y la formación de pliegues en su bloque yacente. Esta sección presenta la Formación León, la cual según Cooper et al., (1995) se depositó durante el mioceno medio. Después de este tiempo, la configuración de la cuenca varía fuertemente, debido a la activación de las fases principales de deformación. Como se aprecia en la sección de 5 Ma, dichas fases se expresan como desplazamiento a lo largo de la falla Servita y a lo largo de las fallas de atajo asociadas a esta.

En general en los estados 3Ma y 5Ma toda la secuencia meso-cenozoica se presenta plegada, presentando pliegues más amplios, suaves y con menor relieve a 5Ma que a 3Ma. En la zona intra fallas Servita-Villavicencio identificada previamente como dominio de imbricaciones, se concentra una deformación importante, representada por mayor cantidad de fallas y pliegues más apretados. En el dominio foredeep también se presenta para estos estados plegamiento, aunque de menor orden de magnitud, si se compara con el de los otros dominios. A 3 Ma y 5 Ma se asumen todas las fallas activas, siendo la falla de inversión Servita, la de mayor desplazamiento. Durante este periodo las fallas de atajo (*short-cuts*) Mirador y Villavicencio presentan desplazamientos importantes, como lo soportan datos de AFT reportados por Mora (2007); se destaca además la

formación de un retro-cabalgamiento (*back-thrust*) en el bloque colgante de la falla Mirador.

Datos publicados por Mora et al., (2008) sugieren un incremento en la tasa de exhumación desde el Plioceno (Figura 32), generando la exhumación de entre 3 a 5 km de material durante los últimos 3 Ma. Un valor en este rango (4200m) representa el desplazamiento vertical de la falla Mirador y fue usado para realizar el movimiento del bloque colgante a lo largo de dicha falla, relativo a las formaciones del cretácico inferior en los bloques colgante y yacente.

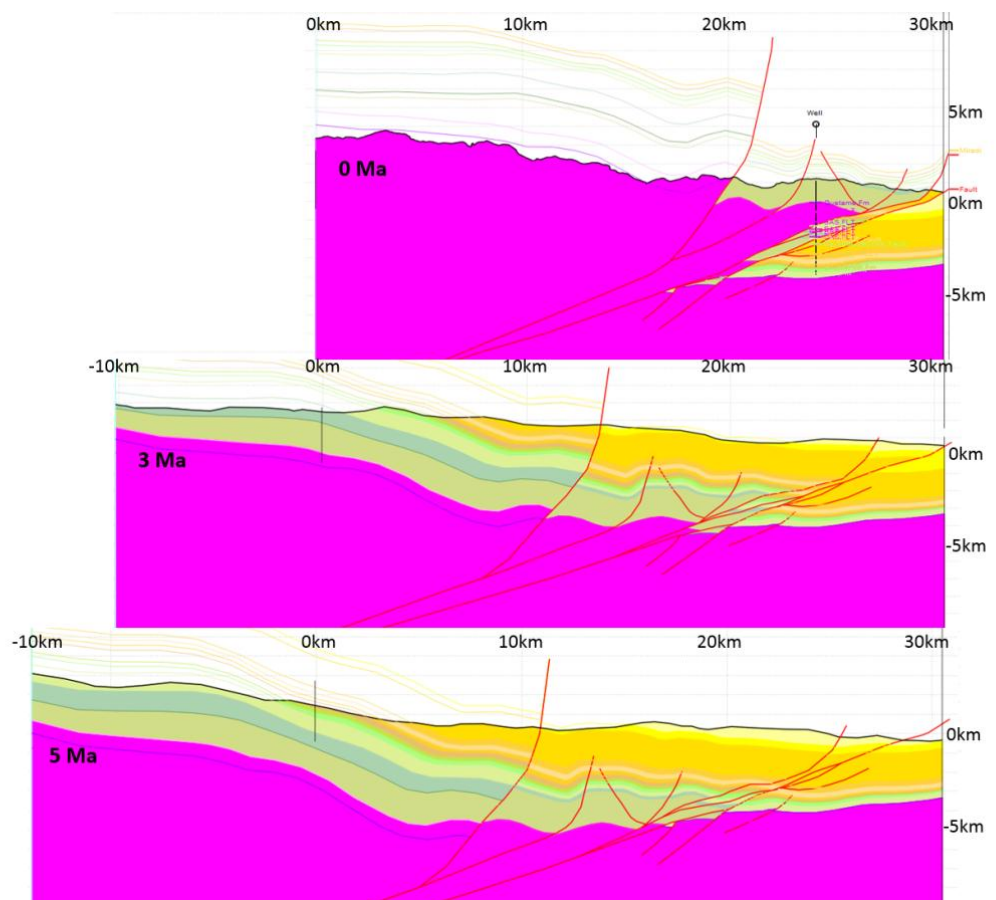
**Figura 32. Compilación de cantidad inferida de material erosionado a través del tiempo (tomado de Mora et al., 2008), ilustrando el incremento en la tasa de exhumación desde el Plioceno.**

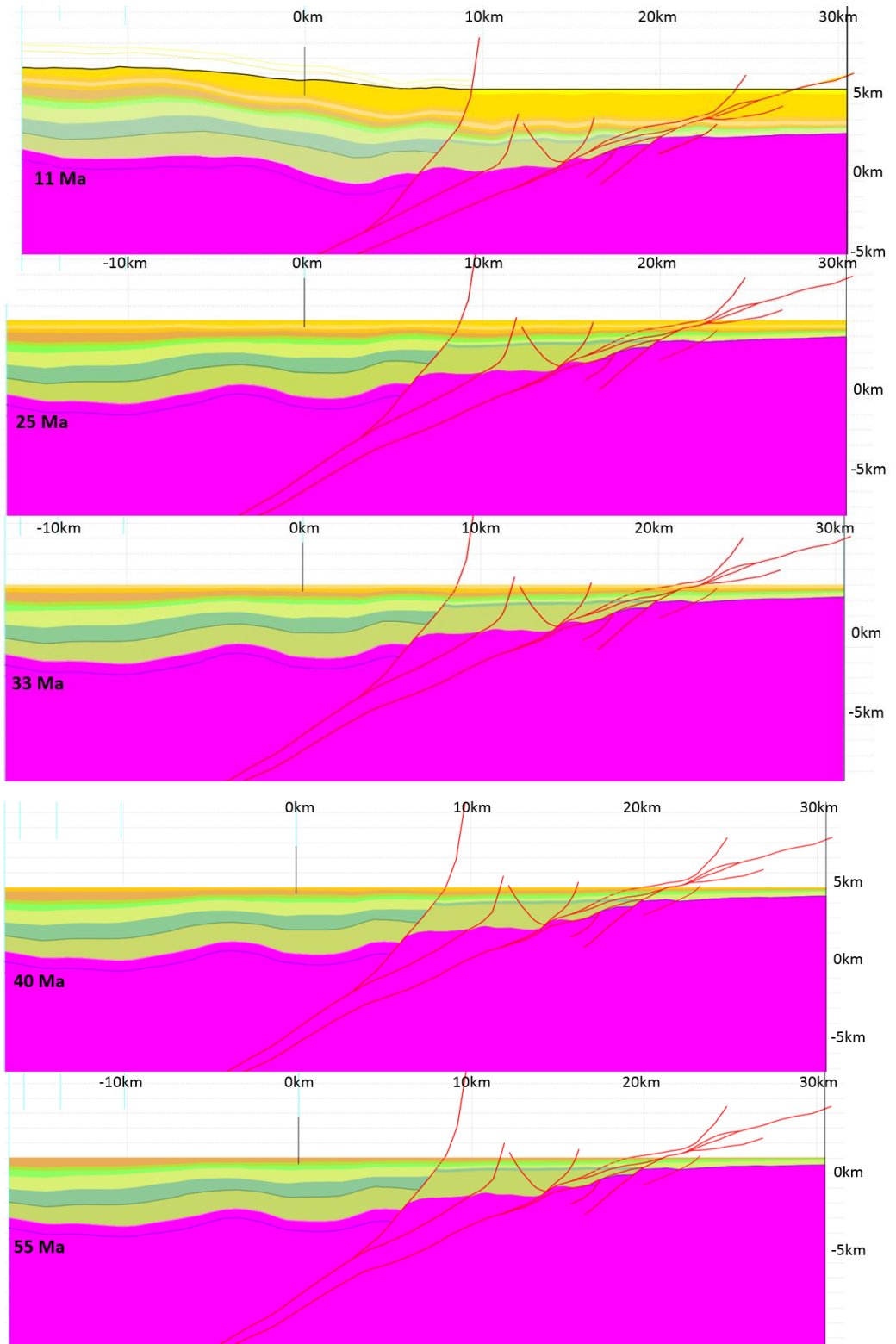


La mayor tasa de exhumación desde el plioceno, se refleja en un mayor acortamiento para los estados de la deformación más recientes (ver Figura 33). El desplazamiento relativo entre las secciones 3 y 0 Ma en la sección restituida es 10.8 Km; lo que corresponde al 60% del acortamiento total, usando como

referencia la sección en estado no deformado para calcularla. Este resultado es comparable con el obtenido por Mora et al., (2008) a partir de retro-deformaciones de secciones estructurales balanceadas, en las cuales estimaron que aproximadamente el 50% del acortamiento del piedemonte llanero de la cordillera oriental ocurrió durante los últimos 3Ma.

