

**ANÁLISIS DE LA EXISTENCIA DE PITFALLS EN LA INTERPRETACIÓN DE  
LÍNEAS SÍSMICAS 2D MEDIANTE LA CONVERSIÓN A PROFUNDIDAD POR  
LOS MÉTODOS DE IMAGE –RAY Y VERTICAL STRECHTED**

**DIEGO FERNANDO GÓMEZ GONZÁLEZ**

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

**2011**

**ANÁLISIS DE LA EXISTENCIA DE PITFALLS EN LA INTERPRETACIÓN DE  
LÍNEAS SÍSMICAS 2D MEDIANTE LA CONVERSIÓN A PROFUNDIDAD POR  
LOS MÉTODOS DE IMAGE –RAY Y VERTICAL STRECHTED**

**DIEGO FERNANDO GÓMEZ GONZÁLEZ**

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

**William Mauricio Aguádelo**

**Geofísico, PhD. ICP-ECOPETROL S.A. Director**

**Dany Rueda Serrano**

**Geólogo, ICP-ECOPETROL S.A Co-DIRECTOR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**ESCUELA DE GEOLOGÍA**

**FACULTAD DE CIENCIAS FISICOQUÍMICAS**

**BUCARAMANGA**

**2011**

## **DEDICATORIA**

Este logro se lo dedico a mis padres Jorge y Nubia por su apoyo y amor incondicional, por guiarme siempre por un buen camino, por tanta Piacenza y porque siempre que necesite de su experiencia y sabiduría me las brindaron de la mejor forma

A mis hermanos Jorge y Lina porque desde muy pequeño me han aconsejado y me han brindado todo su apoyo para cumplir mis metas

## AGRADECIMIENTOS

A mi director William Agudelo por guiarme durante tanto tiempo en el grupo de investigación y permitirme desarrollar este trabajo de investigación.

A mi codirector Dany Rueda por enseñarme todo lo necesario para poder culminar con éxito esta investigación.

A Ángela María Martínez por darme tanta felicidad, tranquilidad, por comprenderme y enseñarme tantas cosas día a día, por estar en mi vida en un momento tan importante y por permitir que yo haga parte de la suya

A mis Amigos incondicionales de geología, Camilo Mateus, Heber Bueno, Oscar Llamosa, Leydy Valencia, Erich Caballero, Ricardo Vargas, Ever Gonzalez, Monika Mendoza, Catalina Niño, Aura Uribe, Adriana Castro, Adriana Prada, Tatiana Mayorga, Mayra Vargas, Jael Pacheco, Gabriel Mendoza, Claudia Cardenas, Xavier Gómez, Carlo Mejia.

A los Amigos que hice en jugando baloncesto durante mi carrera universitaria, Oscar Gualdron, Cesar Muñoz, Oscar Diaff, Adán Fernández, Carolina Ojeda, Jorge Quintero, Víctor Meneses, Rodolfo Rodríguez, Julián Silva, Oscar Carrero, Luis Fernando, Daniel Botello, por ser un apoyo en los momentos difíciles.

A Diana Sánchez por enseñarme a creer en mí y mostrarme como poder lograr las cosas que me propongo.

A las personas que por distintos motivos conocí en la universidad y tienen un lugar especial en mi vida como Nelly Ríos, Ángela Castro, Tatiana Navarro, Ana lucia Corredor, Gina Rincon

A mis compañeros y amigos en el grupo de investigación, Ingrid Tello, Elkin Hernández, Lorena Giraldo, Cristian Zafra, Wilson Ibáñez.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	17
OBJETIVOS.....	19
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1. MÉTODO SÍSMICO.....	21
1.1. DISEÑO DE ADQUISICIÓN.....	21
1.2. ADQUISICIÓN.....	21
1.3. PROCESAMIENTO.....	23
1.4. INTERPRETACIÓN.....	24
1.5. CONVERSIÓN A PROFUNDIDAD.....	24
1.6. IMAGE RAY.....	25
2. PROBLEMA DE CONVERSIONES A PROFUNDIDAD.....	27
2.1. VELOCIDAD DE INTERVALO.....	27
2.2. VELOCIDAD PROMEDIO.....	28
2.3. VELOCIDAD DE PROCESAMIENTO O RMS.....	29
3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	31
3.1. MARCO ESTRATIGRÁFICO REGIONAL.....	32
3.2. MARCO ESTRUCTURAL REGIONAL.....	33
4. METODOLOGÍA.....	36
4.1. GENERACIÓN DE MODELOS SINTÉTICOS.....	37
4.2. SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS.....	37
4.2.1. Pliegues por flexión de falla.....	37
4.2.2. Pliegues por flexión de falla con múltiples rampas.....	38
4.2.3. Pliegues por propagación de falla.....	39
4.2.4. Cizalla simple y pura en pliegues por flexión de falla.....	40
4.2.5. Imbricaciones hacia adelante y hacia atrás en pliegues por flexión de falla.....	41
4.3. MODELOS EN PROFUNDIDAD.....	42
4.4. MODELOS EN TIEMPO.....	43
5. RESULTADOS SINTÉTICOS.....	43
5.1. PLIEGUES POR FLEXIÓN DE FALLA.....	44

5.2.	PLIEGUE POR PROPAGACIÓN DE FALLA.....	47
5.3.	PLIEGUE POR FLEXIÓN DE FALLA CON MÚLTIPLES RAMPAS....	49
5.4.	IMBRICACIÓN HACIA DELANTE EN PLIEGUES POR FLEXIÓN DE FALLA.....	51
5.5.	IMBRICACIÓN HACIA ATRÁS EN PLIGUES POR FLEXIÓN DE FALLA..	52
5.6.	CIZALLA EN PLIEGUES POR FLEXIÓN DE FALLA.....	54
5.6.1.	Cizalla simple.....	54
5.6.2.	Cizalla pura.....	56
6.	INTERPRETACIÓN DE DATOS REALES.....	58
7.	CONVERSIÓN A PROFUNDIDAD.....	60
7.1.	MODELO DE VELOCIDAD.....	60
7.2.	RAYO IMAGEN.....	61
7.3.	ESTIRAMIENTO VERTICAL.....	62
8.	ANÁLISIS DE DATOS REALES.....	63
9.	INFLUENCIA DE LA GEOLOGIA ESTRUCTURAL.....	66
	CONCLUSIONES.....	67
	RECOMENDACIONES.....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	70

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Esquema de adquisición sísmica, las ondas rayos viajan desde la fuente y se reflejan en cada interface, los receptores registran el campo de onda en superficie.....	22
<b>Figura 2:</b> Representación gráfica de conversión por rayo imagen; la unión de todos los ápices de la curva de difracción forman el un horizonte migrado, el cual es conectado con un punto en superficie y en profundidad. La envolvente de de todas la curvas de difracción forman el horizonte no migrado.....	26
<b>Figura 3:</b> Definición de la velocidad de intervalo entre dos interfaces.....	27
<b>Figura 4:</b> Diagrama para determinar la velocidad promedio en puntos sucesivos (Pj) a diferentes profundidades, distanciados en intervalos de diferentes espesores ( $\Delta z_j$ ) y diferente velocidad ( $V_j$ ).....	29
<b>Figura 5:</b> Ubicación área de trabajo, ubicación de línea sísmica.....	31
<b>Figura 6:</b> Estratigrafía del flanco Oriental de la Cordillera Oriental en el área de estudio.....	34
<b>Figura 7:</b> Geometría para el área del Macizo de Quetame y anticlinal de Medina.....	35
<b>Figura 8:</b> Metodología planteada para el desarrollo del trabajo.....	36
<b>Figura 9:</b> Representación de un pliegue por flexión de falla. En verde se muestra el eje axial que marca el inicio de la zona activa y en rojo el final de la zona activa y el inicio de la zona pasiva.....	38
<b>Figura 10:</b> Esquema de un pliegue por flexión de falla con múltiples rampas. En verde se muestran el inicio de las zonas activas producto de las flexiones de la falla.....	39

<b>Figura 11:</b> Esquema de un pliegue por propagación de falla. En verde se muestran el inicio de las zonas activas fijas durante la deformación.....	40
<b>Figura 12:</b> Esquema de cizalla simple en pliegues por flexión de falla. Esquema de cizalla pura, forma un ángulo con el eje axial de la zona activa.....	41
<b>Figura 13:</b> (a) imbricación adelante en pliegues por flexión de falla, por cada falla se crean un domino de buzamiento nuevo. (b) imbricación atrás en pliegues por flexión de falla.....	41
<b>Figura 14:</b> Modelo en profundidad de un pliegue asociado a una falla. Velocidades de onda P entre 2500 m/s y 3800m/s.....	42
<b>Figura 15:</b> (a) Diseño de trazado de rayos para un modelo en profundidad. (b) Sismograma sintético en base a las velocidades del modelo y al trazado de rayos.....	43
<b>Figura 16:</b> Modelo en profundidad de un pliegue por flexión de falla con su respectivo modelo de velocidades.....	44
<b>Figura 17:</b> Trazado de rayos para un pliegue por flexión de falla. El ángulo alto de la falla y la geometría de adquisición no permite que los rayos se refracten correctamente.....	45
<b>Figura 18:</b> Sismograma sintético basado en el trazado de rayos y en el modelo de velocidades.....	45
<b>Figura 19:</b> Modelo de velocidad en profundidad de un pliegue por flexión de falla con un ángulo de falla menor a 45°.....	46
<b>Figura 20:</b> Sismograma sintético de un pliegue por flexión de falla. En rojo se encierra un pliegue falso causado por los cambios laterales de velocidad.....	47
<b>Figura 21:</b> Modelo de velocidad P en profundidad de un pliegue por propagación de falla.....	48

<b>Figura 22:</b> Trazado de para el modelo sintético de un pliegue por propagación de falla.....	48
<b>Figura 23:</b> Sismograma sintético basado en el trazado de rayos, se evidencia la falta de información en cercanías el plano de falla.....	49
<b>Figura 24:</b> Modelo de velocidades P de un pliegue por flexión de falla con múltiples rampas.....	49
<b>Figura 25:</b> Trazado de propuesto para el modelo en profundidad de un pliegue por flexión de falla con múltiples rampas.....	50
<b>Figura 26:</b> Sismograma sintético de un pliegue por flexión de falla con múltiples rampas. Se resalta la existencia de un anticlinal falso.....	51
<b>Figura 27:</b> Modelo de velocidades P en una imbricación delante de un pliegue por flexión de falla.....	51
<b>Figura 28:</b> Trazado de rayos propuesto para el modelo sintético de imbricación adelante.....	52
<b>Figura 29:</b> Sismograma sintético de una imbricación delante en un pliegue por flexión de falla. Se evidencia la presencia de dos pliegues falsos.....	52
<b>Figura 30:</b> Modelo en profundidad de una imbricación atrás con sus respectivas velocidades P.....	53
<b>Figura 31:</b> Trazado de rayos en un modelo de imbricación atrás.....	53
<b>Figura 32:</b> Sismograma sintético, se observa un falso anticlinal en una geometría de imbricación atrás en pliegues por flexión de falla.....	54
<b>Figura 33:</b> Modelo en profundidad y velocidades P de un pliegue generado por flexión de falla con cizalla simple.....	55

<b>Figura 34:</b> Trazado de rayos para el modelo de cizalla simple en un pliegue por flexión de falla.....	55
<b>Figura 35:</b> Sismograma sintético basado en el trazado de rayos. Presencia de pliegues falsos producto del cambio lateral de velocidad.....	56
<b>Figura 36:</b> Modelo de velocidades en profundidad para una cizalla pura en un pliegue por flexión de falla.....	56
<b>Figura 37:</b> Trazado de rayos generado en un pliegue por flexión de falla con cizalla pura.....	57
<b>Figura 38:</b> Sismograma sintético generado a partir del trazado de rayos. Presencia de pliegues falsos.....	57
<b>Figura 39:</b> Interpretación en la línea migrada en tiempo ME-1994-1350 con los respectivos pozos.....	59
<b>Figura 40:</b> Línea sísmica migrada en tiempo ME-1994-1350.....	59
<b>Figura 41:</b> Interpretación de la línea ME-1994-1350 apoyada de las líneas transversales ME-1994-1600, ME-1992-1440.....	60
<b>Figura 42:</b> Modelo de velocidades P en tiempo para la interpretación de la línea sísmica Me-1994-1350.....	61
<b>Figura 43:</b> Trazado de rayos generado con rayos imagen para la conversión de la línea ME-1994-1350.....	62
<b>Figura 44:</b> Trazado de rayos generado con rayos verticales para la conversión de la línea ME-1994-1350.....	63
<b>Figura 45:</b> Resultado de la conversión a profundidad por el método de rayo imagen de la línea ME-1994-1350.....	64

**Figura 46:** Resultado de la conversión a profundidad por el método de estiramiento vertical de la línea ME-1994-1350.....64

**Figura 47:** Comparación de resultado de la conversión a profundidad por el método de rayo imagen con el respectivo PSDM de la línea ME-1994-1350.....65

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Pitfalls generados dependiendo de cada una de las geometrías propuestas para realizar los modelos sintéticos.....	58
<b>Tabla 2:</b> Velocidades y espesores para el área de Medina.....	61

## RESUMEN

Titulo: Análisis de la Existencia de Pitfalls en la Interpretación de Líneas Sísmicas 2D Mediante la Conversión a Profundidad por los Métodos De Image –Ray Y Vertical Stretched

Autor: Diego Fernando Gómez González\*\*

Palabras clave: Pitfall, Método Rayo imagen (Image –Ray), Velocidades intervalo, Fallas inversas.

Los pitfalls o artefactos en la interpretación de perfiles en tiempo de sísmica de reflexión que afectan directamente la incertidumbre en la exploración de hidrocarburos en presencia de pliegues asociados a fallas inversas generan curvaturas falsas (pull-ups, pull-down) en los reflectores cercanos a los planos de falla debido a variaciones laterales de velocidad.

Una solución para estas trampas es una conversión de tiempo a profundidad; en este trabajo se muestra que el método de rayo imagen ofrece muy buenos resultados con costos computacionales bajos. Un resultado óptimo depende en gran medida de la construcción del modelo de velocidad, en este caso se utilizaron velocidades tomadas en los pozos por diferentes métodos.

Se seleccionaron siete modelos estructurales representativos del Piedemonte Llanero Colombiano que fueron introducidos como modelos 2D de velocidad en profundidad y con la aplicación del modelado sísmico en ellos, se buscó determinar cuales pitfalls están presentes en las diferentes estructuras geológicas para tener una referencia en interpretaciones reales en tiempo y tener una idea más clara del resultado de una conversión a profundidad. Se aplicó la metodología de conversión tiempo profundidad con rayo imagen con datos reales en el piedemonte Llanero Colombiano comprobando la eficacia del método de rayo imagen.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología.

Director. PhD. William Mauricio Agudelo

Codirector. Dany Rueda Serrano.

## ABSTRACT

Title: Analysis of Existence of Pitfalls in the Interpretation of 2D seismic lines Through depth conversion by the Image-Ray and Vertical Stretched methods\*

Author: Diego Fernando Gómez González\*\*

Key words: Pitfall, Image –Ray method, Interval Velocities, Thrust faults.

Pitfalls or artifacts in the interpretation of in time-profiles of reflection seismic that directly affect the uncertainty in hydrocarbons exploration hydrocarbons in the presence of folds associated with thrust faults produce false curvatures (pull-ups) in the reflectors near the fault-plane due to lateral variations of velocity.

One solution to these traps is a depth conversion. This paper shows that the image ray method gives very good results with low computational costs. Best results depend largely on the construction of the velocity model, in this case there were used velocities taken from the wells by different methods.

There were selected seven representative structural models of Colombian Llanos Foothills which were introduced as 2D velocity models in depth and with the application of seismic modeling on them, it was tried to determine which pitfalls are present in the different geological structures to have a reference of actual interpretations in time, and have a clearer idea of the result of a depth conversion. It was applied the time-depth conversion methodology using image –ray with real data from Colombian Llanos Foothills of Colombia checking the effectiveness of the image-ray method.

---

\* Graduate project

\*\* Universidad Industrial de Santander. Faculty of Physical and Chemical Engineering. Geology School.

Director. PhD. William Mauricio Agudelo  
Codirector. Dany Rueda Serrano.

## INTRODUCCIÓN

El método sísmico ha sido la herramienta más importante en la exploración de yacimientos de hidrocarburos y busca reproducir imágenes del subsuelo mediante una gráfica, generalmente en tiempo, de las ondas elásticas reflejadas y registradas en la superficie. La interpretación de estas imágenes se basa en la estratigrafía regional, información de pozo y en modelos estructurales congruentes con el estilo de la zona. Muchas veces estas interpretaciones en secciones en tiempo no son correctas ya que los datos arrojados por el método sísmico pueden tener algún error en la adquisición, en el procesamiento o estar artificialmente deformadas en sectores donde las estructuras se tornan más complejas. Generalmente para evaluar una cuenca o correlacionar la información geológica es necesario realizar una conversión a profundidad, pero desafortunadamente no hay un método simple para convertir un set de datos en tiempo en un set de datos en profundidad, debido a que los tiempos de viaje dependen de un modelo de velocidad que en general puede variar en cualquier dirección. Hoy en día, el método más confiable es la migración preapilado en profundidad (PSDM) pero esta requiere un costo computacional muy alto y bastante tiempo de trabajo debido a que debe construirse el modelo de velocidad de intervalo. Una técnica que puede ofrecer resultados similares con costos computacionales más bajos es la conversión a profundidad utilizando rayos imagen. En este trabajo se busca verificar la eficacia de esta técnica en zonas complejas como el piedemonte colombiano ya que no siempre se cuenta con el tiempo y la capacidad computacional para realizar una migración PSDM.

En la literatura se encuentran trabajos sobre numerosos métodos de conversión a profundidad (Velásquez, 2007, Marsden, 1989,1992, etc.) pero hay muy pocos que hayan usado modelos tipo de geología estructural específicos para un área. Para entender a fondo los errores en las líneas sísmicas 2D en tiempo, es necesario conocer las estructuras geológicas y sus características, por esto es preciso trabajar datos sintéticos que representen estas geometrías. Con estos modelos

sintéticos ya se tendrá una base para poder trabajar los datos reales los cuales presentan un mayor grado de dificultad por diferentes factores como por ejemplo la anisotropía que presentan los materiales del subsuelo.

Muchos intérpretes proponen tener toda la información sísmica del piedemonte colombiano migrada en profundidad, pero el costo para realizar estas operaciones sería muy alto, si se utilizara una técnica como la conversión por rayo imagen se ahorraría tiempo y costo computacional, así la incertidumbre a la hora de determinar zonas potencialmente prospectivas se vería reducida al tener la geometría real de las estructuras en profundidad.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Utilizar las Técnicas Image Ray y Vertical Stretched sobre líneas sísmicas en tiempo 2D, como herramienta para caracterizar los diferentes tipos de pitfalls generados en zonas cuya geología presenta una alta complejidad estructural.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar las características de los diferentes tipos de pliegues asociados a fallas.
- Caracterizar posibles pitfalls en imágenes en tiempo dependiendo de la geometría de la estructura a partir de la realización de modelos sintéticos.
- Realizar la interpretación de los datos reales de la línea sísmica 2D en tiempo basándose en el comportamiento geológico regional.
- Obtener la geometría en profundidad de las estructuras geológicas presentes usando la conversión tiempo-profundidad por rayo imagen.
- Evaluar la efectividad de la conversión con rayo imagen por la presencia o no de pitfalls a partir de una comparación de las estructuras obtenidas en profundidad con las estructuras interpretadas en tiempo.
- Analizar y determinar qué influencia Tiene la geología estructural en la respuesta de la sísmica de reflexión en la zona de estudio

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

La interpretación de estructuras geológicas en líneas sísmicas 2D en tiempo en áreas de alta complejidad estructural, con presencia de pliegues asociados a fallas, se hace bastante complicada por la incertidumbre de los datos. Para la exploración en la industria petrolera es de suma importancia conocer la verdadera geometría de estas estructuras ya que esta hace parte de una serie de factores que determinan si una zona es prospectiva y económicamente viable. La sísmica de reflexión en tiempo presenta problemas cuando existen cambios laterales drásticos de velocidad, como por ejemplo en presencia de una falla que pone en contacto dos unidades litológicas de diferente edad y cada una con su respectiva velocidad. Efecto, en muchos casos aparece la curvatura aparente de los reflectores, que se puede confundir con pliegues anticlinales o sinclinales que determinan una estructura potencialmente almacenadora donde no la hay. Ya que la zona en la cual se trabajó es el Piedemonte colombiano se presume que pueden encontrarse estructuras falsas por la alta presencia de fallas inversas.

## **1. MÉTODO SÍSMICO**

La industria del petróleo se divide en tres grandes actividades, exploración, producción y comercialización. En la exploración se utilizan diferentes técnicas que buscan reducir la incertidumbre en la caracterización de un yacimiento, una de ellas es el método sísmico. Aunque es uno de los más costosos comparado con métodos potenciales por ejemplo, es la herramienta más útil en la exploración de hidrocarburos.

Este método está basado en el estudio de ondas elásticas producidas por una perturbación en la superficie, ya sea con explosivos o camiones vibradores, estas ondas se desplazan por el subsuelo y son reflejadas y refractadas siguiendo la ecuación de onda. Dichas reflexiones son registradas en superficie por una serie de geófonos distribuidos dependiendo del diseño de la adquisición. A partir del campo de onda registrado se modela el subsuelo teniendo como resultado una imagen o idea de la disposición de las capas en la zona de interés.

El método sísmico se puede dividir en cuatro pasos, diseño, adquisición, procesamiento e interpretación.

### **1.1. DISEÑO**

El diseño es un paso muy importante ya que de ello depende en gran parte la calidad de los datos. En este paso se determina la cantidad de receptores (geófonos), la cantidad de fuentes (perturbación en la superficie), y el espacio entre fuentes y receptores (offset), entre otros parámetros. (Figura 1).

### **1.2. ADQUISICIÓN**

El objetivo de esta etapa es la recopilación de los tiempos de viaje de los frentes de onda reflejados por los estratos en el subsuelo, estos frentes de onda se

reflejan por los cambios de impedancia en la roca, estos cambios son llamados reflectores.

Cada receptor capta una serie de datos, los cuales se denominan trazas, en el procesamiento convencional estas trazas se suman y se ordenan por receptor común o por punto medio común (CMP) significando con esto que se agrupan las trazas correspondientes al mismo punto intermedio entre fuente y receptor, las cuales corresponden al mismo punto de reflexión en el subsuelo para el caso de estratos planos, paralelos y horizontales, para crear una imagen sísmica.

