

**ESTUDIO DE SOMBRAS DE FALLA USANDO MODELADO SISMICO Y  
MIGRACION EN PROFUNDIDAD, APLICACION EN DATOS SINTETICOS Y  
REALES**

**NHORA MERCEDES MARTINEZ ANDRADE**

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

**2010**

**ESTUDIO DE SOMBRAS DE FALLA USANDO MODELADO SISMICO Y  
MIGRACION EN PROFUNDIDAD, APLICACION EN DATOS SINTETICOS Y  
REALES**

**NHORA MERCEDES MARTINEZ ANDRADE**

**Proyecto de grado para optar al título de Geóloga**

**Director**

**Ph.D. WILLIAM MAURICIO AGUDELO ZAMBRANO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS**

**ESCUELA DE GEOLOGÍA**

**BUCARAMANGA**

**2010**

## DEDICATORIA

*A Dios por la oportunidad,*

*A mis padres Alfonso Martínez G. y Margoth Andrade V. por su apoyo,  
sacrificios y amor incondicional,*

*A mi hermano Alfonso Martínez A por su cariño y amistad,*

*A Juan Carlos Vega por su confianza y amor, y*

*A María Lucía por ser el farolito que alumbra mi oscuridad.*

## **AGRADECIMIENTOS**

La autora expresa sus agradecimientos:

A todos los profesores de Geología quienes contribuyeron a mi formación como geóloga, en especial a los profesores JAIRO CLAVIJO, y JORGE RUBIANO, quienes demostraron durante mi estadía en la Escuela de Geología su ánimo por la enseñanza.

A YAQUELINE FIGUEREDO por darme a conocer la existencia del grupo de Petrosísmica; a CARLOS PIEDRAHITA ESCOBAR por permitirme ser parte de este grupo, y a WILLIAM M. AGUDELO por aceptar ser mi Director de tesis.

A JORGE MONSEGNY, por su colaboración en el desarrollo de esta investigación y por su amistad.

Al Instituto Colombiano del Petróleo y al grupo de Geofísica por permitirme desarrollar este trabajo de investigación.

A DARIO BARRERO, por su valioso aporte e interés en el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos de Ingeniería Mecánica, con quienes inicié mi carrera, CAROLINA DULCEY, NATALIA GARCIA SUAREZ, FABIAN VALLEJO, QUINTILIANO y HENSON MEDINA; y a mis amigas de Geología quienes me acompañaron con su sincera amistad AURA MEJIA, NATALIA REYES y MARLY PALENCIA.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCION	15
OBJETIVOS	17
OBJETIVO GENERAL	17
OBJETIVOS ESPECIFICOS	17
1.1 MÉTODO SÍSMICO	18
1.2 IMAGING (PSTM-PSDM)	22
1.3 PROBLEMA DE SOMBRAS DE FALLA	24
2. METODOLOGIA	28
2.1 ETAPA 1. COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA Y GEOLÓGICA	28
2.2 ETAPA 2. MODELADO SÍSMICO EN 2D DE DATOS SINTÉTICOS	28
2.3 ETAPA 3. PROCESAMIENTO (PSDM) (THRUSTLINE Y PROMAX)	30
2.4 ETAPA 4. METODOLOGÍA PARA EL RECONOCIMIENTO DE SOMBRAS DE FALLA.	36
3. DATOS SINTÉTICOS	38
3.1 MODELAMIENTO DE DATOS SINTÉTICOS	38
3.2 GRÁFICAS DE EFECTOS PULL-UP EN DATOS SINTÉTICOS.	43
4. ANALISIS EN DATOS REALES	50
5. RESULTADOS	53
5.1 CASO BLOQUE MEDINA (CUENCA LLANOS ORIENTALES).	53
5.2 CASO BLOQUE BITUIMA (CUENCA VALLE MEDIO DEL MAGDALENA).	55
CONCLUSIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	60

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Esquema representativo de la emisión de los rayos reflejados en las distintas capas reflectoras.	17
<b>Figura 2.</b> Adquisición sísmica.	20
<b>Figura 3.</b> Representación de los pasos básicos del método sísmico.	21
<b>Figura 4.</b> Un CMP apilado.	22
<b>Figura 5.</b> Diagrama esquemático de la migración.	24
<b>Figura 6.</b> Efecto de sombra de falla. Imagen de una falla inversa,	26
<b>Figura 7.</b> Modelo sintético. Representación de una falla inversa.	29
<b>Figura 8.</b> Carga de datos en la herramienta Thrustline.	32
<b>Figura 9.</b> Procesamiento convencional básico aplicado a los datos sintéticos.	32
<b>Figura 10.</b> Modelo de velocidad RMS.	33
<b>Figura 11.</b> Modelo de velocidad intervalica.	35
<b>Figura 12.</b> Modelo inicial en profundidad con gradiente de velocidad 0.4 ([m/s]/m).	40
<b>Figura 13.</b> Sección apilada en tiempo.	41
<b>Figura 14.</b> Sección Migrada en tiempo de la figura 12.	41
<b>Figura 15.</b> Sección migrada en profundidad de la figura 12.	42
<b>Figura 16.</b> Grafica Angulo de falla vs Tiempo.	43
<b>Figura 17.</b> Grafica Angulo de falla vs Tiempo	44
<b>Figura 18.</b> Grafica Angulo de falla vs Tiempo.	45
<b>Figura 19.</b> Grafica Angulo de falla vs Tiempo en sección Stack	46

<b>Figura 20.</b> Grafica Angulo de falla vs Tiempo en PSTM	47
<b>Figura 21.</b> Grafica de pull-up PSTM vs Stack.	48
<b>Figura 22.</b> Efecto Pull-up en PSDM.	49
<b>Figura 23.</b> Imagen sísmica migrada en tiempo cartografiada de la cuenca medina	51
<b>Figura 24.</b> Imagen sísmica migrada en tiempo del área de Bituima.	52
<b>Figura 25.</b> Análisis del pull-up en el bloque Medina.	54
<b>Figura 26.</b> Sección PrSDM interpretada del bloque Medina.	55
<b>Figura 27.</b> Análisis de pull-up en el Bloque Bituima	56
<b>Figura 28.</b> Imagen sísmica PSDM interpretada de Bituima, VMM.	577

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Parámetros de adquisición aplicados a modelos sintéticos.	29
<b>Tabla2.</b> Identificación dada a cada uno de los modelos, que contienen los diferentes parámetros.	38
<b>Tabla 3.</b> Valores de profundidad y velocidad en registros VSP de la cuenca Medina.	50

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO A.</b> MODELOS SINTETICOS CON SALTO DE FALLA DE 250 (m); OFFSET DE 3000	63
<b>ANEXO B.</b> MODELOS SINTÉTICOS CON SALTO DE FALLA DE 500 (m); OFFSET DE 3000 m	79
<b>ANEXO C.</b> MODELOS SINTÉTICOS CON SALTO DE FALLA DE 500 (m); OFFSET DE 1000(m), 2000(m), 3000(m) y 4000 (m)	95

## RESUMEN

Titulo: ESTUDIO DE SOMBRAS DE FALLA USANDO MODELADO SISMICO Y MIGRACION EN PROFUNDIDAD, APLICACION EN DATOS SINTETICOS Y REALES<sup>1</sup>

Autor: Nhora Mercedes Martínez Andrade<sup>2</sup>

Palabras Clave: fallas, pifia de interpretación, PSDM, sombras de falla, velocidades.

El efecto de sombra de falla, ha sido uno de las pifias responsable de la perforación de considerables pozos secos; efecto que se presenta en cercanías a las fallas normales e inversas, creando anticlinales (pull-up) y sinclinales (sag) falsos, al mismo tiempo que produce incertidumbre en las interpretaciones sísmicas. Sin embargo un debido procesamiento y migración PSDM, puede disminuir este efecto, pero estos por lo general son costosos y el tiempo requerido es considerable.

En base al método sísmico y teniendo en cuenta las diferentes propiedades geológicas y geofísicas de las fallas como, ángulo del plano de falla, salto de falla, gradiente de velocidad y offset máximo de adquisición; se realizó modelado sintético, para lograr medir el efecto de curvatura en las imágenes sísmicas en tiempo; tanto para apiladas como migradas, determinando con ello la influencia de las propiedades geológicas y geofísicas en la generación de sombras de falla.

Para llegar a estos resultados se realizaron más de 30 modelos sintéticos. Al obtener los resultados sintéticos se generaron las curvas de pull-up, la cuales fueron medidas en tiempo, tanto en datos sintéticos como en datos reales, aplicados para Colombia, los cuales contienen diferentes características geométricas y estratigráficas, por lo tanto contribuyo a confirmar el análisis sintético; al mismo tiempo se realizó un análisis en profundidad de horizontes a partir de los datos de apertura de migración y offset máximo de adquisición.

El resultado de este trabajo permite detectar y estimar los efectos de pull-up en la sísmica en tiempo antes de hacer conversiones robustas a profundidad de las imágenes sísmicas.

---

<sup>1</sup> Proyecto de Grado, Modalidad Tesis de Investigación.

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Geología. Directo Ph.D William Mauricio Agudelo Zambrano

## ABSTRACT

Title: STUDY OF FAULTS SHADOWS USING SEISMIC MODELLING AND MIGRATION IN DEPTH, APPLICATION ON SYNTHETIC AND REAL DATA.<sup>3</sup>

Author: Nhora Mercedes Martinez Andrade<sup>4</sup>

KEYWORDS: Faults, Pitfalls, PSDM, Pull-ups, Velocities

The fault shadow effect has been one of the blunders responsible for considerable drilling dry holes; effect that occurs in close to normal and reverse faults, creating anticlines (pull-up) and synclines (sag) false, the while producing uncertainty in the seismic interpretations. But due process and PSDM migration can lessen this effect, but these are usually expensive and time required is considerable.

Based on the seismic method and taking into account the different geological and geophysical properties of faults and angle of the fault plane, jumping faults, shear rate and maximum acquisition offset; synthetic modeling was performed to measure the effect of achieving curvature in seismic imaging time, both stacked and migrated, thereby determining the influence of geological and geophysical properties to generate shadows of failure.

To reach these results were more than 30 synthetic models. By obtaining the synthetic curves were generated pull-up, which were measured in time, both synthetic data and real data used to Colombia, which contain different geometrical and stratigraphic, therefore contributed to confirm the synthetic analysis at the same time conducted a thorough analysis of horizons from the data migration and open up acquisition offset.

The result of this work to detect and estimate the effects of pull-up in the seismic time before robust depth conversions of seismic imaging

---

<sup>3</sup> Degree Work, Research Modalitu

<sup>4</sup> Engineering Physical-Chemistry Department. Geology School. Civil Engineer Ph.D William Mauricio Agudelo Zambrano

## INTRODUCCION

La interpretación sísmica se considera, como el resultado final de un despliegue y desarrollo del método sísmico, en donde se marcan las reflexiones sísmicas de las rocas, para entender las estructuras geológicas del subsuelo y así determinar la probabilidad de hallazgo de hidrocarburos. Sin embargo los datos sísmicos no siempre logran mostrar una imagen confiable debido a la complejidad estructural del área o a errores producidos en las técnicas de adquisición o procesamiento, cada una de las técnicas ya sea en tiempo o en profundidad existente, tiene diferentes costos económicos y computacionales. Estas técnicas de procesamiento a pesar de que contribuyen a mejorar la imagen, en algunas ocasiones pueden mostrar errores debido a la complejidad de ciertas estructuras geológicas y pueden generar incertidumbre, en especial en cercanías a fallas, ya sean de tipo normal o inversa, en donde los cambios de velocidades de los bloques colgantes de las fallas debido a inversión o a las diferencias de velocidad laterales deforman la imagen en tiempo de las estructuras reales del bloque yacente, creando falsos anticlinales o “pull-up”, sinclinales “sag”, y falsos “rollovers”; estas “pifias” engaños son conocidos en la sísmica como sombras de falla. Por lo general los pull-up son los más difíciles de reconocer en la sísmica y son los responsables de la perforación de numerosos pozos secos, en los cuales se creía la existía de un buen prospecto.

Se han publicados algunos artículos donde se muestra que una solución a esta pifia en la interpretación es usar la técnica PSDM, sin embargo estos artículos no han estudiado a fondo la naturaleza de las sombras de falla, ni los efectos producidos por las características geológicas y geofísicas que las producen. En este trabajo de investigación se realiza una profundización sobre las sombras de falla, de acuerdo a las características geológicas y físicas que la generan utilizando modelado sísmico sintético, para definir parámetros y generar una aproximación a una solución general de los datos sísmicos que se ven

actualmente en campo. Para la comprobación de los datos obtenidos sintéticamente se analizan líneas sísmicas de las cuencas Piedemonte y Valle Medio del Magdalena.

La primera parte de este trabajo se concentra en el análisis de parámetros aplicados a datos sintéticos para apreciar sus efectos en imágenes apiladas y migradas en tiempo, las cuales son finalmente migradas en profundidad. Se analizaron tres parámetros geológicos y geofísicos correspondientes al ángulo del plano de falla, el gradiente de velocidad y el offset máximo usado en la migración. A partir de estos modelos sintéticos se generaron tablas de curvatura que miden el efecto de curvatura en tiempo que muestra cada parámetro.

La segunda parte del trabajo consiste en la validación de estos valores obtenidos en las tablas sobre datos sintéticos de líneas sísmicas de cuencas colombianas que han sido migradas en profundidad.

Los actuales artículos en geofísica a nivel mundial señalan que en áreas complejas como nuestros piedemontes se debe tener la información sísmica migrada en profundidad, sin embargo convertir toda nuestra actual información a profundidad llevara tiempo y los costos son altos, sin olvidar que la migración en profundidad no siempre es una solución, por lo cual este trabajo de investigación muestra una forma más rápida y precisa de calcular si lo que tenemos en las imágenes sísmicas son estructuras geológicas o solo corresponden a una pifia causada por los efectos de contrastes de velocidad en la imagen sísmica.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Estudiar los efectos del gradiente de velocidad, el offset máximo usado en la migración y el ángulo del plano de falla de las estructuras en cercanías a fallas inversas; identificando sus características, las estructuras geológicas que supone y como reconocerlas.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Realizar modelos sintéticos en 2D que simulen los casos de fallas inversas donde se ponen en contacto capas de velocidades diferentes.
- Proponer una metodología que evalúe la correcta posición de un reflector visualizado en tiempo de viaje en las zonas por debajo de fallas.
- Aplicar la metodología propuesta en datos reales, en casos de sombra de falla en Colombia.
- Aplicar PSDM a datos sintéticos para solucionar el efecto de falsas estructuras en la imagen sísmica convencional

## 1. MARCO TEORICO

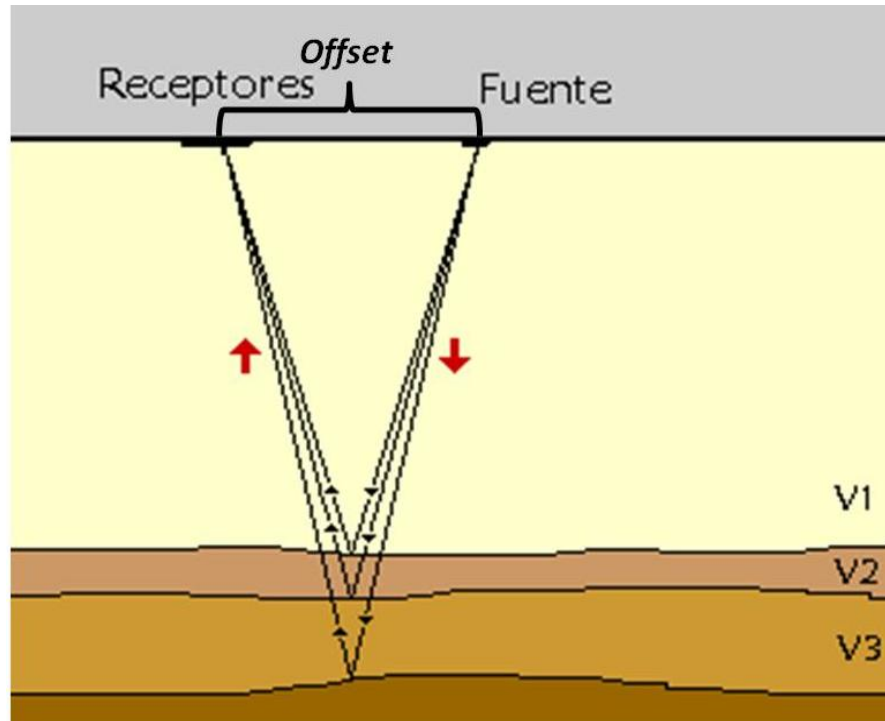
### 1.1 MÉTODO SÍSMICO

En la actualidad las compañías petroleras consideran la interpretación de reflexiones sísmicas, como el camino más acertado para la exploración de hidrocarburos, a pesar de que este método es costoso y complejo ya que no siempre es fácil reproducir una imagen confiable del subsuelo. La interpretación de reflexiones sísmicas, es el resultado final de dos etapas previas, conocidas como la adquisición y el procesamiento de datos sísmicos, todas estas etapas sumadas son el resultado del método sísmico.

El método sísmico se basa en el estudio de las ondas elásticas que se producen en la superficie de la tierra debido a la generación de estas mediante una fuente emisora (explosivos o camiones vibradores) y registrarlas en una serie de estaciones sensoras (geófonos o receptoras) distribuidas sobre el terreno que cubre el subsuelo a estudiar. A partir del estudio de las distintas formas de onda y sus tiempos de trayecto, se consiguen obtener imágenes del subsuelo que luego se relacionan con las capas geológicas. El método sísmico puede ser dividido en la sísmica de refracción y sísmica de reflexión, sin embargo esta última es la actualmente utilizada para la prospección de hidrocarburos.

La sísmica de reflexión se basa en las reflexiones del frente de ondas sísmico sobre las distintas interfaces del subsuelo. Estas interfaces (reflectores) responden, a los contrastes de impedancia que posteriormente se relacionaran con las distintas capas geológicas. Las reflexiones son detectadas por los receptores que se ubican en superficie y que están alineados con la fuente emisora. La distancia entre los la fuente y receptores en denominada offset.

**Figura 1. Esquema representativo de la emisión de los rayos reflejados en las distintas capas reflectoras. El rayo viaja desde la fuente hasta la unidad más profunda y regresa a los Receptores.**



Fuente: Society of Exploration Geophysicists. GEOPHYSICS. Volumen 63, nº 4. Julio-Agosto 1.998. Special Section. Shallow Seismic Reflection Papers.

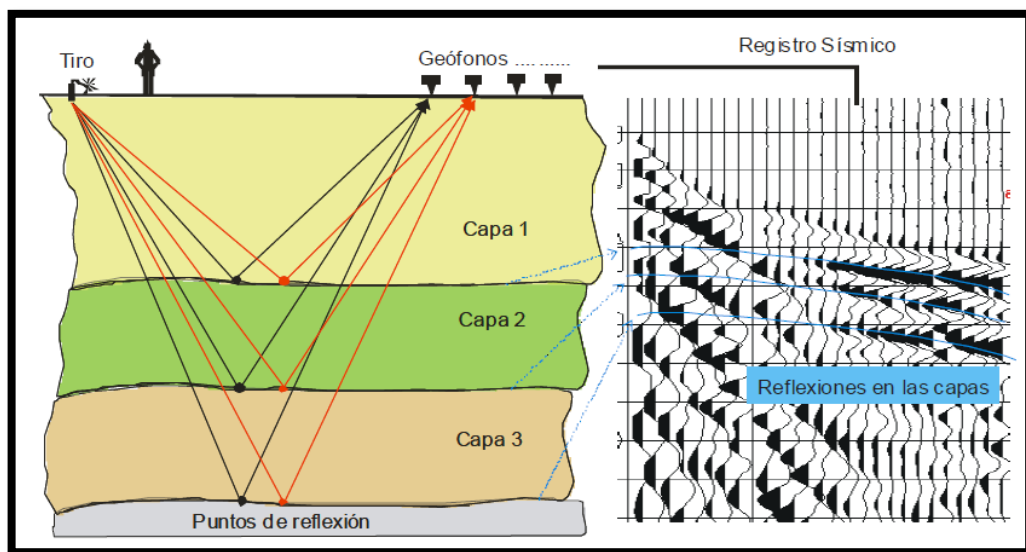
Para obtener una mejor “iluminación” de la zona de estudio, por lo general se realiza un número de disparos sobre la zona de interés los cuales son registrados por geófonos que usualmente están distribuidos en una área mayor a la zona de interés, este procedimiento es conocido bajo el nombre de adquisición sísmica.

Al realizar la adquisición, el resultado es un grupo de trazas sísmicas procedentes de todos los tiros que se analizan, se procesan y luego se reordenan en conjuntos de “puntos reflectores comunes” o Técnica del Medio Punto Común (CMP), los cuales contienen la información pertinente de las reflexiones halladas (Figura).

Estos conjuntos de trazas son denominados como la sección sísmica de reflexión como resultado final del método sísmico por reflexión.

La sección sísmica de reflexión obtenida en la adquisición, pasa por una segunda etapa llamada procesamiento sísmico, en donde se le efectuaran tratamientos con el objeto de obtener una imagen representativa del subsuelo; atenuar el ruido coherente; obtener informaciones del medio geológico en el subsuelo; y convertir el tiempo de tránsito en profundidad.

**Figura 2. Adquisición sísmica. Representación de la adquisición sísmica (izquierda) y el registro sísmico obtenido al lado derecho.**



Fuente: Society of Exploration Geophysicists. GEOPHYSICS. Volumen 63, nº 4. Julio-Agosto 1.998. Special Section. Shallow Seismic Reflection Papers.

Representación del recorrido de los rayos reflejados en tres capas para una posición de tiro y dos estaciones receptoras; esto a su vez es conocido como adquisición sísmica (Izquierda de la imagen). Registro sísmico generado luego de la adquisición, en donde las reflexiones generadas quedan enmarcadas como trayectorias hiperbólicas debido a la ecuación de onda. (Derecha de la Imagen).

El procesamiento sísmico, consta de una secuencia básica:

1. Pre-Procesamiento
2. Deconvolución
3. Ordenación de los datos por Punto Medio Común (CMP)
4. Análisis de Velocidad.
5. Corrección NMO
6. Correcciones de Estáticas Residuales
7. Apilamiento
8. Procesamiento Post-Apilamiento
9. Migración.