**Figura 33. Restitución cinemática a diferentes pasos de tiempo de la sección 105.**

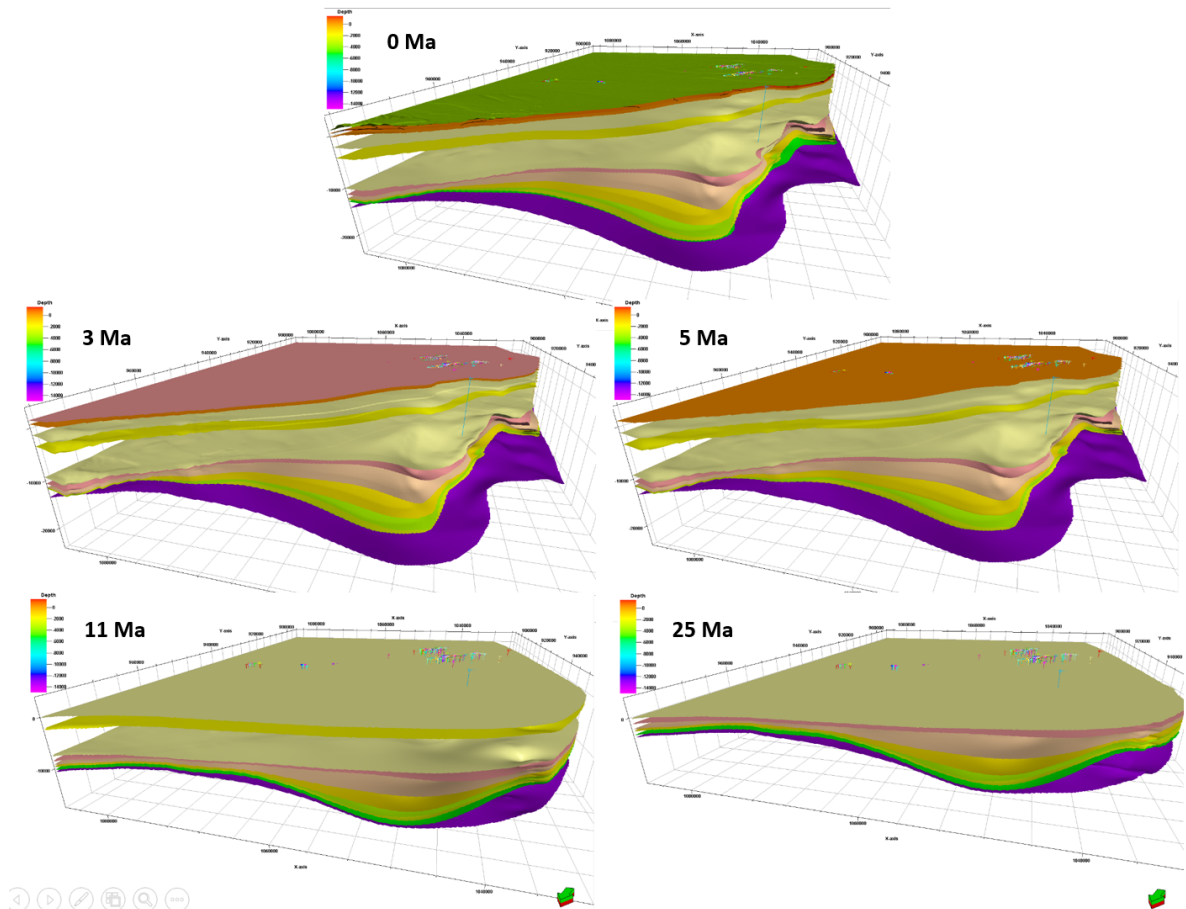




**5.4.2 Restitución cinemática de la estructura 3D en el foredeep** El modelo en profundidad obtenido de la integración de la geometría del foredeep y del piedemonte en el sector más proximal, representa la estructura en el estado de deformación actual. Este modelo puede usarse para restituir la geometría a estados de deformación anterior, que permitan evaluar posibles rutas de migración de hidrocarburos a intervalos de tiempo particular. Esta restitución se lleva a cabo mediante decompactación vertical de las rocas yacentes por eliminación de carga y posterior eliminación de pliegues en las superficies que correspondan en cada paso de tiempo. En el primer paso de restitución, en el que se reconstruye la geometría a 3 Ma, la carga que se elimina corresponde a las rocas que suprayacen la Formación Guayabo Superior, siendo las Formaciones yacentes decompactadas en función de la profundidad y de las propiedades asignadas a cada una (Anexo 5). Seguido de este proceso, la superficie que representa la Formación Guayabo Superior se usa como superficie de referencia en el proceso de desplegado por la técnica flexural Slip y se datumiza a 150m, representando el nivel base de un ambiente de alta energía, asociado a sistemas fluviales generados por el levantamiento de la Cordillera Oriental, en la que de acuerdo con Cooper et al., (1995) se depositó la Formación Guayabo. De manera similar se restituye la estructura al estado de deformación a 5Ma, en cuyo caso la decompactación se realiza en términos de la eliminación de carga de la Formación Guayabo Superior, estableciendo para este momento en el tiempo, la Formación Guayabo medio como paleo-topografía con datum 150m. La geometría resultante es usada para restituir la estructura a 11Ma, siendo en este caso eliminada la carga aportada por la Formación Guayabo medio, para decompactar las formaciones yacentes. La superficie que representa la Formación León es usada como superficie de referencia para eliminar el efecto de plegamiento sobre la estructura. Finalmente para llevar la estructura al estado de deformación de 25Ma, se elimina la carga de la Formación León y de las rocas yacentes sobre el miembro C1 de la Formación Carbonera; usándose la superficie que representa el miembro C5 de la formación Carbonera como superficie de referencia durante el

proceso de eliminación de plegamiento. Las geometrías resultantes en cada estado de deformación se ilustran en la siguiente figura.

**Figura 34. Modelo en profundidad en diferentes estados de deformación en función del tiempo.**



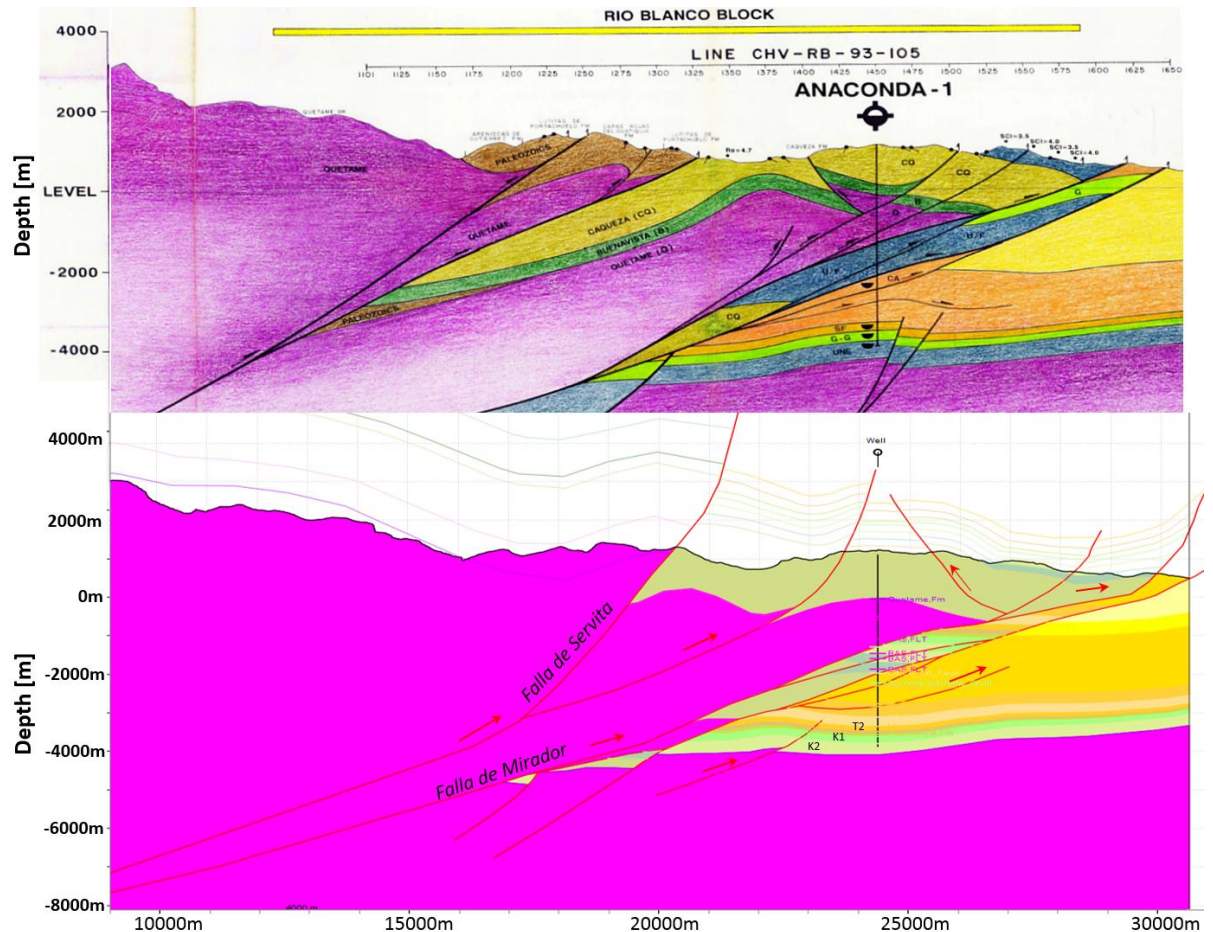
## 6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 OBSERVACIONES SOBRE LA ESTRUCTURA EN PROFUNDIDAD DEL MODELO GENERADO

La geometría de la estructura en profundidad obtenida mediante el desarrollo de la metodología propuesta, presenta diferencias importantes con respecto a otras secciones publicadas. En la figura 35 se presentan: la geometría generada por Chevron (1996) después de la perforación del Pozo Anaconda-1 y la de este trabajo respectivamente. En ambos casos las restricciones aportadas al modelo por los datos de superficie han permitido obtener una geometría relativamente similar en el sector más somero; con rocas asociadas al Macizo de Quetame y del cretácico inferior aflorando al oeste y este respectivamente de la Falla Servita. Sin embargo, se observan múltiples diferencias, entre ellas: (1) la geometría de la falla Servita, siendo de mayor pendiente la obtenida en este trabajo, lo que resulta consistente con el hecho de que se trata de una falla originalmente normal del cretácico inferior, invertida durante la Orogenia Andina según Mora et al., (2008); (2) en el segmento intra-fallas Servita-Mirador se observa un basamento más fallado en la sección de Chevron (1996) que en la presentada en este trabajo, respecto a esto cabe decir que un mayor número de fallas en el bloque colgante de Mirador representa una mejor aproximación a la realidad, ya que estas fallas fueron reportadas durante la perforación del Pozo Anaconda-1 y que pueden también identificarse sobre la sección sísmica CHVRB-1993-105; sin embargo, debido a que son fallas de desplazamiento corto e intra-basamento (que no generan contrastes de velocidad significativos) se han generalizado y no se incluyen en el modelo generado en el presente trabajo. (3) Otra diferencia es un flanco trasero muy extendido en el pliegue anticlinal del bloque colgante de la falla Mirador en la sección de Chevron (1996) en comparación con menor cantidad de

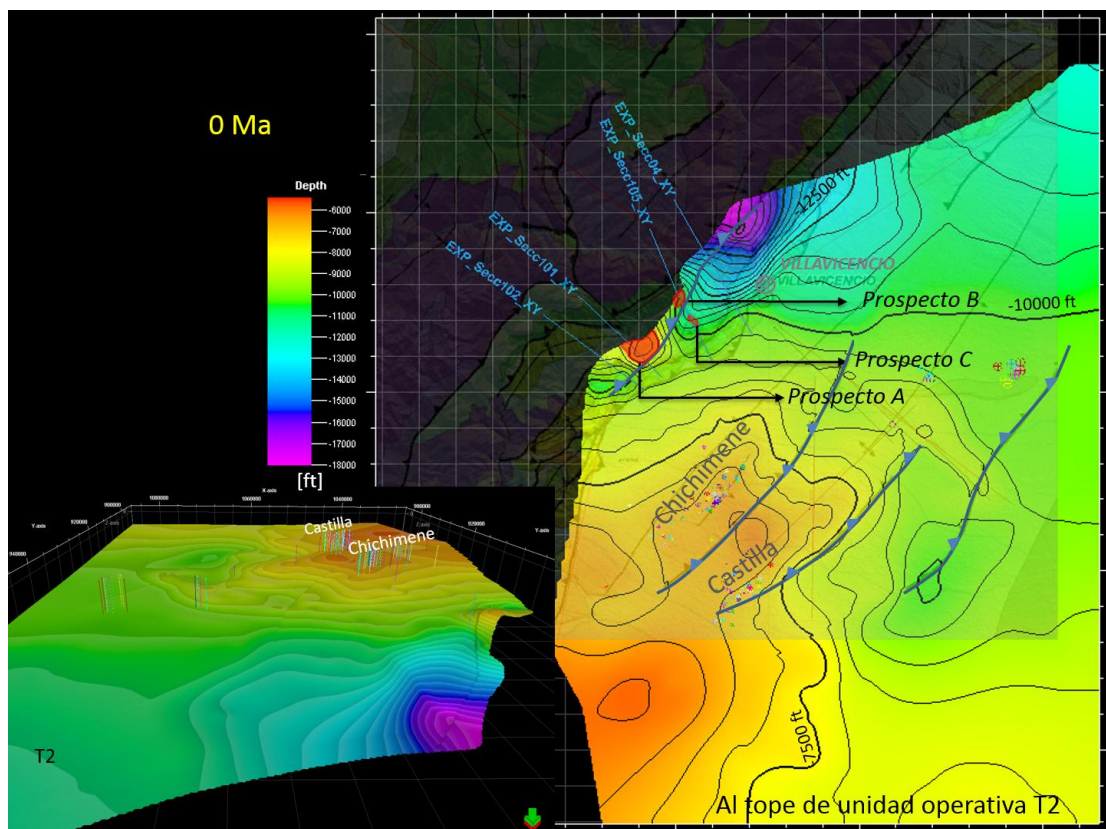
material según la geometría obtenida en el presente trabajo; (4) respecto al segmento intra-fallas Mirador y Villavicencio, se observan diferencias geométricas menores y en general ambas secciones coinciden en un dominio imbricado para esta zona. (5) Finalmente en el dominio del foredeep se observa la diferencia más importante: en la sección de Chevron (1996) se presenta un pliegue anticlinal; mientras que para la sección presentada en este trabajo no existe geometría antiformal al nivel de las formaciones reservorio perforadas por Anaconda-1, pero si un pliegue anticlinal más proximal al piedemonte.