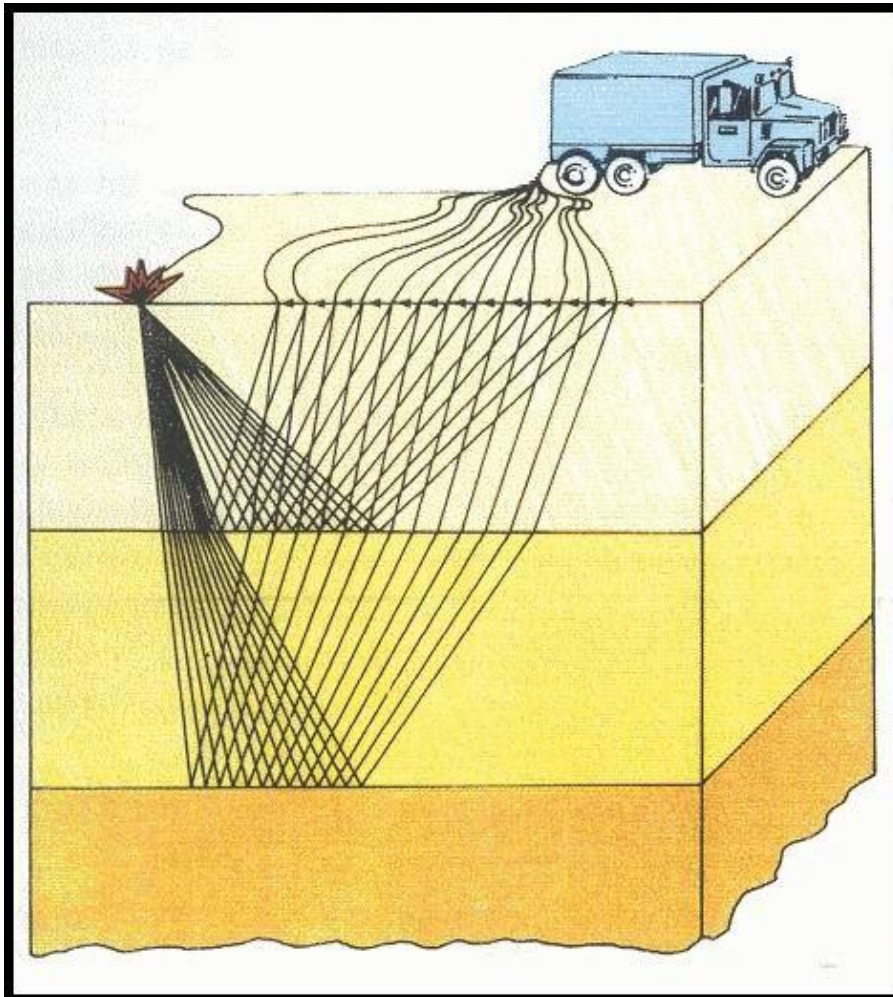


Figura 1: Esquema de adquisición sísmica, las ondas rayos viajan desde la fuente y se reflejan en cada interface, los receptores registran el campo de onda en superficie. Tomado de. <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=801>

### 1.3. PROCESAMIENTO

Una vez hecha la adquisición sísmica se pasa a procesar las imágenes, en este punto se apilan o suman trazas con el fin de mejorar la relación señal/ruido, entendiéndose como ruido a todas aquellos datos que no sean producidos por los reflectores por, ejemplo el movimiento de los arboles por efecto del viento.

El procesamiento sísmico hoy en día tiene una secuencia básica:

- Pre-procesamiento (geometría, atenuación de spikes, recuperación de amplitudes)
  - Spikes: Picos anómalos de amplitud
  - Recuperación de Amplitudes: Proceso de corrección por el efecto de la pérdida de amplitudes debido a la divergencia cuasiesférica del frente de onda y la pérdida por el comportamiento parcialmente inelástico del subsuelo
- Deconvolución: El concepto de deconvolución se refiere a las operaciones matemáticas empleadas en restauración de señales para recuperar datos que han sido modificados por un proceso físico llamado convolución
- Correcciones estáticas: Son correcciones en tiempo debido a la topografía (existencia de desniveles entre fuente de energía y receptores) y a las variaciones de velocidad y espesor de la capa meteorizada (de baja velocidad)
- Ordenado de los datos por punto medio común (CMP)
- Análisis de velocidad: Análisis de velocidades, velocidad promedio, velocidad de apilado y velocidad RMS

- Corrección NMO (Normal Move Out): Necesaria para horizontalizar las hipérbolas y dejar en fase los picos y valles correlacionables entre las distintas trazas en familias de puntos comunes en profundidad
- Correcciones de estáticas residuales: Errores en la alineación de las amplitudes en las trazas
- Apilado de las trazas: Las trazas de los distintos registros de campo deben ser agrupadas en función del punto de reflexión en el subsuelo, al sumar o apilar lo que se está haciendo es atenuar ruidos y resaltar la señal, es decir, obtener una traza suma que consigue mejorar la relación Señal/Ruido
- Procesamiento post-apilado: Posterior al apilado de las trazas, busca mejorar la resolución espacial.
- Migración preapilado en tiempo: La migración mueve las reflexiones buzantes a su verdadera posición en el subsuelo y colapsa las difracciones para lograr incrementar la resolución espacial.

#### **1.4. INTERPRETACIÓN**

En este punto se tiene una imagen sísmica ya procesada y con la mejor resolución posible. Se identifican los horizontes más enfocados (con mejor resolución) y por medio de correlación en pozos se identifican las posibles formaciones y estructuras geológicas presentes en la zona donde se realizó la adquisición. Hay que tener en cuenta que la sección sísmica se encuentra en tiempo y no nos da la posición y forma real.

#### **1.5. CONVERSIÓN A PROFUNDIDAD**

Como se mencionó anteriormente una sección sísmica en tiempo se construye graficando las amplitudes de las ondas reflejadas hasta la superficie en su tiempo de arribo, el problema en este punto es que no se conoce la posición real de los

horizontes. Cuando tenemos presencia alta complejidad estructural y en especial fallas inversas, las cuales ponen en contacto rocas de diferentes edades y velocidades, el efecto en la imagen en tiempo por lo general son estructuras falsas que se crean en el bloque yacente de la falla.

El objetivo de la conversión de una sección en tiempo a una en profundidad es determinar la posición en profundidad de los horizontes y corregir los errores antes mencionados. La técnica que ofrece los mejores resultados es la Migración preapilado en profundidad (PSDM), pero sus algoritmos requieren de un costo computacional muy alto, una alternativa es la técnica Image Ray con un costo computacional mucho menor, haciendo la relación costo-beneficio muy atractiva para la industria.

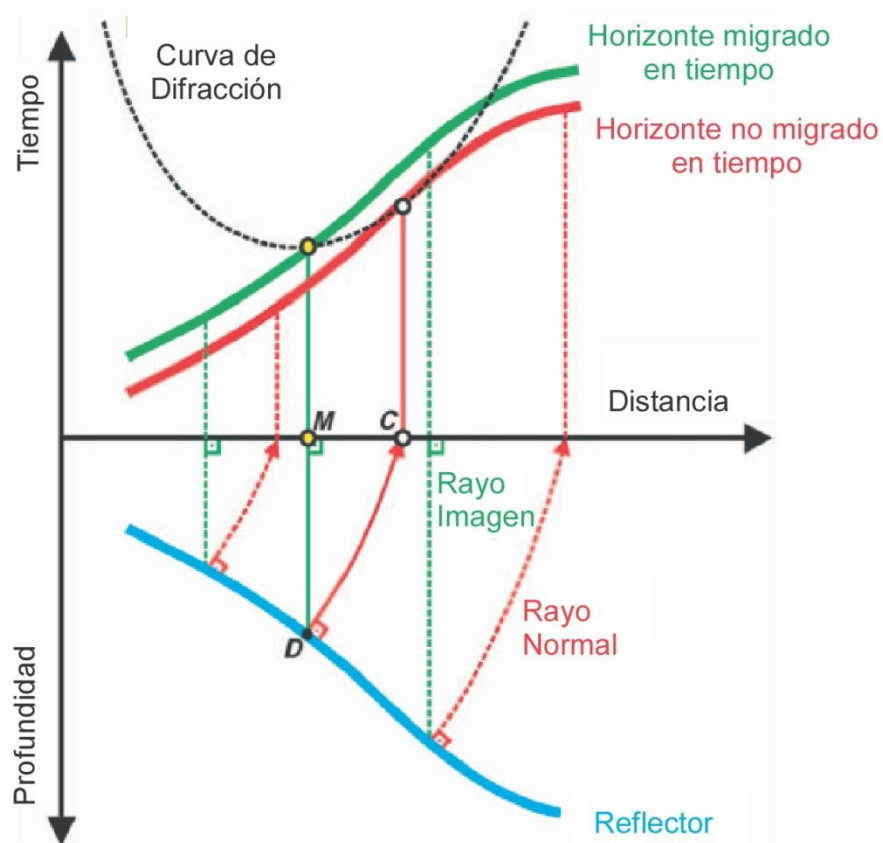
### **1.6. RAYO IMAGEN (IMAGE RAY)**

Como se ha mencionado el objetivo final del método sísmico es proporcionar una imagen realista de la geometría en profundidad de las estructuras presentes en la zona de la adquisición. Las secciones apiladas por CMP y las migradas en tiempo son muy útiles para determinar qué tipos de estructuras pueden estar presentes, pero no son el mejor resultado que puede lograrse.

Una conversión a profundidad de un set de datos sin migrar por medio de un rayo normal involucra tener unas condiciones iniciales con coordenadas del CMP ( $x_1, x_2, t$ ), a partir de este punto se trazan los rayos con una trayectoria normal a la superficie del reflector, esto supone que la interpretación de las estructuras sea correcta ya que esta hace parte de las condiciones iniciales y de esta se deriva la trayectoria de los rayos normales. La conversión se realiza siguiendo la trayectoria de estos rayos desde el punto inicial (CMP) hasta el punto final teniendo en cuenta el tiempo de ida y vuelta del frente de onda (Iversen y Tygel, 2008)

De forma similar se puede proponer la conversión a profundidad de un set de datos migrados por medio de rayos imagen. Una ventaja es que se tienen unas

condiciones iniciales conocidas a diferencia del caso anterior en el cual las condiciones iniciales eran producto de la interpretación. La trayectoria de los rayos imágenes comienza perpendicular a la topografía lo que nos permite tener certeza del punto inicial, este rayo sigue la trayectoria del vector lentitud lo que lo hace sensible a los cambios laterales de velocidad lo que traduce en un mejor resultado en presencia de fallas y pliegues. Cada punto  $(x_1, x_2, t)$  inicial se mueve a través de la trayectoria del rayo imagen hasta consumir el tiempo de ida ubicándose en su verdadera posición en profundidad (Iversen y Tygel, 2008). Una representación gráfica de los dos casos el del set de datos migrados y el de no migrados se observa en la Figura 2



*Figura 2: Representación grafica de conversión por rayo imagen; la unión de todos los ápices de la curva de difracción forman el un horizonte migrado, el cual es conectado con un punto en superficie y en profundidad. La envolvente de todas la curvas de difracción forman el horizonte no migrado. (Modificado Iversen y Tygel, 2008)*

## **2. PROBLEMA DE CONVERSIONES A PROFUNDIDAD**

Existen varios métodos para convertir una sección en tiempo a una sección en profundidad, la validez de estos depende de los datos, de la información disponible y de la complejidad estructural de la zona. Todos los métodos se basan en el mismo principio físico que dice que la velocidad es igual a la distancia recorrida multiplicada por el tiempo empleado (o una expresión integral equivalente). Los métodos difieren en como se construye el modelo de velocidades y en el vector por el cual viaja cada punto a convertir. Un aspecto determinante en la metodología de conversión es el tipo de velocidad. Existen varios tipos, pero no todos nos dan la velocidad correcta de la roca. Las velocidades de intervalo son las verdaderas pero representa un reto conocerlas en donde no hay un buen control de pozo, las velocidades stack o de apilado al igual que las velocidades RMS son más estadísticas que físicas. Antes de determinar cuál método es el mejor para realizar la conversión es importante tener la mejor información de velocidad posible.

### **2.1. VELOCIDAD DE INTERVALO**

Es la velocidad que representa un intervalo rocoso con un espesor determinado. Está definida por el cociente entre el espesor y el tiempo de transito vertical. Esta velocidad se puede determinar o adquirir de diferentes formas, por lo general provienen de datos de pozo ya sea por un check shot, un VSP o un registro sísmico, todo depende de la información existente en la zona.

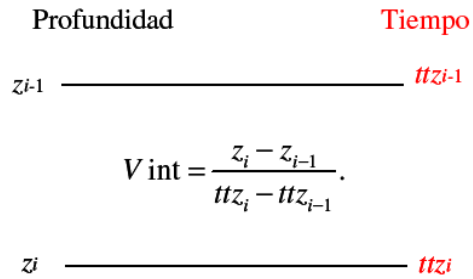


Figura 3: Definición de la velocidad de intervalo entre dos interfaces (tomado de Velásquez 2007)

## 2.2. VELOCIDAD PROMEDIO

Esta es la velocidad en un punto específico en profundidad ( $P_n$ ) medida desde la superficie, la velocidad promedio resulta de dividir la profundidad de este punto ( $P_n$ ) medido desde la superficie de referencia por el tiempo de viaje vertical de la onda desde la superficie hasta el punto (Figura 4). Las velocidades promedio son las más usadas en las conversiones tiempo-profundidad.

Para calcular la velocidad promedio de un reflector o un punto sin medición directa de tiempo de tránsito se hace un promedio ponderado de las velocidades de los puntos o interfaces superiores a él. Entonces si tenemos varias capas el cálculo será la sumatoria de la multiplicación de la velocidad de intervalo de cada capa y su respectivo tiempo de tránsito dividido por la sumatoria de todos los tiempo de tránsito para cada capa.

$$V_{avg_n} = \frac{\sum_{j=1}^n V_j \Delta t_j}{\sum_{j=1}^n \Delta t_j} \quad (1)$$

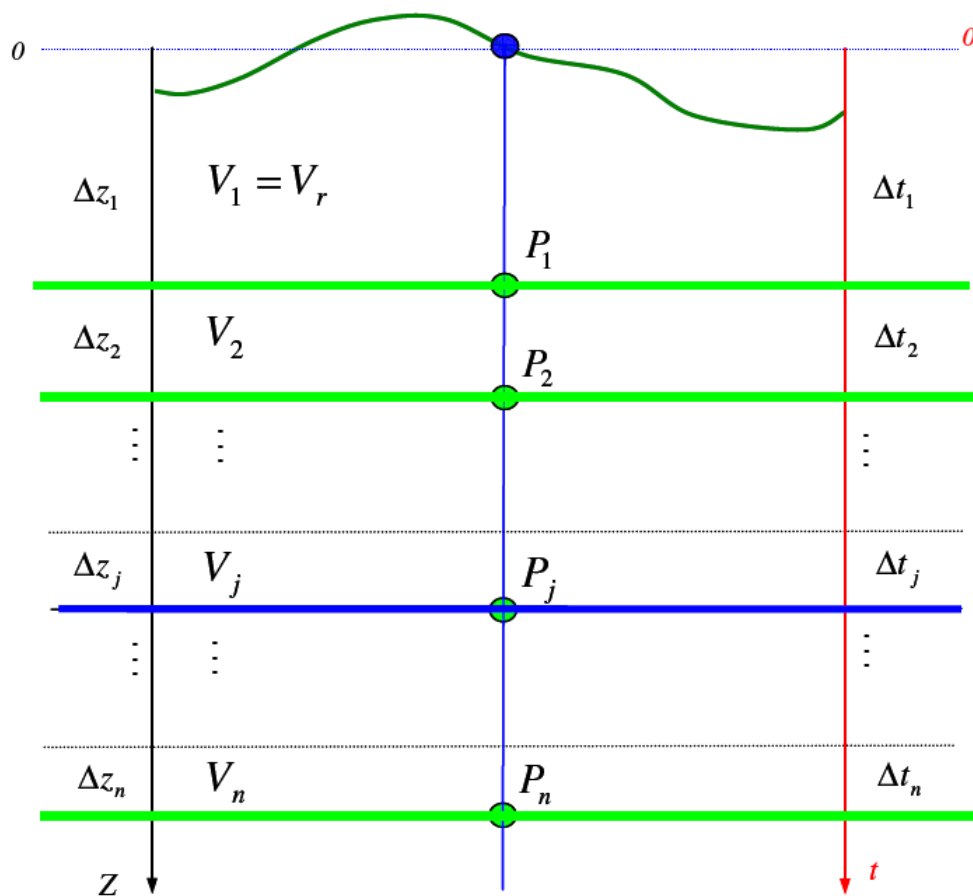


Figura 4: Diagrama para determinar la velocidad promedio en puntos sucesivos ( $P_j$ ) a diferentes profundidades, distanciados en intervalos de diferentes espesores ( $\Delta z_j$ ) y diferente velocidad ( $V_j$ ). (Tomado de Velásquez 2007)

### 2.3. VELOCIDAD DE PROCESAMIENTO O RMS

Las reflexiones sísmicas siguen curvas hiperbólicas por la diferencia de distancia entre las fuentes y receptores (offset). Con el fin de que las trazas queden en fase y puedan ser sumadas o apiladas, esta curva debe ser aplanada a una línea horizontal con el mismo tiempo. Esta operación recibe el nombre de Normal Move Out (NMO) y se hace por medio de una velocidad NMO. Si se tienen varios horizontes la velocidad de apilado la velocidad NMO irá cambiando con la profundidad. En medios con capas isótropas planas y paralelas, cada una refracta

rayos en diferentes ángulos lo que hace que el modelo de velocidad para la corrección NMO sea un poco más complicado de determinar. La manera de corregir este efecto es introduciendo la velocidad RMS, en el caso de capas de bajo buzamiento la velocidad RMS es aproximadamente igual que la velocidad NMO. La velocidad RMS es una velocidad promedio, pero no es ni ponderada, aritmética o geométrica, esta se calcula como la raíz cuadrática media de las velocidades de intervalo.

$$V_{RMS} = \left[ \frac{\sum_{j=1}^n V_j^2 \Delta t_j}{\sum_{j=1}^n \Delta t_j} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Una parte crítica en la metodología de conversión es saber sobre qué zona se está trabajando, puesto que las metodologías deben ser más precisas si se está en un área donde la geología es compleja como por ejemplo piedemonte y cordilleras o las metodologías simples pueden ser una buena aproximación en áreas donde las estructuras son más simples y no implican pliegues asociados a fallas. Muchos métodos se basan en rayos con trayectorias verticales que no tienen en cuenta cambios laterales de velocidad, lo cual es válido en zonas de geología simple, es decir, sin pliegues y sin fallas, las cuales ponen en contacto rocas de diferentes edades y velocidades. En estos casos estos métodos se ajustan y generan buenos resultados. Por el contrario los métodos de rayos verticales en presencia de falla y pliegues no son confiables ya que estos cambios laterales generan errores en la posición final de cada punto en profundidad.

Es necesario utilizar un método que acepte cambios laterales de velocidad en el modelo introducido, en zonas de alta complejidad estructural para esperar un ajuste con la interpretación. Si al final de este proceso se tiene la estructura real en profundidad se puede reducir la existencia de pitfalls (Errores en interpretación

por estructuras falsas e tiempo) en la secciones en tiempo causados por los cambios laterales de velocidad.

### 3. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.

El área de estudio se localiza en el flanco oriental de la cordillera oriental y abarca aproximadamente 40 Km<sup>2</sup>, en cercanías al municipio de Medina departamento de Cundinamarca.

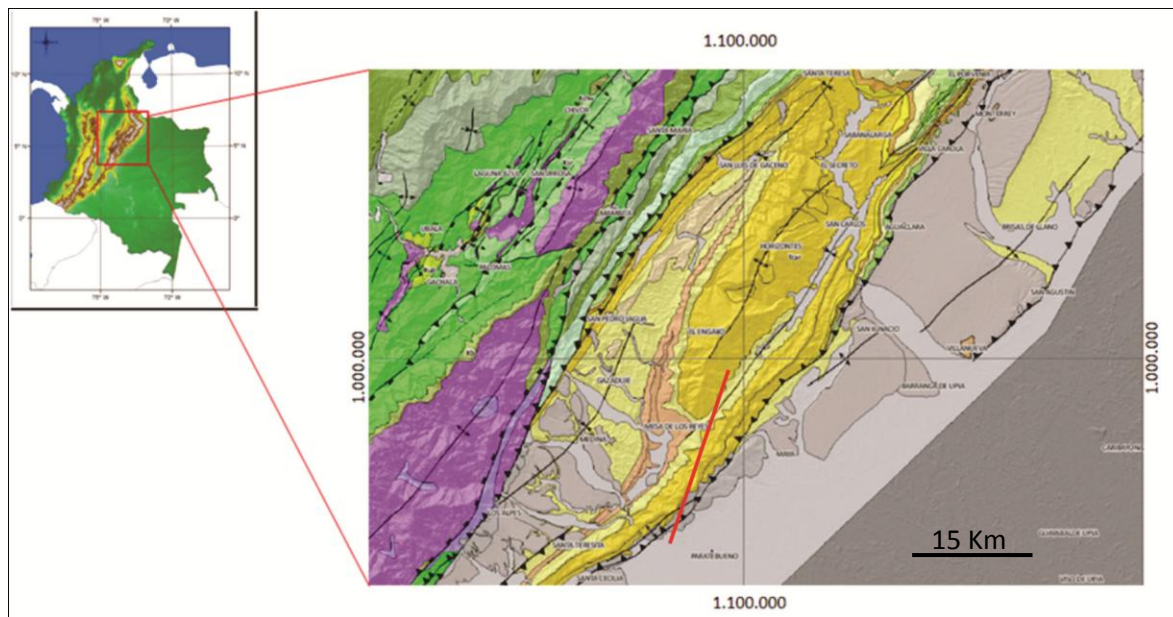


Figura 5: Ubicación área de trabajo, ubicación de línea sísmica ME-1994-1350.