**Figura 3. Representación de los pasos básicos del método sísmico. Adquisición, Procesamiento e Interpretación.**

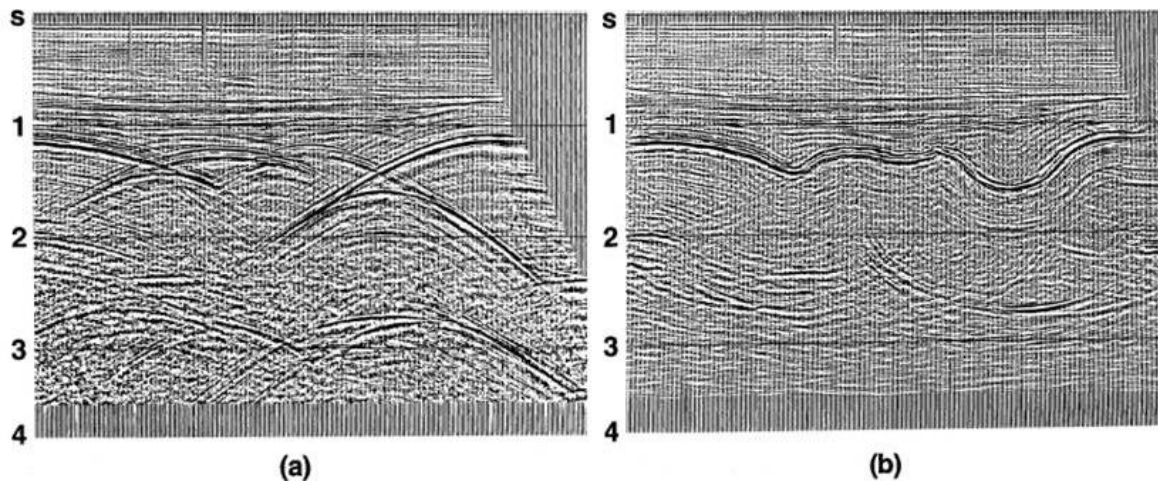


Fuente: autor.

## 1.2 IMAGING (PSTM-PSDM)

La migración sísmica mueve las reflexiones buzantes a su verdadera posición en el subsuelo y colapsa las difracciones, para lograr incrementar la resolución espacial y producir una imagen sísmica más exacta del subsuelo, que las imágenes ya obtenidas en el procesamiento convencional sísmico, Yilmaz, 2002.

**Figura 4. Un CMP apilado. En (a) antes y en (b) después de la migración. En el proceso de migración se eliminan “las sonrisas” de la imagen y se convierten en sinclinales.**



Fuente: Yilmaz, 2002

Imagen sísmica en tiempo. a) Sección apilada en CMP y b) sección migrada de a. Se puede ver como las difracciones desaparecen y se convierten en sinclinales. (Taner y Koehler, 1977).

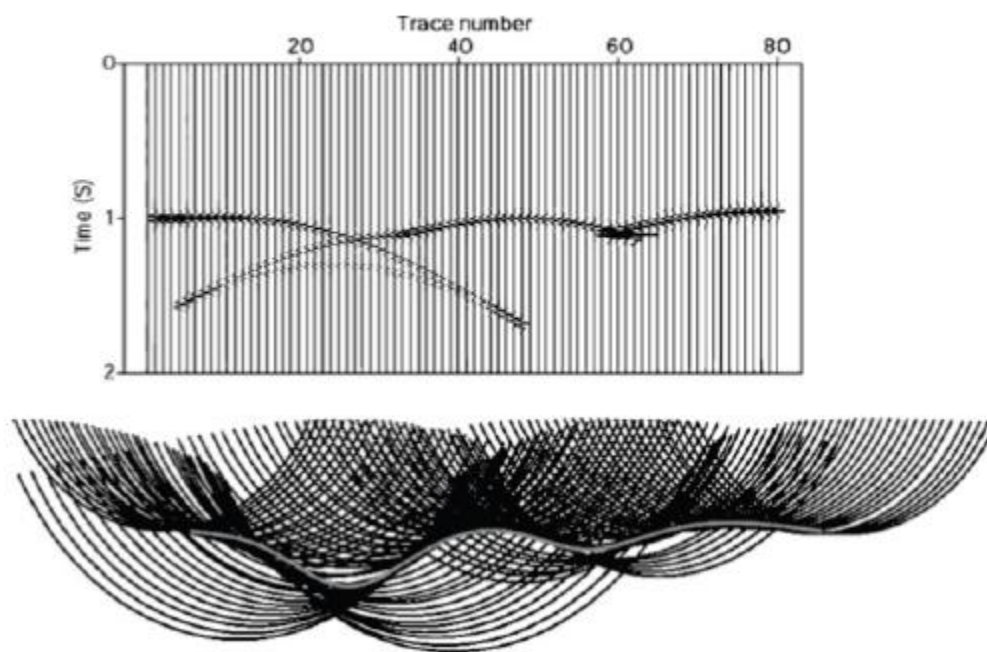
Aunque existen diferentes algoritmos y métodos de migración este trabajo se enfoca en la migración sísmica preapilada usando la ecuación de Kirchhoff.

En un sentido más estricto, para explicar la migración Kirchhoff, se puede ver cómo un frente de onda en un tiempo  $t$  dado puede ser visto como la envolvente

de un continuo de frentes de onda con fuentes en un frente de onda de un tiempo previo  $t - \Delta t$ , de la misma manera, la migración puede ser vista como una envolvente de isócronas. Una isócrona es un lugar de puntos geométricos  $x$  tales que la energía del tiempo de viaje desde una fuente  $x_s$  dada a el punto  $x$  y desde allí a un receptor  $x_r$  es constante. En un medio de velocidad constante, la isócrona es elíptica. Para Offset cero (la fuente y el receptor coinciden en ubicación) la isócrona coincide con un frente de onda, asumiendo que la velocidad de propagación es la mitad de la actual velocidad de propagación. El grupo de isócronas que forman la envolvente (frente migrado) es únicamente definido por la ubicación de la fuente y el receptor para cada traza y el tiempo de la reflexión. La figura muestra una ilustración del proceso. El tope muestra un dato sintético en un medio de velocidad constante. También se asume que el dato es *offset* cero. La migración podría ser hecha de superimponer círculos con centros en las ubicaciones fuente-receptor (tope de cada traza) con un radio de  $vt/2$  donde  $v$  es la velocidad de propagación. La envolvente de los círculos podrían corresponder a el modelo que fue creado a partir del dato sintético (la imagen). Dado que un punto difractor podría enmascarar la energía a lo largo de la energía sobre el dato modelado. Un apilado a lo largo de esta superficie de difracción podría regresar la energía al foco que creo esto: el difractor. La migración colapsa las superficies de difracción dentro de puntos de difracción. Si se considera a cualquier reflector como un continuo de difractores, entonces el método podría ser usado para cada punto a lo largo de la superficie reflectora usando el principio de superposición. Para cada punto en el mismo espacio externo en el mismo espacio de la imagen, una suma de todos los puntos entrantes en el espacio interno a lo largo de la superficie de difracción.

También es necesario aclarar que es más común encontrar interpretación sobre datos migrados en tiempo que sobre secciones migradas a profundidad. Esto se debe a que la migración en profundidad necesita un modelo de velocidad exacto para hacer la conversión el cual a veces es imposible de conseguir

**Figura 5. Diagrama esquemático de la migración (tal como Hagedoorn lo describió). El tope es una sección del dato sintético modelado y a la base se muestra un set de círculos. Cada círculo esta centrado en la ubicación de fuente-receptor con radio  $vt/2$ . La envolvente de todos los círculos corresponde a la imagen del modelo. (Tomado de Jaramillo, 2009)**



Fuente: Yilmaz, 2002

Esquema de migración. El tope es una sección de datos sintéticos modelados. En la base se muestra un conjunto de círculos, cada círculo centrado en la ubicación del par fuente-receptor con radio  $vt/2$ . La envolvente de todos los círculos corresponde a la imagen del modelo.

### 1.3 PROBLEMA DE SOMBRAS DE FALLA

Las interpretaciones de las imágenes sísmicas de reflexión por lo general se hacen complejas a medida que la geología en profundidad se hace compleja ya

sea por perturbaciones tectónicas, estratigráficas o combinaciones de estas y es ahí donde se encuentran los futuros campos de producción, la gran mayoría de ellos en zonas cercanas a fallas.

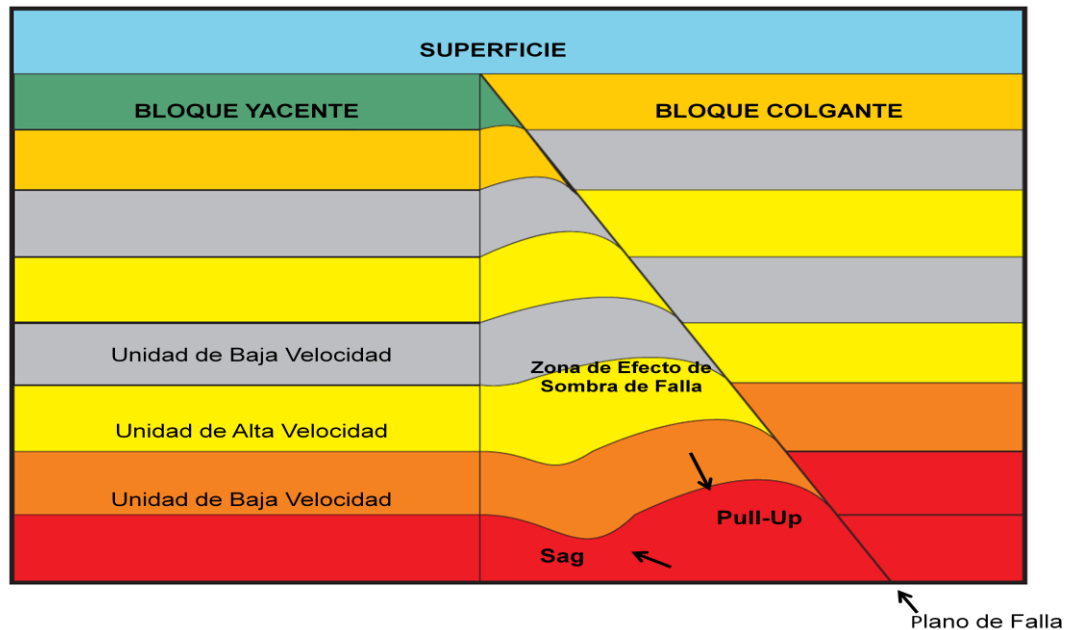
Las fallas son estructuras geológicas, en donde un cuerpo rocoso después de fracturarse sufre un desplazamiento, dividiéndose así en bloque colgante y bloque yacente, los cuales se encuentran separados por el plano de falla. De acuerdo a este desplazamiento las fallas se clasifican en fallas inversas o fallas normales; las primeras se generan cuando el bloque colgante se desplaza hacia arriba con respecto al bloque yacente, y las segundas cuando el bloque colgante se desplaza hacia abajo del bloque yacente.

Las fallas son importantes en la interpretación sísmica porque son consideradas muchas veces como las estructuras sello del sistema petrolífero, lo que contribuye a la acumulación de hidrocarburos y evitan su migración, además los estratos o capas litológicas que hacen parte de la falla pueden formar estructuras geológicas más complejas como anticlinales, propicias para también para la acumulación.

Sin embargo, en las zonas de falla se generan lo que los exploradores e intérpretes llaman: “el problema de sombra de falla”, y consiste en la poco confiable reproducción de la imagen sísmica en el bloque yacente alrededor de fallas estructurales. En la Figura, se muestra una falla de tipo inverso, en la cual se establecieron varias capas litológicas de diferentes velocidades; entre el bloque yacente y el plano de falla, se forma la zona triangular en donde se genera el efecto sombra de falla y sus dos tipos de falsas estructuras, denominadas sag o pull-down (falso sinclinal), y pull-up (falso anticlinal), la primera se genera por el paso de una capa de alta velocidad a una capa de baja velocidad y el segundo es la consecuencia del paso de una capa de baja velocidad a una capa de alta velocidad, esto se presenta debido a que la propagación de las ondas en el subsuelo adquieren diferentes velocidades de acuerdo a la litología presente, lo cual dependerá de la zona de estudio. El efecto de sombras de falla a generado la

perforación de pozos secos en vista de la interpretación que se suele encontrar en la sísmica, sin embargo este efecto es posible eliminarlo por medio de un complejo procesamiento que incluiría Migración Prea pilada en Profundidad (**PrSDM , siglas en ingles**).

**Figura 6. Efecto de sombra de falla. Imagen de una falla inversa, en la cual se aprecia el efecto de sombra de falla, representado por dos de sus estructuras pull-up (anticlinal falso) y sag (sinclinal falso); debido al contraste de velocidad encontradas en sus estratos.**



Fuente: autor.

Diagrama esquemático que muestra el efecto visual generado en el bloque yacente de una falla a partir de las zonas de sombra.

El efecto de sombra de falla es principalmente visto como anomalías en tiempo atribuibles a unidades de mayor velocidad que subrayasen cuerpos de menor velocidad (Fagin, 1996).

Otros autores tales como Carvajal, (1992) y posteriormente Trincherro, (2000), y Salinas, (2001); describen el problema de la sombra de falla como falsas estructuras creadas en la sísmica debido a los cambios laterales de velocidad

producidos en áreas cercanas a falla, patrones de adquisición y errores en el procesamiento.

Generalmente, en las imágenes sísmicas en áreas que presentan fallas inversas, los reflectores de los horizontes en el bloque colgante serán planos y libres de interrupciones, en contraste el bloque yacente mostrara una zona triangular con numerosas distorsiones de imagen (Fagin, 1996). Estas anomalías en tiempo pueden ser fácilmente explicadas desde el punto de vista de las relaciones de los tiempos de viaje (Figura 2), ya que los tiempos de viaje que pasan por unidades de alta velocidad serán menores en posiciones bajo la falla mientras en áreas donde la falla corta unidades de baja velocidad los tiempos de viaje que se registren serán mayores.

El efecto de sombras de falla se presenta tanto en fallas inversas como en fallas normales, pero es debido al mayor desplazamiento que se presenta en las fallas inversas, donde hay procesos de compresión, donde es más comúnmente se puede encontrar. Una manera fácil de eliminar este artefacto es convertir la imagen a profundidad usando técnicas como el PrSDM (ver anexo 1), se debe tener en cuenta que es necesario una apertura de migración (ver anexo 1) lo suficientemente amplia para que el algoritmo de migración reubique correctamente los horizontes. La migración sísmica se puede explicar como un método de inversión que involucra la reordenación de las reflexiones y difracciones ubicándolas en la posición real en el subsuelo. La migración en tiempo, asume que la variación de la velocidad solo se da en la vertical, mientras la migración en profundidad asume la variación de la velocidad tanto en la vertical y horizontal. Originalmente el proceso de migración se llevaba a cabo sobre datos sísmicos interpretados lo cual se hacía a mano, la migración ahora es operación computarizada que se lleva a cabo sobre datos no interpretados usando alguna forma o aproximación de la ecuación de onda. Sheriff and Geldart (1995, 326-33)

## 2. METODOLOGIA

La elaboración de la presente investigación se llevo a cabo en cuatro etapas:

### 2.1 ETAPA 1. COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA Y GEOLÓGICA

En esta parte del proyecto, se realizo una previa recopilación, revisión y análisis de la información existente en el tema de sombras de falla, lo cual incluye búsqueda en artículos de revistas, trabajos de investigación, datos consignados en el Instituto Colombiano del Petróleo. Además de adquirió información sísmica caracterizada por la incertidumbre en las estructuras visibles en ella o que se estimara la existencia de posibles problemas de *pull-up*.

### 2.2 ETAPA 2. MODELADO SÍSMICO EN 2D DE DATOS SINTÉTICOS

#### Aprendizaje del Software para Modelado 2D (NORSAR)

En esta fase se realizo una capacitación en la herramienta NORSAR-2D, correspondiente a un software especializado en modelado sísmico y muy robusto en trazado de rayos, él cual recreo sintéticamente la adquisición sísmica sobre cada uno de los modelos generados.

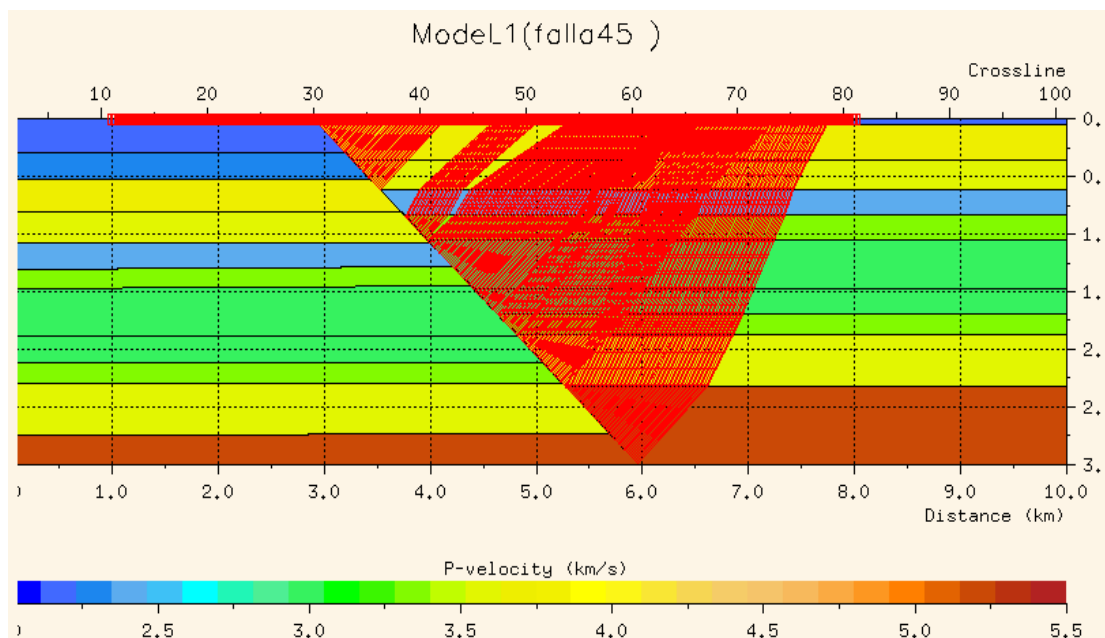
Se realizaron 30 modelos en profundidad, los cuales fueron realizados de acuerdo a las variables geológicas como ángulo de buzamiento del plano de falla, gradiente de velocidad de intervalo, y la variable de adquisición sísmica offset, parámetro importante en la migración de datos sísmicos (Figura 9). Con cada uno de estos modelos se genero una adquisición sísmica sintética, es decir usando un trazador de rayos 2D sobre cada modelo se simulo una respuesta sintética. Para este modelado sísmico sintético se disparo de la forma de fuente centrada, es decir, cada fuente es la coordenada inicial para sus receptoras vivas, además, se usaron los siguientes parámetros de adquisición:

**Tabla 1.** Parámetros de adquisición aplicados a modelos sintéticos.

Intervalo entre fuentes	100 m
Total de disparos	81 m
Coord. Inicial de Fuente	1 Km
Intervalo entre Receptores	20 m
Máximo Offset	3000 m
Total receptores por disparo	300

Una vez se generaron las trazas sísmicas se creó un sismograma sintético para cada modelo, los cuales fueron almacenados en la Base de datos de ICP-ECOPETROL en formato SEG-Y

**Figura 7. Modelo sintético. Representación de una falla inversa, en profundidad con iluminación del trazado de rayos sobre una falla con buzamiento de 45°.**



Fuente: autor.

## 2.3 ETAPA 3. PROCESAMIENTO (PSDM) (THRUSTLINE Y PROMAX)

### **Aprendizaje del Software PROMAX 2D y Procesamiento Sísmico**

En esta etapa se realizó un reconocimiento sobre la aplicación del software PROMAX, en el cual se realizó el procesamiento de los modelos realizados en 2D. Este procesamiento de los datos sintéticos incluye un apilado bruto y una migración en tiempo de cada uno de los *gathers* adquiridos sobre cada modelo en NORSAR-2D.

El procesamiento fue realizado de acuerdo a los siguientes pasos:

**Carga de Datos:** se inició importando los sismogramas sintéticos en formato SEG-Y creados en el trazador de rayos. Luego, en la herramienta de procesamiento se les llama a través de un **Disk Data Input** para que la información quede guardada dentro de la aplicación.

**Geometría:** Esta parte es crucial en el procesamiento de datos sísmicos, pues consiste en añadir las coordenadas de fuentes y receptores al dato sísmico, además es necesario crear o importar un archivo de patrones el cual relaciona los receptores usados en cada disparo junto con la distribución espacial y geométrica.

**Análisis de Velocidad:** Debido a que los datos a procesar son sintéticos, después de la carga de la geometría no se aplicaron mayores filtros, solo una ganancia AGC de 1000 y un filtro pasabandas para cortar frecuencias muy bajas y también las mayores a 72 Hz. La parte central del análisis de velocidad realmente es determinar las funciones de velocidad en función del tiempo, en varias familias CMP a lo largo de la sección sísmica.

**Apilado de las Trazas sísmicas:** Es la suma de las Trazas sísmicas provenientes de una misma familia CMP, las cuales fueron picadas anteriormente en el análisis de Velocidad y con esto se pretende simular una adquisición con cero offset, una

vez apilada las trazas se obtiene una primera sección sísmica, la cual esta aun en tiempo.

**Migración Pre apilada en Tiempo:** Es el proceso en el cual se llevan las trazas a su posición verdadera y se colapsan las difracciones, el método de migración más común es el algoritmo Kirchoff el cual a su vez utiliza la teoría de rayos para reubicar los eventos buzantes en el subsuelo, pero depende claro del modelo de velocidad usado y la apertura de migración para obtener una imagen lo más cercana a la realidad geológica encontrada en profundidad.

- **Aprendizaje y Uso de ThrustLine para PSDM**

ThrustLine es un paquete de software utilizado para el procesamiento de estructuras complejas asociadas con tectónica y superficies de topografía irregular, el cual a diferencia del PROMAX realiza PSDM.

Carga de datos: se importan los PSTM realizados en PROMAX al ThrustLine, en formato SEG-Y, y se continúa con el siguiente flujo:

**GEO:** Creación del archivo. Datos de la geometría de la curva de receptores para luego grabar esta geometría en los datos de entrada creados inicialmente con el trazador de rayos. (Figura 10).

Figura 8. Carga de datos en la herramienta Thrustline.

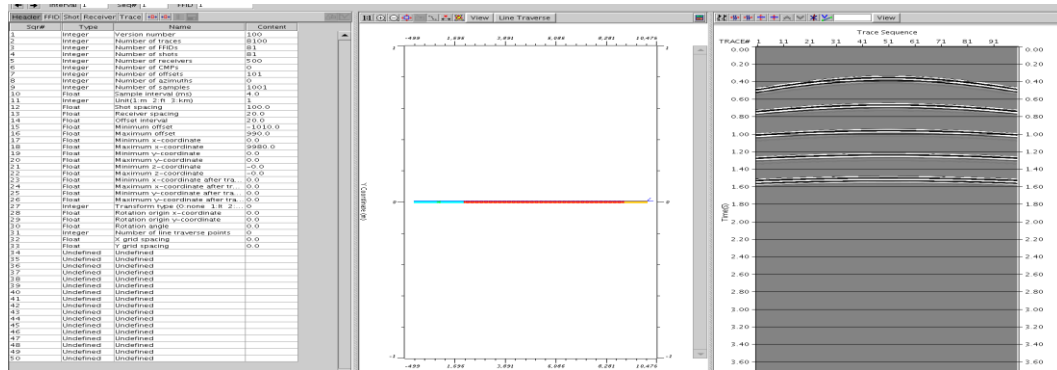
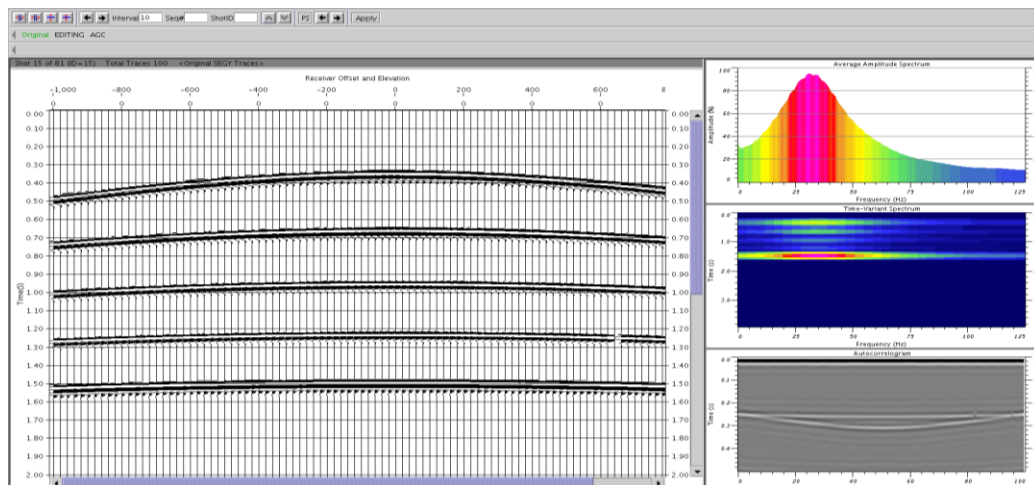


Imagen del *header* para los datos sintéticos a cargar en la herramienta de migración. En esta etapa se verifican las geometrías del SEG-Y para modelar el procesamiento a partir de estas coordenadas iniciales.