**Figura 35. Comparación de la sección estructural en el dominio profundidad obtenida por (Superior) Chevron en 1996 y (inferior) este trabajo.**

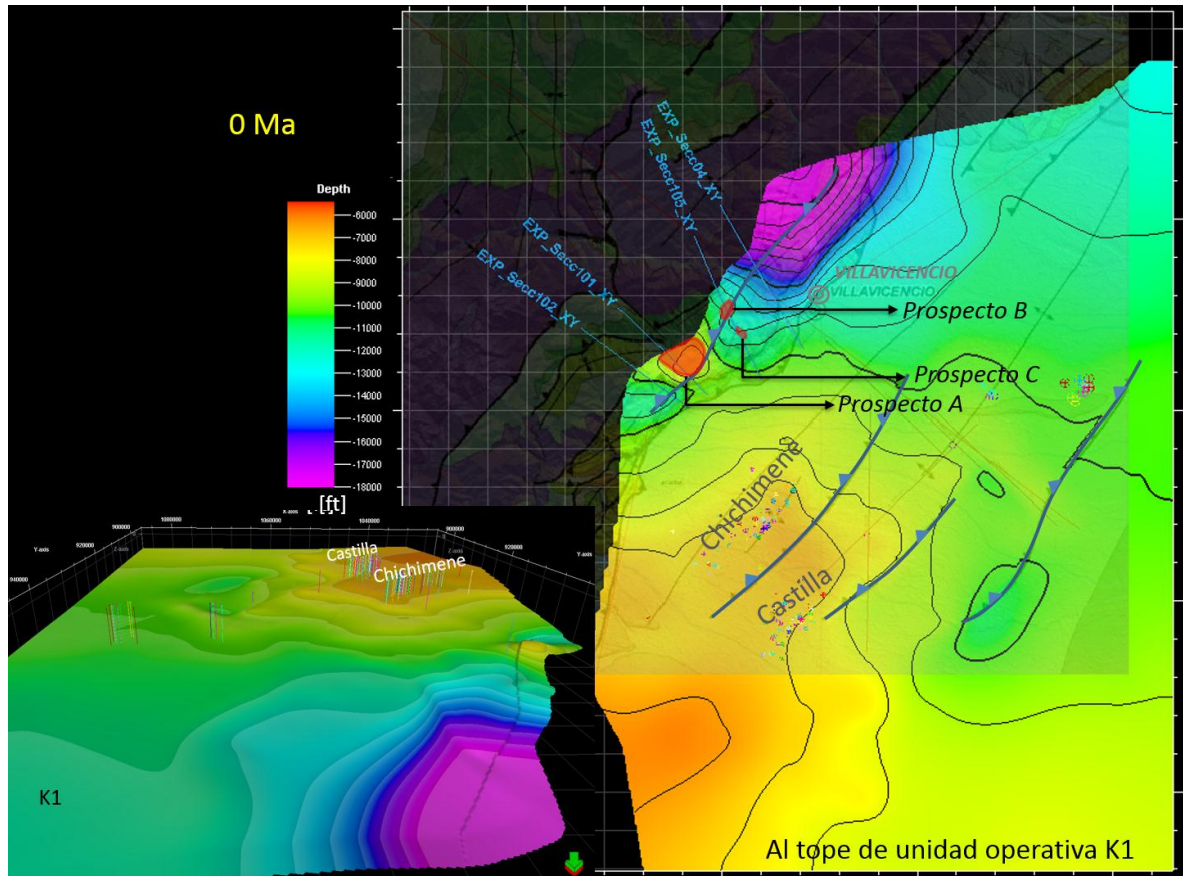


Lo anterior en términos exploratorios es una diferencia sustancial, ya que implica un posicionamiento diferente para el antiguo prospecto. La geometría de la estructura obtenida en este trabajo podría explicar el desacierto exploratorio del pozo en términos solo de la trampa, sin considerar los demás elementos del sistema petrolífero. Los resultados obtenidos en esta sección sugieren que el prospecto podría localizarse en un anticlinal más proximal al piedemonte en el dominio foredeep y en el sector suprayacente intra-fallas Mirador y Villavicencio. Sin embargo, los mapas en profundidad generados al tope de las unidades de interés (T2 y K1) (Figura 36 y Figura 37) indican niveles estructurales bajos en el sector Norte, los cuales se incrementan progresivamente en dirección Sur; donde se localizan los niveles estructurales más altos, a los cuales se asocian los campos Chichimene y Castilla.

**Figura 36. Vista en planta y 3D desde el norte en el dominio profundidad, al Tope de la unidad operativa T2, equivalente a las Formación Mirador.**



**Figura 37. Vista en planta y 3D desde el norte en el dominio profundidad, al Tope de la unidad operativa K1, equivalente a las Formación Guadalupe.**



Los mapas en profundidad generados al tope de las formaciones de interés (Figura 36 y Figura 37) muestran que la geometría de la estructura en el sector más proximal al piedemonte en el dominio foredeep es variable, con niveles estructurales bajos al NNW de Villavicencio y ciertas anomalías en cercanías a las sección CHVRB-93-101, las cuales podrían ser de intereses exploratorio considerando que se localizan en una posible ruta de migración de hidrocarburos entre las paleo-cocinas de la Cordillera Oriental y el Piedemonte y las acumulaciones comprobadas en los Campos Chichimene y Castilla. Con base en estas premisas, en la siguiente sección se evalúa la prospectividad de dichas estructuras considerando no solo la geometría de la estructura obtenida; sino los demás elementos del sistema petrolífero.

## 6.2 EVALUACIÓN DE LA PROSPECTIVIDAD DE LAS ESTRUCTURAS MÁS PROXIMALES AL PIEDEMORTE EN EL DOMINIO FOREDEEP

En esta sección se evalúa la prospectividad en términos de la Probabilidad de hallazgo de hidrocarburos. Para ello se usa la metodología propuesta por la CCOP (*The Coordinating Committee for Coastal and Offshore Geoscience Programmes in East and Southeast Asia*) en la que se cuantifica la probabilidad de un descubrimiento de un prospecto en términos de la evaluación independiente de los siguientes factores: Reservorio, trampa, sistema de carga de petróleo y retención después de la acumulación.

**6.2.1 Reservorio** La probabilidad de que exista un reservorio efectivo puede estimarse multiplicando la probabilidad de la presencia efectiva de facies reservorio (Pr\_A) y la probabilidad de existencia de un reservorio de buena calidad (Pr\_B). Pr\_A es función del ambiente depositacional y de la certeza que se tenga sobre el ambiente en función de la calidad de los datos usados para determinarlo.

En este caso las unidades reservorios de interés son las formaciones Une (unidad operativa K2), Gacheta (unidad operativa K1) y Mirador (unidad operativa T2). En cuanto a la unidad K2, Angarita y Leguizamón (2004) determinaron a partir del análisis de facies en afloramientos y corazones que la unidad K2 fue depositada en un ambiente de acumulación de ríos trezados dominado por carga de fondo dentro de una gran llanura aluvial. La unidad K1 que consta de areniscas y calizas intercaladas con lutitas, siendo de interés como reservorio el intervalo inferior, el cual consta de intercalaciones de cuarzoarenitas y lutitas depositadas en un ambiente de canales tributarios y mareales. En cuanto al tercer reservorio, según Rojas et al., (2004) la unidad T2 corresponde a una intercalación de areniscas cuarzosas y lutitas depositada en un ambiente fluvial anastomosado. Lo que indica que las facies reservorio se depositaron en ambientes predominantemente continentales. Por otro lado, la probabilidad de existencia de dichas facies

reservorio es alta, dado que ha sido comprobada mediante datos directos en los Campos adyacentes Chichimene y Castilla y que han sido mapeadas hacia la zona de interés mediante el seguimiento de horizontes a través de secciones sísmicas. Usando el ambiente depositacional y la confiabilidad de los datos usados para determinarla, como datos de entrada en la Figura del Anexo 1, se ha estimado que la probabilidad de la existencia de las unidades reservorio es 0.8.

El segundo parámetro a evaluar sobre el reservorio es la probabilidad de la existencia de un reservorio de calidad ( $Pr_B$ ), siendo la porosidad y la permeabilidad los parámetros críticos para estimarla. Dado que existe una relación entre profundidad y porosidad, en cuanto a los influencia de los procesos de cementación, fracturamiento y condiciones de presión en la preservación de los parámetros críticos, la CCPO (2000) proponen cuantificar la probabilidad de la existencia de un reservorio efectivo en rangos de profundidad para los prospectos identificados. En el caso del prospecto A (Figura 36 y Figura 37), las profundidades de las unidades reservorios T2, K1 y K2 son 3112m, 3414m y 3603m respectivamente. Para el prospecto B (Figura 36 y Figura 37) las profundidades en el mismo orden de las unidades reservorios son 2307m, 2596m y 2790m.

Además de datos de profundidad, se cuenta con medidas directas de porosidad y permeabilidad en Campos cercanos a las zona de estudio, por ejemplo Rojas et al., (2004) estimaron la porosidad en las arenas de la unidad K2 a partir del registro de densidad y de información de núcleos de los Campos Castilla y Chichimene, obteniendo porosidades entre 13% y 19%. Salazar et al., (2011) reportan a partir de información de pozos porosidad para K1 en Castilla entre 13.9% y 23.4%. Rojas et al., (2004) reportan porosidad promedio de 17% para la unidad T2 en el Campo Chichimene. En general, las porosidades reportadas para las diferentes unidades reservorio se consideran buenas.

En cuanto a la permeabilidad Salazar et al., (2011) reportan permeabilidades de 1mD a 1667mD y de 465mD a 2423 mD para las unidades K1 y K2 en Castilla respectivamente, Rojas et al., (2004) reportan permeabilidad de 400mD para la unidad T2 en Chichimene. En general, a partir de los datos reportados se consideran que las permeabilidades de las unidades reservorio están en el rango entre promedio y altas. Con base en los rangos de profundidad estimados para los prospectos A y B, los rangos de porosidad y permeabilidad reportados y considerando que el aumento en el espesor de las unidades reservorio de W a E (observado en las secciones construidas) se traduce en el aumento de la calidad del reservorio, se estima que la probabilidad de la existencia de unidades reservorio de calidad (Pr\_B) es 0.9. Como se mencionó antes, la probabilidad de que existan facies reservorio y que estas sean de buena calidad se obtiene multiplicando la probabilidad de ambos eventos independientes:

$$P_{\text{reservorio}} = Pr_A \times Pr_B = 0.8 \times 0.9 = 0.72$$

**6.2.2 Trampa** Según la metodología propuesta por la CCPO (2000), la probabilidad de que exista una trampa efectiva puede estimarse multiplicando la probabilidad de que exista estructura (Pt\_A) por la probabilidad de la existencia de un sello efectivo (Pt\_B). La probabilidad de que exista una trampa es función del tipo, la distribución espacial y la calidad de los datos sísmicos usados para definir el prospecto, así como de la técnica de conversión tiempo a profundidad empleada para determinar la localización de la trampa. En este caso, se ha empleado una metodología para realizar la conversión de información de tiempo a profundidad que integra múltiples datos y procesos, generando mejores resultados en este tipo de ambientes tectónicos; sin embargo, el limitado número de líneas sísmicas usado para definir los prospectos hace que la incertidumbre sobre la existencia de la trampa sea aun alto. La relación entre el área de los prospectos analizados y el tamaño de la grilla sísmica es bajo (<2). Usando este dato como entrada en la tabla 1 del Anexo 2, se ha definido que la probabilidad de la existencia de trampa

en el prospecto A es 0.6, dado que se encuentra en una zona de alta complejidad estructural y relativamente cerca del control de pozo, en el caso del Prospecto B, localizado sobre la sección Anaconda, se cuenta con un mejor control de pozo, pero un área de cierre menor, por lo que se ha estimado una probabilidad de existencia de la trampa de 0.5, en cuanto al Prospecto perforado C localizado sobre la misma sección, pero ubicado en un sitio donde la trampa no existe según la geometría de la estructura obtenida en este trabajo, la probabilidad asignada es 0.1. La Tabla 1 resume los resultados para cada prospecto.