En el norte de los Andes y el piedemonte llanero se desarrollo una deformación producto de la actividad entre las placas Nazca-Caribe. Hacia el oriente se presenta una indentación tectónica durante el Mioceno Tardío producida por el bloque Baudó-Panamá. Se considera que la fuerza responsable para la inversión de las cuencas del rift del Mesozoico en la Cordillera Oriental es producto de este evento (Taboada et al., 2000). La Cordillera Oriental está aislada de la Cordillera Central por el VMM (Valle Medio del Magdalena). Esta cuenca está limitada al este por el sistema de fallas de borde llanero, y al oeste por unas fallas de

cabalgamientos con vergencia al oeste que la separa del Valle del río Magdalena. (Butler and Schamel, 1988; Namson, et al., 1994; Gómez., et al., 2003).

### **3.1. MARCO ESTRATIGRÁFICO REGIONAL**

El área de estudio se caracteriza por tener una vasta capa sedimentaria Cretácica-Cenozoica de hasta 10km de espesor, que se posiciona sobre rocas sedimentarias del Paleozoico Superior o filitas pre-Devónicas de bajo grado. Las rocas del basamento se encuentran expuestas por la acción de los cabalgamientos, estas rocas del grupo Quetame, están constituidas por filitas y esquistos verdes de edad pre-devónica. Suprayaciendo esta unidad que es la más antigua se encuentra el grupo Farallones, que está conformado por rocas sedimentarias entre las cuales se encuentran areniscas marinas someras a continentales Devónicas, una secuencia de capas rojas continentales Carboníferas y carbonatos marinos someros Pérmicos (Silva, 2010).

En el cretácico inferior se depositó una secuencia sedimentaria de aproximadamente 5 km de espesor, en el berrasiano se depositaron estratos sin-rift que debido a los cambios faciales laterales no se pueden agrupar en una sola unidad lito-estratigráfica. En la formación Guavio se agruparon las unidades calcáreas, la formación Buenavista se constituye por gravas polimícticas, brechas y areniscas fluviales y la formación Bata se conforma por areniscas líticas terrígenas marino someras, conglomerados polimícticos y limolitas grises. Suprayaciendo estos depósitos se encuentran las formaciones Macanal, las Juntas y Fomeque de edad berrasiano – Aptinao, compuestas por una sucesión de lodolitas físciles marinas y areniscas de espesores altamente variables. Cubriendo estas unidades se encuentra areniscas marinas someras de la formación Une la cual es de edad Albiano-Cenomaniano. Suprayaciéndola se encuentran lodolitas físciles negras marinas del Cretácico Superior (Turoniano-Santoniano) que constituyen la formación Chipaque, cubierta por cuarzo-areniscas

del Campaniano-Mastrichtiano que hacen parte del grupo Guadalupe. (Mora, 1999).

La secuencia Paleo-Eoceno en el piedemonte se caracteriza por estar compuesta de areniscas continentales y lodolitas fisiles que hacen parte de las formaciones Barco, Cuervos y Mirador. Estas unidades son suprayacidas por la Fm. Carbonera que se conforma por una secuencia Oligo-Mioceno Inferior de lodolitas fisiles y areniscas marinas marginales a deltáicas. En el Mioceno Medio se depositaron las lodolitas fisiles de la formación León que cubren la secuencia del Mioceno Inferior. Por último suprayaciendo a la formación León se encuentra una sucesión de arenisca continental y estratos conglomeráticos del Mioceno superior suprayacidos por areniscas y conglomerados del Plioceno al presente de la formación Guayabo.

### **3.2. MARCO ESTRUCTURAL REGIONAL**

La cordillera oriental es un cinturón plegado internamente, limitado por las fallas de Algeciras y Santa Marta-Bucaramanga. Estas fallas acomodan la deformación de rumbo activa. La dirección de convergencia se refleja por el dominio débil, mientras se levantan los bloques indeformados de basamento a lo largo de las estructuras heredadas. En los frentes montañosos las fallas de cabalgamientos están asociadas con sinclinales en el bloque colgante, actuando estos como depocentros en el neógeno, estos depósitos evidencian la historia de crecimiento de las estructuras adyacentes. (Mora, 2007)

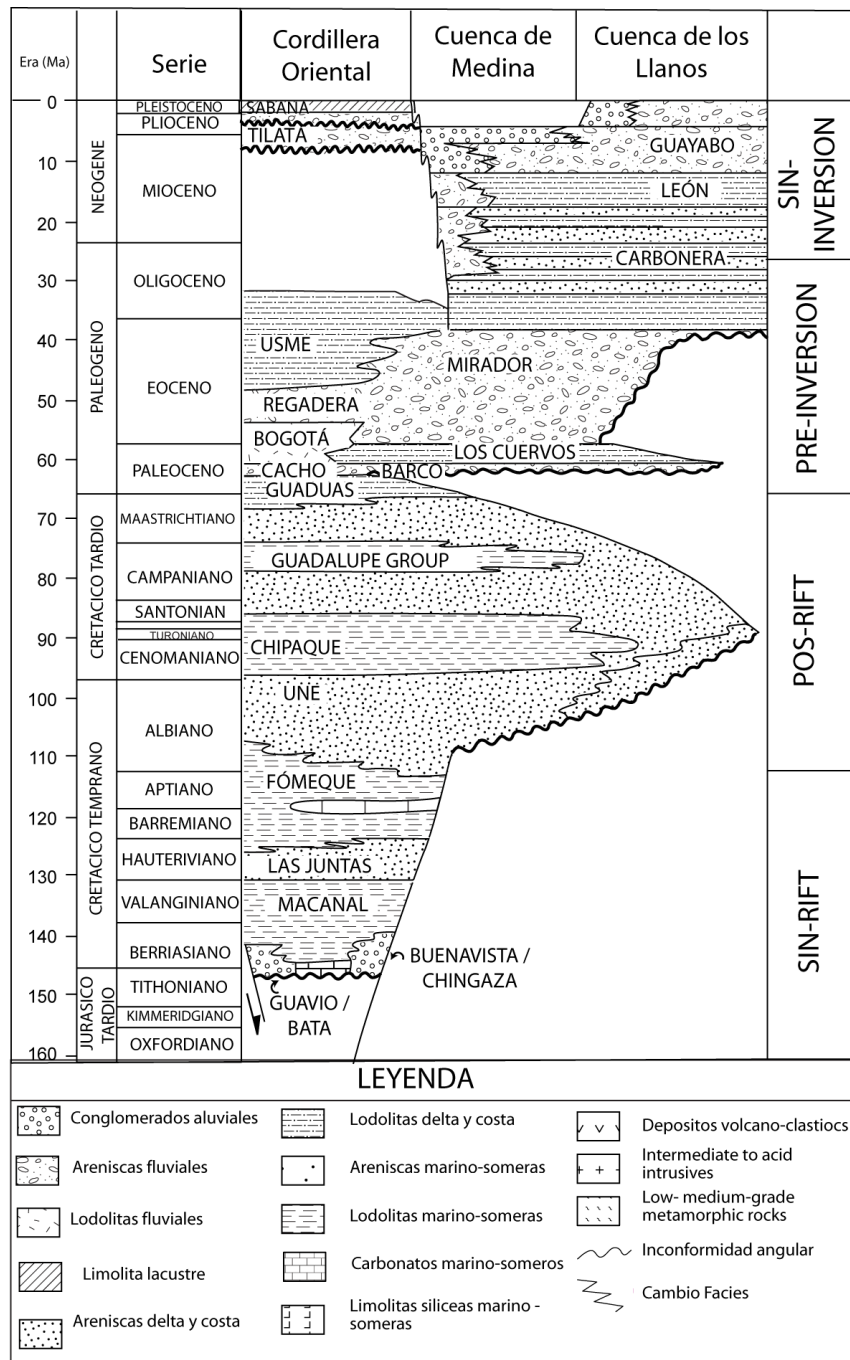


Figura 6: Estratigrafía del flanco Oriental de la Cordillera Oriental en el área de estudio (modificado Mora, 2007).

Para Rowan y Linares (2000) el anticlinal de Medina (Guavio) es interpretado como un pliegue por flexión de falla (Fault-Bend Fold) en el bloque colgante de una falla de cabalgamiento, que hace rampa sobre fallas normales subyacentes ver Figura 7. La falla de cabalgamiento subyacente al anticlinal de Medina parece despegar de lodolitas fisiles del Cretácico Inferior bajo el sinclinal de Nazareth, remonta hacia un despegue intermedio y luego sube en rampa hasta su afloramiento en superficie como la falla de Guaicaramo (Silva, 2010).

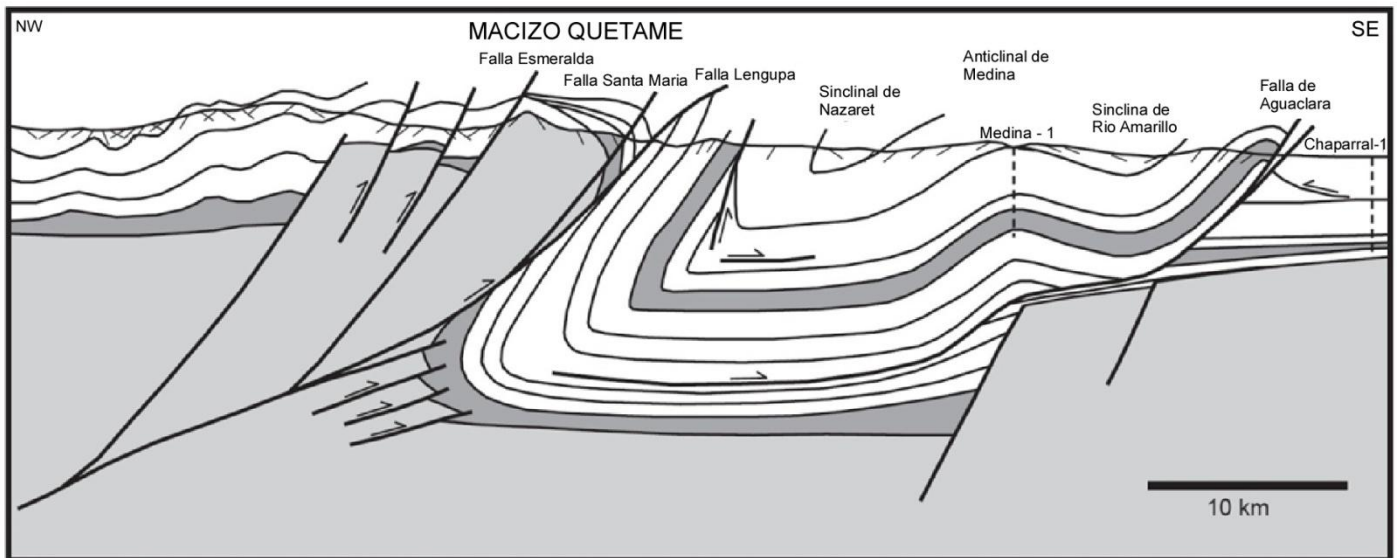
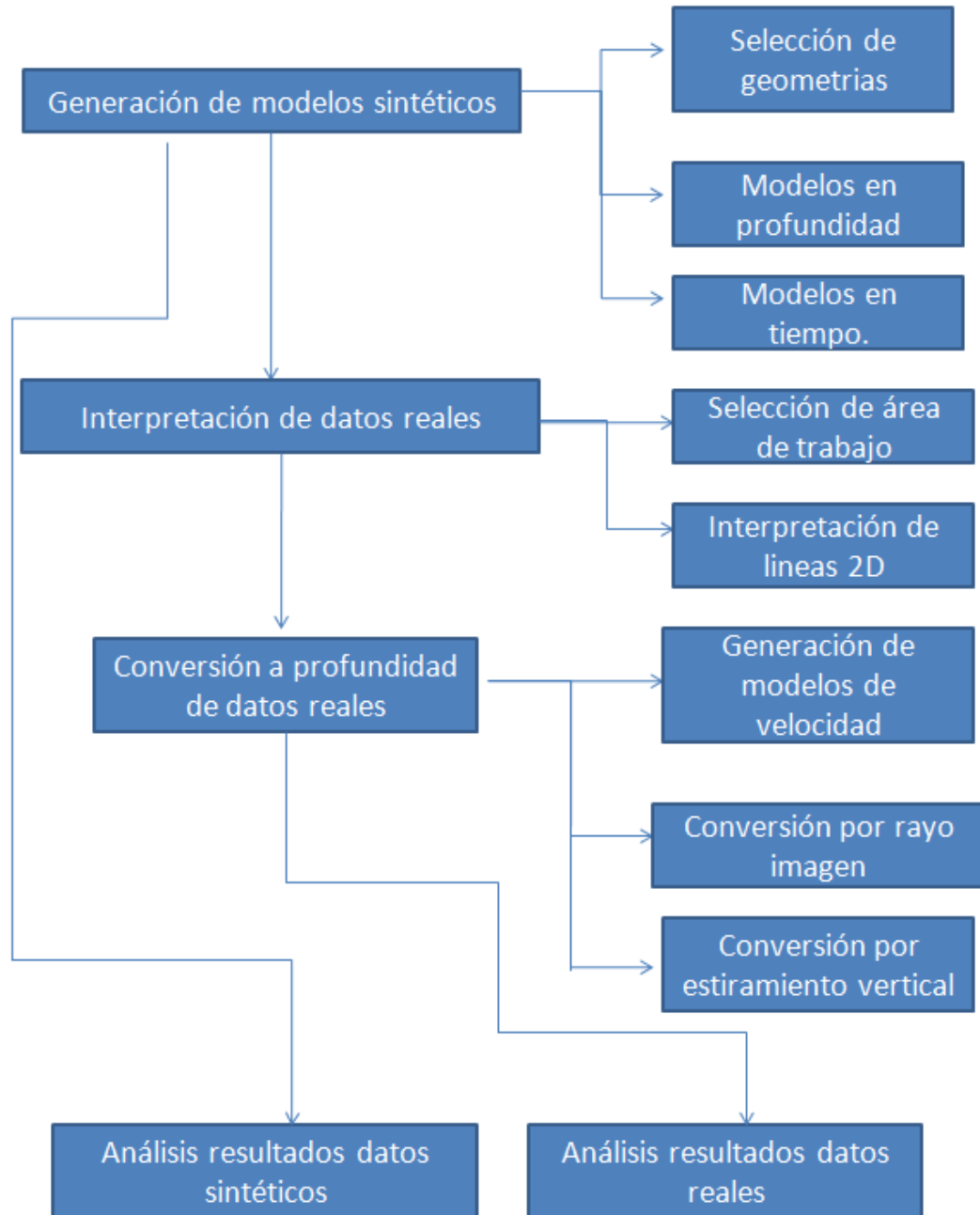


Figura 7: Geometría para el área del Macizo de Quetame y anticlinal de Medina (modificado Rowan y Linares., 2000).

## 4. METODOLOGÍA

Figura 8: Metodología planteada para el desarrollo del trabajo



#### **4.1. GENERACION DE MODELOS SINTÉTICOS**

Con la generación de estos modelos se busca representar las geometrías de deformación del subsuelo y la respuesta de la sísmica de reflexión en tiempo en cada uno de ellos, para caracterizar posibles pitfalls asociados a estas geometrías.

#### **4.3. SELECCIÓN DE GEOMETRÍAS**

En geología estructural se han propuesto diferentes modelos de deformación del subsuelo en respuesta a esfuerzos compresivos. En el piedemonte colombiano se ha podido interpretar por diferentes autores muchas de estas geometrías, debido a esto se seleccionaron 7 modelos diferentes presentes en este ambiente.

##### **4.2.1. Pliegues por flexión de falla (Fault-Bend-Fold)**

El mecanismo de pliegues por flexión de fallas actúa cuando el bloque colgante de rocas se desplaza sobre una falla curvada subyacente. La traslación de rocas rígidas del bloque colgante sobre el segmento superior de la falla produce un vacío entre la falla y el bloque. El desplazamiento del bloque colgante sobre el segmento inferior de la falla crea un traslape, ninguno de los dos casos es razonable (Shaw, et al., 2004). Un caso congruente es plegar el bloque colgante a través del desarrollo de una banda (kink) que tiene la capacidad de doblar estas rocas sobre la falla de sin generar un vacío o una superposición excesiva.

Este pliegue inicia en la flexión de la falla que es donde se localiza el eje activo de esta banda kink, posterior al plegamiento se trasladan sobre el plano de falla. Este pliegue también contiene una zona inactiva que está marcada por el límite de donde los estratos conservan la geometría antes de la deformación (Figura 9). Esta zona inactiva se aleja de la zona activa a medida que el desplazamiento crece, por lo tanto el ancho de la banda es directamente proporcional al desplazamiento.

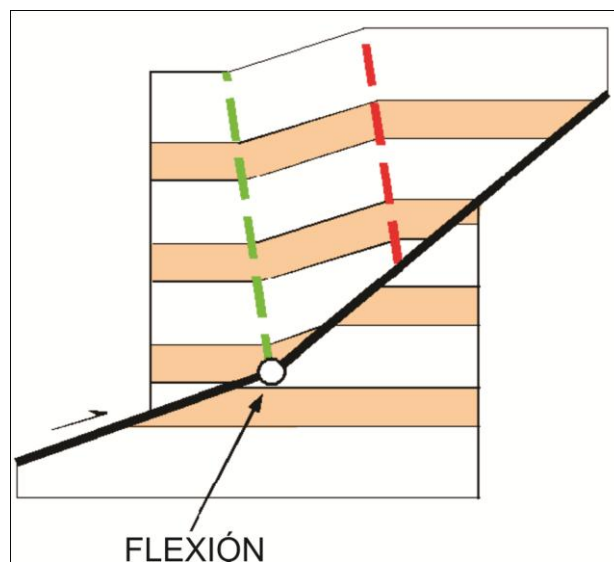


Figura 9: Representación de un pliegue por flexión de falla. En verde se muestra el eje axial que marca el inicio de la zona activa y en rojo el final de la zona activa y el inicio de la zona pasiva. (Modificado Shaw, et al., 2004)

#### 4.2.2. Pliegues por flexión de falla con múltiples rampas

El comportamiento de este mecanismo es similar al Fault-bend-fold con una sola rampa, inicialmente, al desplazarse a través de cada curva produce una banda kink distinta; Sin embargo, con el desplazamiento progresivo, las bandas kink se combinan e interactúan (Shaw, et al., 2004).

El producto de estas interacciones puede ser muy complejo, se generan muchas superficies axiales y dominios de buzamientos nuevos (Figura 10). Por lo tanto, los multi-bend fault-bend folds se caracterizan generalmente por la presencia de múltiples dominios e buzamiento en los limbos traseros y delanteros.

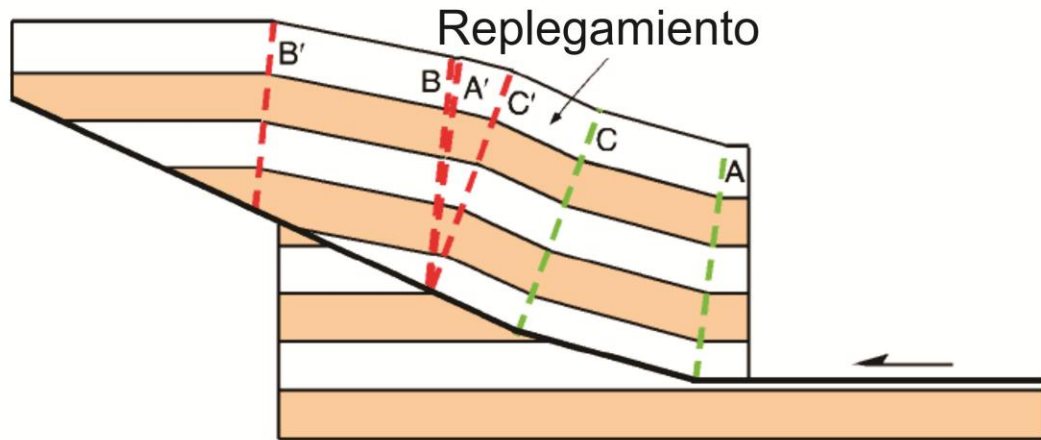
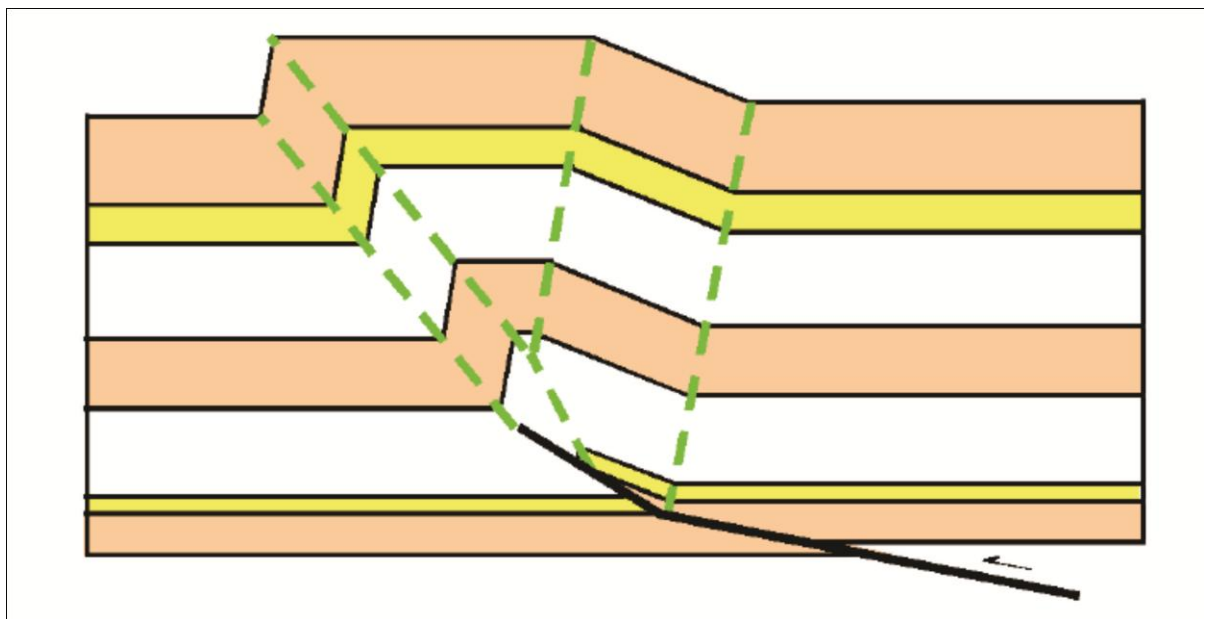


Figura 10: Esquema de un pliegue por flexión de falla con múltiples rampas. En verde se muestran el inicio de las zonas activas producto de las flexiones de la falla. (Modificado Shaw, et al., 2004)

#### 4.2.3. Pliegues por propagación de falla (Fault-Propagation-Fold)

Estos pliegues tienen la particularidad de consumir todo el desplazamiento de la falla, por esto son asimétricos con su flanco delantero mucho más pronunciado que el limbo trasero. Esta geometría también conserva los espesores de los estratos lo que lleva a tener ejes axiales fijos durante la deformación. Se propone una bisagra angular para poder conservar las longitudes de los estratos. Estos espesores constantes se desarrollan al propagarse una superficie activa sujeta a la punta de la falla. El limbo trasero se desarrolla muy similar que en un pliegue por flexión de falla aunque el ancho de suele ser mayor que el desplazamiento de la falla.