**PREAPILADO:** este modulo del software aplica el procesamiento en sí, es decir, aplica los filtros y técnicas de mejora de la imagen, para nuestros datos sintéticos solo se aplicaron Balanceo de los datos, Edición de trazas muestras, filtrado de frecuencias altas, Control de ganancia de Amplitudes y blanqueamiento Espectral. (Figura 11)

Figura 9. Procesamiento convencional básico aplicado a los datos sintéticos. Dentro de los filtros aplicados a los datos sísmicos sintéticos estuvo un control de ganancia y un filtro pasabandas que cortaba la frecuencias por encima de 100Hz.



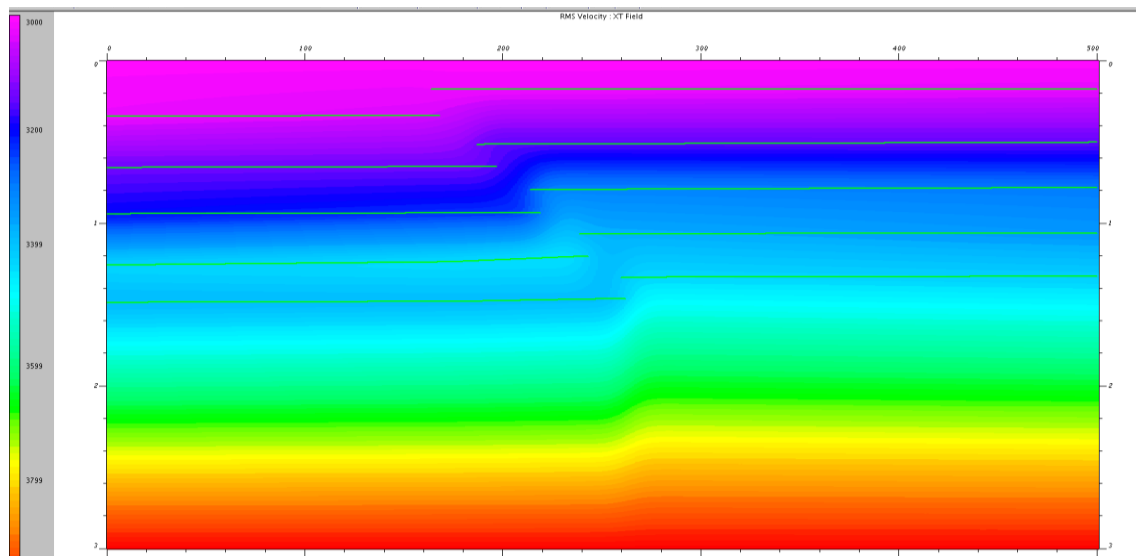
Fuente: autor.

Imagen del modulo de pre-procesamiento donde se editan las trazas y se hacen análisis de amplitud, debido a la calidad de los datos sintéticos solo se les aplicaron filtros pasabanda entre 4-8Hz y 100-120 Hz, además de una ganancia de amplitudes de 1000.

**VTCUBE:** a partir de los datos obtenidos en el proceso anterior se apila usando el promedio de las velocidades estimadas y el datum al cual se van a apilar las trazas, para los datos sintéticos usados en este trabajo el datum fue cero. Al apilar las trazas usando el datum estimado el programa calcula un modelo de velocidad inicial.

**RMSVEL:** Estas velocidades extraídas de la sísmica son usadas para crear un modelo inicial de velocidad. Las velocidades RMS son calculadas a partir de las trazas apiladas en la sísmica y son confiables cuando la imagen sísmica tiene una buena relación señal/ruido (Velázquez, 2008). Para el caso de los datos sintéticos el modelo de velocidad RMS se refina picando los horizontes visibles en la imagen apilada y usando horizontes en tiempo desplegados. (Figura 12).

**Figura 10. Modelo de velocidad RMS. Este fue el modelo de velocidad calculado a partir de la sísmica sintética que fue usado en la migración en tiempo de los datos.**



Fuente: autor.

Imagen del modelo de velocidades RMS obtenidos a partir de la sección apilada. En este modulo del flujo de procesamiento se pican las velocidades sobre los horizontes vistos en la imagen superpuesta al modelo de velocidades.

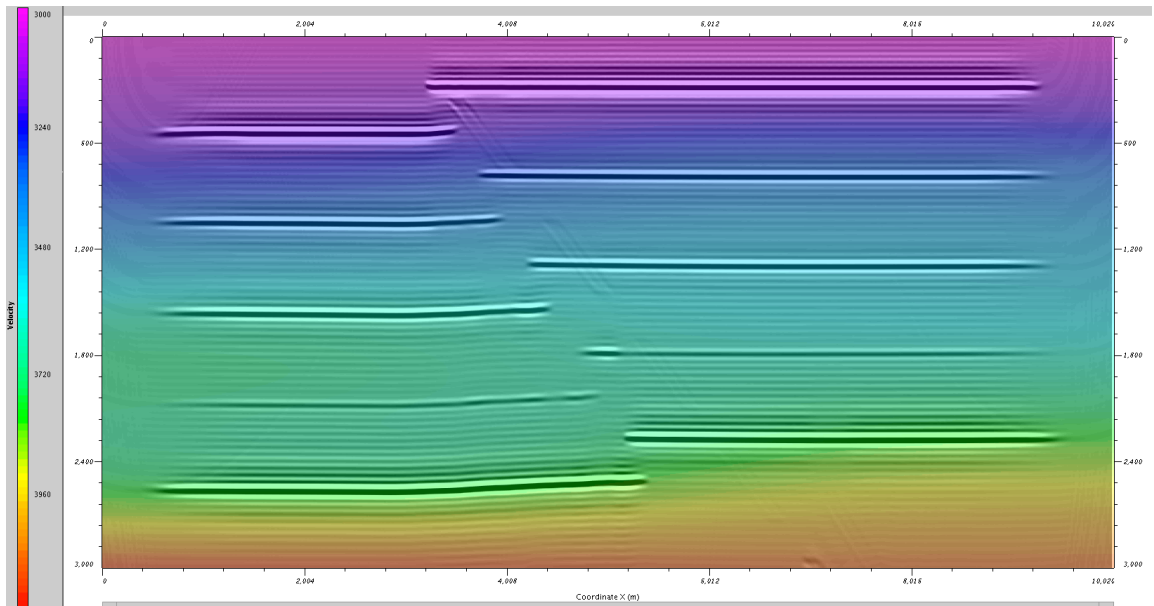
**PSTM:** El proceso de migración consiste en llevar los horizontes buzantes a su verdadera posición y hacer colapsar los eventos difractantes a partir de la ecuación de onda (Yilmaz, 2001). Una vez se obtiene un modelo de velocidad aproximado se migran los datos a su verdadera posición usando algoritmos que implementan la ecuación de onda y la teoría de rayos.

Para migrar los datos en tiempo se generaron tablas de velocidad creadas a partir de los horizontes encontrados en la imagen sísmica, además se tenía en cuenta en offset máximo usado en el trazador de rayos sobre cada modelo, pues esta distancia máxima entre fuente y receptor sirve para calcular la apertura de migración, es decir el camino máximo que tendrán los rayos para llevar los eventos buzantes a su correcta posición, esta apertura de migración se calcula multiplicando la tangente del ángulo de buzamiento por la profundidad de los eventos, así que un horizonte con buzamientos mayores de 45 grados y 5 kilómetros de profundidad necesitara por lo menos 5 kilómetros de offset para asegurar la cobertura en datos suficiente para lograr una correcta migración.

**VELMOD:** ofrece una nueva capacidad para escanear subsuelo modelo de velocidad de intervalo a partir de cerca de una solución de superficie tomografía. Después de aplicar la función descrita en pre apilado, se selecciono abrir el intervalo de velocidad de modelo en Archivo y se busco el modelo de salida del pre apilado, para seleccionar y cargar el Datum archivo. A partir de este modelo de velocidades intervalicas que es aplicada sobre la sección migrada se aplican además una serie de procesos posta pilado útiles para mejorar la calidad de la imagen y la continuidad de los reflectores, tales como filtros F-K y filtros

pasabanda así como conversiones tiempo a profundidad y viceversa para hacer un QC a los datos. (Figura 13).

**Figura 11. Modelo de velocidad intervalica. A partir del modelo de velocidad inicial y las correcciones estáticas trabajadas en el modelado sintético se obtuvo el siguiente modelo de velocidad para los modelos con gradiente 0.4**



Fuente: autor.

Modelo de Velocidades de Intervalo a partir de los horizontes picados en la de migración. Este modelo de velocidad es el usado para la conversión a profundidad de la imagen sísmica migrada en tiempo.

**PSDM:** Ahora se puede migrar de la verdadera fuente y la ubicación del receptor utilizando el modelo de velocidad de intervalo de VELMOD. Un PSDM es un algoritmo que usa la ecuación de onda y la teoría de rayos para convertir una sección sísmica a profundidad a partir de un modelo suavizado de velocidades intervalicas. Gracias a que este proceso no trabaja con los tiempos de viajes es posible generar imágenes sin los efectos de pull-up, pero como se verá en los

resultados es necesario tener un offset suficiente para que el algoritmo migre los datos a sus respectivas posiciones.

## **2.4 ETAPA 4. METODOLOGÍA PARA EL RECONOCIMIENTO DE SOMBRAS DE FALLA.**

### **Generación de Tablas de *Pull-up***

En la generación de sombra de falla, se forman *pull-up* o *pull-down* que dan la impresión de anticlinales; en esta etapa se midieron estas curvaturas para cada uno de los parámetros desarrollados en la etapa de modelado, para obtener el comportamiento particular que tienen las *curvaturas* de acuerdo al parámetro tenido en cuenta. Las tablas que se realizaron midieron tiempo vs longitud para cada modelo trazado usando los datos sintéticos.

Estas tablas hacen parte de un primer resultado de este trabajo y genero una guía aproximada del comportamiento de las sombras de falla debido a cada una de su característica geológica estudiada.

### **Análisis de las tablas de curvatura y uso en datos reales**

Una vez realizadas las tablas se realizaron las respectivas graficas de curvatura y fueron analizadas para obtener los resultados acerca de la influencia que generan los parámetros de ángulo de plano de falla, el gradiente de velocidad y el offset máximo, sobre la generación de sombras de falla.

Se realizaron tres tipos de tablas:

1. Tablas de curvatura generadas a partir de los datos apilados y migrados en tiempo de los datos sintéticos (modelos en profundidad con trazado de rayos)
2. Tablas de curvatura generadas a partir de los datos sintéticos llevados a PSDM.

3. Tablas de curvatura de datos reales, utilizando datos de la cuenca Valle Medio del Magdalena (Bituima) y cuenca del Piedemonte Llanero (Coporo) en tiempo donde se puede apreciar el efecto de sombra de falla.

### 3. DATOS SINTÉTICOS

#### 3.1 MODELAMIENTO DE DATOS SINTÉTICOS

De acuerdo a la metodología acordada, se realizaron diecisiete modelos, los cuales fueron el resultado de variar los siguientes parámetros: ángulo del plano de falla, salto de falla, el gradiente de velocidad y el offset máximo, con diferentes valores; los cuales se relacionan a continuación:

El ángulo de Falla ( $\theta$ )

ANGULO DE FALLA ( $\theta$ )				
15	30	45	60	75

Salto de Falla ( $\Delta S$ ); distancia en metros.

SALTO DE FALLA ( $\Delta S$ )	
250	500

Gradiente de Velocidad ( $\nabla$ )

GRADIENTE DE VELOCIDAD ( $\nabla$ )	
0,4	1

Offset Máximo ( $X$ )

OFFSET MAXIMO ( $X$ )			
1000	2000	3000	4000

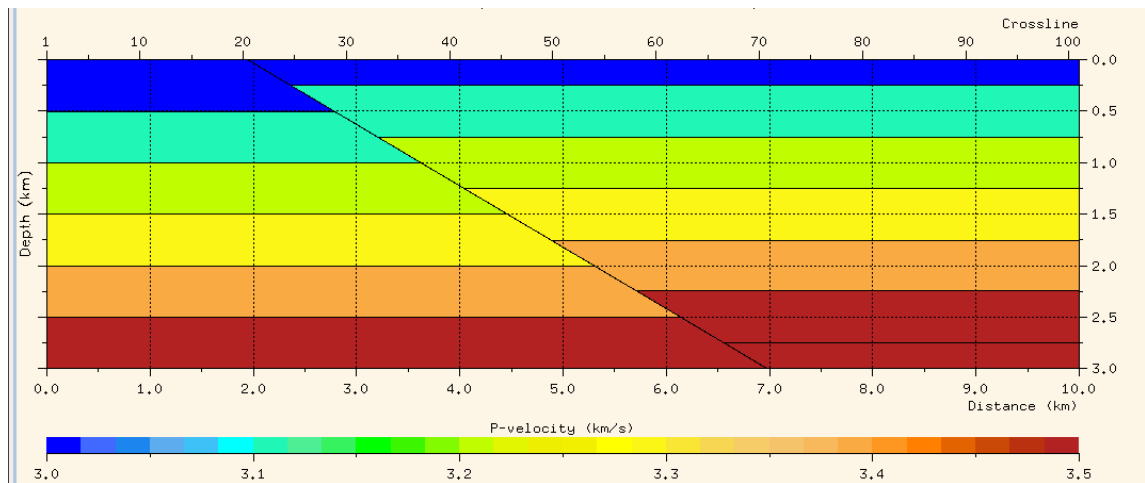
En base a los parámetros y valores señalados, se identificaron cada uno de los modelos, por medio de la siguiente tabla:

**Tabla2.** Listado de Modelos. Identificación dada a cada uno de los modelos, que contienen los diferentes parámetros.

Modelo	$\theta$	$\Delta S(m)$	$\nabla$ [m/s]/m	X(m)
1	15	250	0.4	3000
2	15	250	1	3000
3	30	250	0.4	3000
4	30	250	1	3000
5	45	250	0.4	3000
6	45	250	1	3000
7	60	250	0.4	3000
8	60	250	1	3000
9	75	250	0.4	3000
10	75	250	1	3000
11	15	500	0.4	3000
12	15	500	1	3000
13	30	500	0.4	3000
14	30	500	1	3000
15	45	500	0.4	3000
16	45	500	1	3000
17	60	500	0.4	3000
18	60	500	1	3000
20	45	250	0.4	1000
21	45	250	0.4	2000
22	45	250	0.4	3000
23	45	250	0.4	4000

Por medio del software NORSAR, se efectuaron los modelos, para generar una adquisición sintética. (Figura 7).

**Figura 12. Modelo inicial en profundidad con gradiente de velocidad 0.4 ([m/s]/m). La velocidad inicial en el modelo es 3000m/s y la final 4000m/s.**

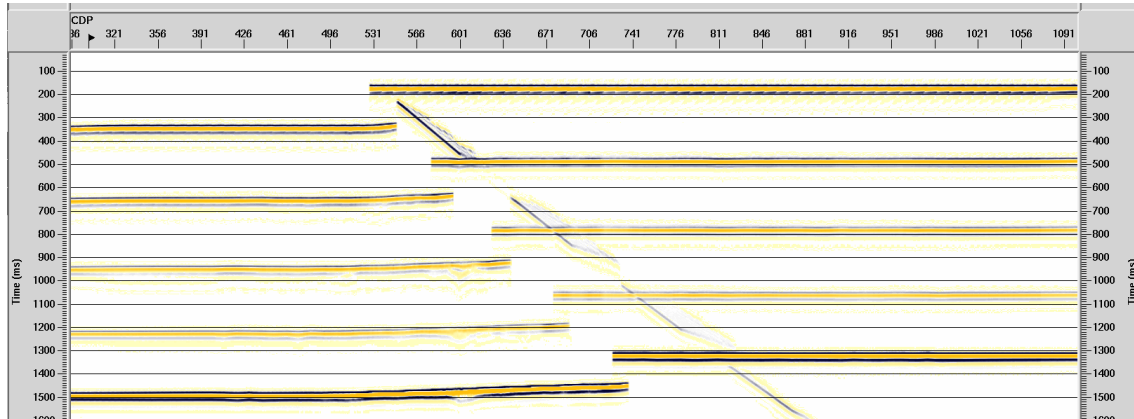


Fuente: autor.

Una vez obtenidos los sismogramas sintéticos correspondientes a cada uno de los modelos diseñados se cargaron y procesaron estos sintéticos, inicialmente usando el software PROMAX y luego fueron procesados utilizando otra herramienta que maneja distintos algoritmos como tomografía no paralela y modelado de estáticas para comprobar que los valores de curvatura obtenidos en cada imagen sísmica no dependieran de la herramienta usada.

En esta etapa de procesamiento en tiempo se generaron dos tipos de imagen, apiladas y migradas. (Figuras 13 y 14).

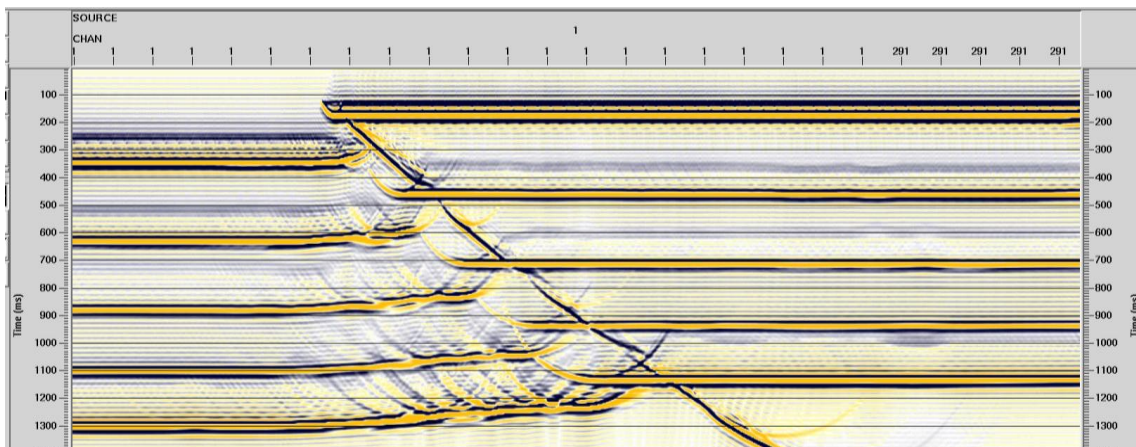
**Figura 13. Sección apilada en tiempo. Usando un picado de velocidades sobre el espectro de amplitudes en PROMAX aplicado al modelo de la figura 12 se obtuvo la imagen mostrada arriba.**



Fuente: autor.

Antes de migrar las reflexiones se aplicaron ciertos filtros para que la imagen mejorara la calidad, además se hicieron pruebas de apertura de migración, buzamientos y offset en cada migración para verificar la corrección de las unidades a resaltar en el análisis. (Figura 16).

**Figura 14. Sección Migrada en tiempo de la figura 12. Se nota la corrección en la posición de las fallas pero el efecto de los sag en las reflexiones de los horizontes se debe a la apertura de migración escogida en la migración de los datos.**

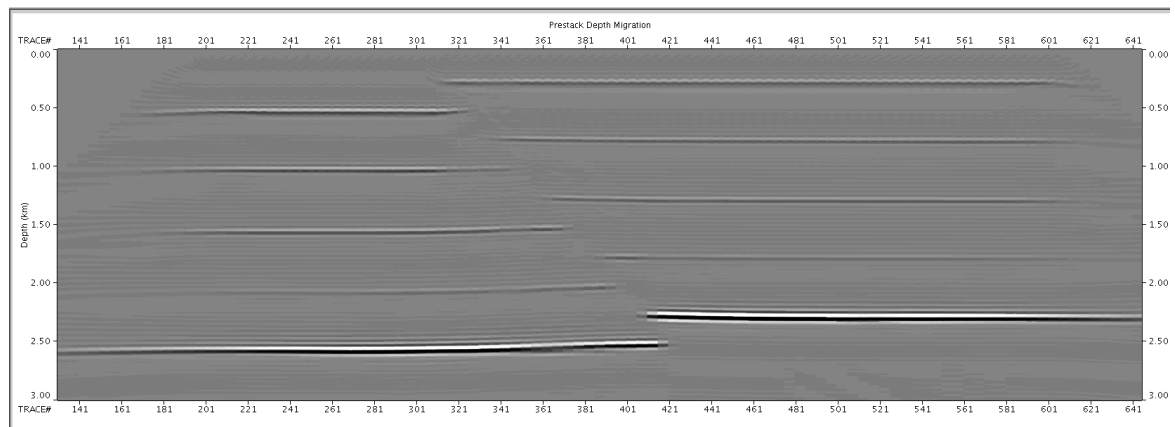


Fuente: autor.

Imagen migrada en tiempo. Note el efecto de las sonrisas o corbatines debidos a la falta de apertura de migración y la migración de buzamientos de alto paso. También fue posible notar que reflectores con buzamientos por encima de 30 grados difícilmente pueden ser migrados a su respectiva posición con el algoritmo de Kirchhoff migration.

Finalmente se migraron a profundidad para verificar la corrección de los horizontes para cada parámetro estudiado y con la variación del offset máximo de adquisición y su apertura de migración. (Figura 17).