Para completar el cálculo de probabilidad de una trampa efectiva, la probabilidad de la existencia de un sello efectivo ( $P_{t\_B}$ ) debe ser estimado. Para ello se debe evaluar la calidad y el mecanismo del sello, este último parámetro se divide en dos categorías: (1) sellos simples, que involucran solo las rocas que yacen sobre el reservorio y (2) sellos combinados que incluyen además sellos laterales e inferiores. En este caso, los prospectos evaluados son pliegues anticlinales, considerados mecanismos de sello simple. Respecto a la calidad del sello, esta se considera buena, puesto que consisten en niveles predominantemente lutíticos del miembro C8 de la formación Carbonera, K1 superior y Gacheta para las unidades reservorio T2, K1 y K2 respectivamente. Con base en lo anterior y usando la tabla del anexo 2 se estima que la probabilidad de que exista sello efectivo en los prospectos analizados es 0.9. Usando los valores de probabilidad estimados se ha calculado la probabilidad de existencia de trampa efectiva para cada uno de los reservorios analizados. Como se aprecia en la Tabla 1, el prospecto A presenta mayor probabilidad de existencia de trampa que el prospecto B; mientras que es prácticamente nula en el caso del prospecto perforado C.

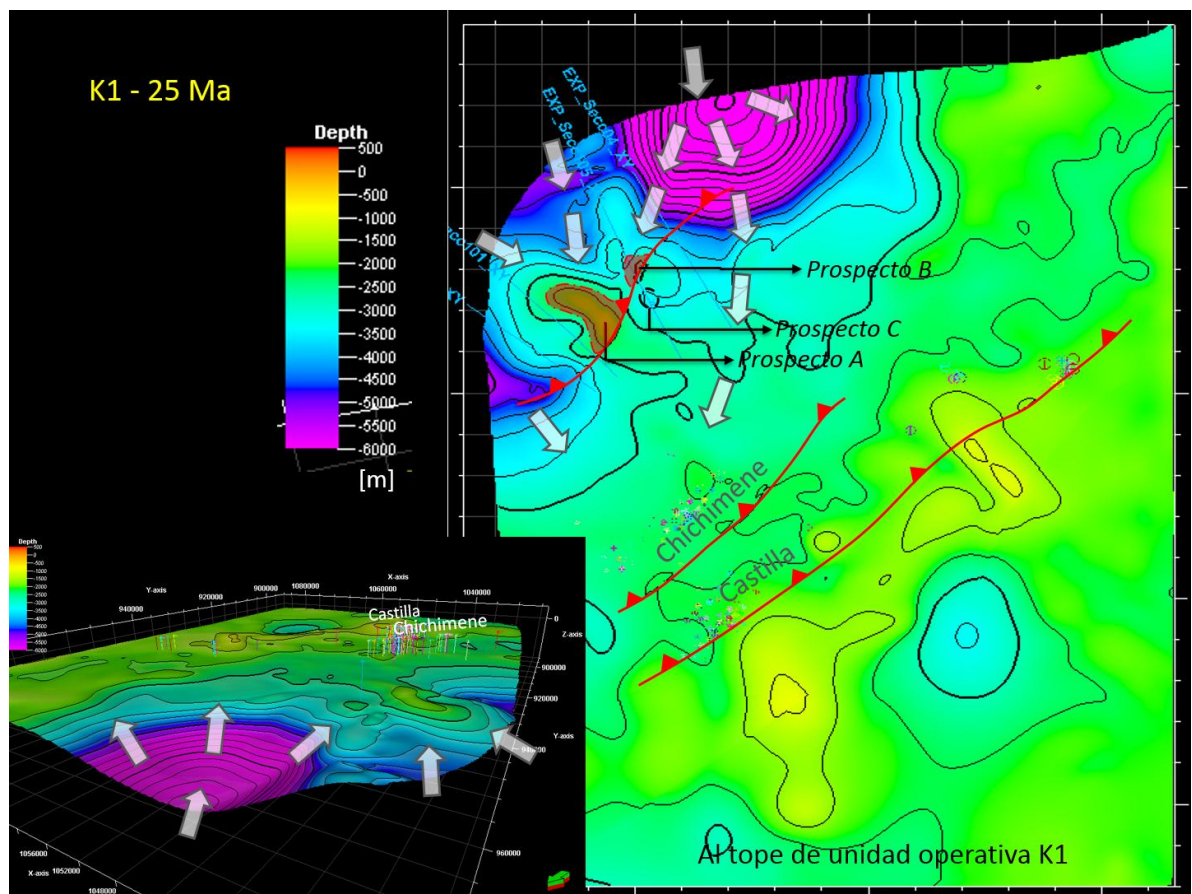
**6.2.3 Carga de Petróleo** El sistema de carga es evaluado en función de la calidad de la roca fuente y de la migración de los hidrocarburos hasta la trampa. Según la CCOP (2000) la probabilidad de tener un sistema de carga efectivo ( $P_c$ ), puede estimarse multiplicando la probabilidad de existencia de roca fuente efectiva

(Pc\_A), por la probabilidad de ocurrencia de migración de hidrocarburos hacia la trampa (Pc\_B). Respecto a la roca fuente en este caso de estudio, la principal roca generadora de hidrocarburos es la Formación Gacheta, la cual según Miller (1979) e ICP (2000) consiste en una secuencia de lutitas negras, con alto contenido de materia orgánica e intercalaciones de areniscas y calizas, depositada en un ambiente marino de plataforma externa durante el Cenomaniano-Turoniano; el carácter marino de esta formación ha sido probado en núcleos del pozo Trinidad-1 según Rincón (2011). Análisis isotópico de muestras de roca fuente de pozos realizados por Cortes et al., (2010) han permitido relacionar el crudo en Campos cercanos y la roca fuente, al establecer que la materia orgánica asociada a los crudos pesados presentes en los campos Castilla y Chichimene tiene un origen marino con aportes terrestre. Según estos mismos autores (Cortes et al., 2010) se asocian las rocas de la formación Gacheta, dos eventos principales de generación de hidrocarburos, el primero durante el eoceno-oligoceno y el segundo desde la orogenia andina. Restituciones cinemáticas realizadas por Mora et al., (2012) han permitido establecer que al primer evento se asocian facies marinas y carbonáticas de la formación Chipaque (equivalente a Gacheta) localizadas durante dicho periodo en el flanco oriental de la Cordillera Oriental; mientras que para el segundo evento, se asocian facies transicionales y siliciclasticas localizadas al oriente respecto a las primeras en el actual piedemonte y foredeep de la cuenca. Con base en las evidencias expuestas y usando la tabla del anexo 3 se establece que la probabilidad de existencia de una roca fuente efectiva es 1. Lo cual indica que se tiene certeza sobre la generación de hidrocarburos en la cuenca.

Respecto a la migración de los hidrocarburos de la roca fuente a la trampa, deben existir rutas que permitan que el flujo se efectúe y las trampas deben estar ya formadas para que los hidrocarburos que migran puedan acumularse. El modelo de la estructura obtenida en este trabajo a 0Ma, se ha retrodeformado para estimar la paleogeometría y hacer inferencias sobre las rutas de migración al tope

de los reservorios de interés en periodos particulares de tiempo. En la Figura 38 se presenta la geometría de la estructura al tope de la unidad reservorio K1 a 25 Ma, periodo de importancia para el primer pulso, puesto que fue posterior pico de generación y expulsión de hidrocarburos durante el oligoceno medio y anterior al enfriamiento de las cocinas por exhumación a los 20Ma según Mora et al., (2012).

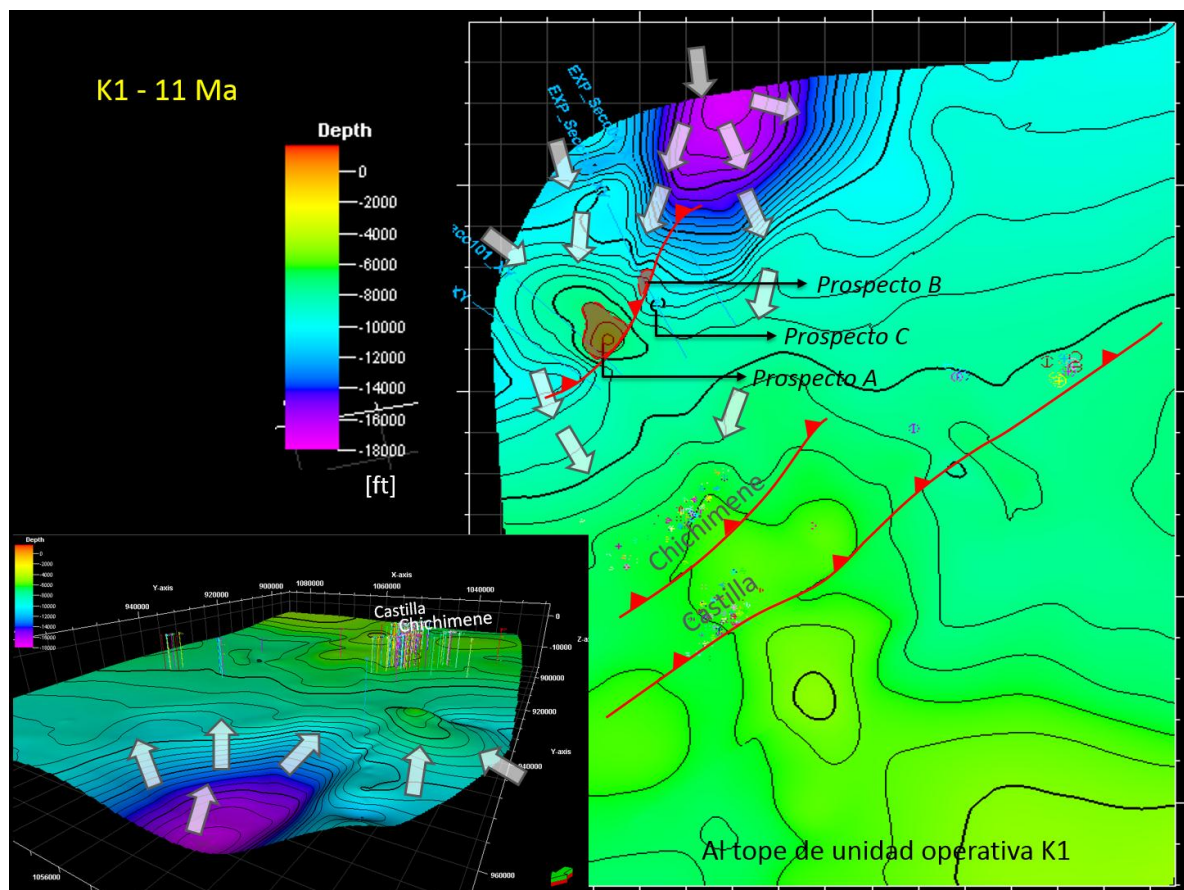
**Figura 38. Paleogeometría restituida a 25 Ma, al tope de la unidad reservorio K1, ilustrando posibles rutas de migración de hidrocarburos.**



En la Figura 39 se presenta la geometría de la estructura al tope de la unidad reservorio K1 a 11 Ma, periodo que representa la paleogeometría de la estructura durante el segundo pulso en esta fase de la orogenia andina. Las flechas blancas en la Figura 38 y Figura 39 representan rutas de migración desde NNW donde se

localizaban las cocinas en la cordillera Oriental y piedemonte para el primer y segundo pulso respectivamente; hacia paleoaltos generados por plegamientos en el foredeep y la cuenca. Como se aprecia en estas figuras es muy probable que los hidrocarburos que fluían desde las cocinas a través de estas rutas pasaran a través de los prospectos analizados llegando hasta niveles superiores donde hoy se localizan los campos Chichimene y Castilla.