*Figura 11: Esquema de un pliegue por propagación de falla. En verde se muestran el inicio de las zonas activas fijas durante la deformación. (Modificado Shaw, et al., 2004)*

#### **4.2.4. Cizalla simple y pura en pliegues por flexión de falla**

Esta cizalla produce anticlinales con formas muy particulares que reflejan una componente de flexión sin desplazamiento en la deformación. Este estilo muestra limbos traseros muy largos que no son paralelos a la rampa de la falla y tiene un ángulo de buzamiento menor. Una evidencia clara de la rotación de este limbo son los estratos de crecimiento que se depositan por encima del anticlinal. Este estilo muestra dos geometrías diferentes cizalla pura y cizalla simple, el comportamiento de las dos es muy similar pero difieren en el ángulo que forma el eje axial activo con el punto de flexión de la falla inversa (Figura 12).

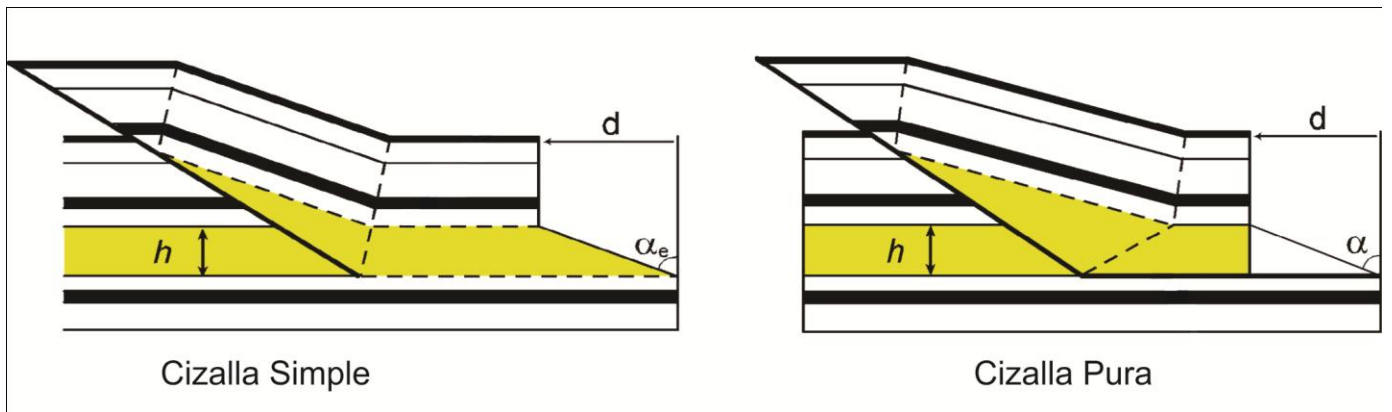


Figura 12: (izquierda) esquema de cizalla simple en pliegues por flexión de falla. (Derecha) esquema de cizalla pura, forma un ángulo con el eje axial de la zona activa. (Modificado Shaw, et al., 2004)

#### 4.2.5. Imbricaciones hacia adelante y hacia atrás en pliegues por flexión de falla

Estas estructuras se forman por el apilamiento vertical de 2 o más fallas inversas con un despegue y un pliegue en común. En el modelo secuencial de ruptura hacia delante (Figura 13a), el desplazamiento de la falla inversa produce un pliegue por flexión de falla que se repliega al generarse la nueva falla en bloque yacente. Por el contrario en el modelo de ruptura hacia atrás (Figura 13b) hay un pliegue preexistente que se corta por la falla más joven producida por el desplazamiento de la falla principal.

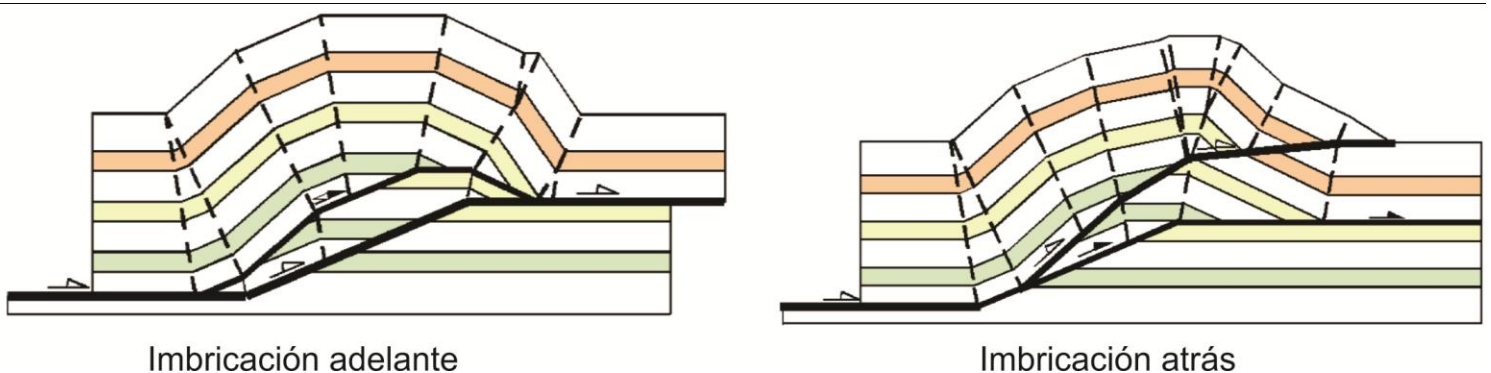


Figura 13: (a) imbricación adelante en pliegues por flexión de falla, por cada falla se crean un domino de buzamiento nuevo. (b) imbricación atrás en pliegues por flexión de falla. (Modificado Shaw, et al., 2004)

#### 4.4. MODELOS EN PROFUNDIDAD

Cada uno de estos modelos representa una geometría en profundidad, y tiene cada una de las características descritas por Shaw, et al., 2004. Para realizar dichos modelos en el software Norsar se necesita de antemano las coordenadas de cada línea en un archivo de texto txt, para esto se construyó cada modelo en el software Autocad y se exportaron las coordenadas de las líneas de cada modelo. Teniendo el modelo en Norsar, se crea el modelo de velocidad asumiendo velocidades que representen una secuencia de rocas similar a las del piedemonte colombiano, con un rango que va entre 2500m/s y 3800m/s. (Figura14)

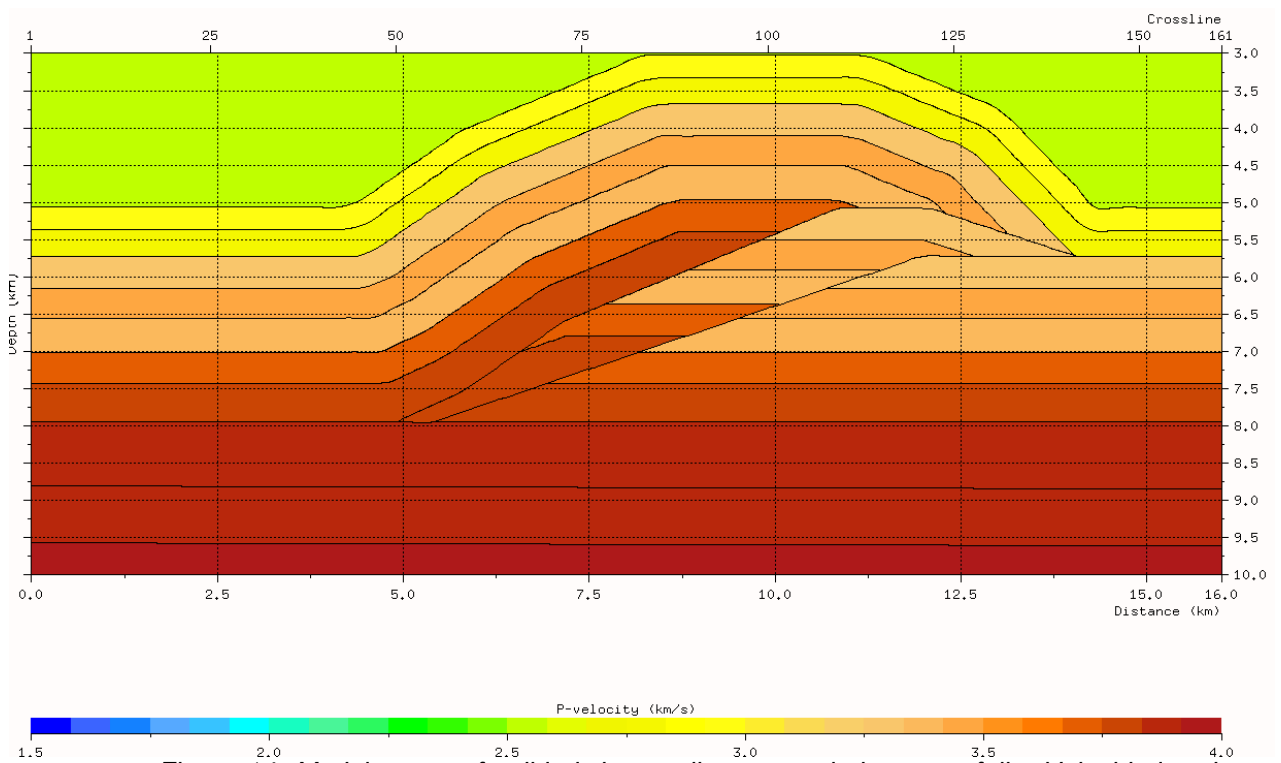
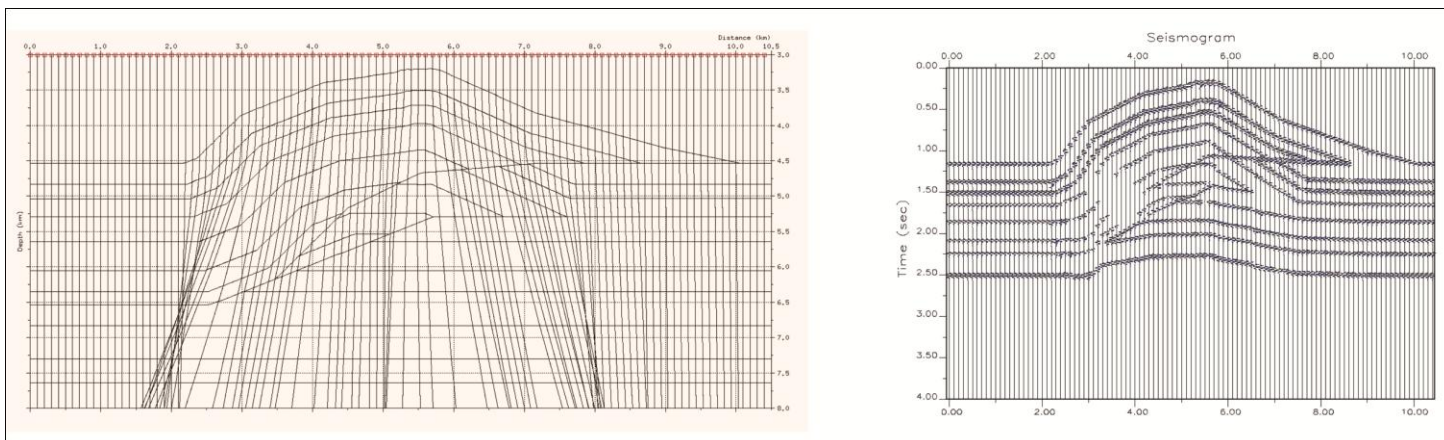


Figura 14: Modelo en profundidad de un pliegue asociado a una falla. Velocidades de onda P entre 2500 m/s y 3800m/s.

## 4.5. MODELOS EN TIEMPO

Al tener cada modelo de velocidades en profundidad con cada una de sus propiedades, es posible hacer un trazado de rayos (Figura 15a). Este trazado se hace con el método de rayo imagen, con esto se busca representar el comportamiento de de una migración en tiempo en dicha estructura. La sección resultado de este trazado se puede observar en un sismograma sintético (Figura 15b). Teniendo el modelo en profundidad y su respectiva imagen en tiempo



podemos comparar que alteraciones sufre la geometría de la estructura.

*Figura 15: (a) diseño de trazado de rayos para un modelo en profundidad. (b) sismograma sintético en base a las velocidades del modelo y al trazado de rayos.*

## 5. RESULTADOS SINTÉTICOS

Como se mencionó anteriormente se escogieron 7 geometrías diferentes de modelos de deformación del subsuelo en respuesta a esfuerzos compresivos. De cada una de ellas se realizó un modelo sintético en profundidad para posteriormente convertirlo a tiempo y observar el comportamiento que tendría una sísmica de reflexión en una zona con dichas geometrías.

## 5.1. PLIEGUES POR FLEXIÓN DE FALLA (FAULT-BEND-FOLD)

De esta geometría se realizaron 2 modelos diferentes variando el ángulo de la rampa de falla.

### 5.1.1. Modelo 1 (rampa mayor a 45 °)

En este modelo se puede observar que al tener una rampa con un ángulo tan alto el trazado de rayos no puede iluminar casi ningún sector próximo a la rampa de falla. Como se observa en la Figura 17 los rayos al incidir en los estratos y el plano de falla, no pueden ser registrados en ciertos puntos ya que no existe un offset suficiente, lo que no deja una zona muy grande sin información.

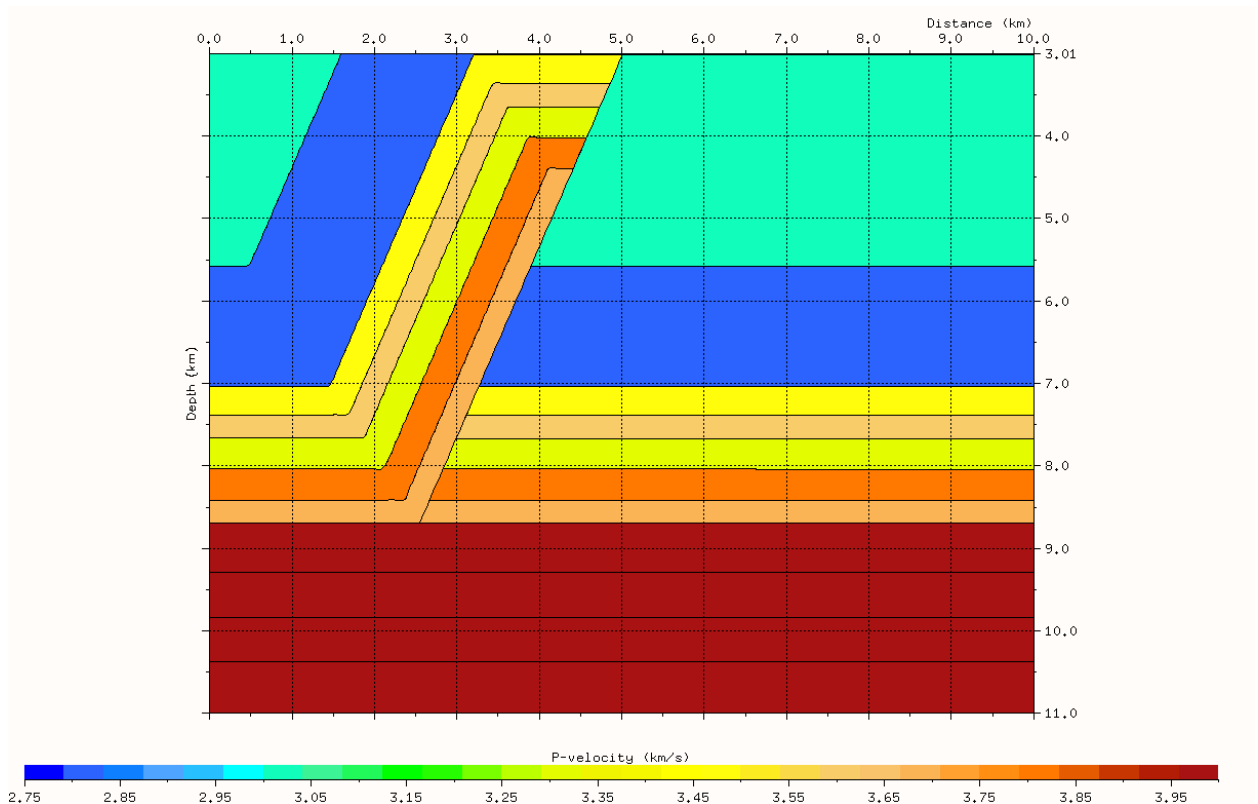


Figura 16 : modelo en profundidad de un pliegue por flexión de falla con su respectivo modelo de velocidades.

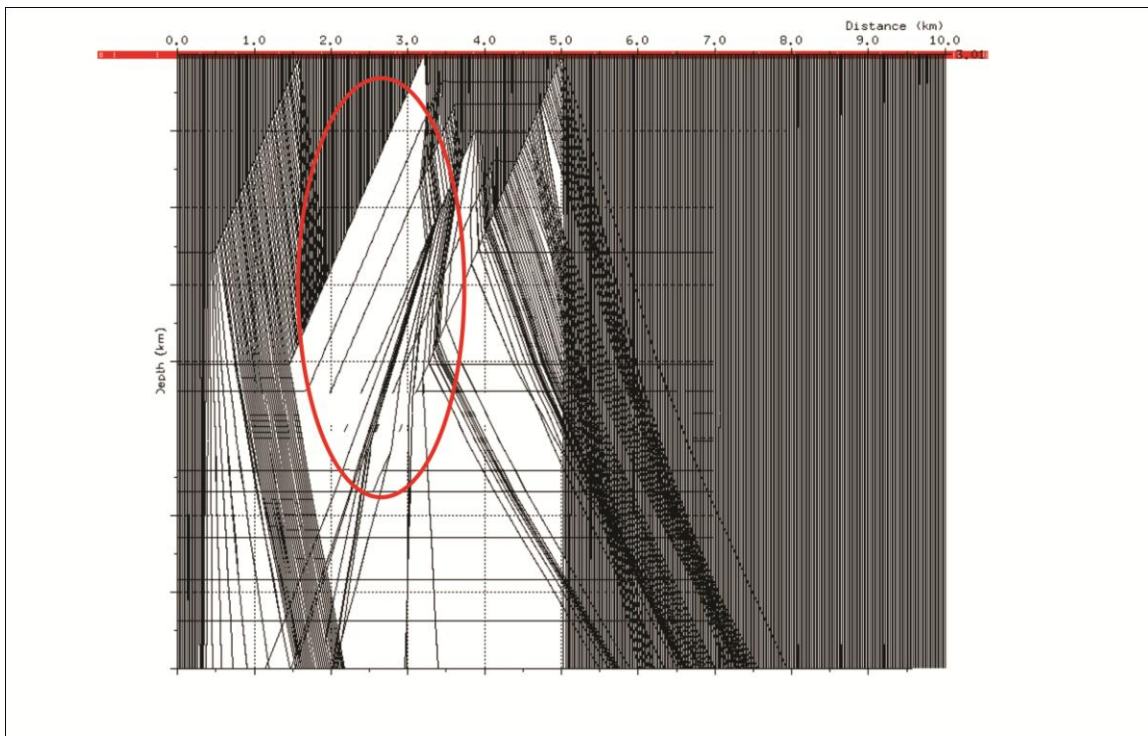


Figura 17: Trazado de rayos para un pliegue por flexión de falla. El ángulo alto de la falla y la geometría de adquisición no permite que los rayos se refracten correctamente.

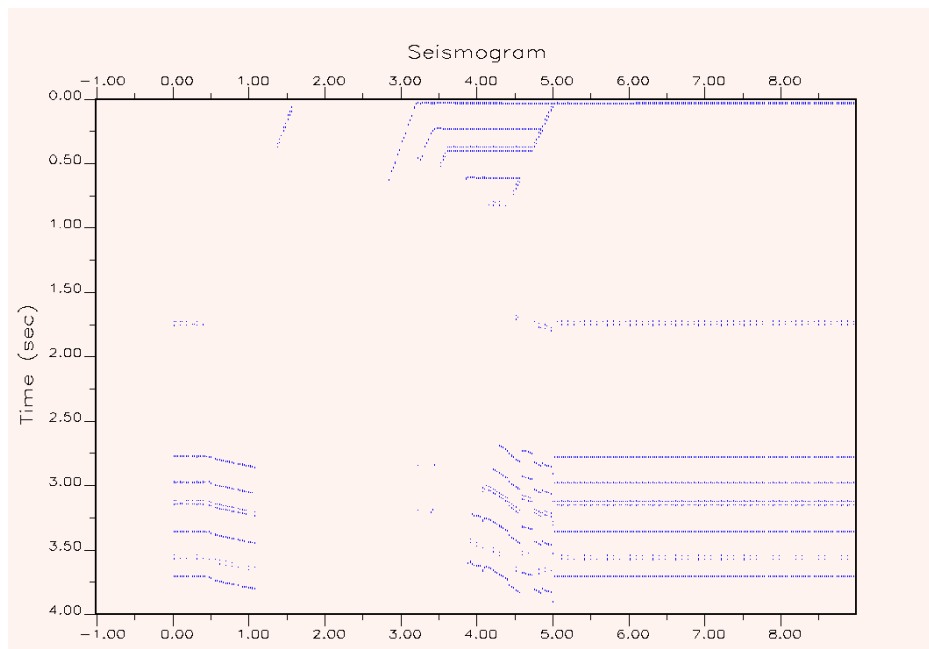


Figura 18: Sismograma sintético basado en el trazado de rayos y en el modelo de velocidades.