**Figura 15. Sección migrada en profundidad de la figura 12. El efecto de corrección sobre los horizontes es claro. Es esta sección el efecto de curvatura tiende a desaparecer en los horizontes someros. También es posible marcar la falla a partir de los *cutoff* de los horizontes.**

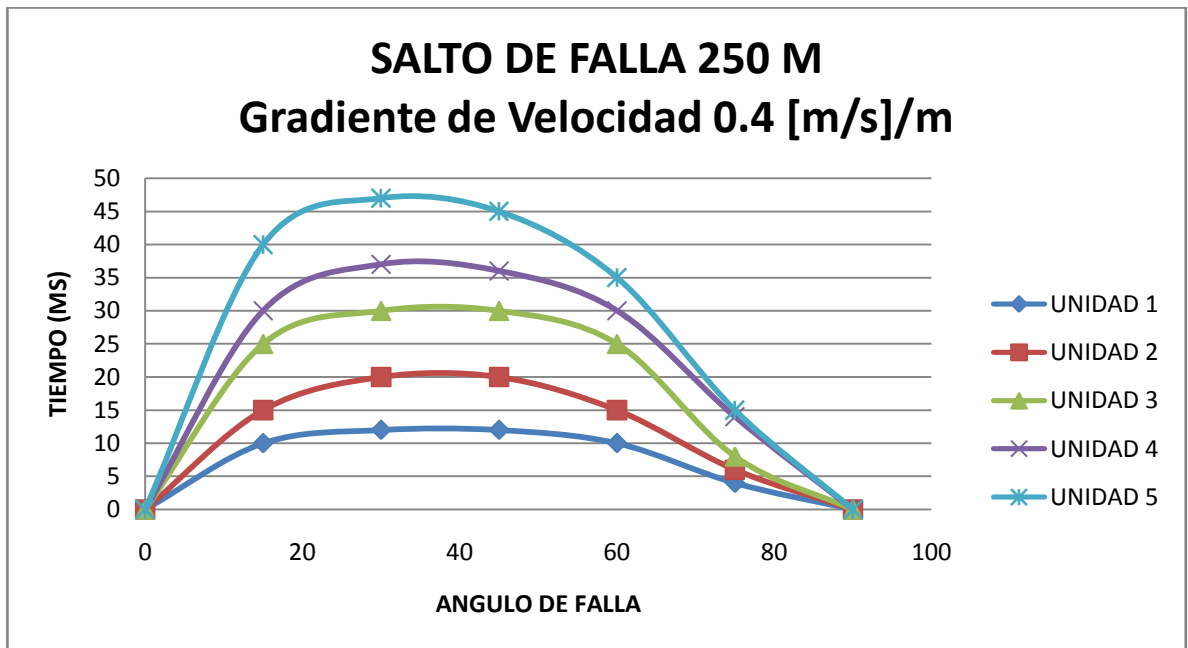


Fuente: autor.

Imagen sísmica del PSDM del modelo sintético. Note el efecto de aplanado de los horizontes en las cercanías a la falla en el bloque yacente.

### 3.2 GRÁFICAS DE EFECTOS PULL-UP EN DATOS SINTÉTICOS.

Figura 16. Grafica Angulo de falla vs Tiempo. Representación de las curvaturas del efecto pull-up con un gradiente de velocidad de 0.4 en la vertical, por lo cual se puede inferir que el mayor efecto pull-up se da entre los ángulo de 30 y 45 grados a diferentes profundidades para el caso de secciones apiladas en tiempo. Este resultado se puede explicar debido al área bajo la curva generada por la falla.

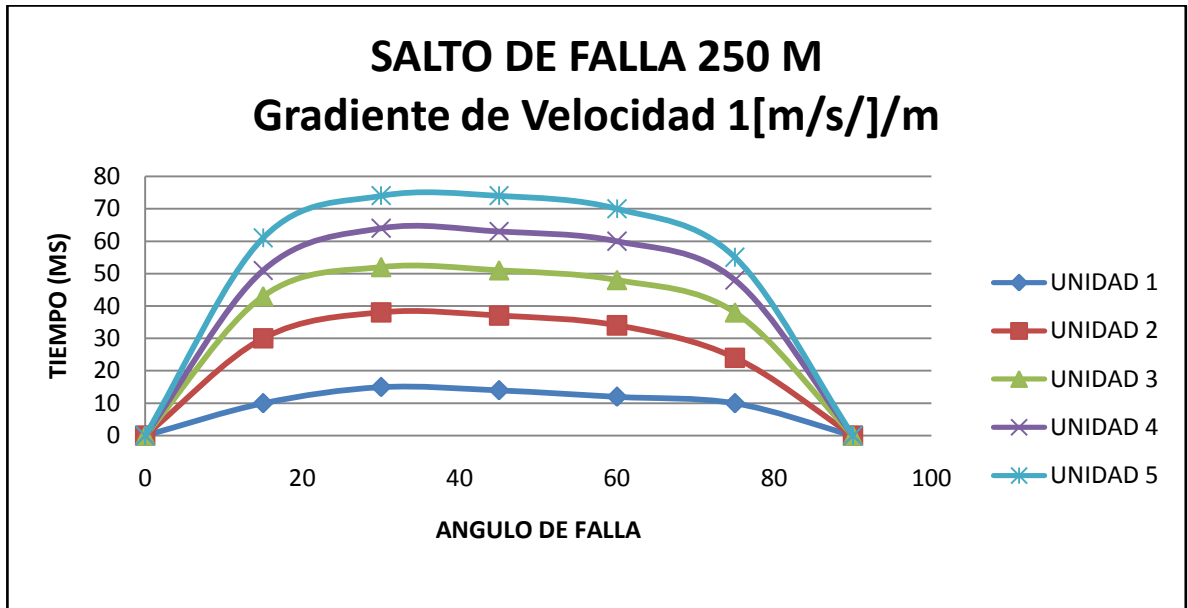


Fuente: autor.

La Figura 16 es el resultado de medir la curvatura o pull-up generada por el efecto de la sombra de falla a todos los horizontes generados en los modelos 1, 3, 5, 7 y 9 de la tabla 2. El salto de falla que se usó fue 250 m y el espesor de cada capa son 500 metros.

Para los datos modelados se encontró que el efecto de curvatura es más agudo entre los ángulos de 30 y 45 grados, este efecto además, es más claro en las unidades más profundas, la explicación del resultado en los pull-up es que el área que atraviesa el rayo es mayor en las zonas de sombra formadas por los ángulos de buzamiento entre 30 y 45 grados.

**Figura 17. Grafica Angulo de falla vs Tiempo. Representación de las curvaturas del efecto pull-up con un gradiente de velocidad de 1 en la vertical, por lo cual se puede inferir que el mayor efecto pull-up se da entre los ángulo de 30 y 45 grados a diferentes profundidades para el caso de secciones apiladas en tiempo. Este resultado se puede explicar debido al área bajo la curva generada por la falla.**

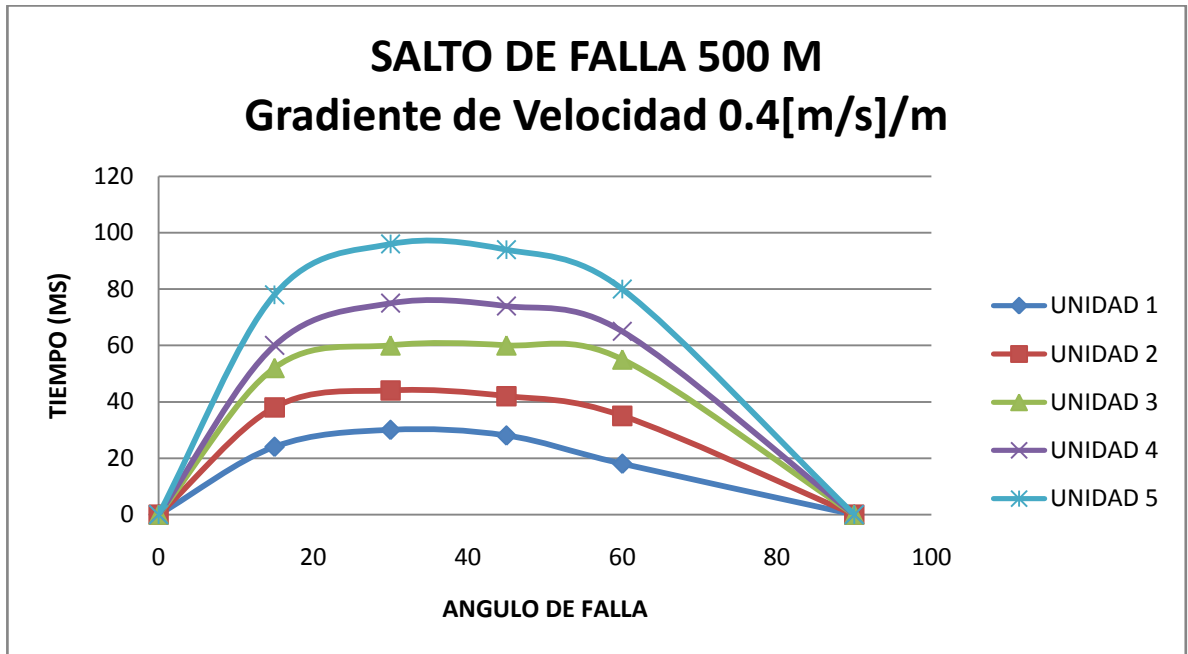


Fuente: autor.

La Figura 17 es el resultado de medir la curvatura o pull-up generada por el efecto de la sombra de falla a todos los horizontes generados en los modelos 2, 4, 6, 8 y 10 de la tabla 2. El salto de falla que se uso fue 250 m y el espesor de cada capa son 500 metros.

Nuevamente, para los datos modelados se encontró que el efecto de curvatura es más agudo entre los ángulos de 30 y 45 grados, esta grafica es congruente con la figura 16 y está mostrando que en fallas inversas típicas de Colombia, con ángulo entre 30 y 45°, debido al trayecto más lento que deben recorrer los rayos de la onda sísmica bajo la falla, es muy probable encontrar fuertes efectos de pull-up.

**Figura 18. Grafica Angulo de falla vs Tiempo. Representación de las curvaturas del efecto pull-up con un gradiente de velocidad de 0,4 en la vertical y un salto de falla de 500m. Los resultados de pull-up son consistentes con las dos graficas anteriores donde el mayor efecto pull-up se da entre los ángulo de 30 y 45 grados a diferentes profundidades para el caso de secciones apiladas en tiempo.**



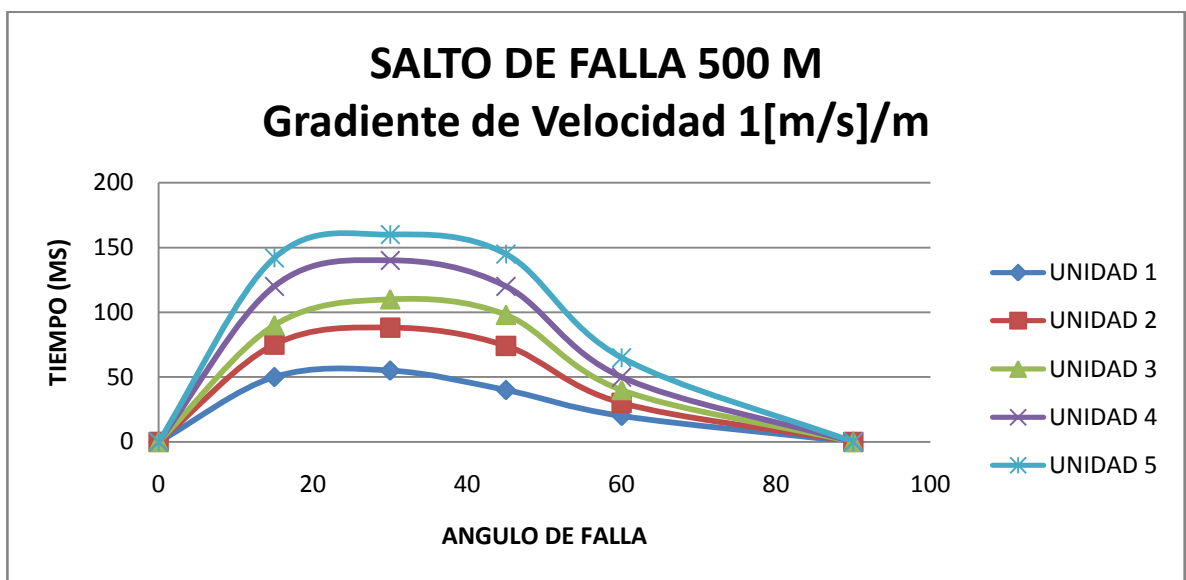
Fuente: autor.

La Figura 18 es el resultado de medir la curvatura o pull-up generada por el efecto de la sombra de falla a todos los horizontes generados en los modelos 11, 13, 15, 17 y 19 de la tabla 2. El salto de falla que se uso fue 500 m y el espesor de cada capa son 500 metros.

Nuevamente, para los datos modelados se encontró que el efecto de curvatura es más agudo entre los ángulos de 30 y 45 grados, esta grafica es congruente con las figuras 16 y 17, lo cual muestra que en fallas inversas típicas, con ángulo entre 30 y 45°, debido al trayecto más lento que deben recorrer los rayos de la onda sísmica bajo la falla, es muy probable encontrar fuertes efectos de pull-up en la sísmica, los cuales serán mayores con el aumento del gradiente de velocidad vertical presente en la cuenca.

Comparando las graficas 16 y 18, el efecto pull-up es doblado en valor, solo variando el gradiente vertical de velocidad, lo cual muestra que mayores velocidades afectaran directamente este fenómeno.

**Figura 19. Grafica Angulo de falla vs Tiempo en sección Stack. Representación de las curvaturas del efecto pull-up con un gradiente de velocidad de 1 en la vertical y un salto de falla de 500m. Los resultados de pull-up son consistentes con las graficas anteriores donde el mayor efecto pull-up se da entre los ángulo de 30 y 45 grados a diferentes profundidades para el caso de secciones apiladas en tiempo.**

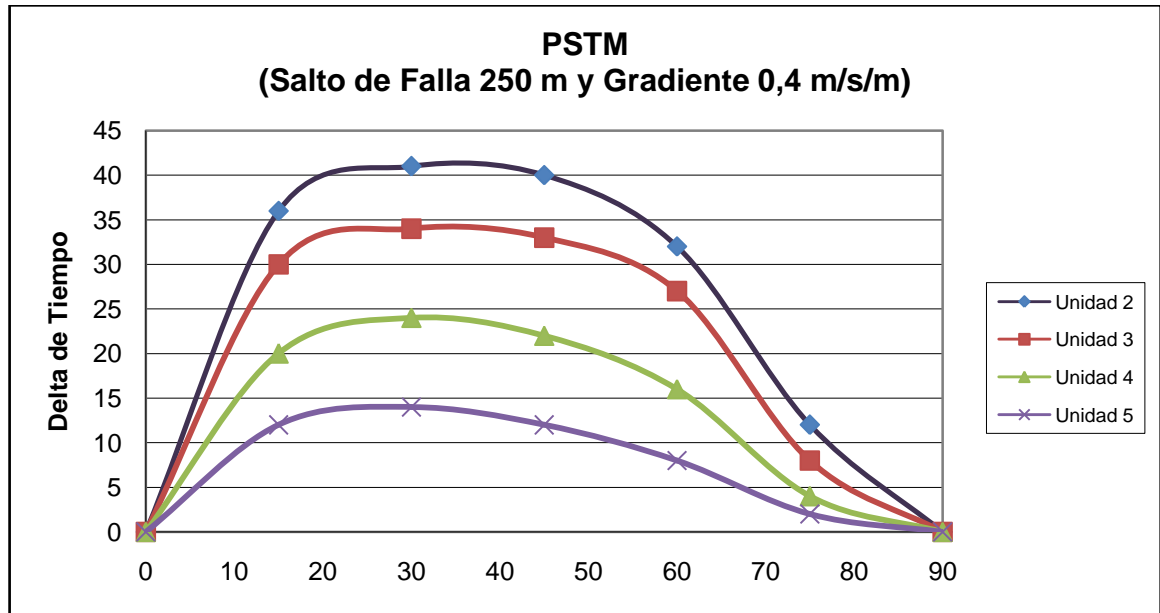


Fuente: autor.

La Figura 19 es el resultado de medir la curvatura o pull-up generada por el efecto de la sombra de falla a todos los horizontes generados en los modelos 12, 14, 16, 18 y 20 de la tabla 2. El salto de falla que se uso fue 250 m y el espesor de cada capa son 500 metros.

Nuevamente, para los datos modelados se encontró que el efecto de curvatura es más agudo entre los ángulos de 30 y 45 grados, esta grafica es congruente con las anteriores y está mostrando que en fallas inversas, mayores velocidades y ángulos entre 30 y 45, generaran efectos de pull.up en los horizontes bajo las estructuras de interés.

Figura 20. Grafica Angulo de falla vs Tiempo en PSTM. Representación de las curvaturas del efecto pull-up con un gradiente de velocidad de 0,4 en la vertical,



Fuente: autor.

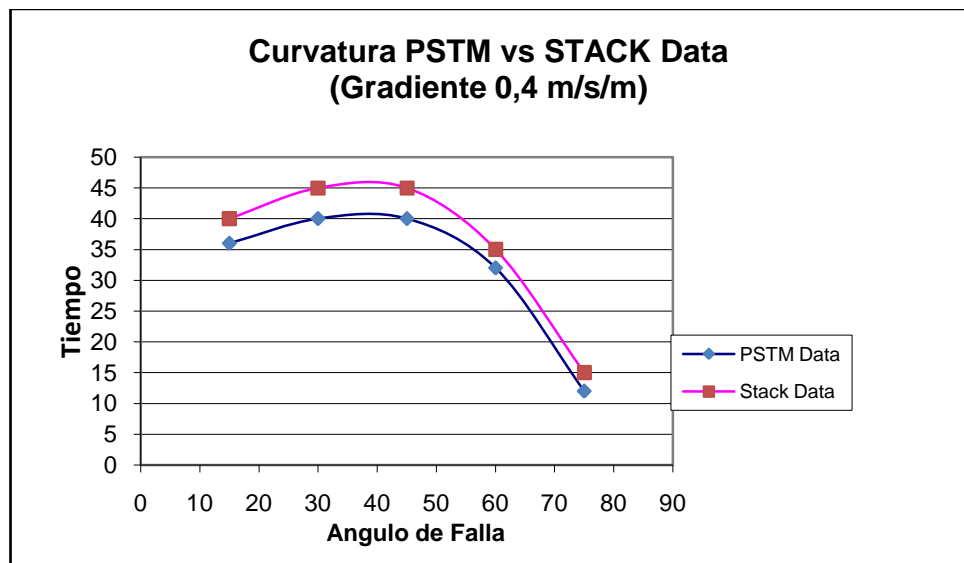
La Figura 20 es el resultado de migrar en tiempo los modelos representados en la grafica 16. Dando valores de pull-up menores que los medidos en las secciones apiladas.

La migración en tiempo soluciona pobremente el efecto pull-up encontrado en las secciones apiladas medidas en las graficas 16 – 19 más notorio en los horizontes someros que en los profundos. Una explicación a estos resultados esta en el efecto de la apertura de migración usada en la migración de los datos sísmicos. Para que el algoritmo de migración lleve los rayos a su posición inicial necesita un valor de la apertura de migración suficiente para que la distancia recorrida desde la fuente al receptor sea la correcta. (Yilmaz, 2002).

El hecho que la migración en tiempo corrija el efecto en los horizontes someros y no en los profundos se debe a que el offset utilizado para adquirir los datos fue

igual al horizonte más profundo a cartografiar por lo tanto, la apertura de migración usada fue igual al offset, esto mostraría que el offset de adquisición en áreas de estructura compleja o dudas en las mismas, se debe adquirir la información sísmica con offset mayores a las distancias más profundas a cartografiar.

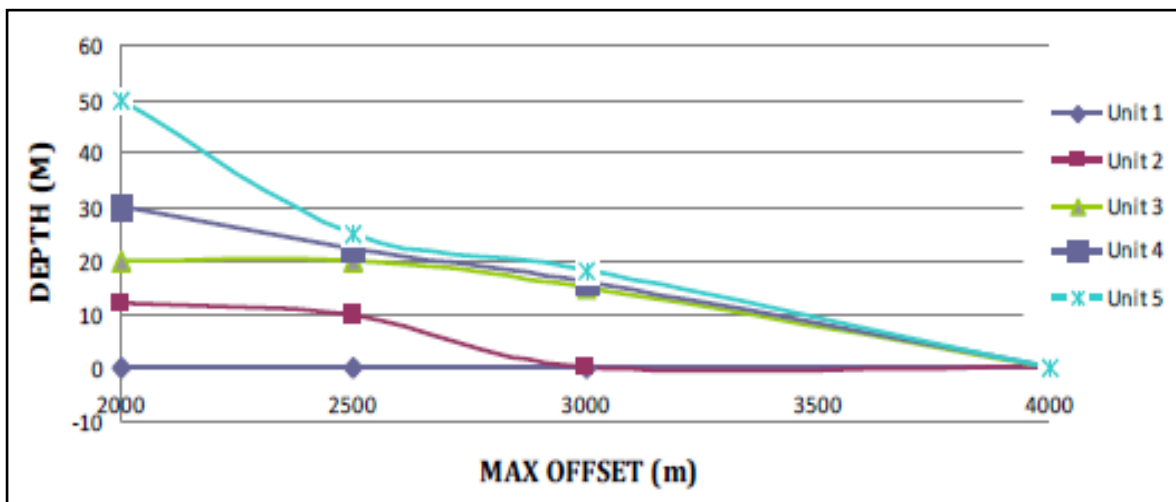
**Figura 21. Grafica de pull-up PSTM vs Stack. Representación de las curvaturas del efecto pull-up medidas en las secciones apiladas y las migradas en tiempo con un gradiente de velocidad de 0,4 en la vertical.**



Fuente: autor

La Figura 21 es el resultado de medir la curvatura o pull-up generada por el efecto de la sombra de falla a todos los horizontes generados en las secciones apiladas (Stack) y en las secciones migradas en tiempo (PrSTM)

Figura 22. Efecto Pull-up en PSDM.



Fuente: autor.

Los valores de esta tabla de curvatura fueron obtenidos a partir de la variación del offset máximo de adquisición y desde luego la apertura de migración usada en el algoritmo de conversión a profundidad. Este análisis muestra que es necesario un offset igual o mayor a la máxima profundidad a cartografiar si se quiere tener una corrección exacta de los reflectores, es decir el efecto de pull-up aun se puede mantener en la migración a profundidad si la apertura de migración no es lo suficientemente grande como para migrar el trazado de los rayos afectados por la anomalía de velocidad.

#### 4. ANALISIS EN DATOS REALES

Los datos tenidos en cuenta para el estudio de sombras de falla corresponden al Campo Bituima, correspondiente a la Cuenca del Valle Medio del Magdalena y a la región Medina, de la cuenca Piedemonte Llanero.