**Figura 39. Paleogeometría restituida a 11 Ma, al tope de la unidad reservorio K1, ilustrando posibles rutas de migración de hidrocarburos.**



Evidencias adicionales sobre la migración de los hidrocarburos desde la roca fuente al NW, hasta la zona donde se localizan los prospectos analizados, es la presencia de Oil Shows reportados en Anaconda-1 por Chervon (1996) y

existencia de crudo en Chichimene y Castilla, considerando que los prospectos analizados se ubican entre la roca fuente y dichos Campos.

Sobre la temporalidad entre migración y trampa, Mora y Parra et al., (2008) sugieren con base en las relaciones estructurales que el plegamiento de baja amplitud que presentan las estructuras en el bloque yacente de los *short-cuts* (fallas de atajo) podría ser anterior al evento de deformación principal. Indicando que ya existía trampa antes de que el evento principal de exhumación ocurriera, dejando abierta la posibilidad de carga por evento de migración antiguos. Con base en estos datos y usando la tabla del anexo 3, se estima que la probabilidad de que hubiese existido migración efectiva de hidrocarburos hacia los prospectos es 0.9. Por tanto, la probabilidad de la existencia de un sistema de caga efectivo se calcula multiplicando la probabilidad obtenida para la existencia de la roca fuente y la probabilidad de migración efectiva, obteniéndose un valor de 0.9 (Tabla 1).

**6.2.3 Retención después de la acumulación** Finalmente debe estimarse la probabilidad de retención después de la acumulación. Para ello deben evaluarse los eventos posteriores a la acumulación, como posible reactivación de fallas, eventos de exhumación y erosión. En nuestro caso de estudio, el evento más importante según Van der Hammen, (1958) y Cooper et al., (1995) es el inicio la fase principal de inversión tectónica de la Cordillera Oriental, el cual se asocia a la colisión del arco Panama-Baudó con el margen Oeste de Suramérica. Sin embargo, dado que los prospectos analizados se localizan bajo el frente principal de deformación del piedemonte llanero, la exhumación no es el factor crítico en dichas estructuras, en cambio estas si presentan plegamiento y posible fallamiento asociado a la compresión durante la orogenia andina. Con base en estos datos y usando la tabla del Anexo 4, se estima que la probabilidad de retención después de la acumulación es 0.6. Este último factor se usa para estimar las probabilidades

de cada uno de los prospectos analizados. Los resultados se resumen a continuación:

**Tabla 1. Probabilidad de presencia de hidrocarburos a partir de los diferentes factores evaluados para los diferentes prospectos analizados en la zona de estudio.**

		PROSPECTO A (SUR)		PROSPECTO B (Sobre Sección 105)		PROSPECTO PERFORADO C (Anaconda-1)	
		Area = 2317 Acres		Area = 195.83 Acres		Sin cierre	
P1 Reservorio	P_Reservorio_efectivo =	P <sub>1a</sub> = 0.8	P <sub>1</sub> = P <sub>1a</sub> X P <sub>1b</sub> = 0.72	P <sub>1a</sub> = 0.8	P <sub>1</sub> = P <sub>1a</sub> X P <sub>1b</sub> = 0.72	P <sub>1a</sub> = 0.8	P <sub>1</sub> = P <sub>1a</sub> X P <sub>1b</sub> = 0.72
	P_Reservorio_de_calidad =	P <sub>1b</sub> = 0.9		P <sub>1b</sub> = 0.9		P <sub>1b</sub> = 0.9	
P2 Trampa	P_Existencia_Trampa =	P <sub>2a</sub> = 0.6	P <sub>2</sub> = P <sub>2a</sub> X P <sub>2b</sub> = 0.54	P <sub>2a</sub> = 0.5	P <sub>2</sub> = P <sub>2a</sub> X P <sub>2b</sub> = 0.45	P <sub>2a</sub> = 0.1	P <sub>2</sub> = P <sub>2a</sub> X P <sub>2b</sub> = 0.09
	P_Sello_efectivo =	P <sub>2b</sub> = 0.9		P <sub>2b</sub> = 0.9		P <sub>2b</sub> = 0.9	
P3 Carga	P_Roca_fuente =	P <sub>3a</sub> = 1	P <sub>3</sub> = P <sub>3a</sub> X P <sub>3b</sub> = 0.9	P <sub>3a</sub> = 1	P <sub>3</sub> = P <sub>3a</sub> X P <sub>3b</sub> = 0.9	P <sub>3a</sub> = 1	P <sub>3</sub> = P <sub>3a</sub> X P <sub>3b</sub> = 0.9
	P_Migración_efectiva =	P <sub>3b</sub> = 0.9		P <sub>3b</sub> = 0.9		P <sub>3b</sub> = 0.9	
P4 Retención	P_Retencion =	P <sub>4a</sub> = 0.6	P <sub>4</sub> = 0.6	P <sub>4a</sub> = 0.6	P <sub>4</sub> = 0.6	P <sub>4a</sub> = 0.6	P <sub>4</sub> = 0.6
		P <sub>1</sub> X P <sub>2</sub> X P <sub>3</sub> X P <sub>4</sub> = 0.21		P <sub>1</sub> X P <sub>2</sub> X P <sub>3</sub> X P <sub>4</sub> = 0.175		P <sub>1</sub> X P <sub>2</sub> X P <sub>3</sub> X P <sub>4</sub> = 0.03	

Como se aprecia, el prospecto A presenta mayor probabilidad de existencia de hidrocarburos que el prospecto B, lo que resulta razonable considerando las mejores condiciones de la trampa en términos de ubicación y tamaño. El área estimada para el Prospecto A (196 Acres) indica que no es económicamente viable. Respecto al análisis del prospecto perforado C, como se esperaba el valor de probabilidad obtenido es muy bajo. En general, los valores de probabilidad estimados para los prospectos evaluados resultan relativamente bajos. Por otro lado, el rango de valores diferentes de probabilidad obtenidos para prospectos de un mismo *play*, indica que la geometría de la estructura puede presentar variaciones fuertes, lo que habla de la complejidad asociada a la estructura analizada.

Observando los valores de probabilidad obtenidos para los diferentes elementos del sistema petrolífero analizados, puede concluirse que la presencia de la trampa es el factor más crítico en la configuración de este tipo de *play*. Ya que es muy probable que facies de roca reservorio de buena calidad existan y que los eventos

geológicos ocurridos a través del tiempo hayan permitido que se dieran las condiciones necesarias para la generación y expulsión de hidrocarburos en la cuenca. Por lo anterior, el análisis de la geometría de la estructura juega un papel importante durante el proceso de exploración en este tipo de hábitat de los hidrocarburos.

## 7. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo mediante la aplicación de técnicas de construcción de la sección estructural en profundidad, no disponibles 20 años atrás, durante la prognosis del pozo Anaconda-1, han permitido establecer que la causa probable para este desacierto exploratorio radicó en la ausencia de la trampa. Desacierto causado por distorsiones geométricas que presentan las estructuras interpretadas sobre imágenes sísmicas migradas en tiempo y que se asocian al posicionamiento incorrecto de los eventos reflectivos en el dominio profundidad. En el caso del Pozo Anaconda-1, estas distorsiones indicaron la presencia de pliegue anticlinal en el dominio foredeep, el cual se encuentra posiblemente desplazado hacía el NW, correspondiendo a una estructura de menor tamaño. La existencia de distorsiones geométricas en las imágenes sísmicas son causadas por fuertes contrastes en las propiedades del medio de propagación, lo que es común en cinturones fallados y plegados dada su configuración estructural. El uso de métodos de conversión tiempo/profundidad basados en trazado de rayo imagen, e integrados con el uso de técnicas de balanceo de la sección estructural facilita el entendimiento de tales efectos distorsivos y permite producir secciones con geometrías de menor incertidumbre.

Las estructuras anticlinales localizadas en el sector más proximal al piedemonte en el dominio foredeep, identificadas en las secciones obtenidas en este trabajo son de menor tamaño y se presentan desplazadas centenas de metros hacia el orógeno; respecto a las identificadas en secciones convertidas a profundidad mediante estiramiento vertical, donde las distorsiones causadas por los cambios bruscos en las propiedades del medio durante la propagación de las ondas sísmicas no han sido corregidas.

El análisis realizado sobre los diferentes elementos que conforman el sistema petrolífero indica que la presencia de la trampa es el factor más crítico en términos de prospectividad para este tipo de play.

Prospectos ubicados en el dominio de las imbricaciones, es decir en el bloque colgante de las fallas que conforman el frente de deformación del piedemonte llanero (falla de Villavicencio y Mirador en esta zona de estudio) y yacente de la Falla Servita, tienen un alto riesgo exploratorio, esto debido a que la probabilidad de retención de hidrocarburos después de la acumulación es baja, ya que eventos de exhumación durante la orogenia Andina pudieron haber causado removilización y pérdida de hidrocarburos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Angarita, J., y Leguizamón A., (2004), Arquitectura estratigráfica de la Unidad K2 mediante integración de información de afloramientos y pozos en los Campos Castilla y Chichimene, 3ra Convención técnica de la ACGGP, AAPG Database.

Bally, A., Gordy, P., y Steward, G., (1966), Structure, seismic data and orogenic evolution of southern Canadian Rocky Mountains, Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v. 14, p. 377-381.

Bayona, G., Cortes, M., Jaramillo, C., Ojeda, G., Aristizabal, J. & Reyes-Harker, A. (2008). An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous–Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. Geological Society of America Bulletin, 120, 1171–1197.

Bayona, G., Cardona, A., Jaramillo, C., Mora, A., Montes, C., Caballero, V., Mahechas, H., Lamus, F., Montenegro, O., Jimenez, G., Mesa, A., y Valencia, V., (2013), Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos Basin; responsible to Caribbean-South American convergence in the early Palaeogene time, Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion. Geological Society, London, Special Publications, 377.

Biondi, L. B., 2007, Concepts and applications in 3D seismic imaging, Society of Exploration Geophysics, Distinguished Instructor Series, No 10.

Bürgl, H., 1961, Sedimentación cíclica en el geosinclinal Cretáceo de la Cordillera Oriental de Colombia: Servicio Geológico Nacional, Informe 1347, p 1-60.

Cameron, M., 2007, Seismic velocity estimation from time migration: Inverse Problems, 23, 1329-1369.

Cediel, F., Leal, H., Shaw, R., Melgarejo, J., and Restrepo, P., (2011), Regional Geology of Colombia Vol. 1. In Petroleum Geology of Colombia, Cediel, F., Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) Special Publication, Fondo Editorial Universitario EAFIT, 183 p.

Chamberlain, R., (1910), The Appalachian folds of Central Pennsylvania: Journal of Geology, v. 18, p. 228-251.

Chevron., (1996), Anaconda-1: Final Geologic Report, Chevron Colombia Staff., p 1-172.

Colleta, B., Hebrard, F., Letouzey, J., Werner, P., y Rudkiweicz, J., 1990, Tectonic style and cristal structure of the Eastern Cordillera, Colombia from a balanced cross section, in Letouzey, J., ed, Petroleum and Tectonics in Mobbille Belts: Paris, Editions Technip, p. 81-100.

Cooper, M. A. (1983), The calculation of bulk strain in oblique and inclined balanced sections. Journal of Structural Geology 5, 161-165.

Cooper, M., Addison, F., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R., Hayward, A., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A., &Taborda, A., (1995), Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. AAPG Bulletin, V. 79, No. 10, p. 1421-1443.

Coordinating Committee for Coastal and Offshore Geoscience Programme in East and Southeast Asia (CCOP), (2000), The CCOP guidelines for risk assessment of

petroleum prospects: Bangkok, Thailand, Coordinating Committee for Coastal and Offshore Geoscience Programme in East and Southeast Asia, 35 p.

Cortes, J., Rincon, J., Jaramillo, J., Philp, P., y Allen, J., (2010), Biomarkers and compound-specific stable carbon isotope of n-alkanes in crude oils from Eastern Llanos Basin, Colombia, *Journal of South American Earth Sciences* 29 (2010) 198–213.

Dahlstrom, C., (1969), Balanced cross sections: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 6., p. 743-757.

DeCelles, P., y Giles, K., (1996), Foreland basin system, *Basin Research* 8, p 105-123.