### 5.1.2. Modelo 2 (rampa menor a 45 °)

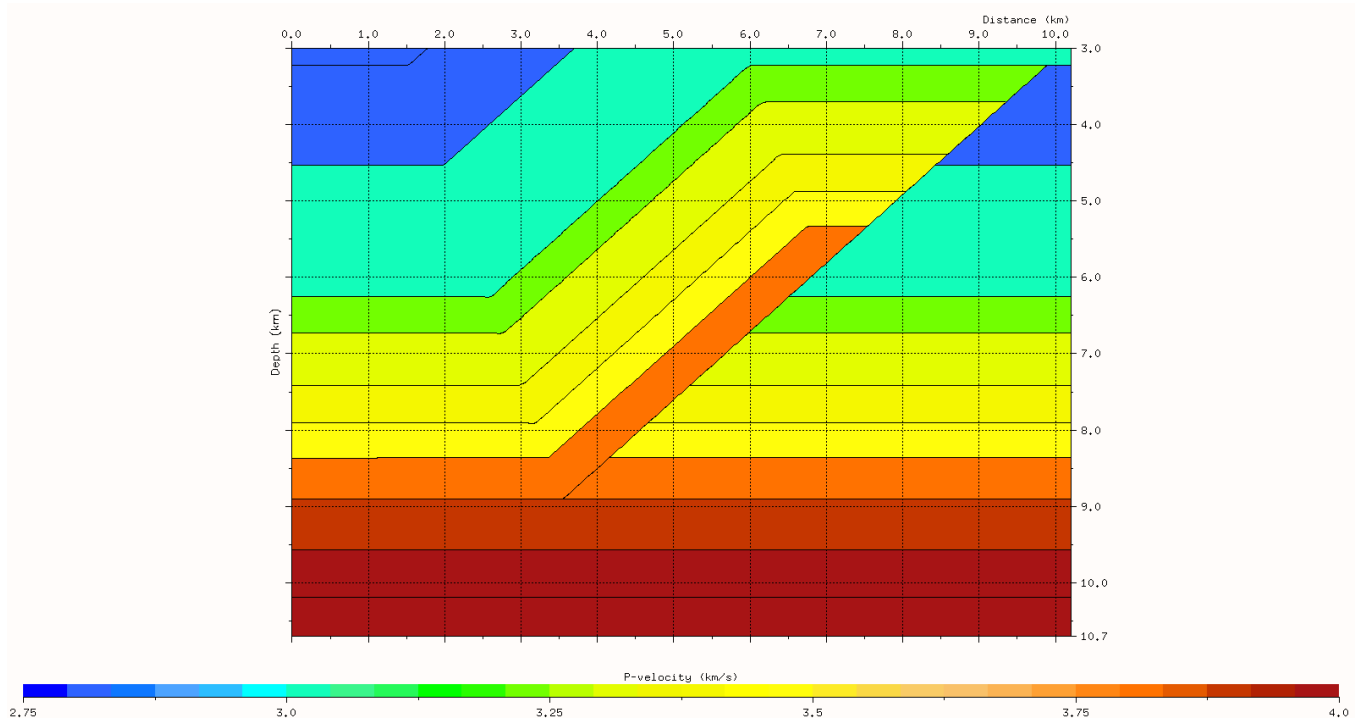
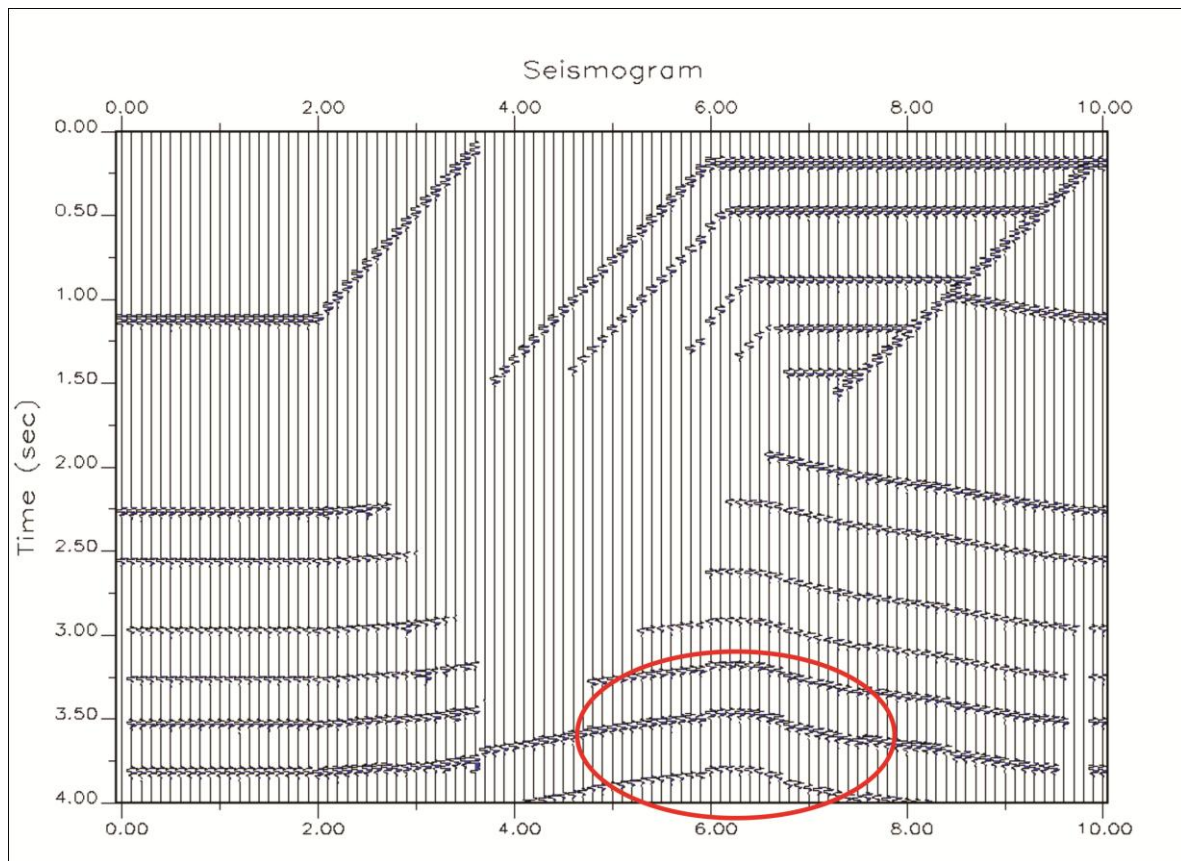


Figura 19: Modelo de velocidad en profundidad de un pliegue por flexión de falla con un ángulo de falla menor a 45°

Contrario a lo que sucede en el modelo anterior con la geometría de adquisición presente en esta rampa de menor ángulo se ilumina gran parte del plano de falla y el bloque yacente de esta que es donde generalmente se encuentran los pitfalls. En el sismograma (Figura 20) observamos un falso anticlinal que se forma justo debajo de la falla, teniendo en cuenta que en el modelo en profundidad este sector se comporta como plano el anticlinal en el bloque yacente es un pliegue falso pull-up.



*Figura 20: sismograma sintético de un pliegue por flexión de falla. En rojo se encierra un pliegue falso causado por los cambios laterales de velocidad*

## **5.2. PLIEGUE POR PROPAGACIÓN DE FALLA (FAULT-PROPAGATION-FOLD)**

En este caso el bloque yacente se ilumina muy bien, pero gracias a que el flanco delantero del anticlinal presente en el bloque colgante tiene un buzamiento alto no permite que el trazado de rayos ilumine bien este sector (Figura 23). Analizando el bloque yacente en tiempo observamos que no hay mayor diferencia con la geometría en profundidad y un intérprete no tendría problemas al observar una línea de este tipo, por el contrario en el bloque colgante en la zona de falla la falta de información sería un problema para determinar el plano de falla.

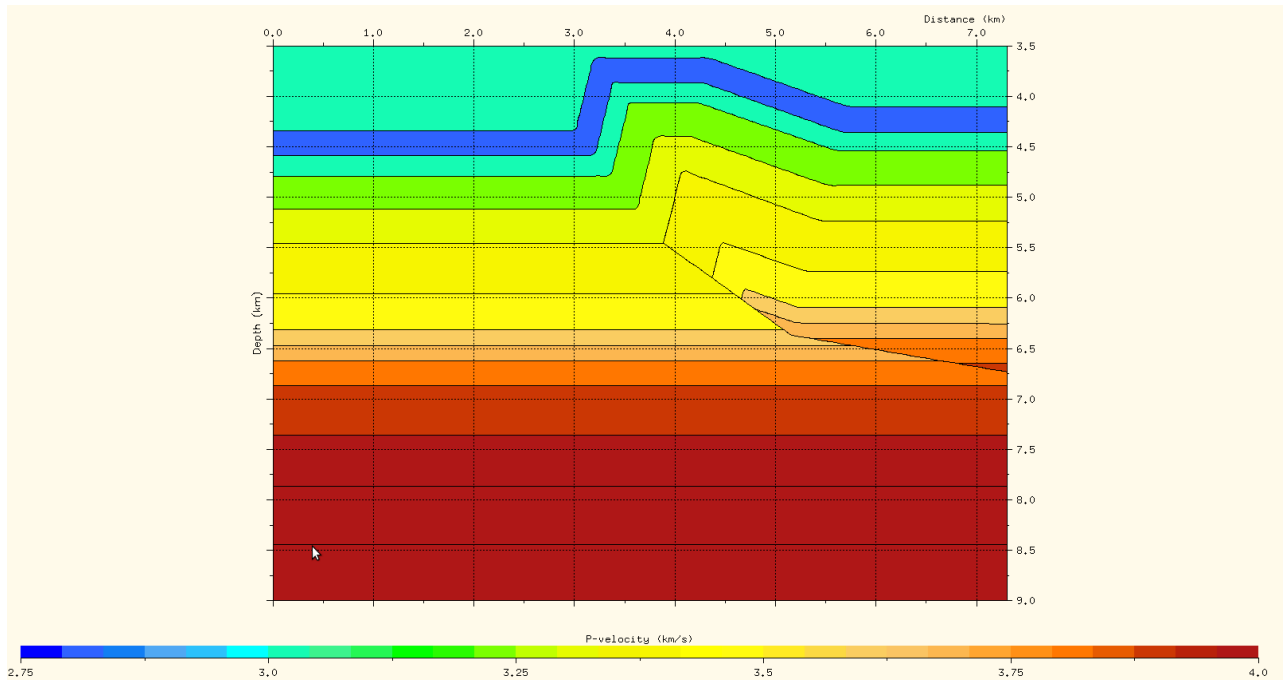


Figura 21: Modelo de velocidad P en profundidad de un pliegue por propagación de falla.

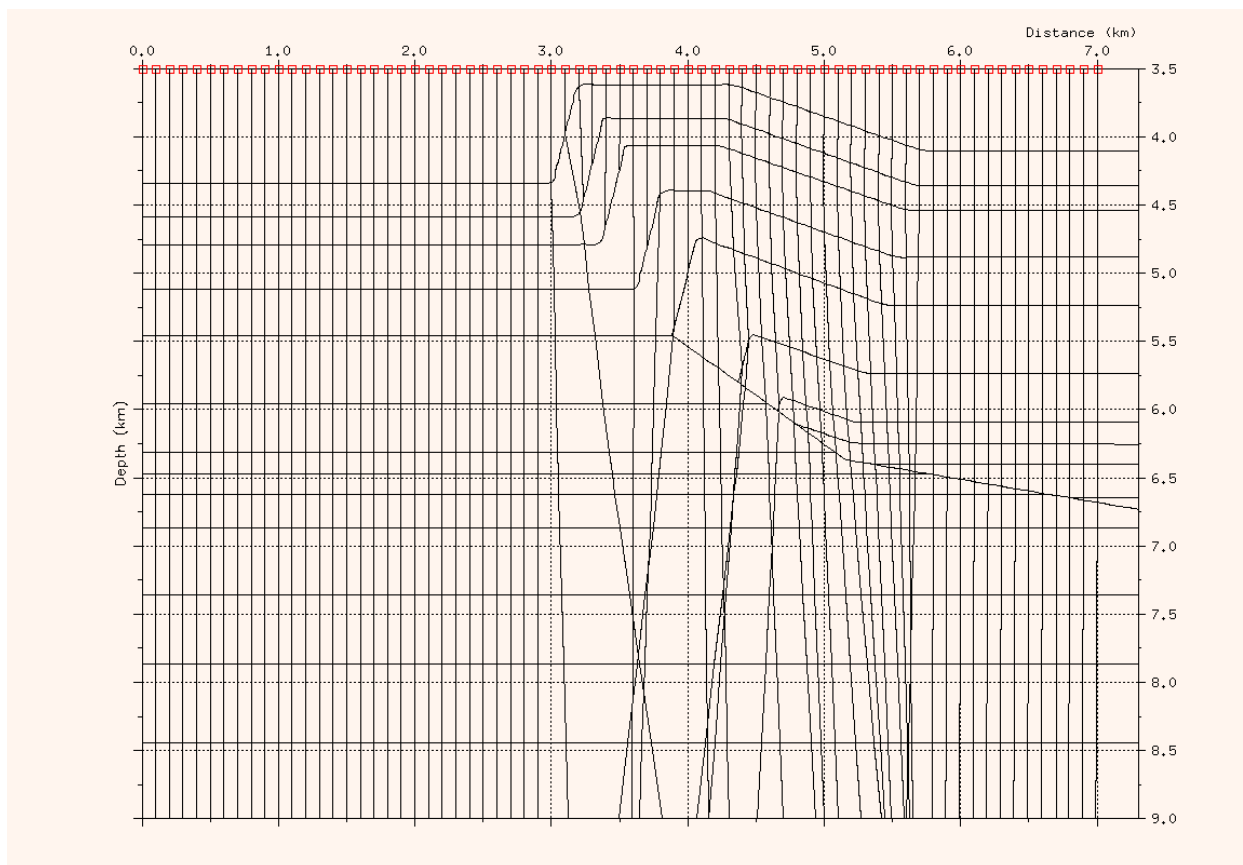


Figura 22: Trazado de rayos para el modelo sintético de un pliegue por propagación de falla.

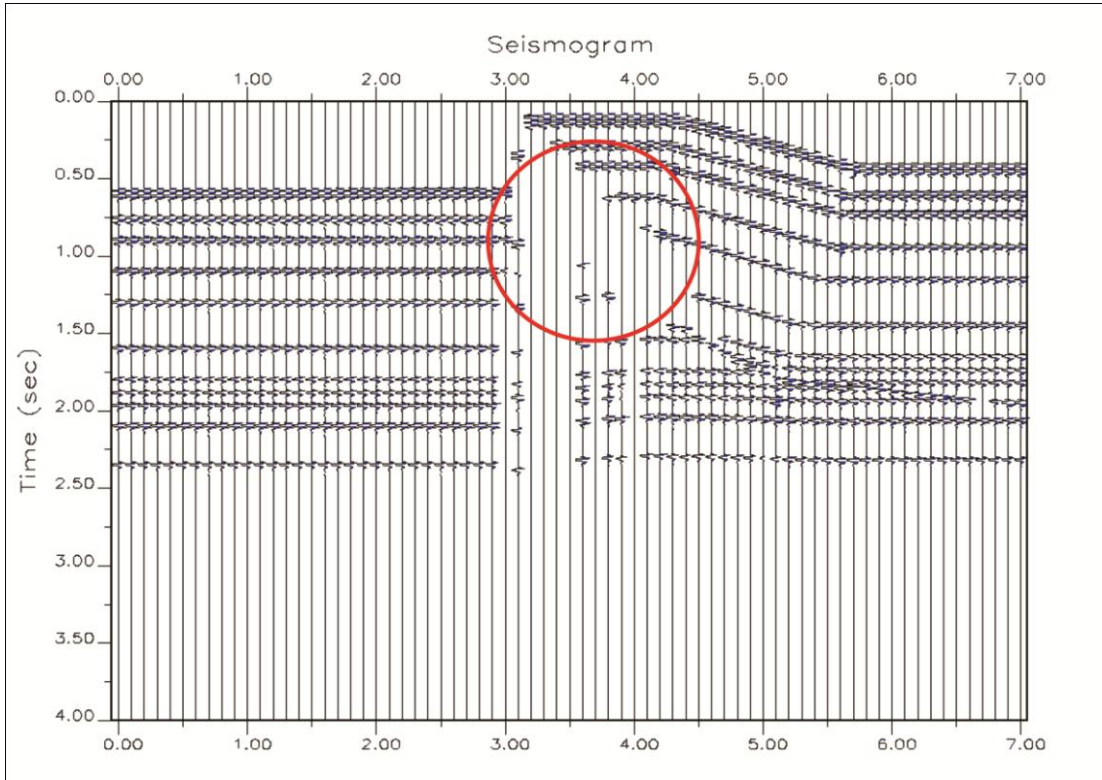


Figura 23: sismograma sintético basado en el trazado de rayos, se evidencia la falta de información en cercanías el plano de falla

### 5.3. PLIEGUE POR FLEXIÓN DE FALLA CON MÚLTIPLES RAMPAS(MULTI-BEND” FAULT-BEND FOLDS)

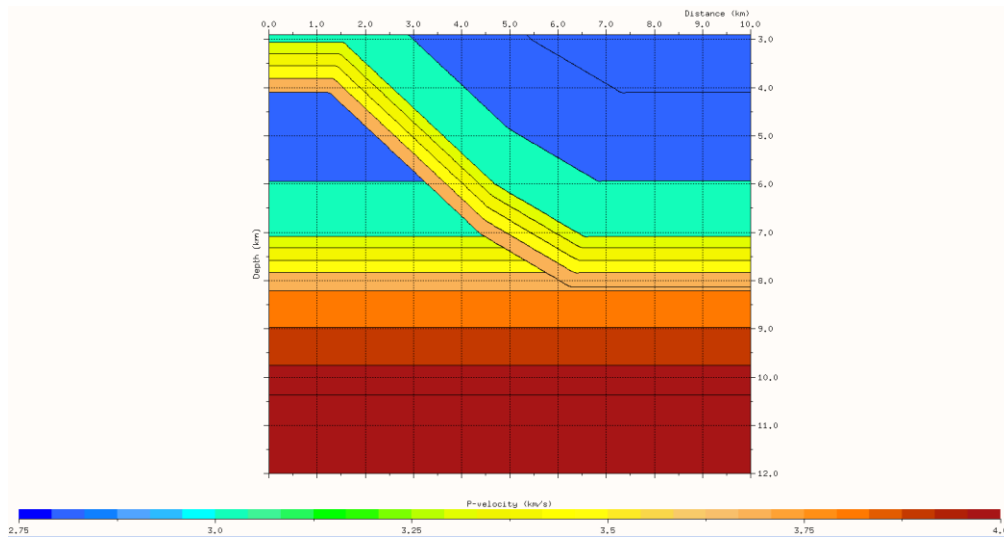
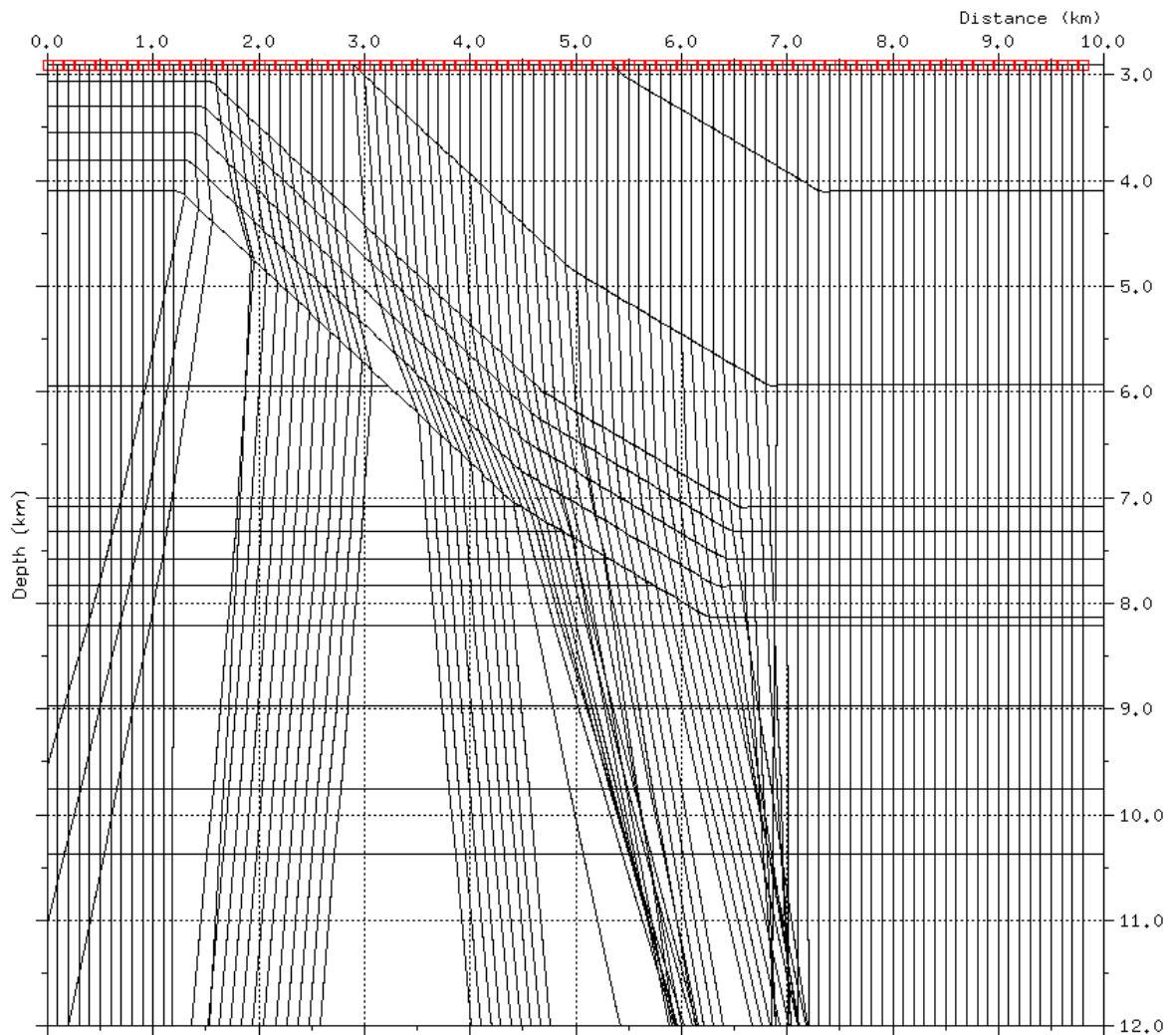


Figura 24: Modelo de velocidades P de un pliegue por flexión de falla con múltiples rampas

En este modelo se representa un pliegue por flexión de falla con dos rampas, en el sismograma (Figura 26) se observa que el plano de falla no está bien iluminado lo que no permite observar con claridad las dos rampas, en bloque yacente se observa un anticlinal que al igual que en el modelo por flexión de falla con una sola rampa es un pitfall, adicional a este pull-up hay un sector que se podría interpretar como una falla.