**Ejemplo Real, Caso Medina:** A partir de los datos VSP (tabla 3), correspondiente a un pozo cercano a la línea sísmica analizada en el presente trabajo (Figura 18), se calculo el gradiente de velocidad presente en el área de Medina. Para el cálculo del gradiente se tomaron las bases de las unidades cartografiadas en la interpretación y se les asignaron sus respectivas velocidades intervalicas promedio, seguido a esto, se calculo el diferencial de velocidad con un paso de 1 km hasta completar la profundidad de 3km (igual que en los modelos sintéticos) así se definió que para el área **el gradiente de velocidad es aproximadamente 381.**

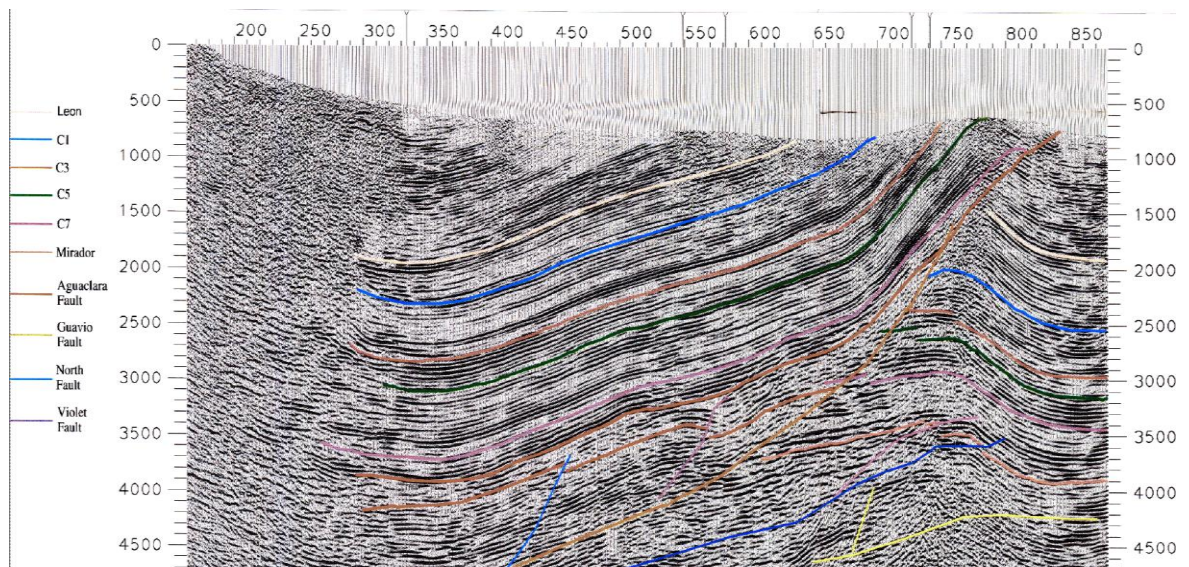
**Tabla 3. Valores de profundidad y velocidad en registros VSP de la cuenca Medina.**

<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>VELOCIDAD PROMEDIO (m/s)</b>	<b>HORIZONTE</b>
702	4092	C2
1080	3318	C3
1175	3444	C4
1854	3841	C5
2195	3497	C6
2643	3835	C7
2844	3876	C6F
3092	4319	C5FW

**Intervalo en profundidad: 2624m; Diferencia de Velocidad: 1000m/s**

El buzamiento de la falla Guavio tienen un valor de  $40^\circ$ , el cual fue comparado con el modelo sintético Modelo5\_f45\_g0.4, ya que el gradiente de velocidad establecido en el área fue de 400 y el buzamiento de la falla a analizar es  $45^\circ$  se comparo la curvatura en tiempo de la imagen sísmica en Medina con el Modelo5\_f45\_g0.4.

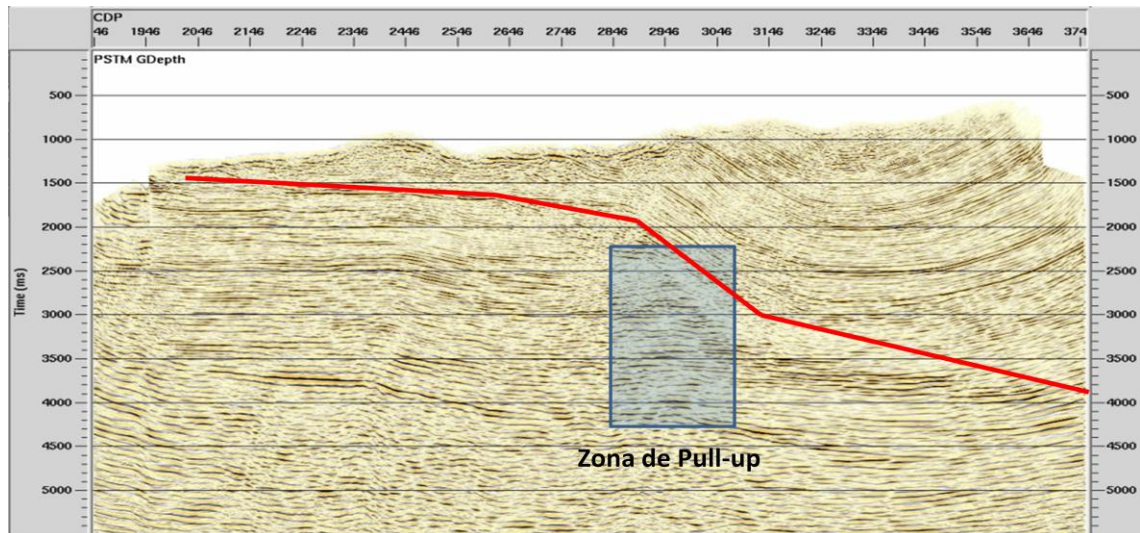
**Figura 23. Imagen sísmica migrada en tiempo cartografiada de la cuenca medina. Bajo la falla de alto ángulo se puede notar la falsa estructura anticlinal.**



Fuente: Mora, 2010.

**Ejemplo Real, Caso Bituima:** para validar los valores de pull-up obtenidos a través del modelado sintético se midió la diferencia en tiempo de otra área conocida por presentar este tipo de pifia sísmica además de tener problemas en la calidad de la imagen lo que hace difícil la cartografía continua de reflectores debajo de la zona de falla, la cual a su vez es de interés exploratorio. (Figuras 19 y 20)

**Figura 24. Imagen sísmica migrada en tiempo en el área de Bituima .Tipo Kirchhoff; el cuadro sombreado muestra la zona de pull-up.**



Fuente: Grupo de geofísica, ECOPEPETROL, 2010.

En las figuras 22 y 23 se puede interpretar erróneamente estructuras de potencial exploratorio debido al efecto ejercido por la sombra de falla.

A partir de estas falsas estructuras reconocidas en tiempo se propuso comparar el efecto con las tablas definidas en el modelado sintético.

## 5. RESULTADOS

Los primeros resultados obtenidos en el presente trabajo fueron los valores de curvatura medidos en cada una de las secciones sísmicas modeladas ya fuera Apilado o migración Kirchhoff en tiempo de los datos sintéticos que luego fueron migrados a profundidad.

El producto final de este trabajo es obtener unas tablas que permitan estimar los riesgos de pull-up en determinar áreas exploratorias, con este fin se compararon los valores medidos de pull-up en áreas de exploración colombianas en donde dicho efecto ha sido comprobado (Andrés Mora, comunicación verbal) con los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

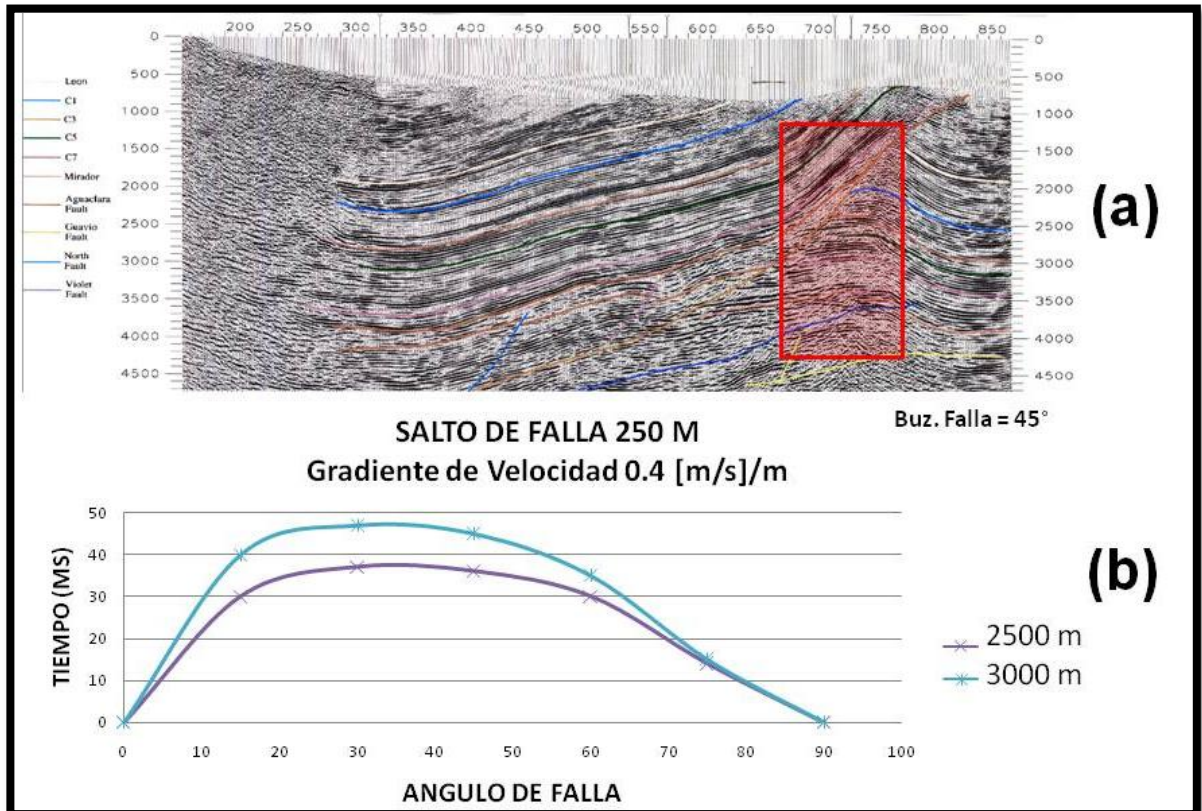
### 5.1 CASO BLOQUE MEDINA (CUENCA LLANOS ORIENTALES).

A continuación se muestran las imágenes en PrSTM y PrSDM (usando algoritmo de Kirchhoff) del bloque Bituima obtenidas por cortesía del grupo de Geofísica del ICP-ECOPETROL y que muestran claros efectos de pull-up. (Figura 24).

Como se describió en el capítulo anterior, las características estructurales de la sección a analizar en la cuenca Medina constan de una falla inversa de 45° grados aproximadamente con un salto de falla de 300 metros (falla del Guavio), a partir de los datos de velocidad tomados de un pozo en el área se estimó un gradiente de velocidad de 0,4 [(m/s)/m] y con estructuras de interés hasta a 3000 metros de profundidad. Una vez montada la sección sísmica migrada en tiempo del área se midió la curvatura de los horizontes bajo la falla y se encontró para el horizonte a 3000 ms una curvatura en tiempo con respecto al tiempo de su equivalente horizontal de 60 ms. Este valor fue comparado con el resultado obtenido en el modelado sintético.

En ambos casos, real y sintético, el efecto de curvatura en la sección en tiempo fue aproximadamente 60 ms. Validando las primer grafica de pull-up (figura 25).

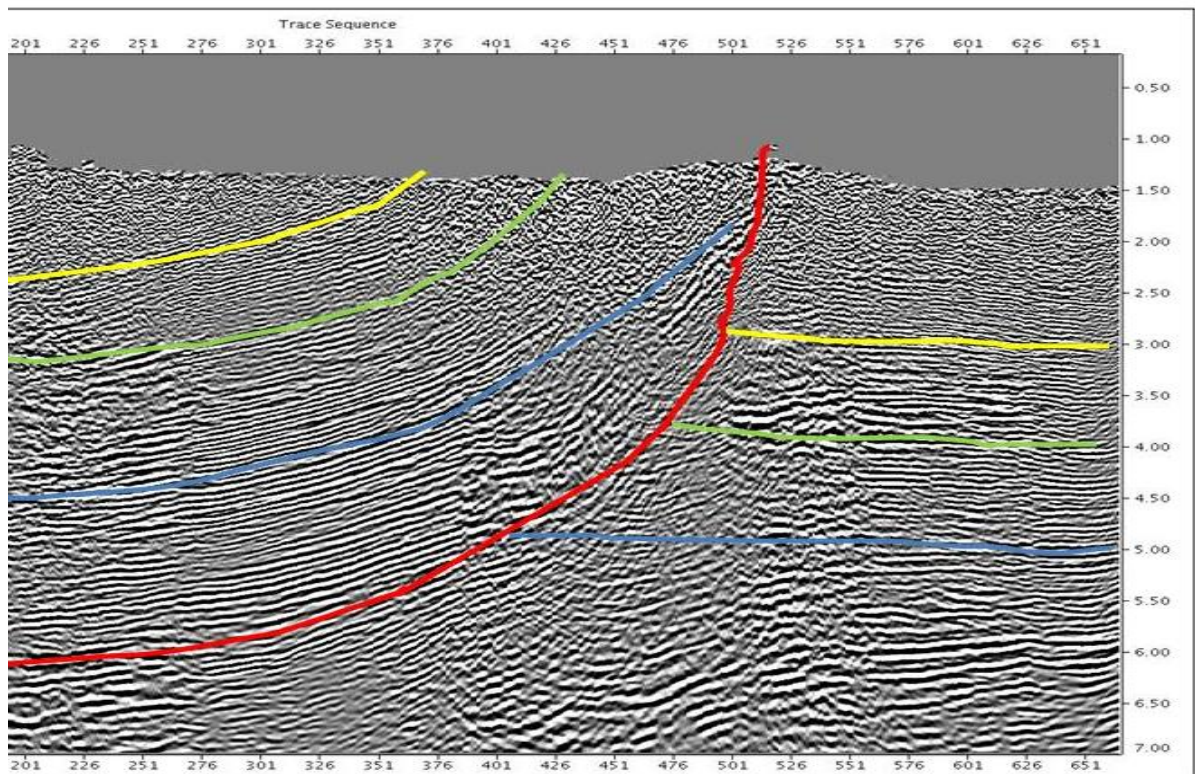
**Figura 25. Análisis del pull-up en el bloque Medina. En (a), la imagen sísmica interpretada en tiempo. (b) la tabla de pull-up cercana a las características estructurales del área para el análisis. La curvatura en ambos es de 60 ms a una profundidad de 3000 metros.**



Fuente: ICP-ECOPETROL

El efecto de pull-up es comprobado una vez interpretada la sección migrada en profundidad de la misma área, donde claramente se pueden notar que los horizontes son casi planos a lo largo de toda la línea sísmica. (Figura 26).

**Figura 26. Sección PrSDM interpretada del bloque Medina. Una vez migrado a profundidad el modelo y con el amarre a pozo del área se puede concluir que la estructura vista en tiempo es falsa.**



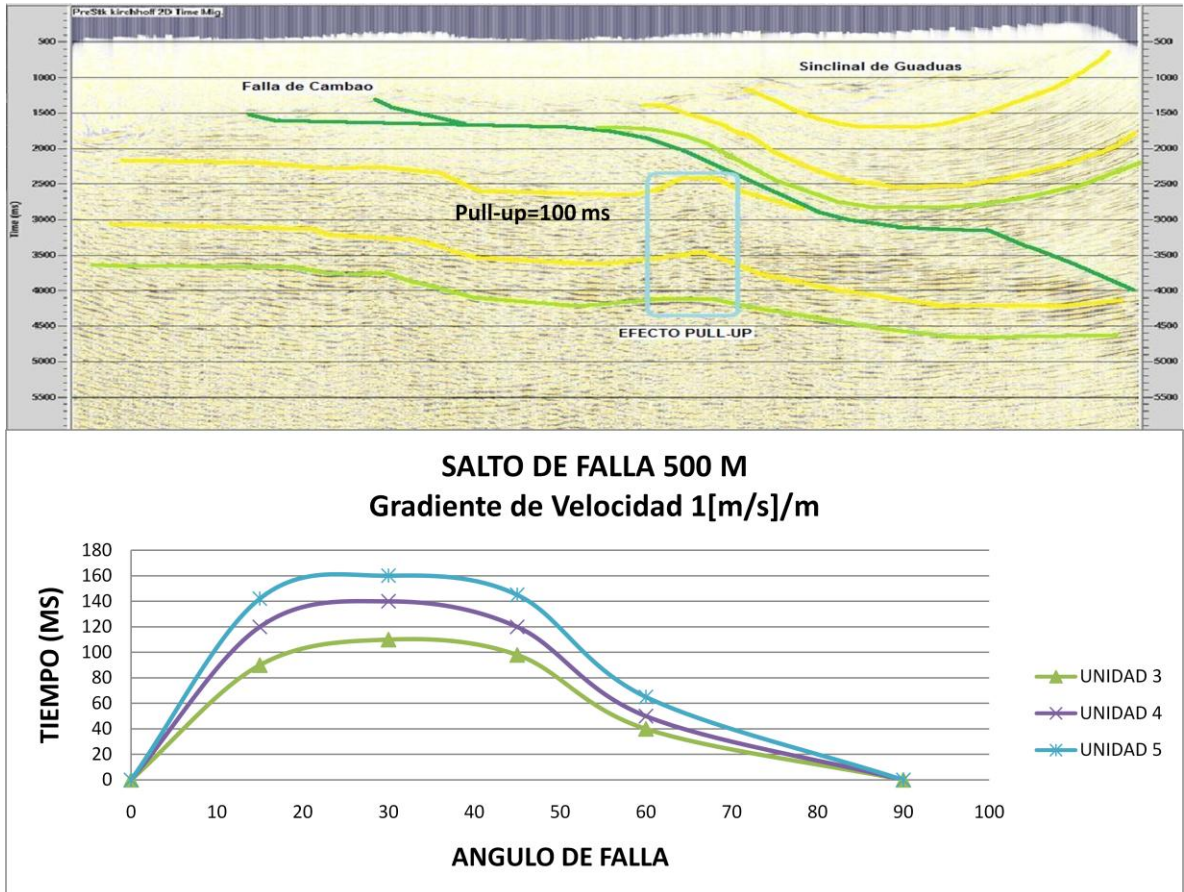
Fuente: Mora, 2010.

## **5.2 CASO BLOQUE BITUIMA (CUENCA VALLE MEDIO DEL MAGDALENA).**

A continuación se muestran las imágenes en PrSTM y PrSDM (usando algoritmo de Kirchhoff) del bloque Bituima obtenidas por cortesía del grupo de Geofísica del ICP-ECOPETROL y que muestran claros efectos de pull-up. (Figura 27).

La tabla utilizada en este análisis varío debido a que el gradiente de velocidad en la sección analizada es mayor, cercano a 1 [(m/s)/m]

**Figura 27. Análisis de pull-up en el bloque Bituima. En (a) la imagen sísmica interpretada en tiempo (b) la tabla de pull-up cercana a las características estructurales del área para el análisis. La curvatura en ambos es de 60 metros a una profundidad de 60 metros.**

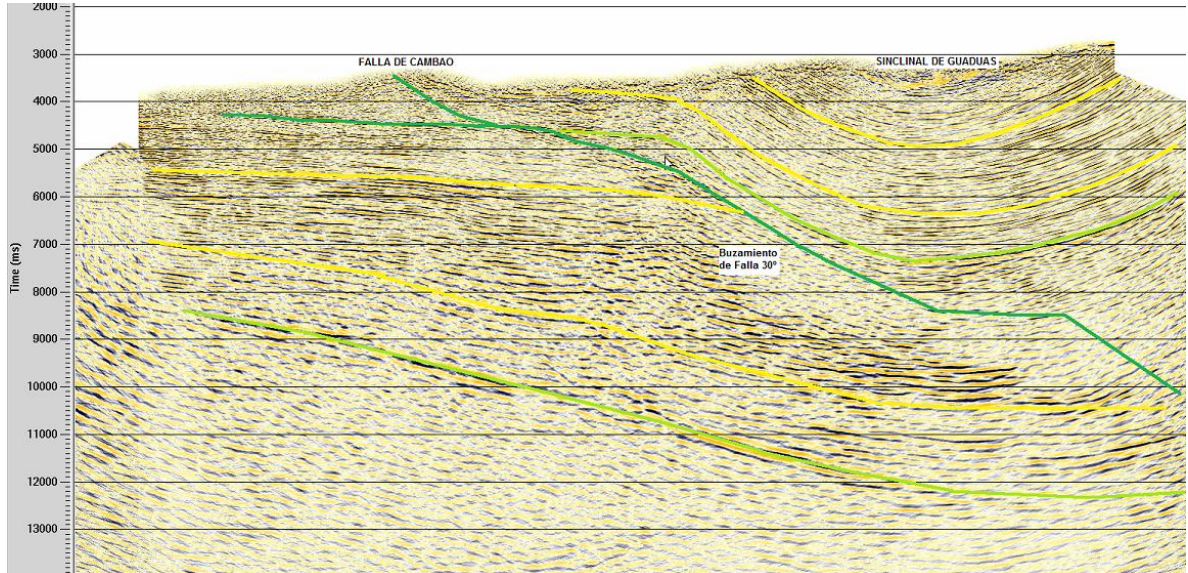


Fuente: autor

El bloque Bituima ha sido en una cuenca de distinta evolución y características de enfriamiento distinto, valida nuevamente en análisis realizado sintéticamente.

El efecto de pull-up en esta sección es nuevamente puesto a la vista en la conversión a profundidad usando migración kirchoff. (Figura 28).

**Figura 28. Imagen sísmica PSDM interpretada de Bituima, VMM. El buzamiento de la falla es de 30° y los horizontes del bloque yacente están planos debido a que la estructura vista en tiempo es falsa.**



Fuente: autor

La aproximación de los valores de pull-up en distintas cuencas con los resultados sintéticos muestra que efectivamente podemos pronosticar el efecto de pull-up de determinada zona antes de aplicar algoritmos de conversión a profundidad, que en llegado momento pueden resultar ineficaces, ya sea por el modelo de velocidad usado o por la técnica misma, para desenmascarar esta típica pifia de la interpretación.

## CONCLUSIONES

- El profundo análisis realizado a través de numerosos modelos sintéticos y la comparación de estos datos con líneas sísmicas de diferentes cuencas permitió comparar y establecer parámetros de identificación de las sombras de falla tales como el gradiente de velocidad, el área de efecto retardador del rayo bajo la falla y la apertura de migración como efecto de solución en las curvaturas aun encontradas en imágenes de PSDM.
- El modelado sintético de las estructuras en tiempo permite predecir el efecto de las velocidades en la geometría del pull-up para el caso de imágenes sísmicas en tiempo caracterizando, así que fallas con buzamientos entre 30 y 45° van a generar mayor efecto de pull-up con curvaturas aumentando en profundidad.
- A partir de todos los modelos procesados se puede decir que todas las imágenes sísmicas en tiempo que tengan cambios o variaciones laterales alrededor de una falla experimentarían un efecto de pull-up, sean imágenes sísmicas en tierra o en offshore.
- Para solucionar completamente el efecto de pull-up es necesario migrar a profundidad los datos sísmicos teniendo en cuenta que la apertura de migración debe ser mínimo el valor del horizonte más profundo a cartografiar en orden de minimizar correctamente el efecto de sombra. Si la apertura de migración usada no es lo suficientemente amplia el efecto se mantendrá en la imagen sísmica.
- Utilizando estos resultados es posible evaluar prospectos exploratorios antes de tener un modelo correcto de velocidades para la migración en profundidad ahorrando así tiempo en el análisis de riesgo exploratorio de

las compañías petroleras. Este concepto es teniendo en cuenta que solo se deben hacer migraciones a profundidad cuando se tenga un modelo de velocidades de intervalo consistente con los datos geológicos en el área.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barrero, D., 1979, Geology of the central Western Cordillera west of Buga and Roldanillo, Colombia: Colombia Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras Publicación Geológicas Especiales de Ingeominas, no. 4, 75 p.
- Carvajal, Luis., 1992, Problemas de velocidades asociados a la sombra de las fallas normales en la cuenca de los llanos. Consideraciones regionales. ECOPETROL S.A
- Casero, P., J. F. Salel, and A. Rossato (1997), Multidisciplinary correlative evidences for polyphase geological evolution of the foot-hills of the Cordillera
- Colletta, B., Hebrard, F., Letouzey, J., Werner, P., and Rudkiweicz, J.L., 1990, Tectonic style and crustal structure of the Eastern Cordillera, Colombia, from a balanced cross section, *in* Letouzey, J., ed., Petroleum and Tectonics in Mobile Belts: Paris, Editions Technip, p. 81–100.
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, S. H., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., and Taborda, A., 1995, Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 79, no. 10, p. 1421-1443.
- Etayo, F., G. Renzoni, and D. Barrero, 1969, Contornos sucesivos del mar Cretáceo en Colombia: Primero Congreso Colombiano de Geología, Memorias, p. 217–252.