DeCelles, P., (2012), Foreland basin systems revisited: variations in response to tectonic settings, *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*, First Edition. Blackwell Publishing Ltd.

Duque-Caro, H., 1990, The Chocó block in the northwestern corner of South America; structural, tectonostratigraphic and paleogeographic implications: *Journal of South American Earth Science*, v. 3, p. 1-14.

Ege, H., E. R. Sobel, E. Scheuber, and V. Jacobshagen, 2007, Exhumation history of the southern Altiplano plateau (southern Bolivia) constrained by apatite fission track thermochronology: *Tectonics*, v. 26, no. TC1004, doi:10.1029/2005TC001869.

Fabre, A., (1985), Subsistencia, maduración de la material orgánica y generación de hidrocarburos: un modelo sencillo para representar la evolución de la Cordillera

Oriental de Colombia y los Llanos durante el cretáceo y terciario, Informes geológicos y geofísicos, International Trading Net LTDA., p. 109.

Fagin, S., (1996), The Fault shadow problem: Its nature and elimination, The Leading Edge, 15, p. 1005-1013.

Gray, H. J., Johntone, S. A., Hourigan, J. K., Darby, B. J., Rits, B. D., Zhuang, G.; Lippert, P.C., Structural and thermochronologic implications for the development of the Northern Qilian Shan; tracking the history of slip partitioning from the AltynTagh Fault into the Northern Tibetan Plateau. American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract #T43B-2190.

Hardebol, N., Callot, J., Faure, J., Bertotii, G., Roure, F., (2007), Kinematics of the SE Canadian Fold and Thrust Belt: Implications for the Thermal and Organic Maturation History. Chapter 10, p. 179-202 en: Lacombe, O., Lavé, J., Roure, F., Vergés, J., (2007), Thrust Belts and Foreland Basins from Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems. Frontier in Earth Science, Editorial Springer.

Hubral, P., 1977, Time migration - Some ray theoretical aspects: Geophysical Prospecting, vol. 25, No 5, 738-745.

ICP, (2000). Definición del modelo estratigráfico en el intervalo cretáceo tardío a mioceno medio en la Cuenca de los Llanos Orientales y el Piedemonte Llanero. Ecopetrol, Reporte Interno.

Ingeominas, (2007)., Tapias, J., Nivia, A., Montes, N., Tejada, M., Mapa Geológico de Colombia, INGEOMINAS- Servicio Geológico.

Iversen, E., y Tygel, M., (2008), Image-ray tracing for joint 3D seismic velocity estimation and time-to-depth conversion, Geophysics, vol. 73, No 3, S99-S114.

Jaillard, E., Solar, P., Carlier, G., y Mourier, T., 1990, Geodynamic evolution of the northern and central Andes during early to middle Mesozoic times: a Tethyan model: *Journal of the Geological Society of London*, v. 147, p. 1009-1002.

Julivert, M., (1968), *Colombie, Précambrien, Paléozoïque, Mésozoïque, et intrusions d'âge mésozoïque – tertiaire*, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, 15, quai Anatole-France, Paris - VII.

Lacombe, O., Lavé, J., Roure, F., Vergés, J., (2007), *Thrust Belts and Foreland Basins from Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems*. *Frontier in Earth Science*, Editorial Springer.

Lamerson, P., (1982), The Fossil Basin area and its relationship to the Absaroka thrust fault system: in Powers, R., *Geologic Studies of the Cordilleran Thrust Belt: Rocky Mountain Association of Geologists*, p. 279-340.

Larner, K. L., Hatton, L., Gibson, B. S., and Hsu, I., 1981, Depth migration of imaged time sections, *Geophysics*, vol. 46, No 5, 734-750.

Loucks, G., (1975), The search for Pineview Field, Summit County, Utah. *Symposium on Deep Drilling Frontiers in the Central Rocky Mountains*. *Rocky Mountain Association of Geologists*. p. 255-263.

Mantilla, E., (2002). *Predicting petrophysical properties by simultaneous inversion of seismic and reservoir engineering data*. A dissertation submitted to the department of Geophysics, University of Stanford, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

Miller, T., (1979). *The geology of the Eastern cordillera between Aguazul-Sogomoso-Villa de Leiva, part I: geological field-trips, Colombia 1959–1978*.

Colombian Society of Petroleum Geologist and Geophysicist, Geotec Ltd., Bogota. pp. 349–396.

Mora, A., Parra, M., Strecker, M., Kammer, A., Dimeté C., Rodriguez, F., (2006), Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia, *TECTONICS*, Vol. 25, TC2010.

Mora, Andrés, (2007), Inversion tectonics and exhumation processes in the Eastern Cordillera of Colombia, [Ph.D Thesis]: Potsdam University, Potsdam, 146 p.

Mora, A., y Parra, M., (2008). The structural style of footwall shortcuts along the eastern foothills of the Colombian eastern cordillera. Differences with other inversion related structures, *CT&F, Ciencia, Tecnología y Futuro*, Vol. 3, Num 4. 14 p.

Mora, A., Parra, M., Strecker, M., Sobel, E., Hooghiemstra, H., Torres, V., Jaramillo, J., (2008), Climatic forcing of asymmetric orogenic evolution in the Eastern Cordillera of Colombia., *GSA Bulletin*, v. 120., no 7/8, p. 930-949.

Mora, A., Gaona, T., Kley, J., Montoya, D., Parra, M., Quiroz, L., Reyes, G., Strecker, M., (2009), The role of inherent extensional fault segmentation and linkage in contractional orogénesis: a reconstruction of Lower Cretaceous inverted rift basins in the Eastern Cordillera of Colombia, *Basin Research.*, 21, 111–137.

Mora, A., B. K. Horton, A. Mesa, J. Rubiano, R. A. Ketcham, M. Parra, V. Blanco, D. Garcia, y D. F. Stockli, (2010). Migration of Cenozoic deformation in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: Implications for petroleum systems: *AAPG Bulletin*, v. 94, p. 1543–1580.

Mora, A., Blanco V., Naranjo, J., Sanchez, N., Ketcham, R., Rubinao, J., Stockli, D., Quintero, I., Nemcok, M., Horton, B., Davila, H., (2013), On the lag time between internal strain and basement involved thrust induced exhumation: The case of the Colombian Eastern Cordillera., *Journal of Structural Geology.*, p. 1-23.

Parra, M., (2008), Cenozoic foreland-basin evolution in the northern Andes: insights from thermochronology and basin analysis in the Eastern Cordillera, Colombia., [Ph.DThesis]: Potsdam University, Potsdam, 147 p.

Parra, M., Mora, A. et al. (2009). 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*, 121, 780–800.

Parra, M., Mora, A. Jaramillo, C., Torres, V., Zeilinger, G., y Strecker, M., (2010). Tectonic controls on Cenozoic foreland basin development in the north-eastern Andes, Colombia. *Basin Research* 22, 874-903.

Powers, (1980), Oil and Gas potential of Wyoming-Utah-Idaho Overthrust Belt – Relation to Canadian Foothills Province: *Am.Assoc.Pet. Geol.Boll.*, v.64, no 5, p 767.

Renzoni G., (1965)., *Geología del cuadrángulo L-11 Villavicencio*, Serv. Geol. Nal. e Inventario Min. Nal., Mapa geológico, Esc, 1:200.000.

Rincón, L., (2011)., *Determinación de oportunidades de hidrocarburos detrás del revestimiento (Oil Behind casing) en los ampos operados por Perenco en la Asociación Casanare, Cuenca de las Llanos Orientales*, Tesis, Universidad Industrial de Santander., 110 p.

Rojas, N., Cardona, P., Arango, S., y Flores, A., (2004), Redescubriendo un gigante: Yacimiento San Fernando, Campo Chichimene- Cuenca Llanos Orientales, 3ra Convención técnica de la ACGGP. AAPG Database.

Royse, F., Warner, M., y Reese, D., (1975), Thrust belt structural geometry and related stratigraphic problems, Wyoming-Idaho-Northern Utah: in Rocky Mountain Association of Geologists, Symposium on Deep Drilling Frontiers in Central Rocky Mountains, p. 454.

Salazar, V., Hoyos, D., Loza, J., Suarez D., y Calderón, Z., (2011), Metodología para la selección de Pozos candidatos a perforar en condiciones de bajo balance. Aplicación al Campo Castilla de Ecopetrol S.A., Revista Fuentes, Vol 9, No 2., pp 63-71.

Sarmiento-Rojas, L. F., J. D. Van Wess, y S. Cloetingh (2006), Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models, J. South Am. EarthScience. , 21, 383 – 411

Sarmiento, Luis, (2001), Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of The Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from Tectonic Models, [Ph.DThesis]: VrijeUniversiteit, Amsterdam, 319 p.

Sclater, J., y Christie P., (1980), Continental stretching: an explanation of the post-Mid-Cretaceous subsidence of the Central North Sea Basin. Journal of Geophysical Research, v.85, No. B7. Pp. 3711-3739.

Servicio Geológico Colombiano, (2015)., Gomez, J., Montes, N., Nivia, A., Diederix, H., Plancha 5-14, Escala 1:500000, Atlas Geológico de Colombia 2015.

Suarez, A. (1990), The basement of the Eastern Cordillera, Colombia: an allochthonous terrane in northwestern South America, *Journal of South America Earth Sciences*. V.3., p. 141-151.

Operto S., Xu S., Lambaré G., 2000, Can we quantitatively image complex structures with rays?., *Geophysics*., Vol. 65, No, 4., P., 1223-1238.

Parra, M., Mora, A. et al. 2009. 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*, 121, 780–800.

Parra. M., Mora, A., Sobel, E., Strecker, M., Gonzalez, R., 2009, Episodic orogenic front migration in the northern Andes: Constraints from low-temperature thermochronology in the Eastern Cordillera, Colombia., *Tectonics*, Vol, 28, TC4004, p., 1 - 27.

Powers, (1980), Oil and Gas potential of Wyoming-Utah-Idaho Overthrust Belt – Relation to Canadian Foothills Province: *Am.Assoc.Pet. Geol.Boll.*, v.64, no 5, p 767.

Rincón, L., (2011), Determinación de oportunidades de hidrocarburos detrás del revestimiento (Oil Behind Casing) en los campos operados por Perenco en la asociación Casanare, Cuenca de los Llanos Orientales, [BSc. Thesis], Universidad Industrial de Santander, Colombia, 110 p.

Trincheró, E., 2000, The Fault shadow problem as an interpretation pitfall, *The Leading Edge*, No 19, p., 132-135.

Van der Hammen, T., J. H. Werner, y H. van Dommelen, (1973), Palynological record of the upheaval of the northern Andes: a study of Pliocene and lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its high-Andean biota: *Paleobotany and Palynology*, v. 16, p. 1–122.

Wijjinga, V., (1996), *Paleobotany and palynology of Neogene sediments from the high plain of Bogota (Colombia). Evolution of Andean flora from a paleoecological perspective*. PhD Thesis, University of Amsterdam.

Woodward N., Boyer S., y Suppe J., 1985, *An outline of Balanced Cross-Sections*, University of Tennessee, Department of Geological Sciences, *Studies in Geology* 11, 2nd Edition, p 166.

## BIBLIOGRAFÍA

ANGARITA, J., y LEGUIZAMÓN A., Arquitectura estratigráfica de la Unidad K2 mediante integración de información de afloramientos y pozos en los Campos Castilla y Chichimene, 3ra Convención técnica de la ACGGP, AAPG Database. 2004

BALLY, A., GORDY, P., y STEWARD, G., Structure, seismic data and orogenic evolution of southern Canadian Rocky Mountains, Bulletin of Canadian Petroleum Geology, v. 14, 1966 p. 377-381.