*Figura 25: Trazado de propuesta para el modelo en profundidad de un pliegue por flexión de falla con múltiples rampas*

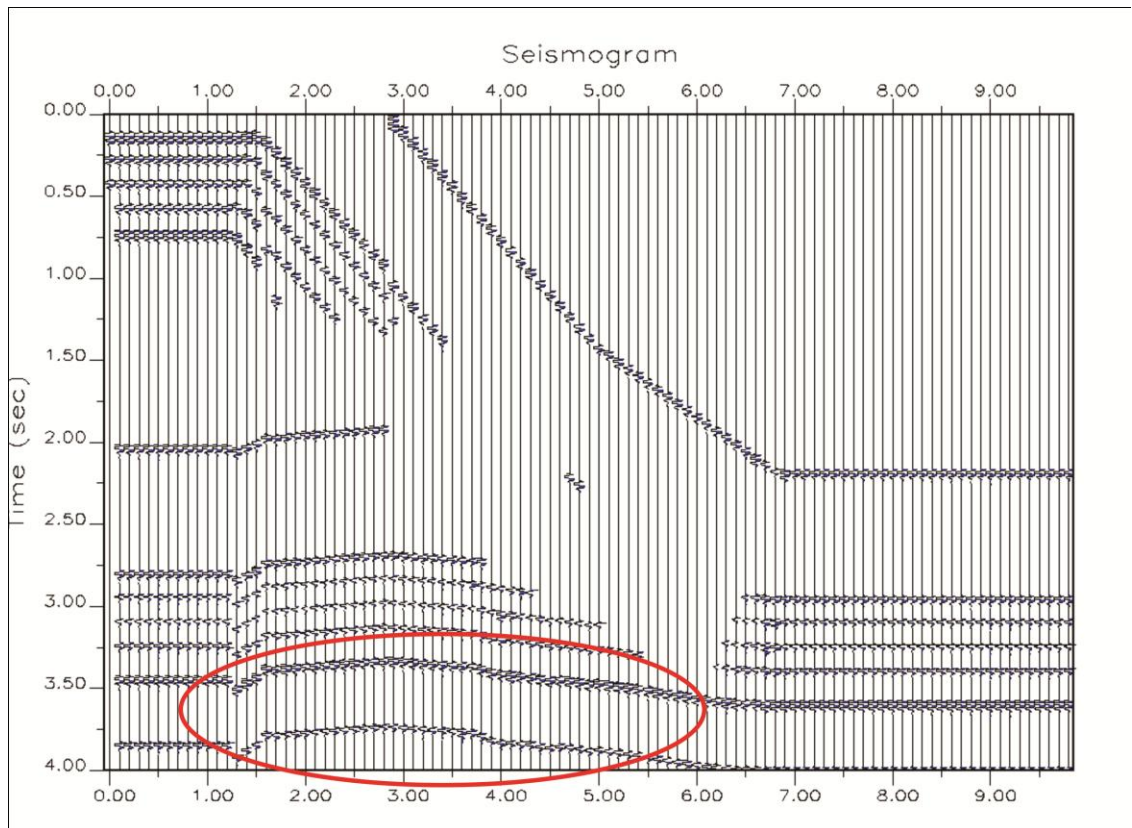


Figura 26: Sismograma sintético de un pliegue por flexión de falla con múltiples rampas. Se resalta la existencia de un anticlinal falso

#### 5.4. IMBRICACIÓN HACIA DELANTE EN PLIEGUES POR FLEXIÓN DE FALLA

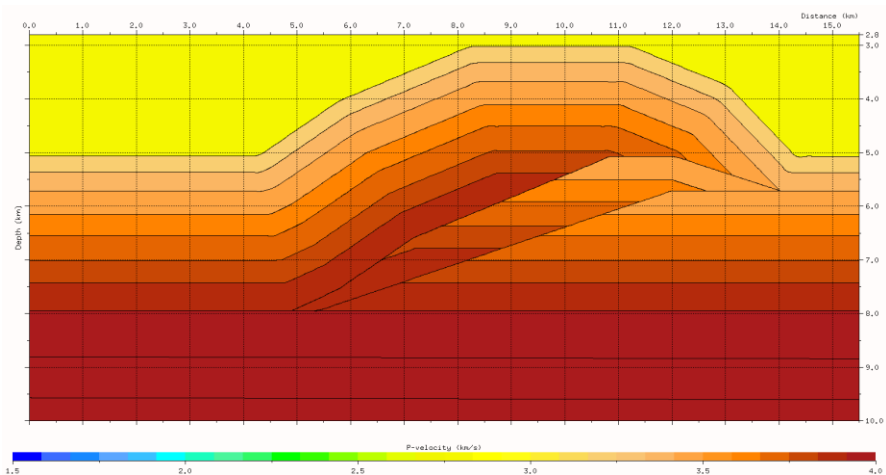


Figura 27: Modelo de velocidades P en una imbricación delante de un pliegue por flexión de falla

En este caso se cuenta con dos falla las cuales generan un pliegue en el bloque colgante de cada una, en la Figura 29 observamos que en tiempo esta geometría produce un pull-up y un pull-down en el bloque yacente de la falla mas nueva.

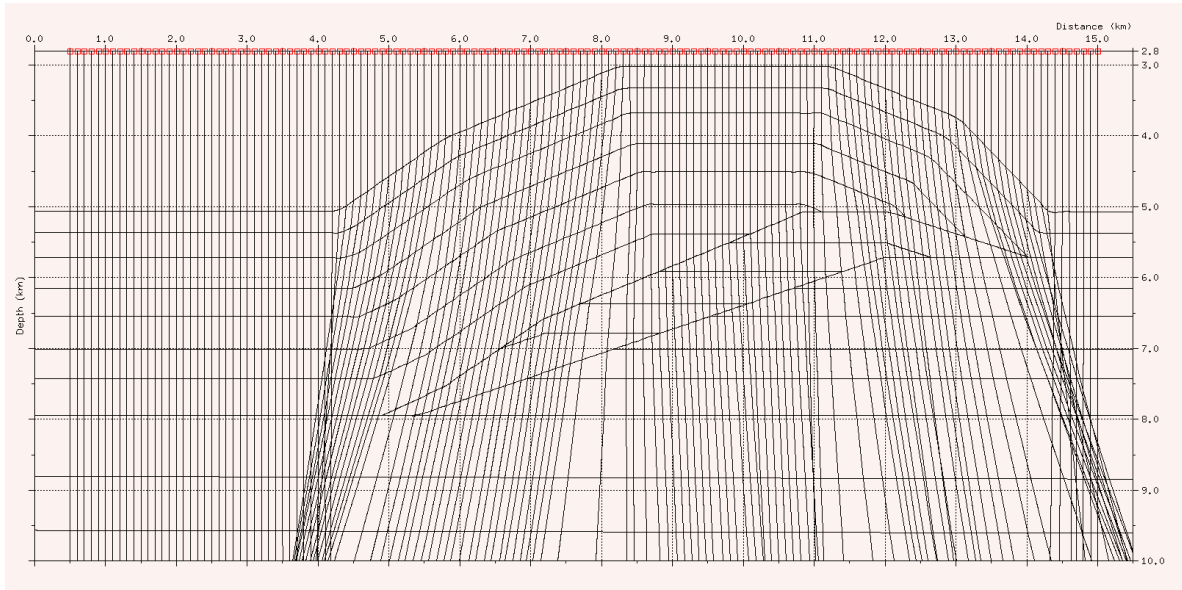


Figura 28: Trazado de rayos propuesto para el modelo sintético de imbricación adelante

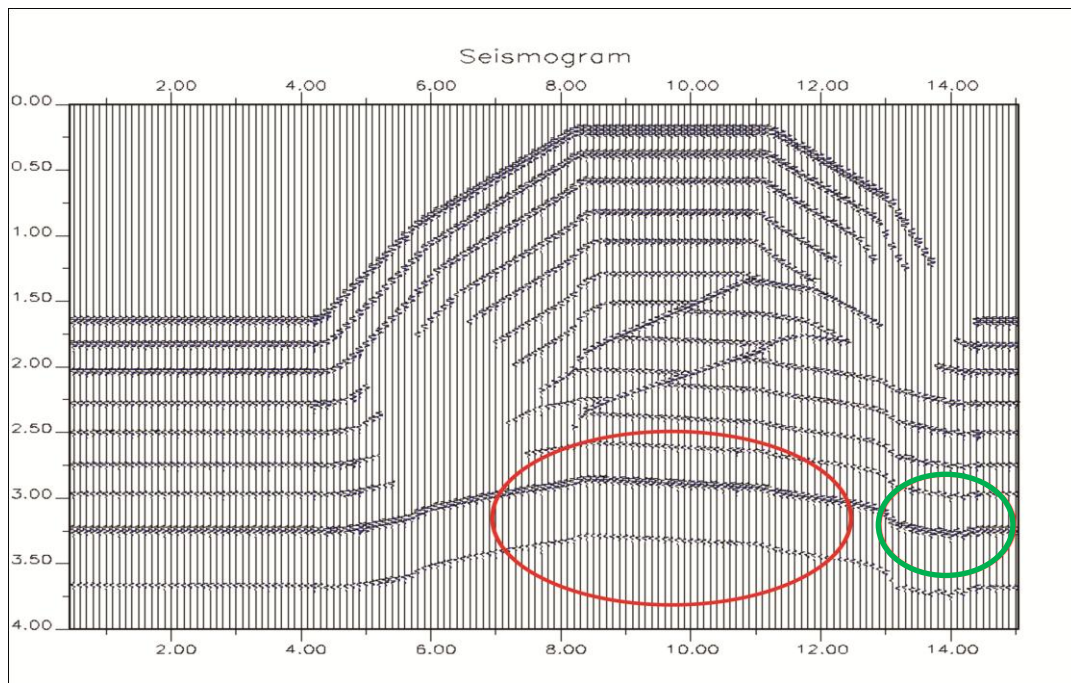


Figura 29: sismograma sintético de una imbricación delante en un pliegue por flexión de falla. Se evidencia la presencia de dos pliegues falsos.

## 5.5. IMBRICACIÓN HACIA ATRÁS EN PLIGUES POR FLEXIÓN DE FALLA.

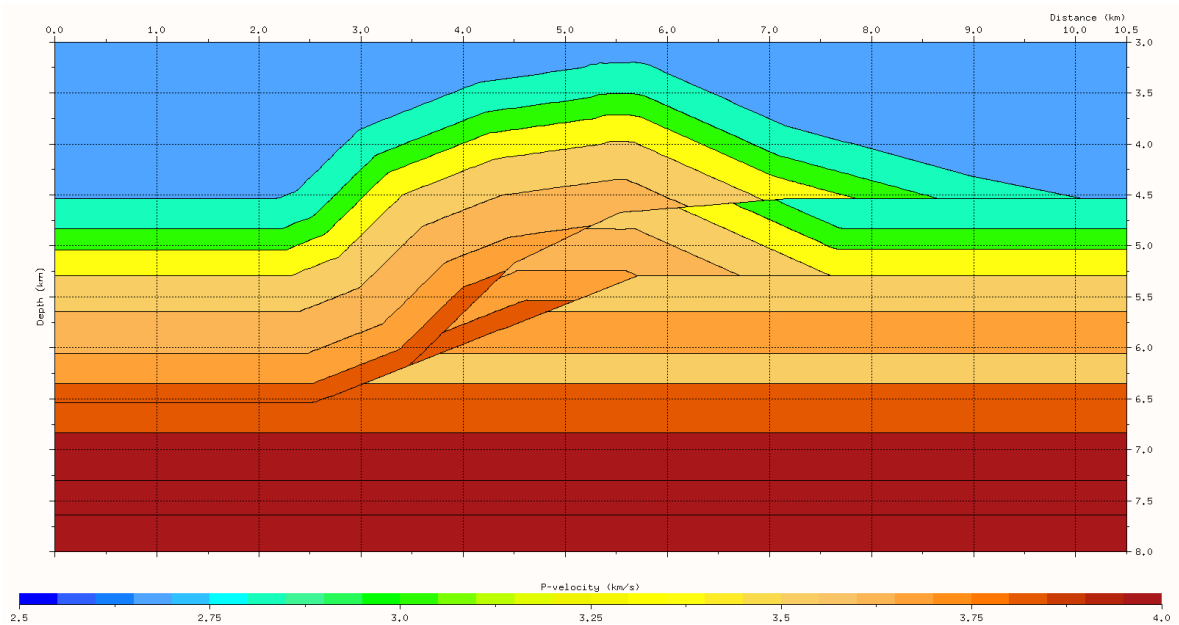


Figura 30: modelo en profundidad de una imbricación atrás con sus respectivas velocidades  $P$

En este caso la sísmica de reflexión tiene una buena respuesta en cuanto a la iluminación, en el bloque yacente de la falla más antigua se presenta un anticlinal el cual es falso (pull-up) ya que el modelo en profundidad diseñado no lo contiene (Figura 32).

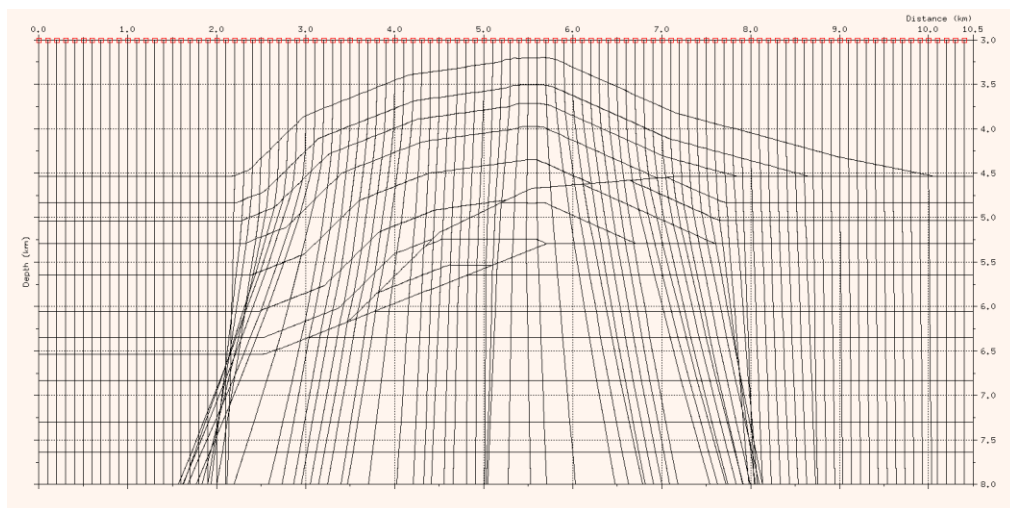
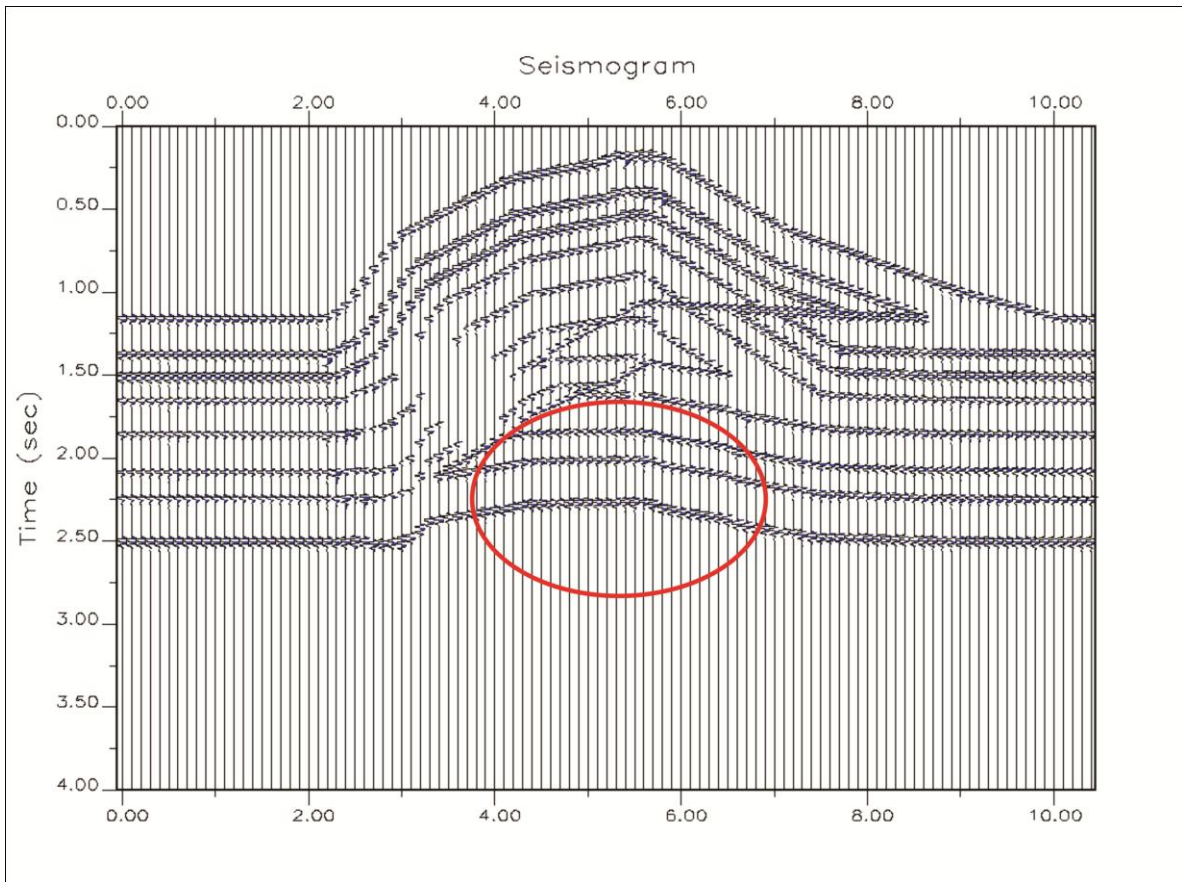


Figura 31: Trazado de rayos en un modelo de imbricación atrás



*Figura 32: Sismograma sintético, se observa un falso anticlinal en una geometría de imbricación atrás en pliegues por flexión de falla*

## **5.6. CIZALLA EN PLIEGUES POR FLEXIÓN DE FALLA (SHEAR FAULT-BEND FOLDS)**

Como se nombro anteriormente la cizalla se puede presentar en dos casas, cizalla pura y cizalla simple. Representamos los dos casos en modelos sintéticos para observar si este cambio en el ángulo afectaba en algo la sísmica.

### **5.6.1. Cizalla simple**

Gracias a que en este mecanismo de deformación los estratos tienes un ángulo menor a la rampa de falla, cuando los rayos inciden en ellos no tienen ningún problema dando una resolución muy

buena en la sismica (Figura 34). En cuanto a los pitfalls en el bloque yacente de la falla inversa se crea un anticlinal falso (pull-up) acompañado de un pequeño sinclinal falso (Figura 35).

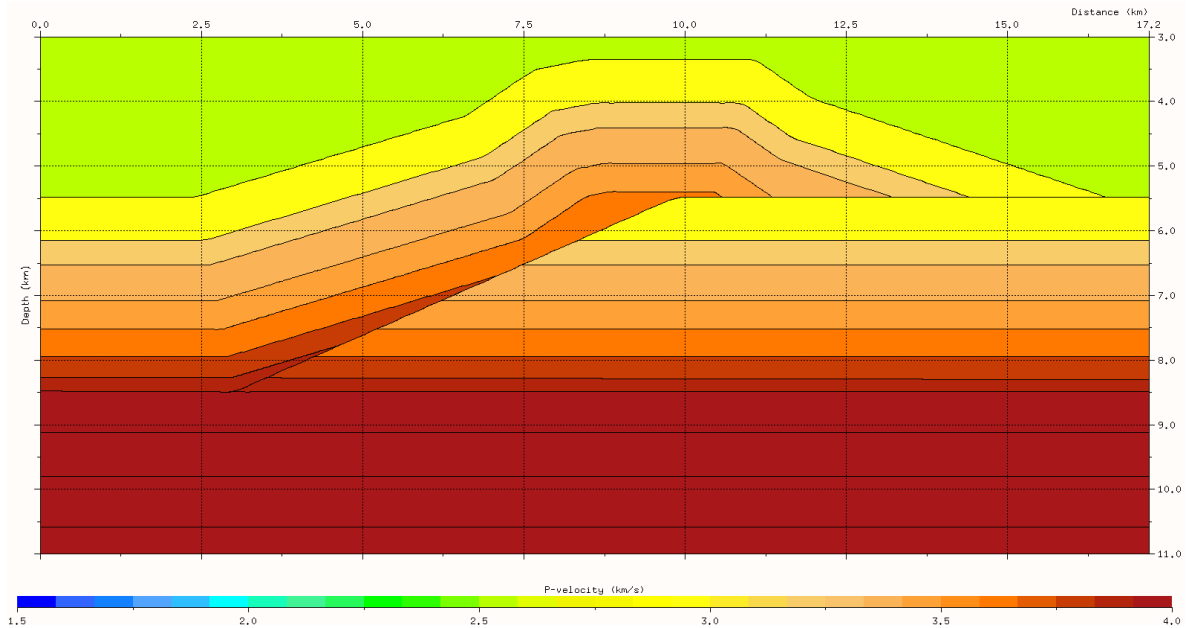


Figura 33: Modelo en profundidad y velocidades P de un pliegue generado por flexión de falla con cizalla simple.