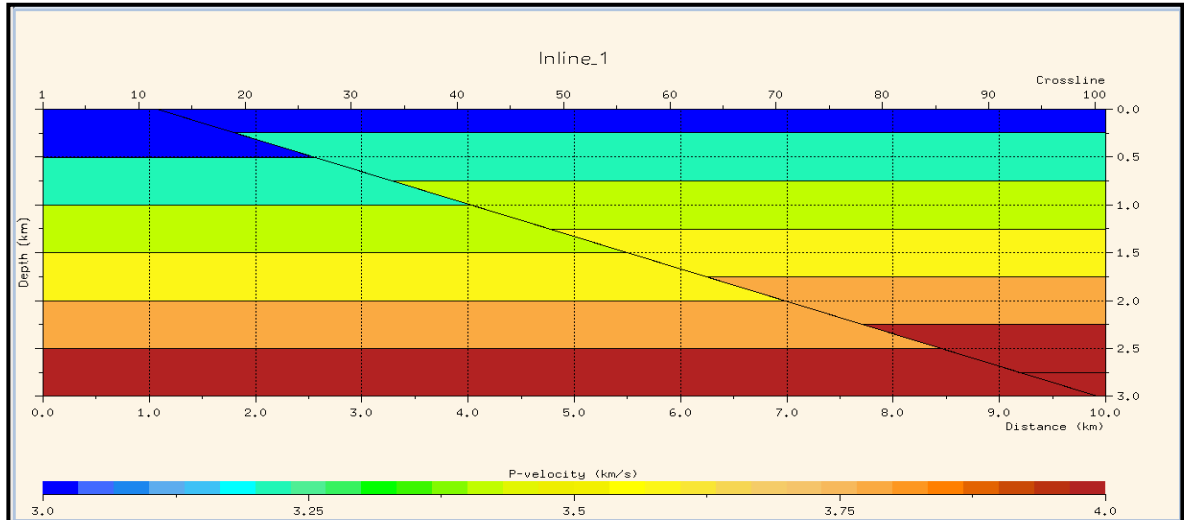
- Fagin, Stuart. The Fault shadow problem: Its nature and elimination. En: Revista the Leading Edge. No (September, 1996); p. 1005-1013.
- Jordan, T.E., 1995, Retroarc foreland and related basins, *in* Busby, C.J., and Ingersoll, R.V., eds., Tectonic of Sedimentary Basins: Cambridge, Massachusetts, Blackwell Science, p. 331–362.
- McCourt, W. J., Aspden, J. A., and Brook, M., 1984, New geological and chronological data from the Colombian Andes: Continental growth by multiple accretion: Journal of the Geological Society of London, v. 141, p. 831–845
- Mora, A., Parra, M., Strecker, M.R., Kammer, A., Dimaté, C., and Rodríguez, F., 2006, Cenozoic contractional reactivation of Mesozoic extensional structures in the Eastern Cordillera of Colombia: Tectonics, v. 25, no. 2, TC2010, doi: 10.1029/2005TC001854.
- Mora, A., Parra, M., Strecker, M.R., Sobel, E.R., Hooghiemstra, H., Torres, V., and Vallejo-Jaramillo, J., 2008a, Climatic forcing of asymmetric orogenic evolution in the Eastern Cordillera of Colombia: Geological Society of America Bulletin, v. 120, no. 7–8, p. 930–949, doi: 10.1130/B26186.1.
- Mora, A., Gaona, T., Kley, J., Montoya, D., Parra, M., Quiroz, L.I., Reyes, G., and Strecker, M., 2008b, 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 (in press).
- Mondragón, Juan, Mayorga, Marcela, Rodríguez, Germán, Navarro, Jorge, Moretti, Isabella. Nuevas perspectivas: exploratorias en el sector sur de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (Colombia). En: Revista de Geo

Petróleo. No. 6 (Noviembre, 2009); p. 4-8

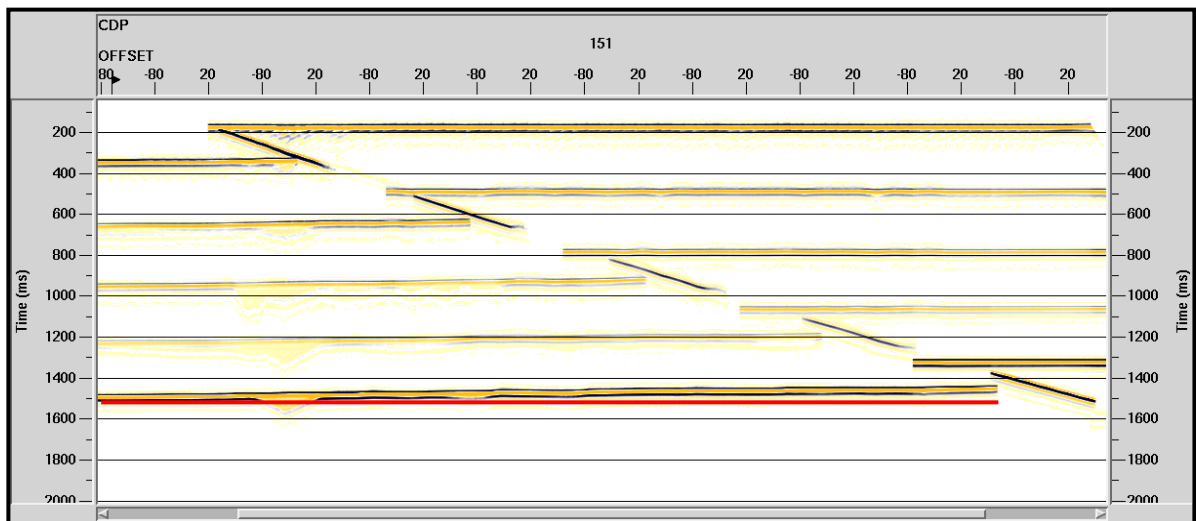
- Parra Mauricio, Andrés Mora, Carlos Jaramillo, Manfred R. Strecker, Edward R. Sobel, Luis Quiroz, Milton Rueda and Vladimir Torres., 2009, Orogenic wedge advance in the northern Andes: Evidence from the Oligocene-Miocene sedimentary record of the Medina Basin, Eastern Cordillera, Colombia. *Geological Society of America Bulletin* 2009;121;780-800. doi: 10.1130/B26257.1
- Ramon, J.C., and Rosero, A., 2006, Multiphase structural evolution of the western margin of the Girardot subbasin, Upper Magdalena Valley, Colombia: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 21, no. 4, p. 493–509, doi: 10.1016/j.jsames.2006.07.012.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.O., and Pérez, D.J., 2002, The Pampean fl at-slab of the Central Andes: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 15, no. 1, p. 59–78, doi: 10.1016/S0895-9811(02)00006-8.
- Salinas, T.; Reyes, J., 2001, Conversión Tiempo a Profundidad en presencia de sombra de falla. Cuenca los Llanos: ACIPET
- Trincherro, Eduardo. The fault shadow problem as an interpretation pitfall. En: *Revista the Leading Edge*. No 19 (February, 2000).
- Velásquez, A. J. (2002), Modelamiento geofísico cortical por medio de métodos de campos potenciales con base en un modelo estructural del piedemonte llanero, Colombia, B.Sc. thesis, 115 pp., Univ. Nac. de Colombia, Bogotá.
- Yilmaz, O. (2001). *Seismic data procesing*. Stephen Doherty Editor. U.S.A. P.53

## ANEXO A.

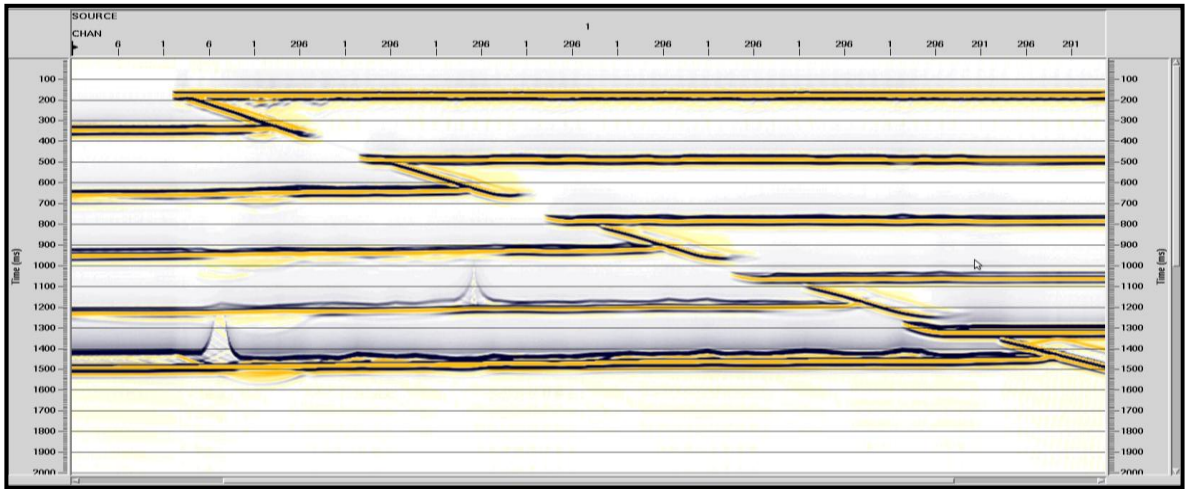
### MODELOS SINTÉTICOS CON SALTO DE FALLA DE 250 (m); OFFSET DE 3000 (m)



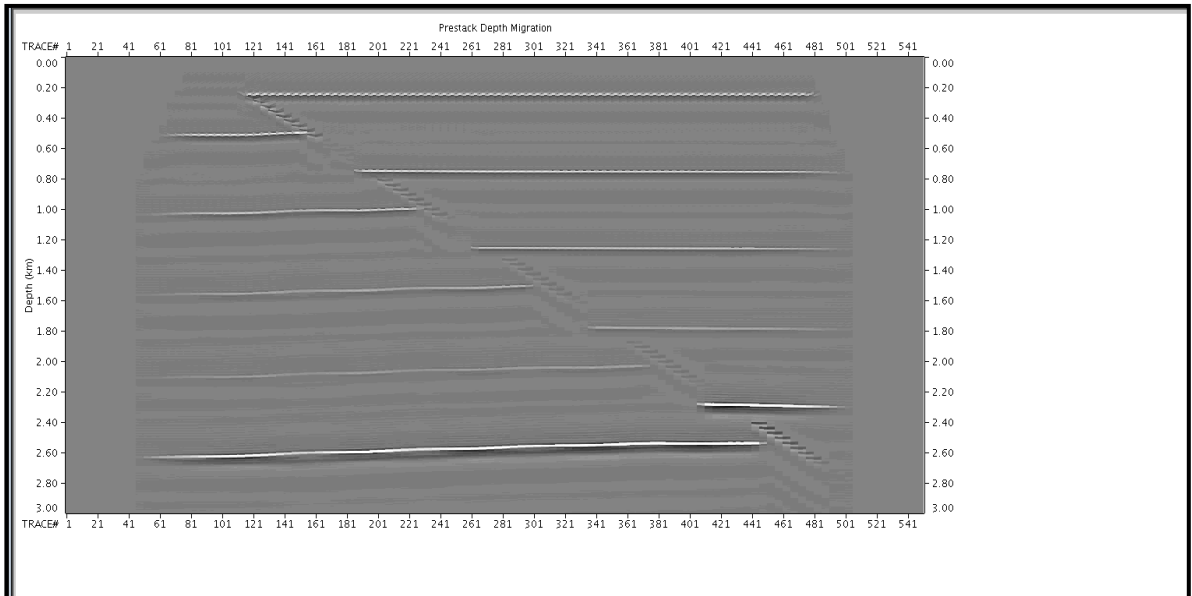
Modelo1\_f15\_g0.4. Modelo sintético; falla de 15° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m.



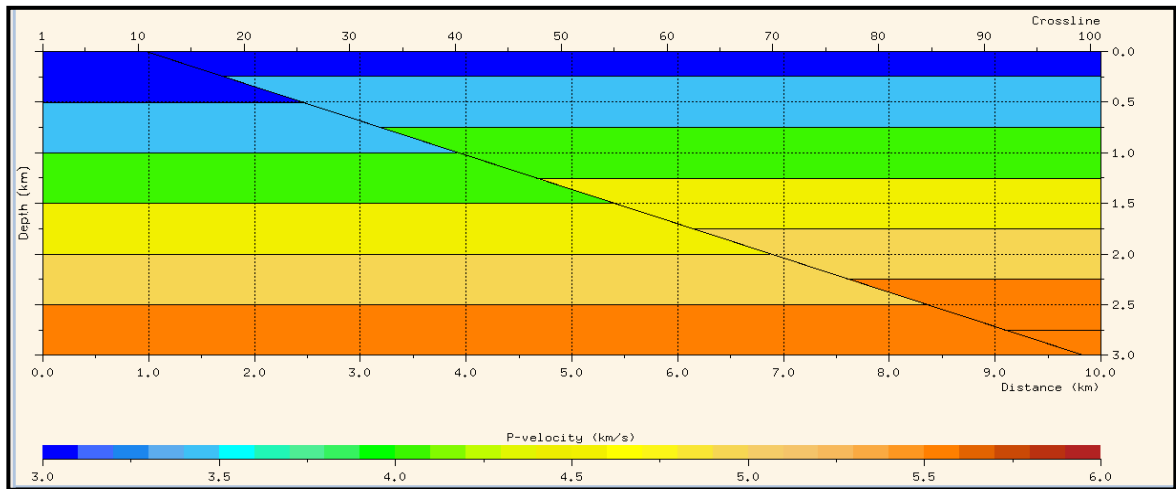
Modelo1\_f15\_g20.4\_stack. Modelo sintético; falla de 15° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. La línea roja representa la posición real que debería tener el reflector; sin embargo el reflector sufre un leve levantamiento.



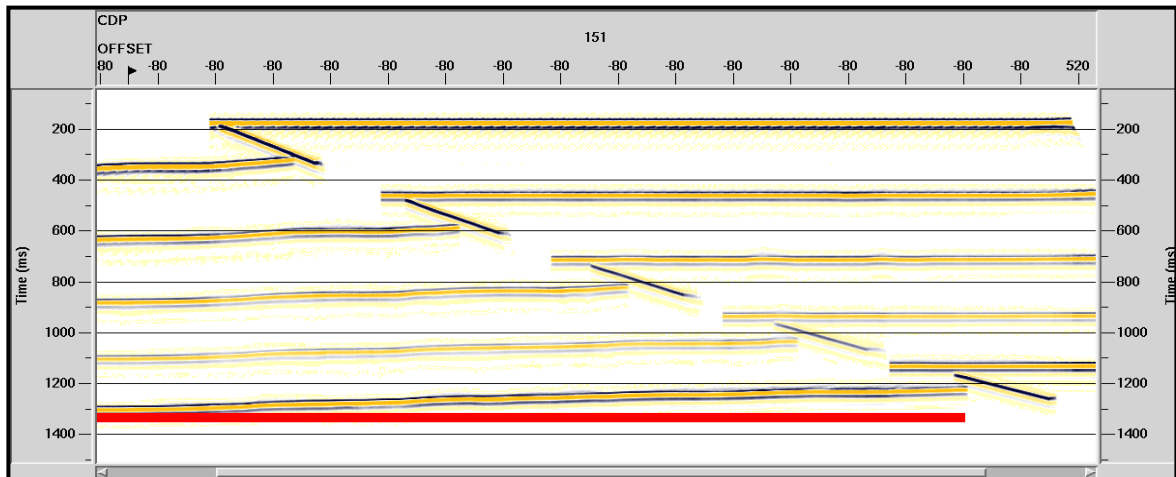
Modelo1\_f15\_g0.4\_PSTM. Modelo sintético; falla de 15° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. El reflector es llevado a su posición original en tiempo.



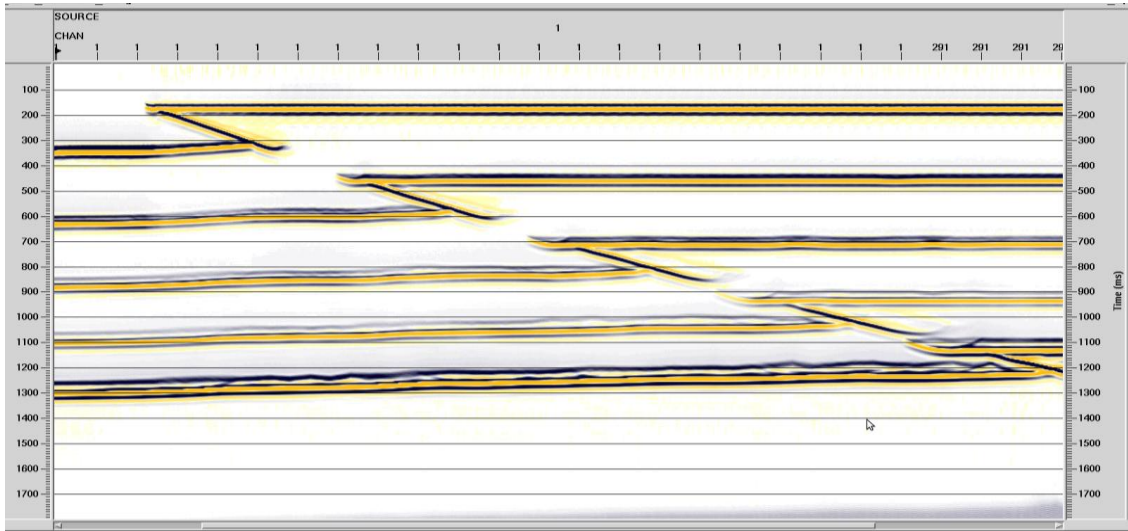
Modelo1\_f15\_g0.4\_PSDM. Modelo sintético; falla de 15° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. El reflector es llevado a su posición original en profundidad.



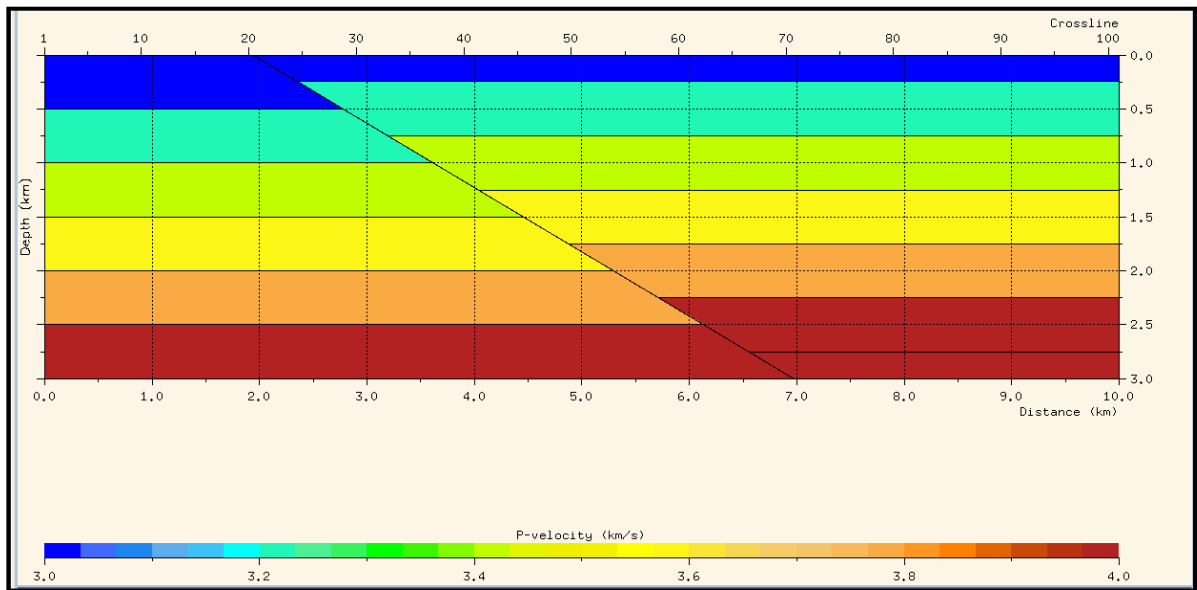
Modelo2\_f15\_g1. Modelo sintético; falla de 15° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m.



Modelo2\_f15\_g1\_stack. Modelo sintético; falla de 15° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m. La línea roja representa la posición real que debería tener el reflector; sin embargo se evidencia un considerable levantamiento del mismo.



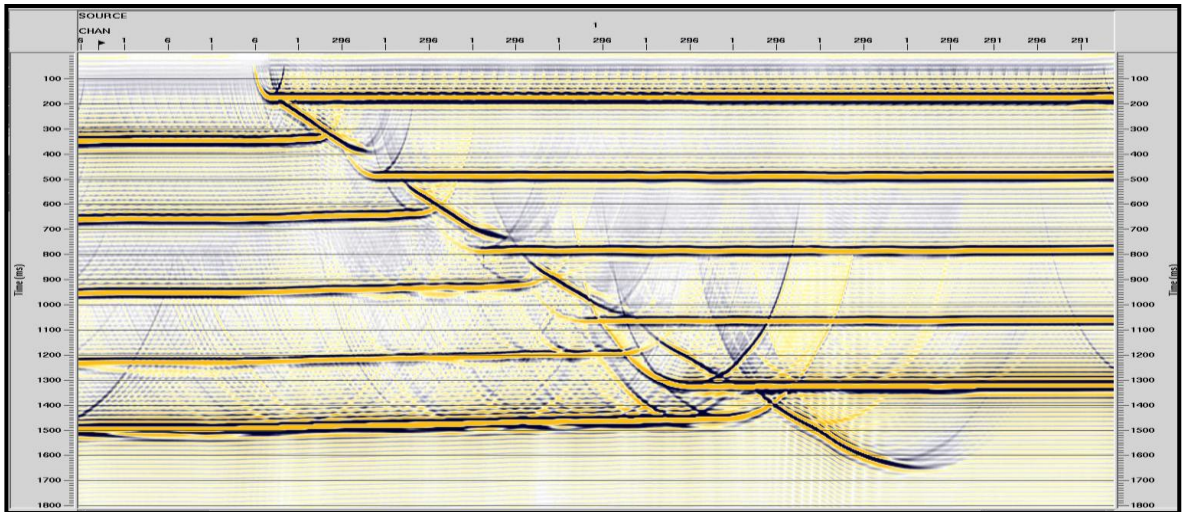
Modelo2\_f15\_g200\_PSTM. Modelo sintético; falla de  $60^\circ$  con un gradiente de  $0.4$  [m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.