BAYONA, G., CARDONA, A., JARAMILLO, C., MORA, A., MONTES, C., CABALLERO, V., MAHECHAS, H., LAMUS, F., MONTENEGRO, O., JIMENEZ, G., MESA, A., y VALENCIA, V., Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos Basin; responsible to Caribbean-South American convergence in the early Palaeogene time, Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion. Geological Society, London, Special Publications, 377. 2013

BAYONA, G., CORTES, M., JARAMILLO, C., OJEDA, G., ARISTIZABAL, J. & REYES-HARKER, A. An integrated analysis of an orogen-sedimentary basin pair: Latest Cretaceous–Cenozoic evolution of the linked Eastern Cordillera orogen and the Llanos foreland basin of Colombia. Geological Society of America Bulletin, 2008 120, 1171–1197.

BIONDI, L. B., Concepts and applications in 3D seismic imaging, Society of Exploration Geophysics, Distinguished Instructor Series, No 10. 2007

BÜRGL, H., Sedimentación cíclica en el geosinclinal Cretáceo de la Cordillera Oriental de Colombia: Servicio Geológico Nacional, Informe 1347, 1961, p 1-60.

CAMERON, M., Seismic velocity estimation from time migration: Inverse Problems, 23, 2007, 1329-1369.

CEDIEL, F., LEAL, H., SHAW, R., MELGAREJO, J., and RESTREPO, P. Regional Geology of Colombia Vol. 1. In Petroleum Geology of Colombia, Cediél, F., Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) Special Publication, Fondo Editorial Universitario EAFIT, 2011 183 p.

CHAMBERLAIN, R., The Appalachian folds of Central Pennsylvania: Journal of Geology, v. 18, 1910 p. 228-251.

CHEVRON., Anaconda-1: Final Geologic Report, Chevron Colombia Staff., 1996 p 1-172.

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

COOPER, M. A. The calculation of bulk strain in oblique and inclined balanced sections. Journal of Structural Geology 5, 1983, 161-165.

COOPER, M., ADDISON, F., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R., HAYWARD, A., HOWE, S., MARTINEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A., & TABORDA, A., Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. AAPG Bulletin, V. 79, No. 10, 1995, p. 1421-1443.

COORDINATING COMMITTEE FOR COASTAL AND OFFSHORE GEOSCIENCE PROGRAMME IN EAST AND SOUTHEAST ASIA (CCOP), The CCOP guidelines for risk assessment of petroleum prospects: Bangkok, Thailand, Coordinating Committee for Coastal and Offshore Geoscience Programme in East and Southeast Asia, 2000 35 p.

CORTES, J., RINCON, J., JARAMILLO, J., PHILP, P., y Allen, J., Biomarkers and compound-specific stable carbon isotope of n-alkanes in crude oils from Eastern Llanos Basin, Colombia, *Journal of South American Earth Sciences* 29 2010 198–213.

DAHLSTROM, C., Balanced cross sections: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 6., 1969 p. 743-757.

DECELLES, P., *Foreland basin systems revisited: variations in response to tectonic settings*, *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*, First Edition. Blackwell Publishing Ltd. 2012

DECELLES, P., y GILES, K., Foreland basin system, *Basin Research* 8, 1996 p 105-123.

DUQUE-CARO, H., The Chocó block in the northwestern corner of South America; structural, tectonostratigraphic and paleogeographic implications: *Journal of South American Earth Science*, v. 3, 1990, p. 1-14.

EGE, H., E. R. SOBEL, E. SCHEUBER, and V. JACOBSHAGEN, Exhumation history of the southern Altiplano plateau (southern Bolivia) constrained by apatite fission track thermochronology: *Tectonics*, v. 26, no. TC1004, 2007, doi:10.1029/2005TC001869.

FABRE, A., Subsistencia, maduración de la material orgánica y generación de hidrocarburos: un modelo sencillo para representar la evolución de la Cordillera Oriental de Colombia y los Llanos durante el cretáceo y terciario, Informes geológicos y geofísicos, International Trading Net LTDA., 1985 p. 109.

FAGIN, S., The Fault shadow problem: Its nature and elimination, The Leading Edge, 15, 1996 p. 1005-1013.

GRAY, H. J., JOHNTONE, S. A., HOURIGAN, J. K., DARBY, B. J., RITS, B. D., ZHUANG, G.; LIPPERT, P.C., Structural and thermochronologic implications for the development of the Northern Qilian Shan; tracking the history of slip partitioning from the AltynTagh Fault into the Northern Tibetan Plateau. American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract #T43B-2190.

HARDEBOL, N., CALLOT, J., FAURE, J., BERTOTII, G., ROURE, F., Kinematics of the SE Canadian Fold and Thrust Belt: Implications for the Thermal and Organic Maturation History. Chapter 10, p. 179-202 en: Lacombe, O., Lavé, J., Roure, F., Vergés, J., (2007), Thrust Belts and Foreland Basins from Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems. Frontier in Earth Science, Editorial Springer. 2007

HUBRAL, P., Time migration - Some ray theoretical aspects: Geophysical Prospecting, vol. 25, No 5, 1977, 738-745.

ICP, Definición del modelo estratigráfico en el intervalo cretáceo tardío a mioceno medio en la Cuenca de los Llanos Orientales y el Piedemonte Llanero. Ecopetrol, Reporte Interno. 2000

INGEOMINAS, TAPIAS, J., NIVIA, A., MONTES, N., TEJADA, M., Mapa Geológico de Colombia, INGEOMINAS- Servicio Geológico. 2007

IVERSEN, E., y TYGEL, M., Image-ray tracing for joint 3D seismic velocity estimation and time-to-depth conversion, *Geophysics*, vol. 73, No 3, 2008 S99-S114.

JAILLARD, E., SOLAR, P., CARLIER, G., y MOURIER, T., Geodynamic evolution of the northern and central Andes during early to middle Mesozoic times: a Tethyan model: *Journal of the Geological Society of London*, v. 147, 1990, p. 1009-1002.

JULIVERT, M., *Colombie, Précambrien, Paléozoïque, Mésozoïque, et intrusions d'âge mésozoïque – tertiaire*, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE, 15, quai Anatole-France, Paris - VII. 1968

LACOMBE, O., LAVÉ, J., ROURE, F., VERGÉS, J., *Thrust Belts and Foreland Basins from Fold Kinematics to Hydrocarbon Systems*. *Frontier in Earth Science*, Editorial Springer. 2007

LAMERSON, P., The Fossil Basin area and its relationship to the Absaroka thrust fault system: in Powers, R., *Geologic Studies of the Cordilleran Thrust Belt*: Rocky Mountain Association of Geologists, 1982 p. 279-340.

LARNER, K. L., HATTON, L., GIBSON, B. S., and HSU, I., Depth migration of imaged time sections, *Geophysics*, vol. 46, No 5, 1981, 734-750.

LOUCKS, G., The search for Pineview Field, Summit County, Utah. *Symposium on Deep Drilling Frontiers in the Central Rocky Mountains*. Rocky Mountain Association of Geologists. 1975 p. 255-263.

MANTILLA, E., Predicting petrophysical properties by simultaneous inversion of seismic and reservoir engineering data. *Adisertation submitted to the*

departement of Geophysics, University of Stanford, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. 2002

MILLER, T., The geology of the Eastern cordillera between Aguazul-Sogomoso-Villa de Leiva, part I: geological field-trips, Colombia 1959–1978. Colombian Society of Petroleum Geologist and Geophysicist, Geotec Ltd., Bogota. 1979 pp. 349–396.

MORA, A., B. K. HORTON, A. MESA, J. RUBIANO, R. A. KETCHAM, M. PARRA, V. BLANCO, D. GARCIA, Y D. F. STOCKLI, Migration of Cenozoic deformation in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: Implications for petroleum systems: AAPG Bulletin, v. 94, 2010 p. 1543–1580.

MORA, A., BLANCO V., NARANJO, J., SANCHEZ, N., KETCHAM, R., RUBINAO, J., STOCKLI, D., QUINTERO, I., NEMCOK, M., HORTON, B., DAVILA, H., On the lag time between internal strain and basement involved thrust induced exhumation: The case of the Colombian Eastern Cordillera., Journal of Structural Geology., 2013 p. 1-23.

MORA, A., GAONA, T., KLEY, J., MONTOYA, D., PARRA, M., QUIROZ, L., REYES, G., STRECKER, M., The role of inherent extensional fault segmentation and linkage in contractional orogénesis: a reconstruction of Lower Cretaceous inverted rift basins in the Eastern Cordillera of Colombia, Basin Research., 21, 2009 111–137.

MORA, A., PARRA, M., STRECKER, M., KAMMER, A., DIMETÉ C., RODRIGUEZ, F., Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia, TECTONICS, Vol. 25, TC2010. 2006

MORA, A., PARRA, M., STRECKER, M., SOBEL, E., HOOGHIEMSTRA, H., TORRES, V., JARAMILLO, J., Climatic forcing of asymmetric orogenic evolution in the Eastern Cordillera of Colombia., GSA Bulletin, v. 120., no 7/8, 2008 p. 930-949.

MORA, A., y PARRA, M., The structural style of footwall shortcuts along the eastern foothills of the Colombian eastern cordillera. Differences with other inversion related structures, CT&F, Ciencia, Tecnología y Futuro, Vol. 3, Num 4. 2008 14 p.

MORA, Andrés, Inversion tectonics and exhumation processes in the Eastern Cordillera of Colombia, [Ph.D Thesis]: Potsdam University, Potsdam, 2007 146 p.

OPERTO S., XU S., LAMBARÉ G., Can we quantitatively image complex structures with rays?., Geophysics., Vol. 65, No, 4., 2000, P., 1223-1238.

PARRA, M., Cenozoic foreland-basin evolution in the northern Andes: insights from thermochronology and basin analysis in the Eastern Cordillera, Colombia., [Ph.D Thesis]: Potsdam University, Potsdam, 2008 147 p.

PARRA, M., MORA, A. et al. 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, 121, 2009 780–800.

PARRA, M., MORA, A. JARAMILLO, C., TORRES, V., ZEILINGER, G., Y STRECKER, M., Tectonic controls on Cenozoic foreland basin development in the north-eastern Andes, Colombia. Basin Research 22, 2010 874-903.

PARRA. M., MORA, A., SOBEL, E., STRECKER, M., GONZALEZ, R., Episodic orogenic front migration in the northern Andes: Constraints from low-temperature

thermochronology in the Eastern Cordillera, Colombia., *Tectonics*, Vol, 28, TC4004, 2009, p., 1 - 27.

POWERS, Oil and Gas potential of Wyoming-Utah-Idaho Overthrust Belt – Relation to Canadian Foothills Province: *Am.Assoc.Pet. Geol.Boll.*, v.64, no 5, 1980 p 767.

RENZONI G., Geología del cuadrángulo L-11 Villavicencio, *Serv. Geol. Nal. e Inventario Min. Nal.*, Mapa geológico, Esc, 1:200.000. 1965

RINCÓN, L., Determinación de oportunidades de hidrocarburos detrás del revestimiento (Oil Behind Casing) en los campos operados por Perenco en la asociación Casanare, Cuenca de los Llanos Orientales, [BSc. Thesis], Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2011 110 p.

ROJAS, N., CARDONA, P., ARANGO, S., Y FLORES, A., Redescubriendo un gigante: Yacimiento San Fernando, Campo Chichimene- Cuenca Llanos Orientales, 3ra Convención técnica de la ACGGP. AAPG Database. 2004

ROYSE, F., WARNER, M., y REESE, D., Thrust belt structural geometry and related stratigraphic problems, Wyoming-Idaho-Northern Utah: in *Rocky Mountain Association of Geologists, Symposium on Deep Drilling Frontiers in Central Rocky Mountains*, 1975 p. 454.

SALAZAR, V., HOYOS, D., LOZA, J., SUAREZ D., y CALDERÓN, Z., Metodología para la selección de Pozos candidatos a perforar en condiciones de bajo balance. Aplicación al Campo Castilla de Ecopetrol S.A., *Revista Fuentes*, Vol 9, No 2. 2011, pp 63-71.

SARMIENTO, Luis, Mesozoic Rifting and Cenozoic Basin Inversion History of The Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from Tectonic Models, [Ph.DThesis]: VrijeUniversiteit, Amsterdam, 20013 19 p.