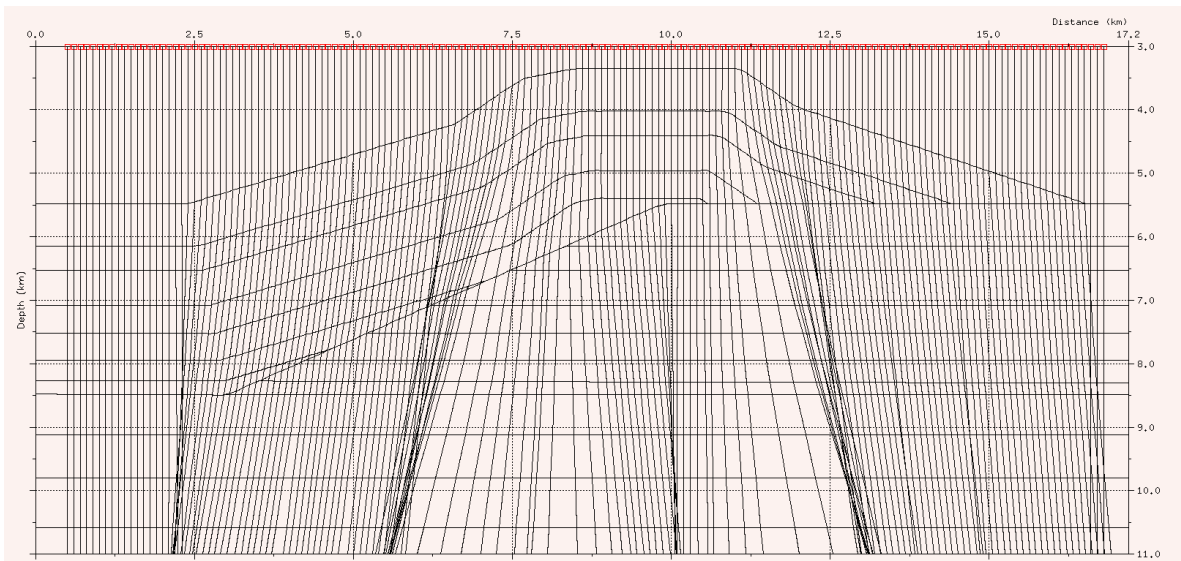


Figura 34: Trazado de rayos para el modelo de cizalla simple en un pliegue por flexión de falla

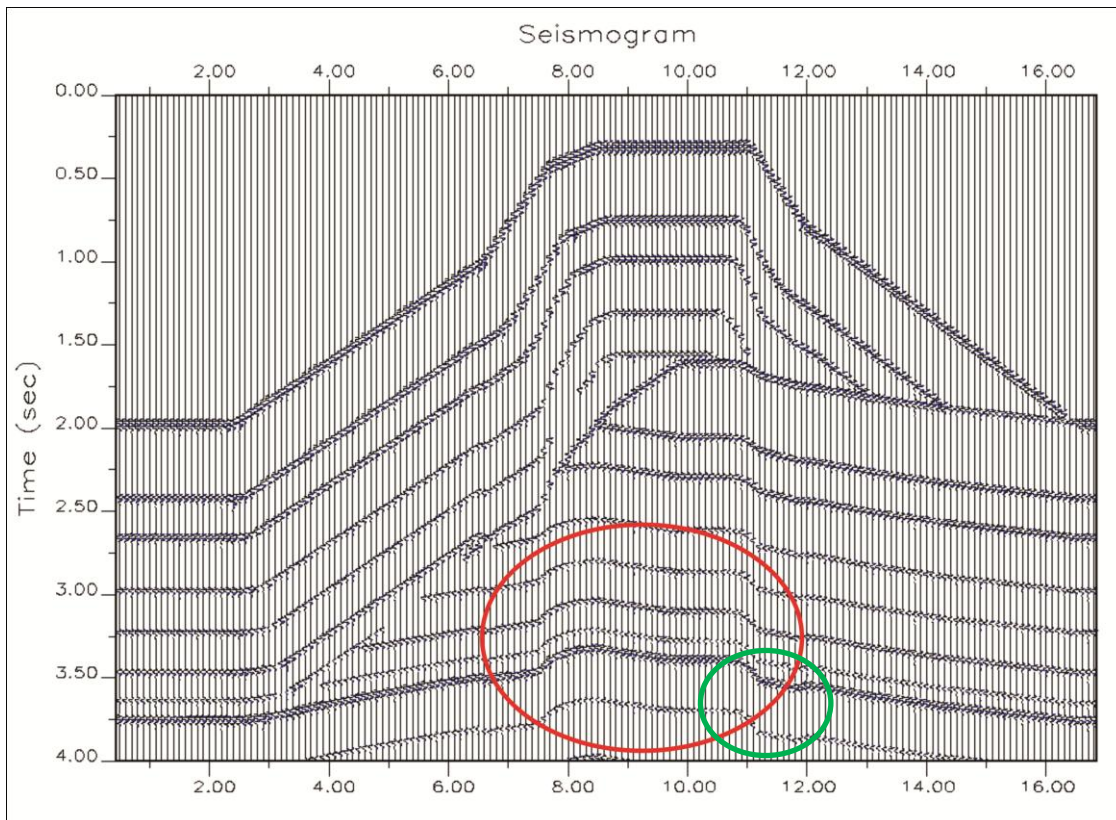


Figura 35: Sismograma sintético basado en el trazado de rayos. Presencia de pliegues falsos producto del cambio lateral de velocidad

### 5.6.2. Cizalla pura

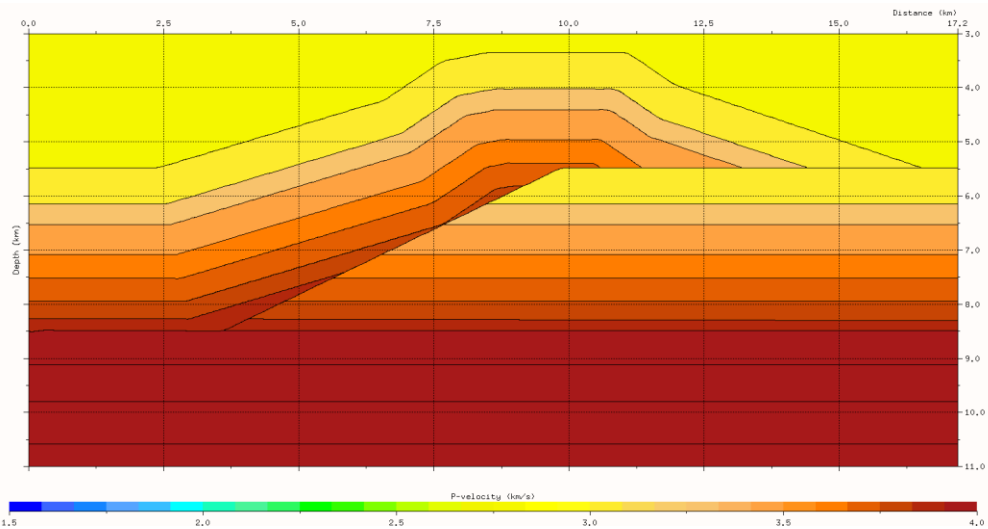


Figura 36: Modelo de velocidades en profundidad para una cizalla pura en un pliegue por flexión de falla

No existe gran diferencia con el mecanismo anterior, al igual que en la cizalla simple se obtiene una imagen muy buena (Figura 38), y los mismos pitfalls en el bloque yacente de a falla (pull-up, pull-down).

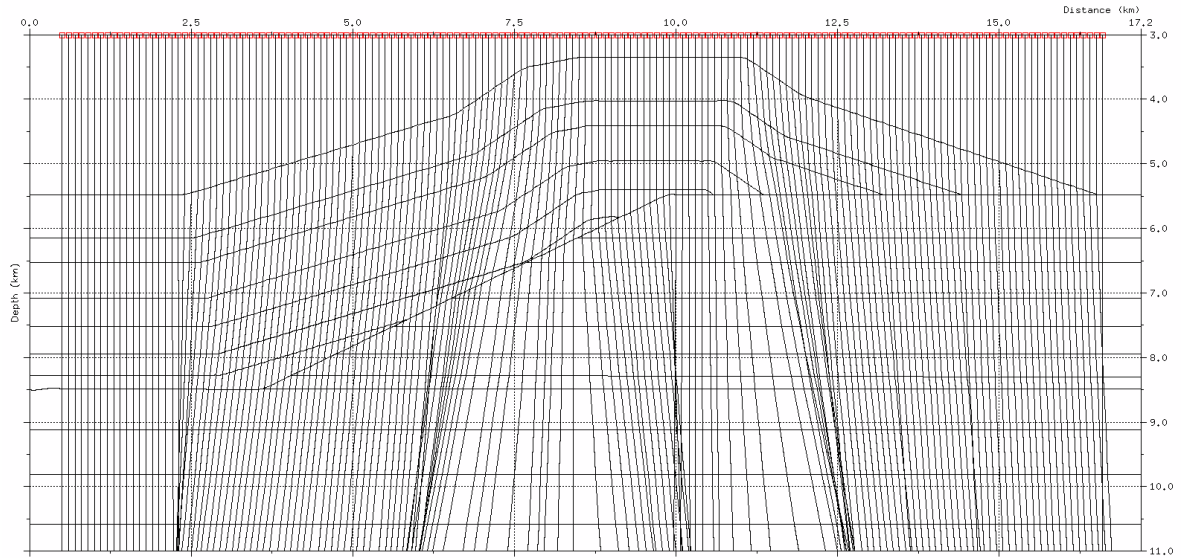


Figura 37: Trazado de rayos generado en un pliegue por flexión de falla con cizalla pura

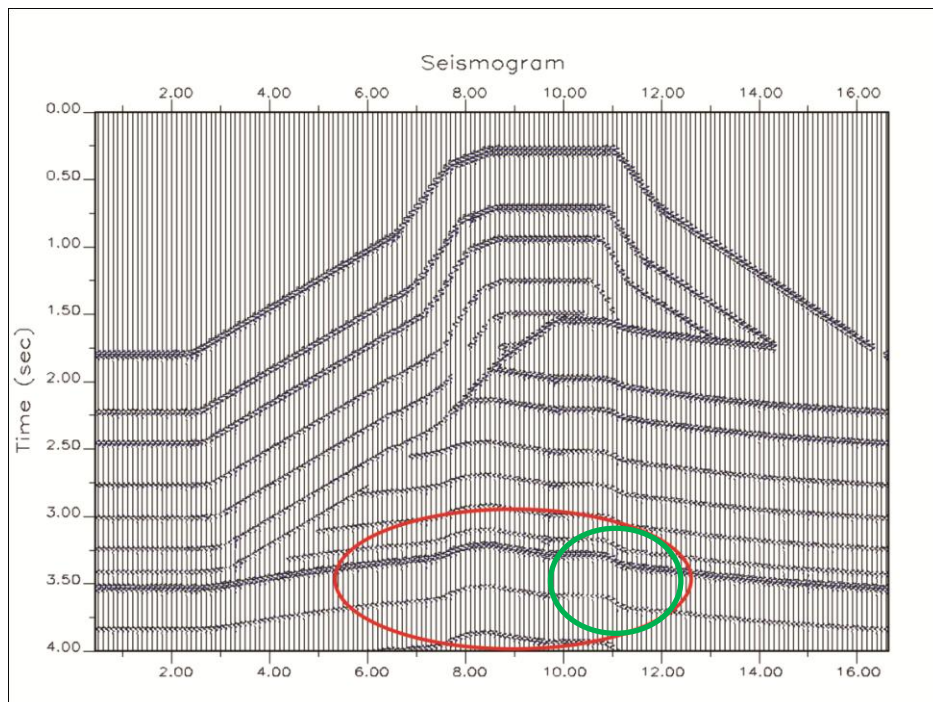


Figura 38: Sismograma sintético generado a partir del trazado de rayos. Presencia de pliegues falsos.

Analizando los modelos sintéticos en profundidad y sus respectivas geometrías en tiempo, generalmente se siempre bajo la falla se crea un pull-up (tabla 1). Estos anticlinales falsos son formados gracias al los cambios laterales de velocidad que están presentes en los planos de falla, que pone en contacto rocas antiguas con rocas de menor edad y velocidad.

Geometría	Pull-up	Pull-down
Pliegues por flexión de falla	x	
Pliegues por propagación de falla	x	
Pliegues por flexión de falla con múltiples rampas	x	
Cizalla pura en Pliegues por flexión de falla	x	x
Cizalla simple en Pliegues por flexión de falla	x	x
Imbricación adelante en Pliegues por flexión de falla	x	x
Imbricación atrás en Pliegues por flexión de falla	x	

Tabla 1: *Pitfalls* generados dependiendo de cada una de las geometrías propuestas para realizar los modelos sintéticos

## 6. INTERPRETACIÓN DE DATOS REALES

Para realizar la interpretación en tiempo se utilizaron la línea ME-1994-1350 y datos de los pozos cercanos Cumaral Ax1 y Coporo1, los cuales fueron convertidos a tiempo con ayuda de los respectivos checkshots de cada uno. Teniendo la línea y los pozos cargados en el software (Figura 39), se amarran los topes de las formación teniendo en cuenta los espesores reales medidos en campo (Mora y Parra, 2008), los cuales también fueron convertidos a intervalos de tiempo con ayuda de las velocidades de cada formación descritas en los pozos.

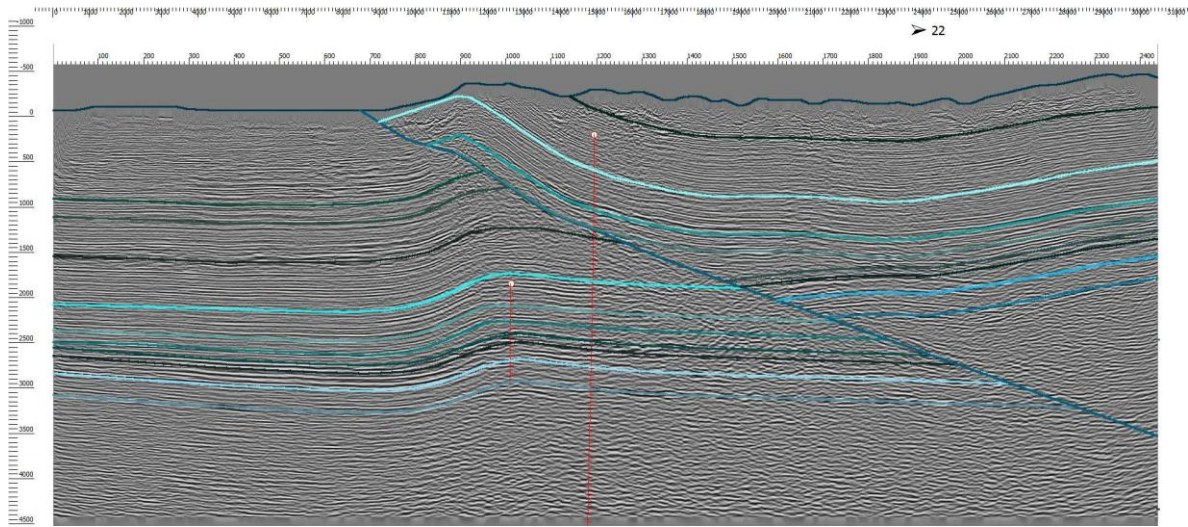


Figura 39: Interpretación en la línea migrada en tiempo ME-1994-1350 con los respectivos pozos

Ya que la línea ME-1994-1350 (Figura 40) es una línea de rumbo la interpretación se pudo apoyar por las líneas de Buzamiento que pasan por esta estructura (Figura 41). Se amarraron los topes de las formaciones interpretadas en las líneas ME-1994-1600, ME-1992-1440, en el trabajo de Silva 2010.

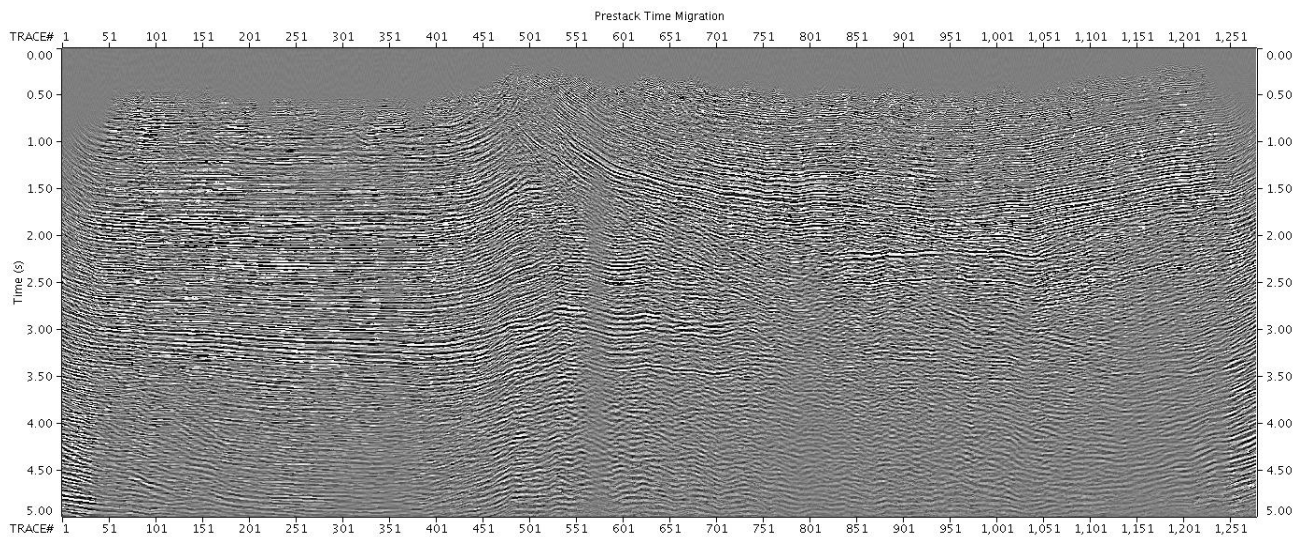


Figura 40: línea sísmica migrada en tiempo ME-1994-1350.

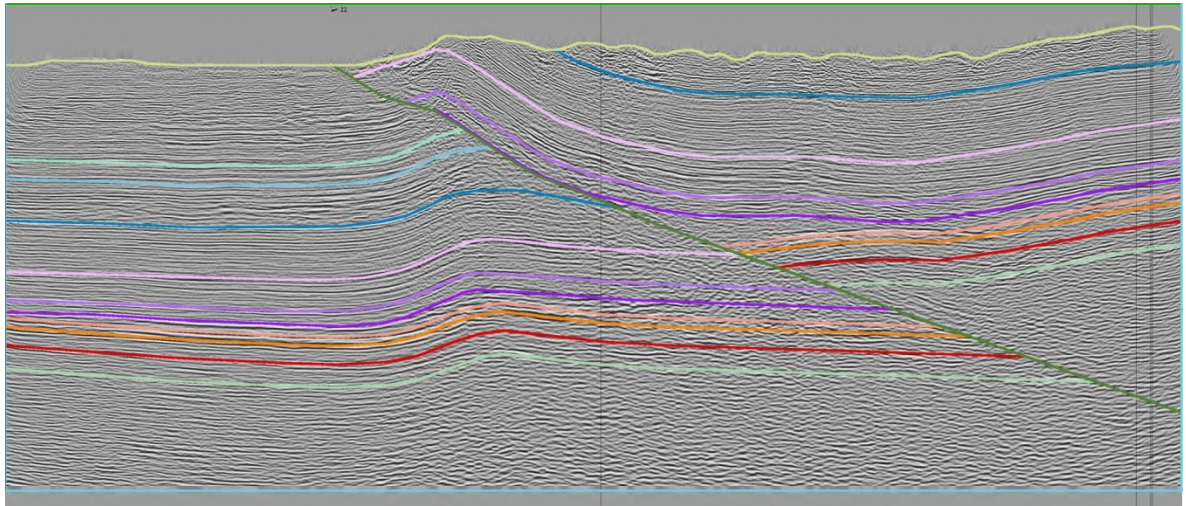


Figura 41: Interpretación de la línea ME-1994-1350 apoyada de las líneas transversales ME-1994-1600, ME-1992-1440

## 7. CONVERSIÓN A PROFUNDIDAD

### 7.1. MODELO DE VELOCIDAD

Teniendo la interpretación en la línea migrada en tiempo en el software 2DMove se exportan los topes de las formaciones, la topografía y la falla en archivos txt. En el software Norsar 2D se importan estos archivos para crear la geometría del modelo y se procede a crear el modelo de velocidad. Para escoger la velocidad a utilizar se tiene en cuenta la información disponible, gracias a que esta línea cuenta con pozos cercanos se pueden tomar directamente de los checkshots (tabla 2). En el caso que no se contara con información de pozo las velocidades tendrían que ser velocidades de apilado o de intervalo tomadas de la sísmica, estas velocidades son velocidades promedio que difieren un poco de las velocidades de intervalo o velocidades verdaderas de la roca.