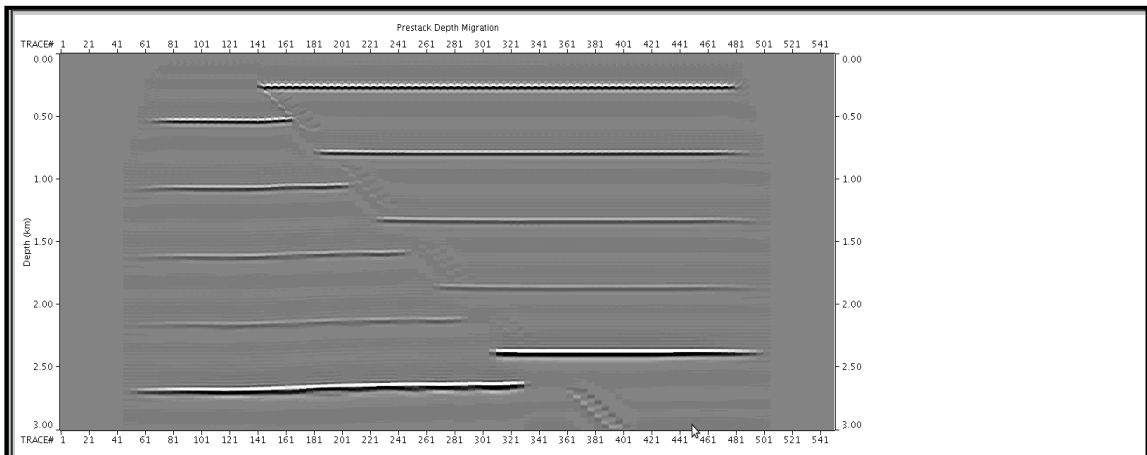
Modelo3\_f30\_g0.4. Modelo sintético; falla de  $30^\circ$  con un gradiente de  $0.4$  [m/s]/m.



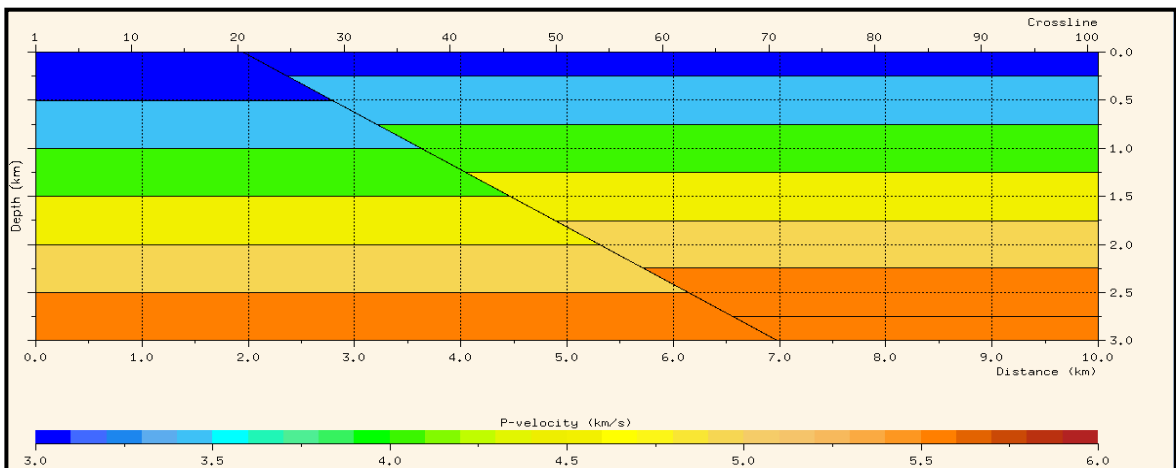
Modelo3\_f30\_g200\_stack. Modelo sintético; falla de 35° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Las líneas rojas representan la posición real que deberían tener los reflectores; sin embargo se evidencia un levantamiento de los mismos.



Modelo3\_f30\_g0.4\_PSTM. Modelo sintético; falla de 30° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.

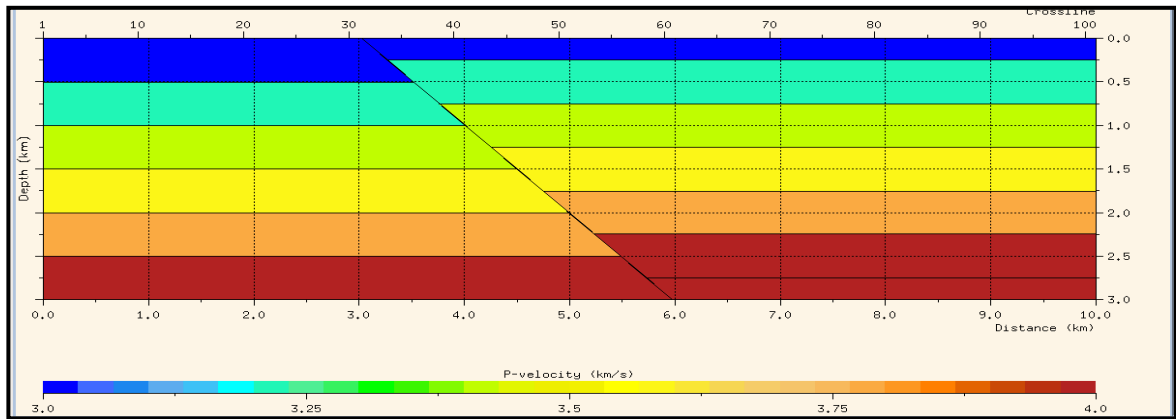


Modelo3\_f30\_g200\_PSDM. Modelo sintético; falla de 35° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. El reflector es llevado a su posición original en profundidad.

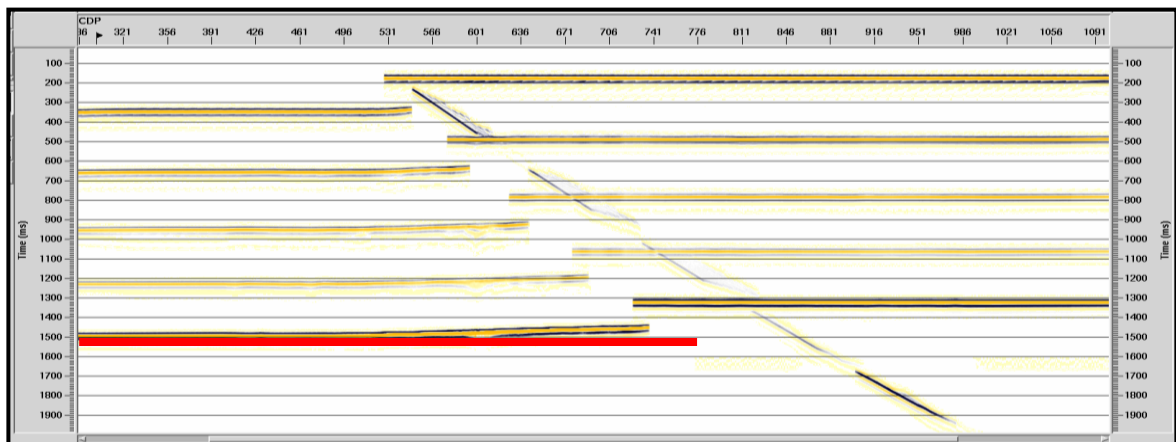


Modelo4\_f30\_g1.0. Modelo sintético; falla de 30° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m.

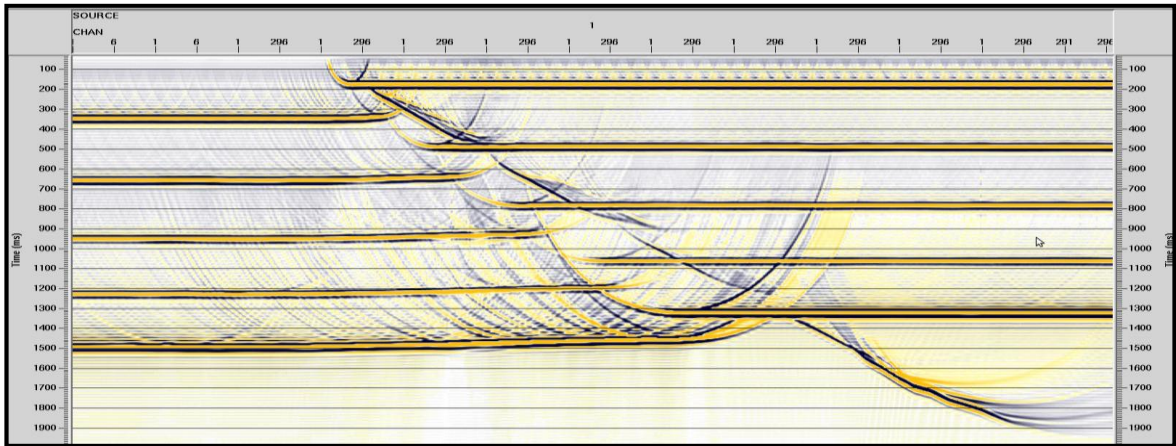




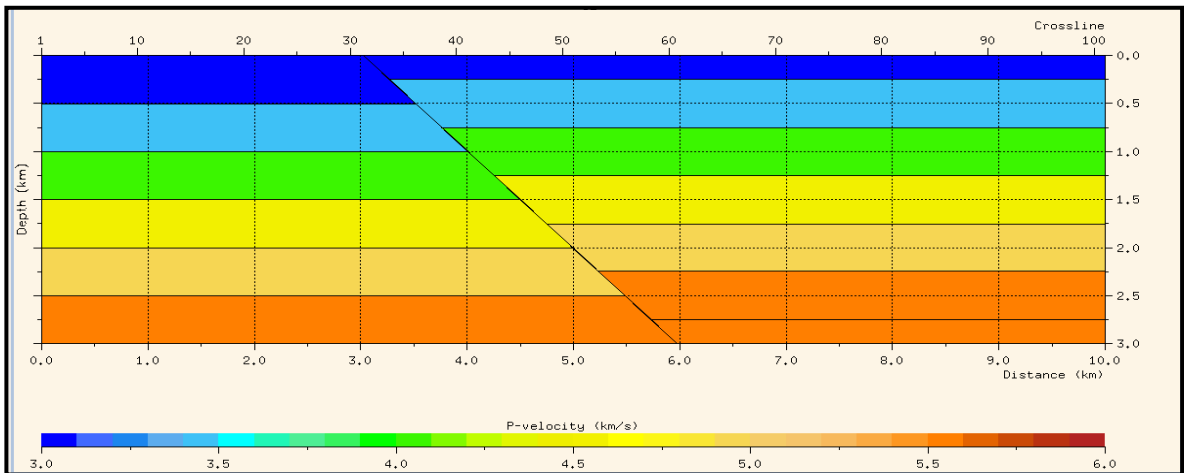
Modelo5\_f45\_g0.4. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m.



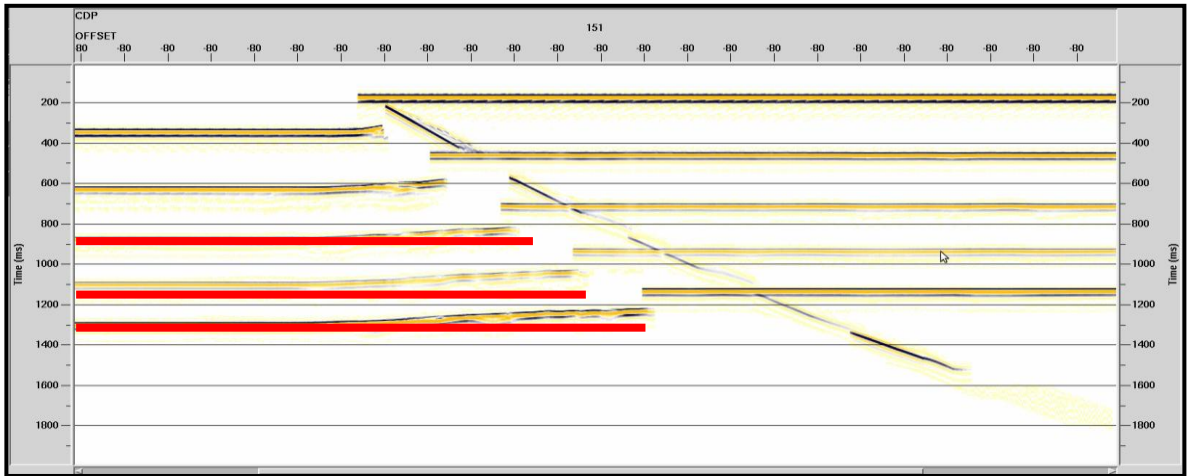
Modelo5\_f45\_g0.4\_stack. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. La línea roja representa la posición real que debería tener el reflector; sin embargo se evidencia un levantamiento del mismo.



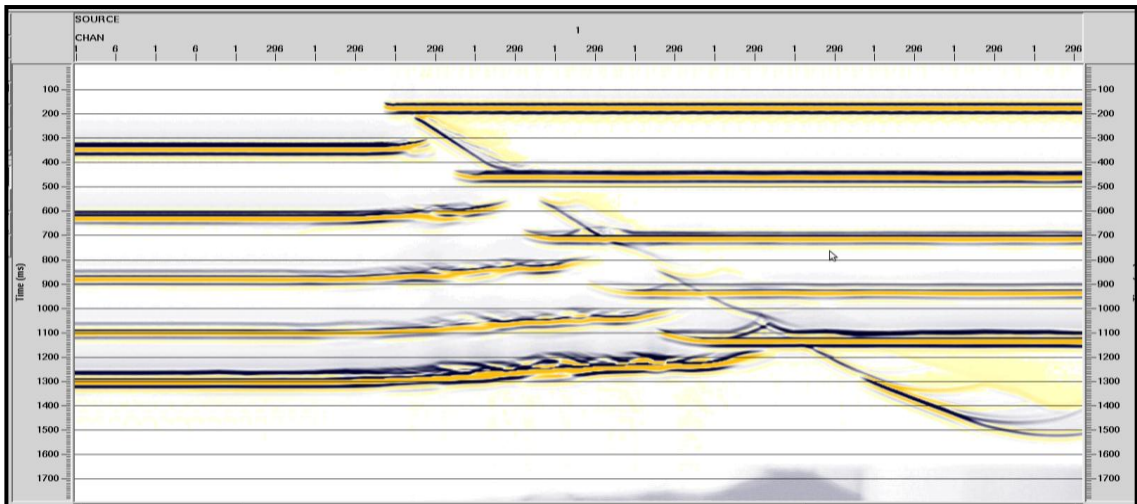
Modelo5\_f45\_g0.4\_PSTM. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.



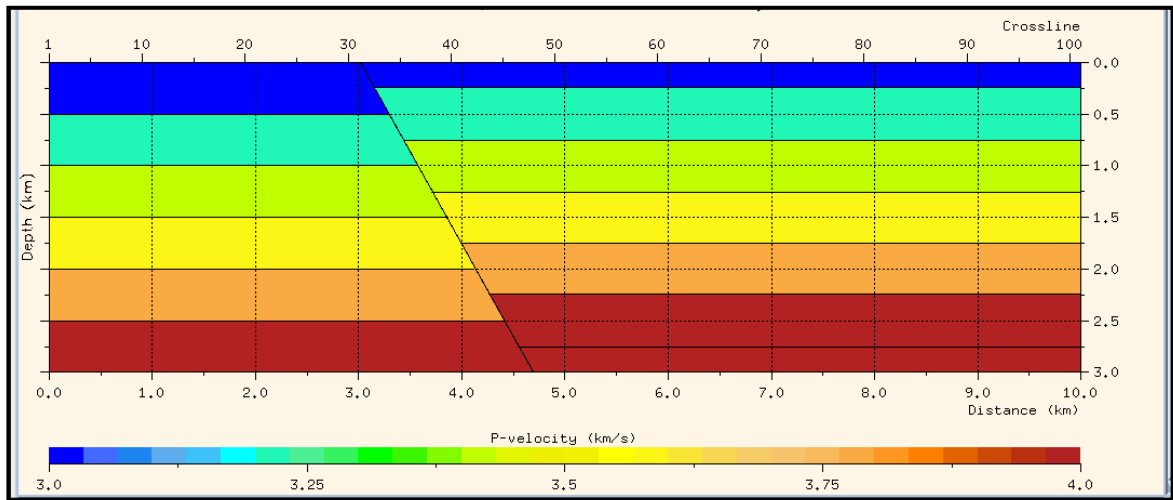
Modelo6\_f45\_g1.0. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m.



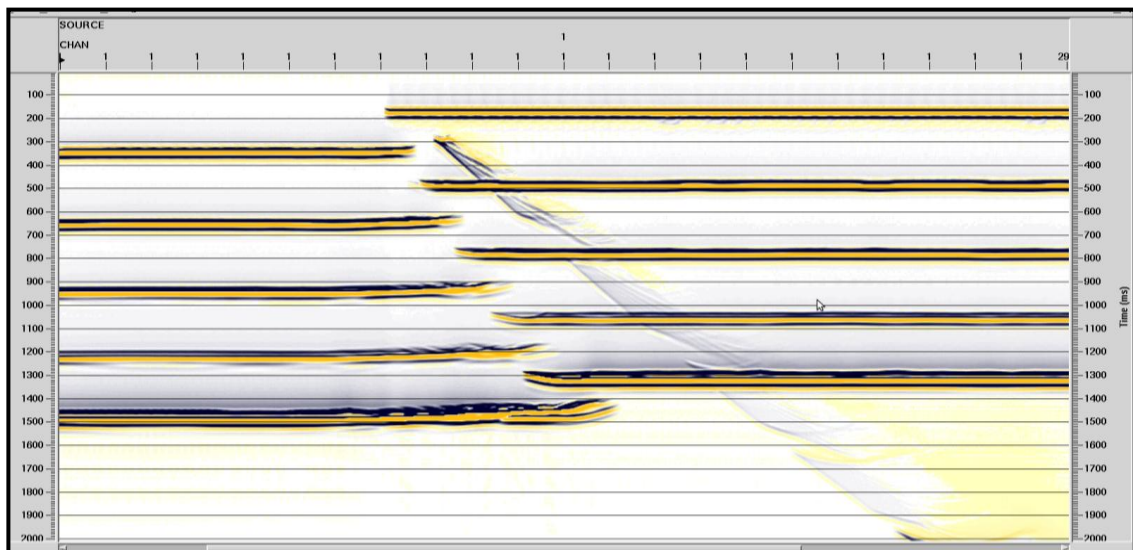
Modelo6\_f45\_g1.0\_stack. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m. Las líneas rojas representan la posición real que debería tener los reflectores; sin embargo se evidencian considerables levantamientos, de manera descendente, desde el tercer reflector hasta el último.



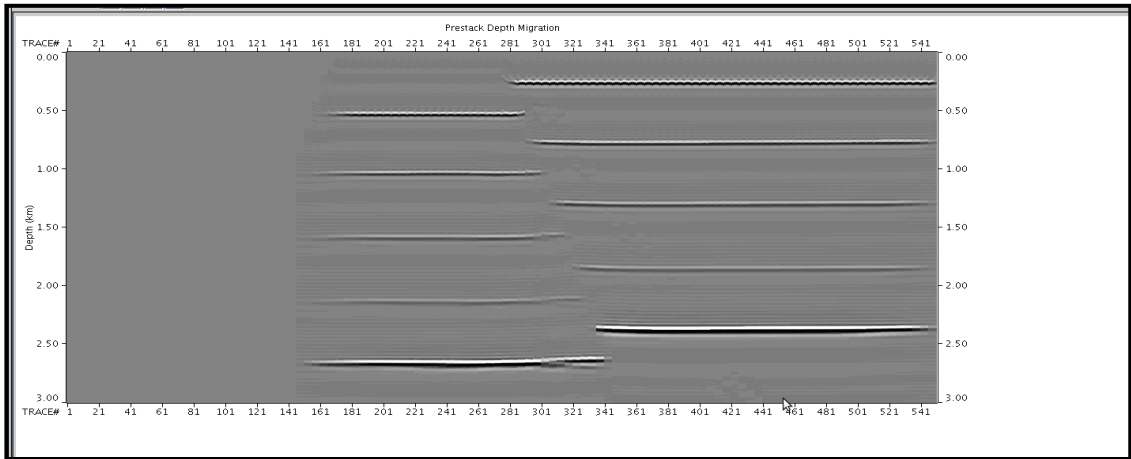
Modelo6\_f45\_g1.0\_PSTM. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.



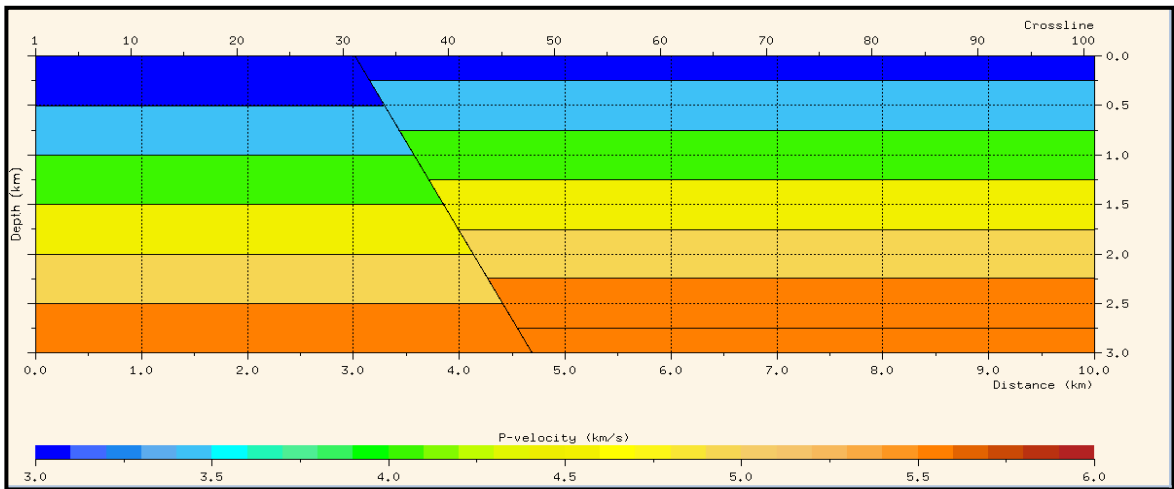
Modelo7\_f60\_g0.4 .Modelo sintético; falla de 60° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m.