SARMIENTO-ROJAS, L. F., J. D. VAN WESS, Y S. CLOETINGH Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models, J. South Am. EarthScience. 2006, 21, 383 – 411

SCLATER, J., y CHRISTIE P., Continental stretching: an explanation of the post-Mid-Cretaceous subsidence of the Central North Sea Basin. Journal of Geophysical Research, v.85, No. B7. 1980 Pp. 3711-3739.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, GOMEZ, J., MONTES, N., NIVIA, A., DIEDERIX, H., Plancha 5-14, Escala 1:500000, Atlas Geológico de Colombia 2015.

SUAREZ, A, The basement of the Eastern Cordillera, Colombia: an allochthonous terrane in northwestern SouthAmerica, Journal of South America Earth Sciences. V.3. 1990, p. 141-151.

TRINCHERO, E., The Fault shadow problem as an interpretation pitfall, The Leaging Edge, No 19, 2000, p., 132-135.

VAN DER HAMMEN, T., J. H. WERNER, y H. VAN DOMMELEN, Palynological record of the upheaval of the northern Andes: a study of Pliocene and lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its high-Andean biota: Paleobotany and Palynology, v. 16, 1973 p. 1–122.

WIJINGA, V., Paleobotany and palynology of Neogene sediments from the high plain of Bogota (Colombia). Evolution of Andean flora from a paleoecological perspective. PhD Thesis, University of Amsterdam. 1996

WOODWARD N., BOYER S., y SUPPE J., An outline of Balanced Cross-Sections, University of Tennessee, Department of Geological Sciences, Studies in Geology 11, 2nd Edition, 1985, p 166.

## ANEXOS

### Anexo A. (Izq.) Probabilidades de presencia efectiva de facies reservorio y (der) de existencia de un reservorio de buena calidad. Tomado de CCOP (2000)

Depositional environment		Data reliability			
		Direct data, proximal deposits	Direct data, more distal deposits	Limited data, discontinuous deposits	Indirect data, seismic sequence analysis
Marine	Shallow marine, "blanket"	0.9 - 1.0	0.7 - 0.8	0.6 - 0.7	0.4 - 0.6
	Coastal, deltaic, tidal	0.8 - 1.0	0.7 - 0.8	0.6 - 0.7	0.4 - 0.6
	Submarine fan	0.7 - 0.8	0.5 - 0.6	0.3 - 0.5	0.1 - 0.3
	Carbonates	0.8 - 1.0	0.6 - 0.8	0.5 - 0.7	0.3 - 0.5
Continental	Lacustrine deltaic	0.7 - 0.9	0.5 - 0.7	0.4 - 0.6	0.3 - 0.5
	Alluvial fan, braided stream, meand. chan.	0.7 - 0.9	0.5 - 0.7	0.4 - 0.6	0.3 - 0.5
	Eolian	0.8 - 1.0	0.6 - 0.8	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6
Others	Fractured basement	0.4 - 0.6	0.3 - 0.5	0.2 - 0.4	0.1 - 0.3
	Fractured, porous lava	0.4 - 0.6	0.3 - 0.5	0.2 - 0.4	0.1 - 0.3

Res. depth, (pressure, temp.)	Data reliability	Direct data, proximal deposits	Direct, but less data, more distal deposits	Limited data, uncertain correlation	Indirect data
		1 - 3 km	Homogeneous, clean reservoir	0.9 - 1.0	0.8 - 0.9
	Mixed, unclean reservoir	0.8 - 1.0	0.7 - 0.8	0.6 - 0.7	0.4 - 0.6
3 - 4 km	Homogeneous, clean reservoir	0.8 - 0.9	0.7 - 0.8	0.5 - 0.7	0.4 - 0.5
	Mixed, unclean reservoir	0.7 - 0.9	0.6 - 0.7	0.5 - 0.6	0.3 - 0.5
> 4 km	Homogeneous, clean reservoir	0.7 - 0.9	0.5 - 0.7	0.4 - 0.6	0.3 - 0.5
	Mixed, unclean reservoir	0.6 - 0.9	0.3 - 0.5	0.2 - 0.4	0.1 - 0.3

Late uplift	Take <b>maximum burial</b> into consideration
Calcite cementation	Consider <b>regional studies</b>
Illitisation	<b>Regional studies, clay content</b>
Dolomitisation	Consider <b>regional studies</b>
Early migration	May <b>preserve</b> reservoir porosity
Secondary porosity	Pressure/solution studies, etc.
<b>ADJUST DEPTH BOUNDARIES ABOVE TO FIT BASIN PROPERTIES</b>	
<b>ADJUST MINIMUM POROSITY VALUE IN VOLUME CALCULATIONS</b>	

**Anexo B. (Izq.) Probabilidades de presencia efectiva de facies reservorio y (der) de existencia de un reservorio de buena calidad. Tomado de CCOP (2000).**

Seismic correlation and mapping		Data reliability	3D-seismic	2D-seismic		
				Dense grid size	Open grid size	Very open grid
Good corr. nearby wells	Low structural complexity		0.9 - 1.0	0.9 - 1.0	0.8 - 1.0	0.7 - 0.9
	High structural complexity		0.7 - 1.0	0.6 - 0.9	0.5 - 0.8	0.4 - 0.7
	Low relief, uncertain depth conversion		0.6 - 0.9	0.5 - 0.8	0.4 - 0.7	0.3 - 0.6
Uncertain corr. distant wells	Low structural complexity		0.9 - 1.0	0.8 - 1.0	0.7 - 0.9	0.5 - 0.8
	High structural complexity		0.7 - 0.9	0.6 - 0.9	0.4 - 0.8	0.3 - 0.7
	Low relief, uncertain depth conversion		0.5 - 0.8	0.4 - 0.7	0.3 - 0.6	0.2 - 0.5
Unreliable corr. analogue model	Low structural complexity		0.9 - 1.0	0.7 - 1.0	0.6 - 0.8	0.4 - 0.7
	High structural complexity		0.4 - 0.7	0.3 - 0.6	0.2 - 0.5	0.1 - 0.4
	Low relief, uncertain depth conversion		0.3 - 0.7	0.2 - 0.6	0.1 - 0.5	0.1 - 0.4

Seal mechanism			Seal quality				
			Very good	Good	Acceptable	Poor	
Top surface	Bottom, side	Structural style					
Simple seal	Con-form	N/A.	Anticline, buried highs, build-ups, faulted str.	0.9 - 1.0	0.8 - 1.0	0.6 - 0.8	0.4 - 0.6
	Uncon-form	N/A.	Faulted structures	0.8 - 0.9	0.7 - 0.8	0.5 - 0.7	0.3 - 0.5
Combined seal	Con-form	Uncon-form	Onlap, low-stand wedge	0.5 - 0.7	0.4 - 0.5	0.3 - 0.4	0.1 - 0.3
	Con-form	Faults	Downfaulted structures	0.6 - 0.8	0.5 - 0.6	0.3 - 0.5	0.1 - 0.3
	Con-form	Facies shift	"shale out"	0.6 - 0.8	0.5 - 0.7	0.4 - 0.6	0.1 - 0.3
	Uncon-form	Con-form	Subcrop structures	0.4 - 0.5	0.3 - 0.5	0.2 - 0.4	0.1 - 0.3

Interpretation of top surface not based on seismic reflector:	
Parallel reflectors	In general, middle to high end of range
Non-parallel reflectors	Low end of range

Area of closure/grid size:	
> 5 times	Dense grid size
2 - 5 times	Open grid size
< 2 times	Very open grid size

Salt, anhydrite, carbonates	Very good sealing properties
Thick shales	Good sealing properties
Thin shales	Poor to acceptable sealing properties
Basalt	Acceptable to good sealing properties
Faults cutting top surface	Poor to acceptable sealing properties
Juxtaposition; fault planes	Depends on sand/shale or sand/sand contact

**Anexo C. Probabilidades de presencia efectiva de facies reservorio y (der) de existencia de un reservorio de buena calidad. Tomado de CCOP (2000)**

Data reliability		Depositional environment			
		Restricted marine or lacustrine environment with conc sapropelic organic matter	Mixed marine or lacustrine environment with dispersed sapropelic organic matter	Deltaic environment with mostly humic organic matter (terrestrial; mainly gas)	
Provenience	Sufficient volume	0.9 - 1.0	0.8 - 1.0	0.8 - 1.0	
	Marginal volume	0.5 - 0.8	0.4 - 0.7	0.4 - 0.7	
	Marginal mature	0.3 - 0.6	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	
Quality and quantity	Sufficient volume	0.7 - 0.9	0.6 - 0.8	0.6 - 0.8	
	Marginal volume	0.4 - 0.6	0.3 - 0.6	0.3 - 0.6	
	Marginal mature	0.2 - 0.5	0.1 - 0.4	0.1 - 0.4	
Theoretical type	Sufficient volume	0.5 - 0.8	0.4 - 0.7	0.4 - 0.7	
	Marginal volume	0.3 - 0.7	0.3 - 0.6	0.3 - 0.6	
	Marginal mature	0.1 - 0.4	0.1 - 0.4	0.1 - 0.4	
Latent Spec	Sufficient volume	0.4 - 0.7	0.3 - 0.7	0.3 - 0.7	
	Marginal volume	0.2 - 0.6	0.2 - 0.5	0.2 - 0.5	
	Marginal mature	0.1 - 0.4	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3	

Migration		Timing		
		The trap is formed before onset of hydrocarbon migration	Time of trap formation and time of migration are overlapping	The trap is formed when the source rock is supposed to be "overcooked"
Local migration		0.9 - 1.0	0.4 - 0.8	0.1 - 0.4
Lateral migration without barriers		0.8 - 0.9	0.4 - 0.7	0.1 - 0.3
Lateral migration with barriers		0.5 - 0.8	0.2 - 0.5	0.1 - 0.3
Vertical migration without barriers		0.7 - 0.9	0.3 - 0.6	0.1 - 0.3
Vertical migration with barriers		0.4 - 0.6	0.2 - 0.4	0.1 - 0.2
Long-distance "fill-spill" migration		0.4 - 0.6	0.2 - 0.4	0.1 - 0.2
The trap is in the "shadow" of migration		0.2 - 0.4	0.1 - 0.3	0.1

**Anexo D, (Izq.) Probabilidades de presencia efectiva de facies reservorio y (der) de existencia de un reservorio de buena calidad. Tomado de CCOP (2000).**

Geological processes after accumulation		Data control		
		Positive unambiguous data (seismic, wells, etc.)	Data control and interpretation is poor to fair	Negative unambiguous data (seismic, wells, etc.)
No late activity	No tectonic activity after accumulation	0.9 - 1.0	0.8 - 1.0	0.7 - 1.0
	Shallow traps, possible biodegradation	0.8 - 0.9	0.4 - 0.7	0.1 - 0.3
Erosion	Trap in connection to generating source	0.7 - 0.9	0.3 - 0.6	0.1 - 0.3
	Trap not connected to generating source	0.5 - 0.8	0.2 - 0.5	0.1 - 0.2
Uplift and tilting	Form, volume, top-point not changed	0.7 - 0.9	0.4 - 0.7	0.2 - 0.4
	Form, volume, top-point changed	0.5 - 0.6	0.3 - 0.4	0.1 - 0.2
Reactivated faults	Compression and/or transpression	0.5 - 0.7	0.4 - 0.5	0.3 - 0.4
	Tension	0.4 - 0.6	0.3 - 0.4	0.1 - 0.3

**Anexo E. Parámetros usados en el proceso de de-compactación.**

<b>Formación</b>	<b>Porosity</b>	<b>Depth Coefficient [1/km]</b>
Sandstone	0.49	0.27
Shale	0.63	0.52
Limestone	0.41	0.4
Guayabo Superior	0.49	0.27
Guayabo medio	0.49	0.27
León	0.63	0.51
Miembro C1 de Carbonera	0.56	0.39
Miembro C5 de Carbonera	0.55	0.36
Miembro C8 de Carbonera	0.63	0.51
Mirador	0.49	0.27
Los Cuervos	0.56	0.39
Barco	0.56	0.39
Guadalupe	0.49	0.27
Gacheta	0.63	0.51
Une	0.63	0.27