Ma	Periodo	Época	Edad	Formación	Espesores (m)		Velocidad	
					Parra, 2008	Servigecol		
2 - 5	Neógeno	Plioceno	Zancleano	Tgu Guayabo	Sup.	1200	3200	
5 - 10			Tortoniano		Inf.	360	1306	3200
10 - 16		Mioceno	Langhiano	Tle	Leon	480	300 - 720	3400
16 - 19				Burdigaliano		C1	1090	450
					C2	210		3700
19 - 23			Tear Carbonera		C3	235		
					C4	80	330	
					C5	320?	620	
					C6	225?	500	3800
				Aquitaniense		C7	725?	
23 - 39	Paleógeno	Oligoceno			C8	245	3900	
39 - 45		Eoceno	Bartoniano					
			Lutetiano	Tmi	Mirador	240	156 - 190	4000
45 - 56		Paleoceno	Thanetiano	Tlcu	Cuervos	475	164 - 320	4200
56 - 60	Selandiano		Tba	Barco	235	160 - 230	4300	
60 - 83	Superior		Campaniano	Kg	Guadalupe	525	400 - 530	4400
		Cenomaniano	Kch	Chipaque		420 - 500	4500	
	Inferior	Aptiano	Ku	Une		490 - 560	4600	
		Barremiano	Kfo	Fomeque		503 - 610	5000	
		Hauteriviano	Kaj	Juntas		808 - 975	5200	
		Valanginiano	Klm	Macanal		>792	5400	
		Berriasiano	Kgu	Guavio		290?	5600	
		Jurásico?		Kbt	Bata		900	5600
		Devónico		Ds	Farallones		>792	5700
		Cámbrico		CAO	Quetame		>1097	5800

Tabla 2: Velocidades y espesores para el área de medina (Silva 2010)

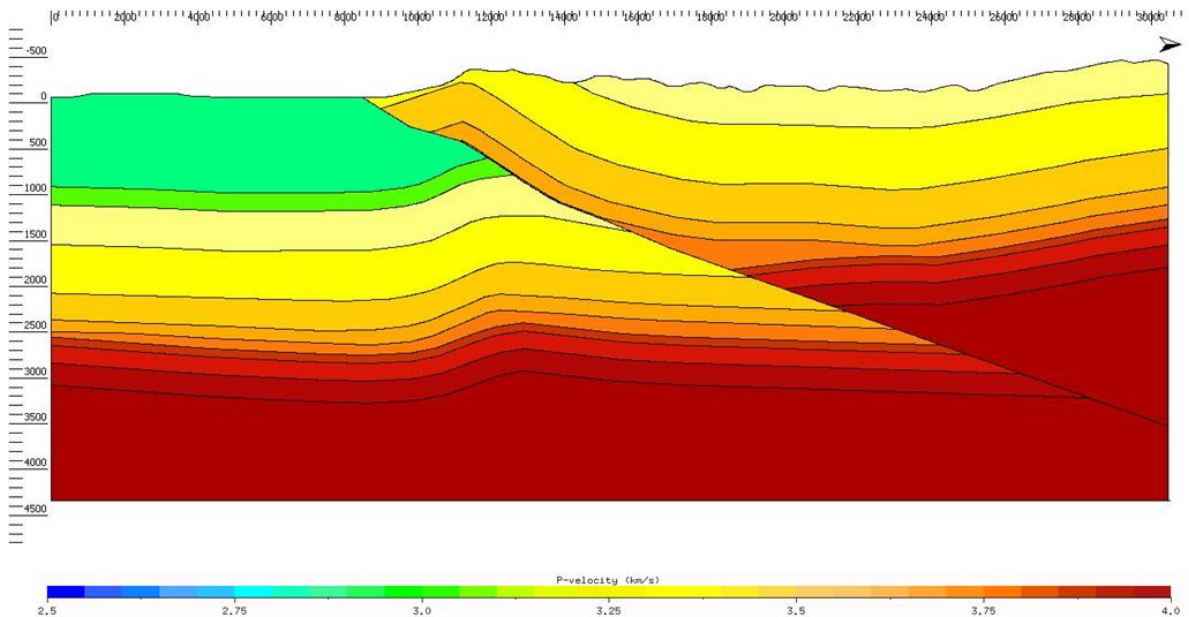


Figura 42: Modelo de velocidades P en tiempo para la interpretación de la línea sísmica Me-1994-1350

## 7.2. RAYO IMAGEN (IMAGE RAY)

Al igual que en los modelos sintéticos después de tener el modelo de velocidad en tiempo se realiza un trazado de rayos desde la superficie teniendo en cuenta el datum (200 m) y la velocidad de corrección (2800

m/s) tomadas de los archivos .tiif de la línea sísmica (Figura 43). Al generar este trazado de rayos hay que tener en cuenta que los rayos no pueden cruzarse para obtener una conversión lo más cercana a la realidad posible. Si los rayos se cruzaran cambiarían la posición de cada punto en profundidad dando como resultado una geometría que no se acepta dentro de los parámetros geológicos.

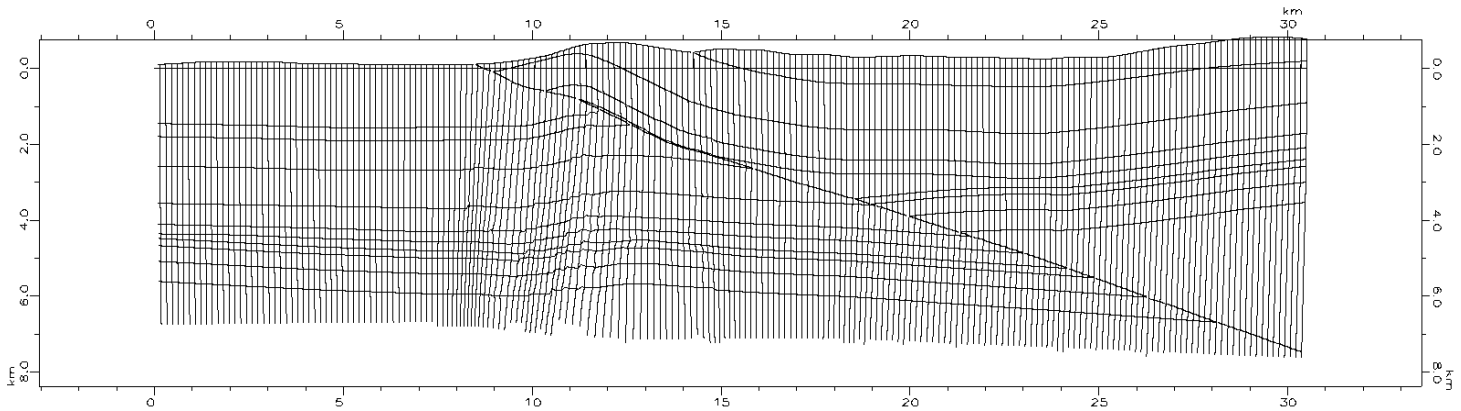


Figura 43: Trazado de rayos generado con rayos imagen para la conversión de la línea ME-1994-1350

### 7.3. ESTIRAMIENTO VERTICAL (VERTICAL STRECHTED)

Al igual que la conversión por rayo imagen se utiliza el modelos de velocidad creado en tiempo a partir de las velocidades de intervalo de las formaciones. Se realiza un trazado de rayos verticales desde la superficie teniendo en cuenta los parámetros de la velocidad de corrección y el datum antes mencionados (Figura 44). En este método no hay que tener en cuenta si se cruzan o no los rayos ya que al ser verticales tendrán la misma trayectoria durante todo el tiempo de viaje.

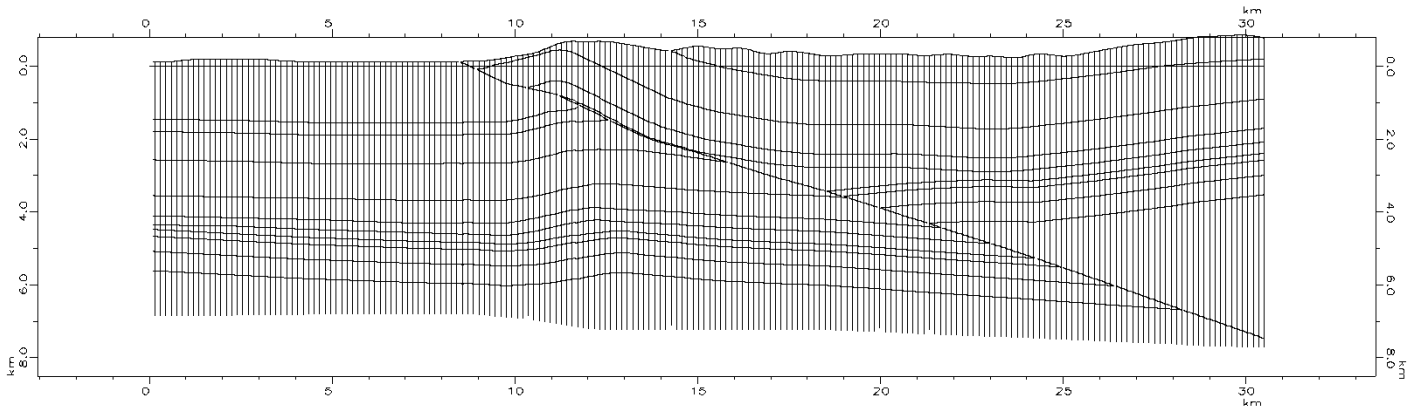


Figura 44: Trazado de rayos generado con rayos verticales para la conversión de la línea ME-1994-1350

## 8. ANÁLISIS DATOS REALES

La línea sísmica 2D a la que se le realizó una conversión a profundidad por los métodos de rayo imagen y estiramiento vertical está localizada en cercanías al municipio de Medina en el departamento de Cundinamarca cuenca del piedemonte llanero. Esta cuenca está caracterizada por presentar estructuras complejas como sistemas de cabalgamientos producidos por inversión tectónica (Mora, et al., 2008) lo cual produce una serie de plegamientos asociados al desplazamiento sobre estas fallas inversas. Se escogió la línea ME-1994-1350 ya que estructuralmente favorece la generación de Pitfalls y cuenta con una migración preapilada en tiempo (PSTM) lo que es fundamental para realizar la técnica de rayo imagen. Esta línea también cuenta con una migración preapilado en profundidad (PSDM) lo que nos permitirá comparar si los resultados de las técnicas a realizar son óptimos o no ya que esta migración es uno de los métodos con mejores resultados pero tiene un costo computacional muy alto.

Como se ha mencionado la técnica de rayo imagen se comporta muy bien en zonas con estructuras complejas gracias a que la trayectoria está sujeta al vector lentitud y tiene en cuenta los cambios laterales de velocidad. Analizando los resultados vemos que el pliegue anticlinal presente en la línea migrada en tiempo se suaviza y tiende a quedar horizontal (Figura 45), lo que nos indica que hay la presencia de un pitfall bajo el plano de falla. Teniendo en cuenta la

interpretación de esta línea, el mecanismo de deformación producido por esta falla es un pliegue por flexión de falla, haciendo una revisión de los resultados con datos sintéticos en los pliegues por flexión de falla esperamos tener este tipo de pliegues falsos (pull up, pull down), lo que apoya la teoría de tener un pull-up en esta línea sísmica.

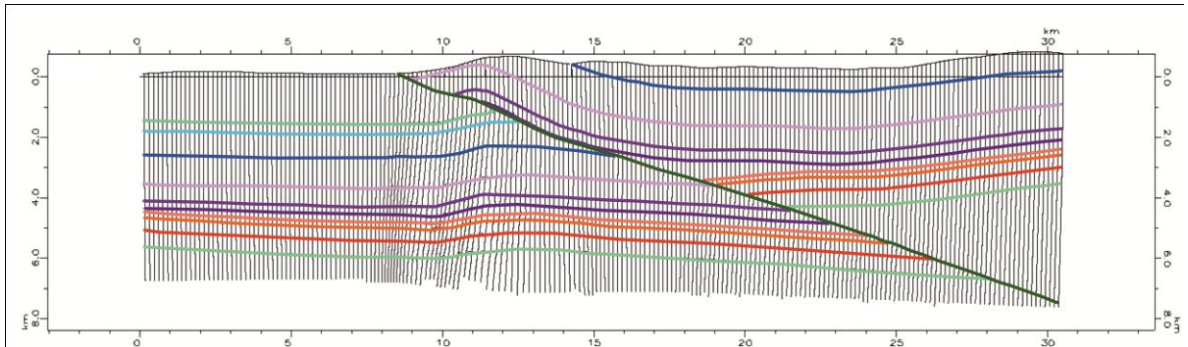


Figura 45: Resultado de la conversión a profundidad por el método de rayo imagen de la línea ME-1994-1350

Por otro lado la técnica de estiramiento vertical al basarse en rayos con trayectorias verticales en sectores con fallas inversas presenta problemas ya que al cambiar de velocidad lateralmente no modifica su trayectoria lo que afecta la geometría de las estructuras. Observando el resultado por esta técnica el pliegue falso que determinamos con el rayo imagen permanece prácticamente igual que en la línea migrada en tiempo (Figura 46). Si no se tuviera en cuenta la limitación de esta técnica en este tipo de zonas se podría determinar que este pliegue es verdadero.

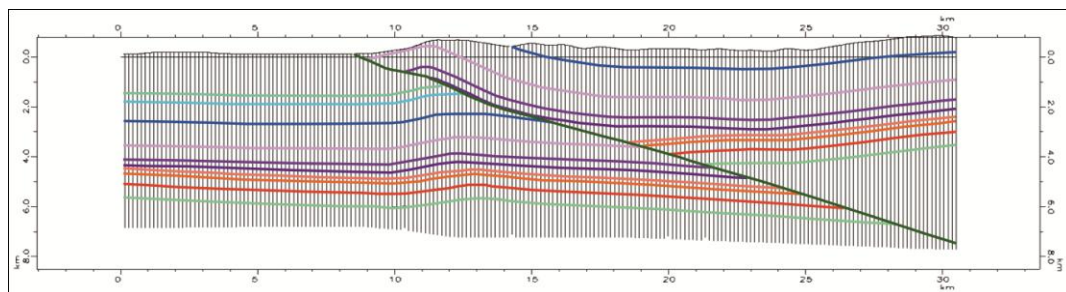
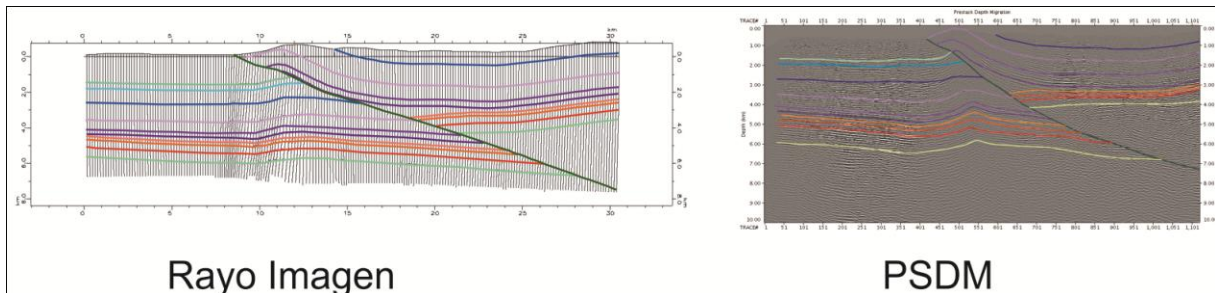


Figura 46: Resultado de la conversión a profundidad por el método de estiramiento vertical de la línea ME-1994-1350

Teniendo en cuenta que la migración preapilado en profundidad es uno de los métodos con mejores resultados, pero depende mucho de la experiencia y criterios del procesador. El resultado final de esta al igual que en otras técnicas depende del modelo de velocidades propuesto y de qué tipo de velocidades se utilizaron. Comparando los resultados obtenidos con el rayo imagen el pliegue presente bajo el plano de falla en la imagen PSDM permanece con las mismas características que en la imagen PSTM (Figura 47), esto nos indica que el modelo de velocidad utilizado en la migración en profundidad es diferente ya que se construyó con velocidades intervalo obtenidas en el procesamiento y no se tuvieron en cuenta las velocidades de los checkshots de los pozos. La diferencia en los dos modelos puede deberse a que el modelo de velocidades construido para la técnica rayo imagen en Norsar tiene en cuenta una velocidad uniforme dentro de las unidades, y el modelo de la sísmica no es uniforme dentro de cada unidad. Por otro lado las profundidades de los topes de las formaciones concuerdan en las dos técnicas, ratificando un resultado óptimo con la técnica de rayo imagen.



**Rayo Imagen** **PSDM**  
 Figura 47: Comparación de resultado de la conversión a profundidad por el método de rayo imagen con el respectivo PSDM de la línea ME-1994-1350

## 9. INFLUENCIA DE LA GEOLOGIA ESTRUCTURAL.

En la sísmica de reflexión el modelo más simple e idealizado, es una serie de capas horizontales las cuales no tienen ninguna deformación, lo que permite una propagación y una reflexión de los frentes de onda cumpliendo la mayoría de parámetros (punto medio, velocidad hiperbólica, etc.). A medida que estas capas se empiezan a inclinar y deformar por ejemplo los apilados en punto medio comienzan a tener problemas para reproducir una imagen del subsuelo confiable.

El piedemonte colombiano es una zona con muchas deformaciones producto de los esfuerzos compresivos a la que ha estado sometida durante millones de años. En esta área encontramos diferentes geometrías producidas por los diferentes mecanismos de deformación del subsuelo con este tipo de esfuerzos. Estos mecanismos están asociados a los desplazamientos producidos por fallas inversas comúnmente encontradas en este tipo de ambientes estructurales, estas fallas rompen las rocas produciendo un plano divisor de dos bloques. El bloque suprayacente a este plano es llamado colgante y el bloque bajo el plano se nombra como yacente. Progresivamente el material en el bloque colgante se desplaza sobre este plano y ponen en contacto rocas de diferentes velocidades. Esta condición afecta en gran medida la propagación basada en el tiempo de ida y vuelta de los frentes de onda que viajan por el subsuelo. Los cambios de velocidad laterales presentes en los contactos de rocas antiguas con rocas más jóvenes en los planos de falla hace más corto el tiempo de viaje de los frentes de onda. El hecho de que los tiempos sean más cortos en ciertos sectores hace que en la representación grafica se observen curvaturas que pueden ser interpretadas como plegamientos del las rocas en el subsuelo. Como se comprobó con los modelos sintéticos de estructuras con fallas inversas, en la sísmica de reflexión con presencia fallas se generan estas curvaturas en las imágenes 2D en tiempo. Estos pitfalls están directamente relacionados con el ambiente estructural ya que sin estas fallas inversas no se tendría el efecto de un tiempo de viaje más corto.

## CONCLUSIONES

- A través del estudio de los modelos sintéticos de cada geometría se determinó que en presencia de una falla inversa existen inconsistencias en las imágenes sísmicas en tiempo con respecto a los modelos en profundidad planteados.
- En los sismogramas sintéticos se observa que los pliegues conservan sus características y presentan una cresta más apretada que sus similares en profundidad, lo que podría determinar si una estructura es prospectiva o no.
- Los pitfalls más comunes en este tipo de estructuras son los anticlinales falsos o pull-up, presentes en todos los sismogramas de los modelos sintéticos en profundidad realizados. Específicamente en los modelos de cizalla y de imbricación adelante se identifican pequeños sinclinales falsos (pull-down).
- En la línea ME-1994-1350 se interpretó la falla inversa de Guaicaramo con un anticlinal asociado a su desplazamiento en el cual se observan los estratos en el bloque colgante paralelos a la falla lo que es una evidencia que se desarrollo por el mecanismo de Fault-bend fold (pliegues por flexion de falla).
- Por medio de la conversión a profundidad por el método de rayo imagen y estiramiento vertical se obtuvo la geometría en profundidad de la estructura presente en la línea 2D en tiempo. Encontrando como diferencia en el resultado de estas dos técnicas

que la cresta del anticlinal en el bloque colgante es más suave en el método de rayo imagen que en el de estiramiento vertical.

- A partir del análisis realizado al resultado de la conversión a profundidad con el método de rayo imagen se determinó la presencia de un anticlinal falso en el bloque yacente basándose en que la curvatura de estas líneas se suaviza y tiende a quedar horizontal. Todo esto apoyado con los resultados en los modelos sintéticos.
- Comparando este resultado con una imagen sísmica preapilado en profundidad (PSDM) vemos que las profundidades para los topes de las formaciones concuerdan lo que nos dice que es una conversión óptima. Sin embargo la PSDM tiene una geometría diferente por variaciones en el modelo de velocidad.
- La geología estructural de la zona tiene una gran influencia en la presencia de estos pitfalls, ya que en ambientes compresivos generalmente se encuentran fallas inversas asociadas a estas estructuras falsas en tiempo. Si fuese un ambiente extensivo la mayoría de las fallas encontradas serian fallas normales y los cambios laterales de velocidad serian de una velocidad menor a una mayor como en una secuencia normal a medida que aumenta la profundidad.

## RECOMENDACIONES

- Al hacer conversiones a profundidad es fundamental tener un riguroso cuidado en la construcción del modelo de velocidad y en la escogencia de la velocidad de la roca. Este modelo nos determina el la posición final de cada punto y cualquier variación en el nos alejara del resultado esperado.
- En lo posible hacer conversiones de las líneas de buzamiento para tener un control total de la estructura

## BIBLIOGRAFIA

- Butler, K., and Schamel, S., 1988, Structure along the eastern margin of the Central Cordillera, upper Magdalena Valley, Colombia: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 1, no. 1, p. 109-120.
- Gomez, E., T. E. Jordan, R. W. Allmendinger, K. Hegarty, S. Kelley, M. Heizler, K. A. Hegarty, and Anonymous, 2003, Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. New exploration and production opportunities in Colombia; lessons from basin-analyses studies and a look forward: *Geological Society of America Bulletin*, v. 115, p. 131-147.
- Iversen, E., and M. Tygel, 2008, Image-ray tracing for joint 3D seismic velocity estimation and time-to-depth conversion: *Geophysics*, v. 73, p. S99-114.
- Marsden, D., 1989, I; Layer cake depth conversion: *The Leading Edge*, v. 8, p. 10-14.
- Marsden, D., 1992, V o -K method of depth conversion: *The Leading Edge*, v. 11, p. 53-54.
- Mora, A., 1999. Análisis estructural del área ubicada entre la Sabana de Bogotá y la Cuenca alta del Río Guatiquía, flanco Oriental de la Cordillera Oriental. Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 118p.
- Mora, A., 2007, Inversion tectonics and exhumation processes in the Eastern Cordillera of Colombia: PhD thesis, Universität Potsdam, Potsdam, 133 p.
- Mora, A., T. Gaona, J. Kley, D. Montoya, M. Parra, L. I. Quiroz, G. Reyes, and M. Strecker, 2008, The role of inherited extensional fault segmentation and linkage in contractional orogenesis: A reconstruction of Lower Cretaceous inverted rift basin in the Eastern Cordillera of Colombia: *Basin Research*, v. 21, p. 111-137
- Mora, A., & 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*. v. 3, N° 4, p. 7-21.
- Namson, J., Cunningham, R., and Woodcock, G., 1994, Structural geology and hydrocarbon potential of the northern part of the Upper Magdalena Basin, Colombia, in V Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en la Cuencas Subandinas, Puerto La Cruz, Venezuela, p. 356-364.
- Rowan, M. G., and R. Linares, 2000, Fold-evolution matrices and axial-surface analysis of fault-bend folds: Application to the Medina anticline, Eastern Cordillera, Colombia: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 84, p. 741-764.
- Silva, A., 2010, Cinemática De La Deformación Frágil En El Área De Medina (Cordillera Oriental, Colombia); Relación De Temporalidad Entre La

Deformación Frágil y Los Sistemas Petrolíferos. Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander. 122p.

- Shaw J., Connors C., and Suppe J. 2004. Seismic Interpretation of Contractional Fault-Related Folds. AAPG Seismic Atlas Studies in Geology #53
- Taboada, A., L. A. Rivera, A. Fuenzalida, A. Cisternas, H. Philip, H. Bijwaard, J. Olaya, and C. Rivera, 2000, Geodynamics of the Northern Andes; subductions and intracontinental deformation (Colombia): Tectonics, v. 19, p. 787-813.
- Velásquez, A., 2007, Conversión Tiempo – Profundidad. Metodologías y estudio de casos (Cuencas VMM y CAT, Colombia). Informe ECOPETROL