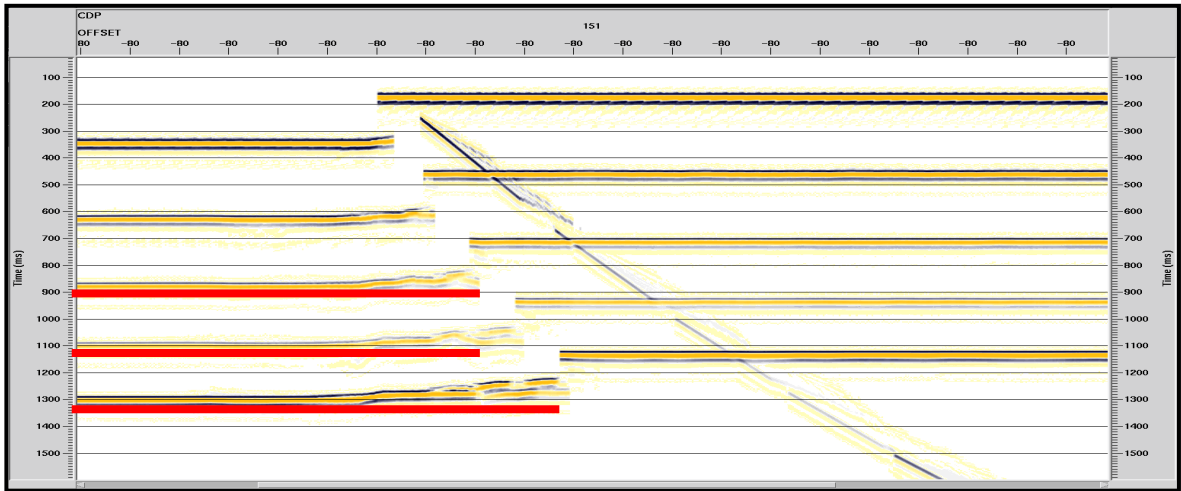
Modelo7\_f60\_g0.4\_PSTM. . Modelo sintético; falla de 60° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.



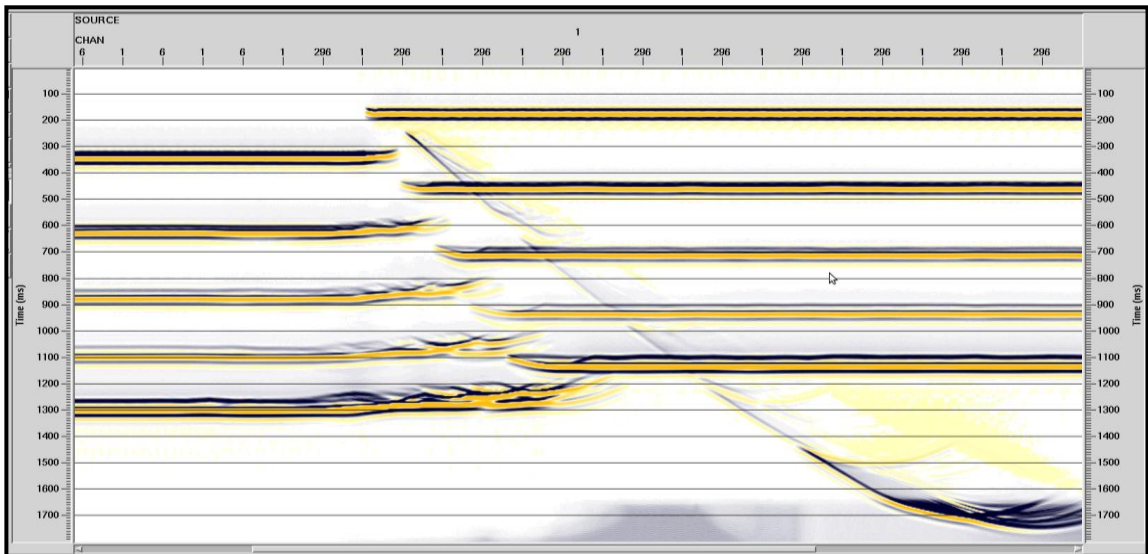
Modelo7\_f60\_g0.4\_PSDM. Modelo sintético; falla de 60° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. El reflector es llevado a su posición original en profundidad.



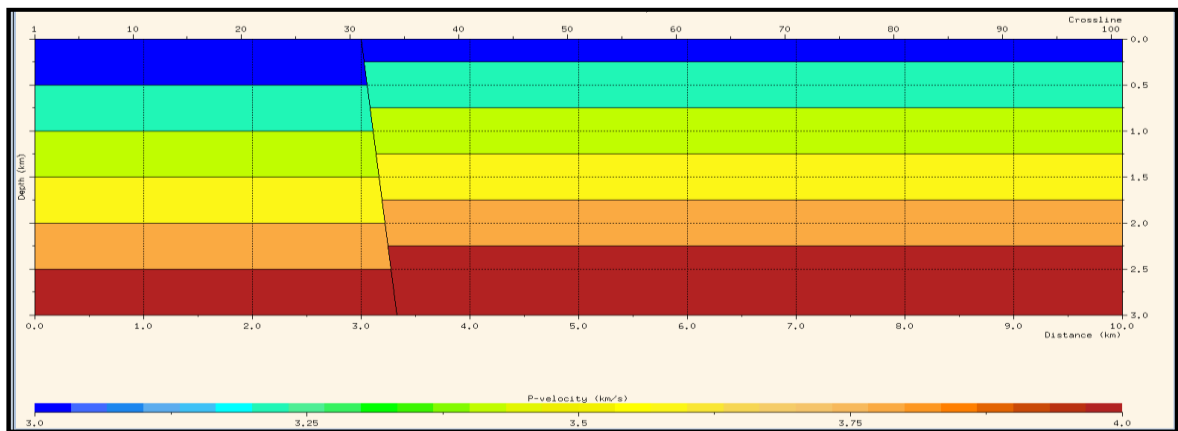
Modelo8\_f60\_g1.0. Modelo sintético; falla de 60° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m.



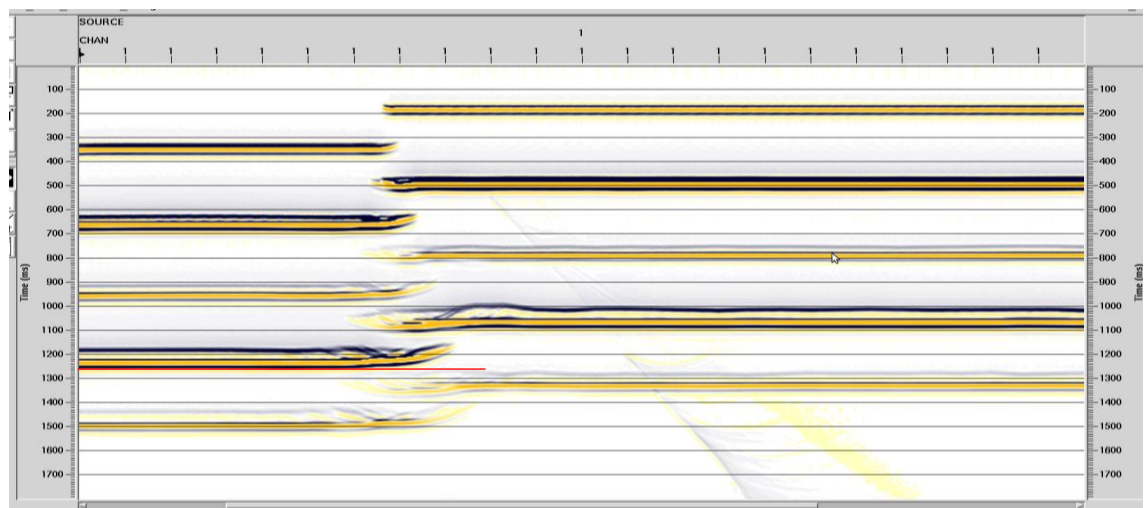
Modelo8\_f60\_g1.0\_stack. Modelo sintético; falla de 60° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m. Las líneas rojas representan la posición real que debería tener los reflectores; sin embargo se evidencian considerables levantamientos, de manera descendente, desde el tercer reflector hasta el último.



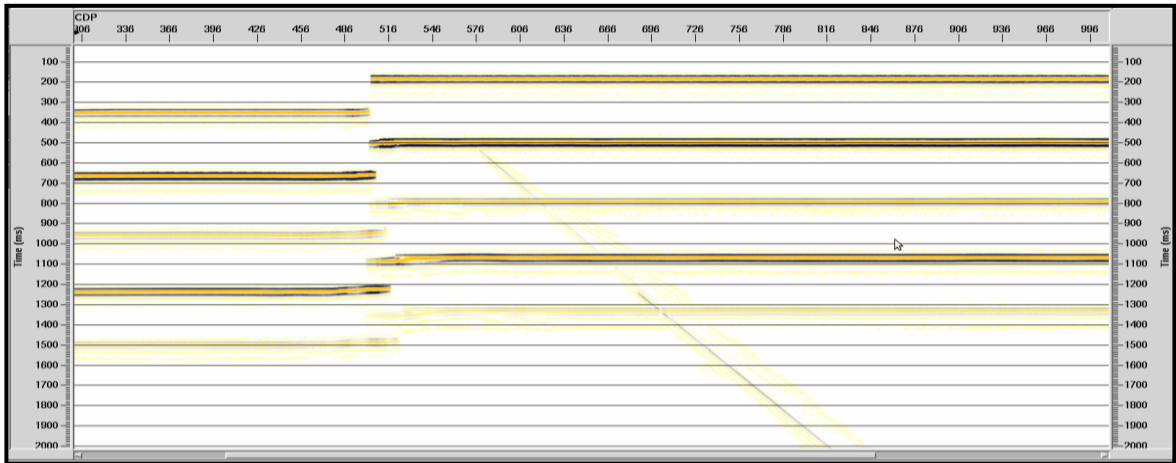
Modelo8\_f60\_g1.0\_PSTM. Modelo sintético; falla de 60° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.



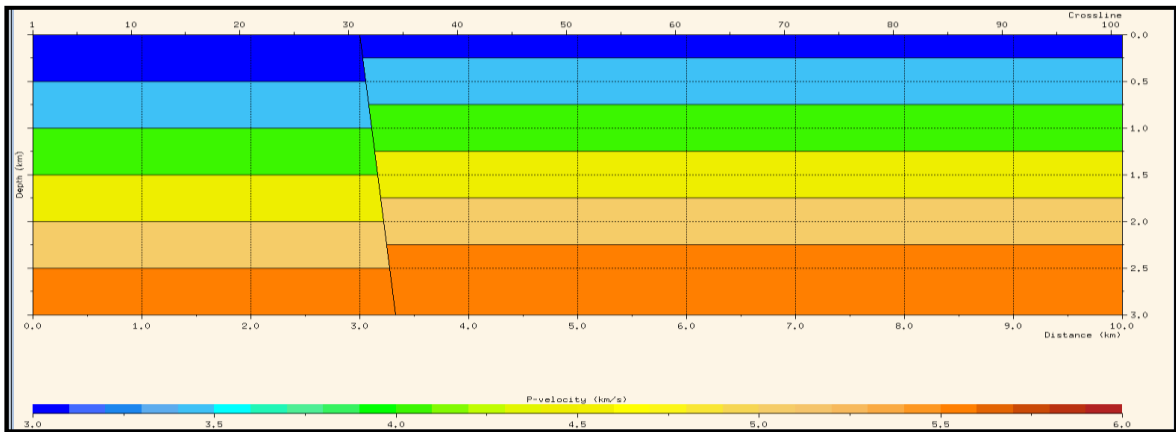
Modelo9\_f75\_g0.4. Modelo sintético; falla de 75° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m.



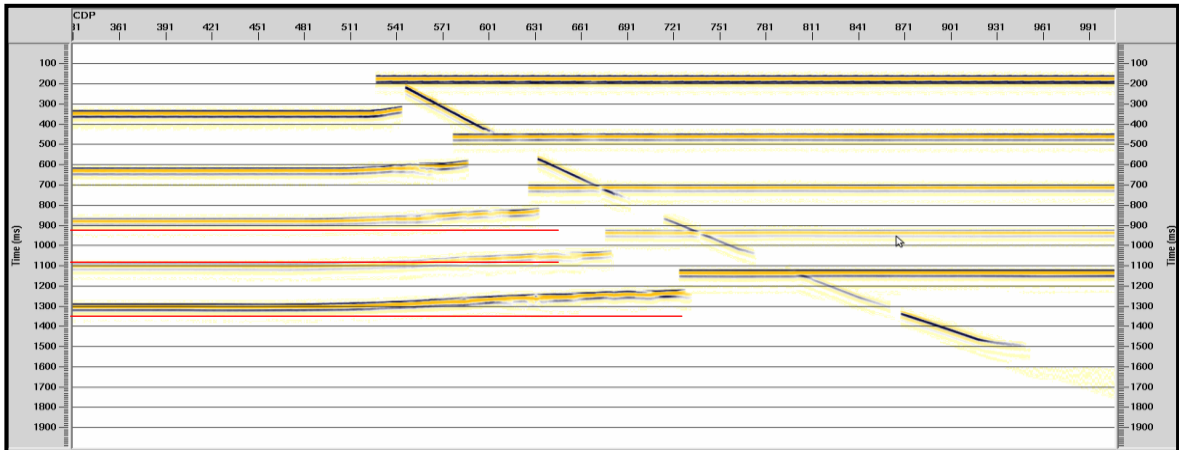
Modelo9\_f75\_g0.4\_stack. Modelo sintético; falla de 75° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. La línea roja representa la posición real que debería tener el reflector; sin embargo se evidencia un leve levantamiento del mismo.



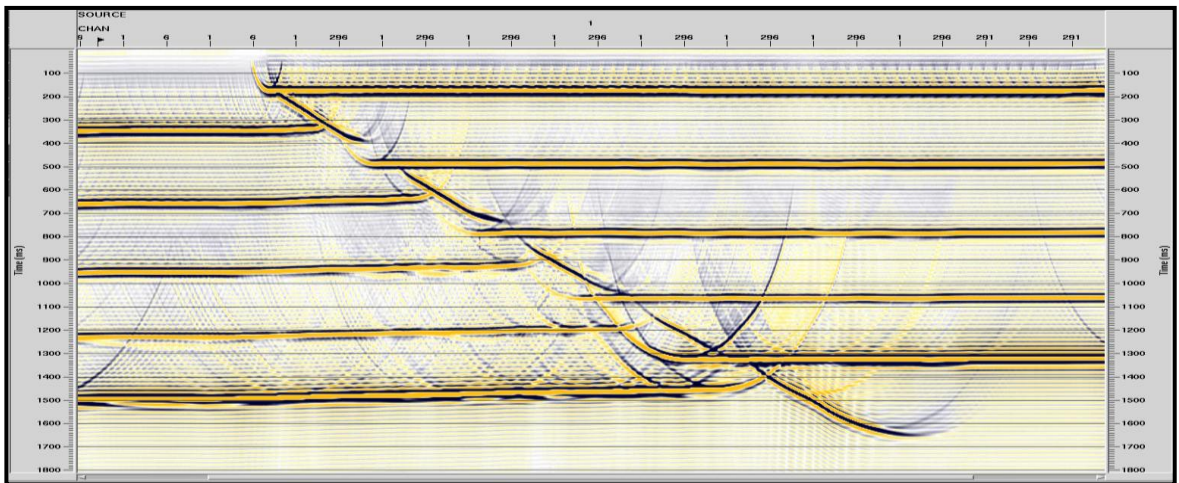
Modelo9\_f75\_g0.4\_PSTM. Modelo sintético; falla de 60° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.



Modelo10\_f75\_g1.0. Modelo sintético; falla de 75° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m.



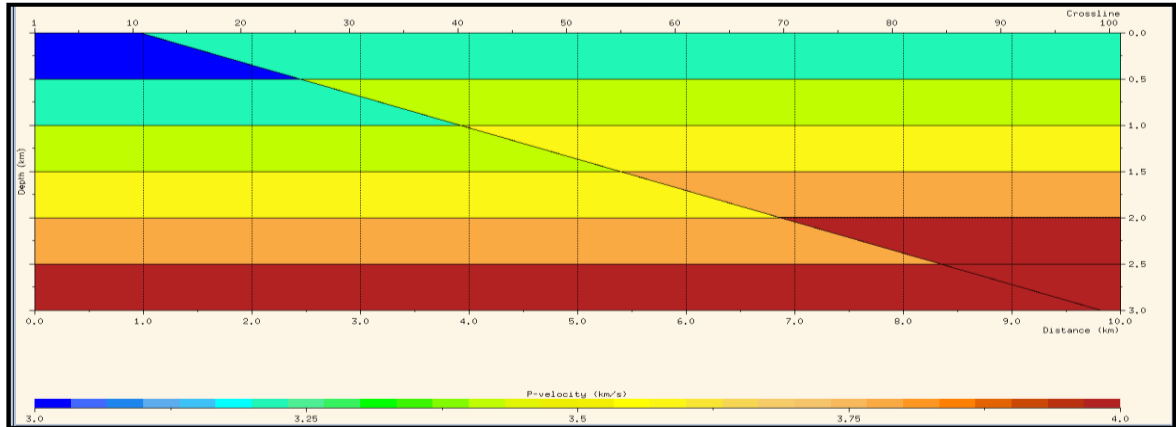
Modelo10\_f75\_g1.0\_stack. Modelo sintético; falla de  $75^\circ$  con un gradiente de  $1.0$  [m/s]/m. Las líneas rojas representan la posición real que debería tener los reflectores; sin embargo se evidencian considerables levantamientos, de manera descendente, desde el tercer reflector hasta el último.



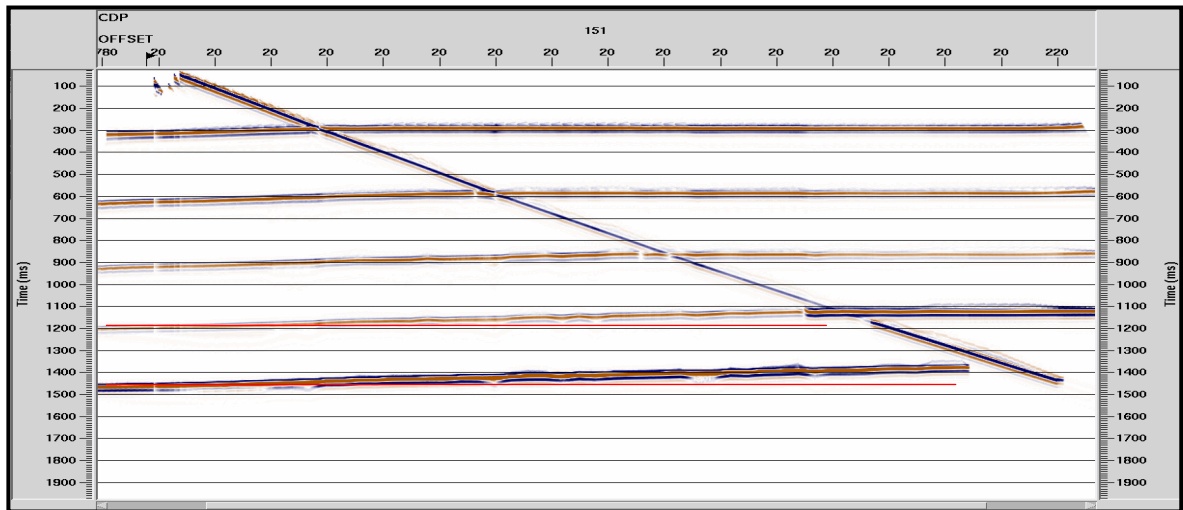
Modelo10\_f75\_g1.0\_PSTM. Modelo sintético; falla de  $75^\circ$  con un gradiente de  $1.0$  [m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.

## ANEXO B.

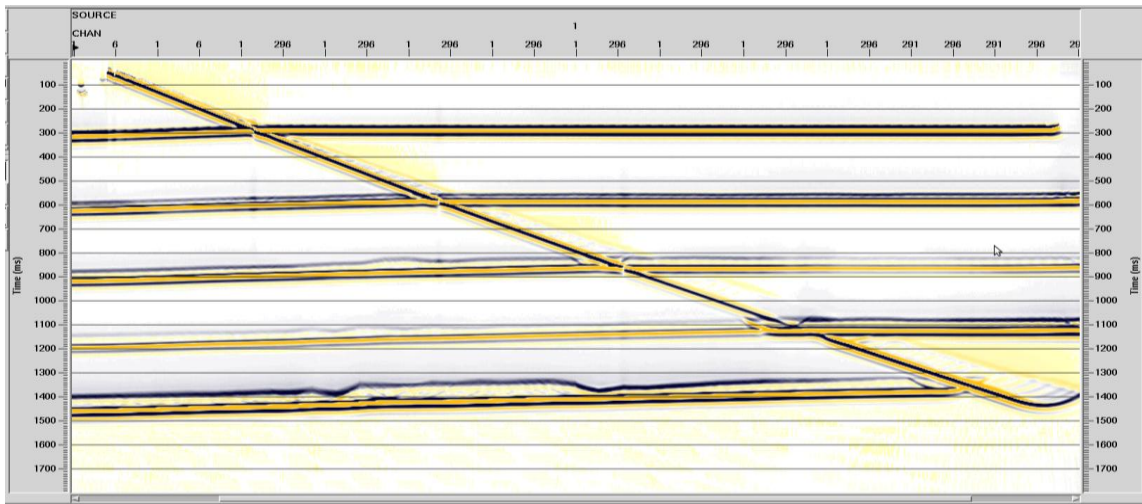
### MODELOS SINTÉTICOS CON SALTO DE FALLA DE 500 (m); OFFSET DE 3000 (m)



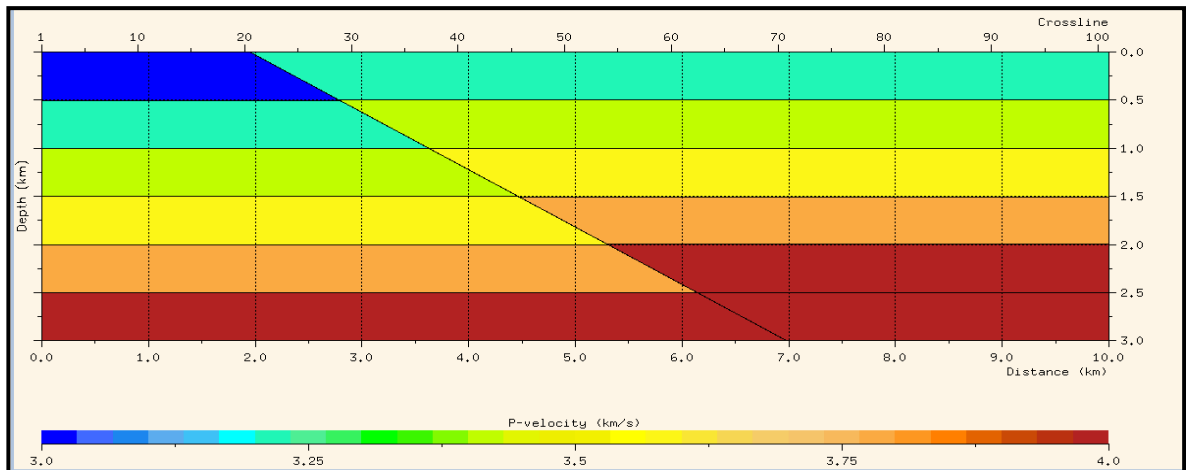
Modelo11\_f15\_g0.4. Modelo sintético; falla de 15° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m.



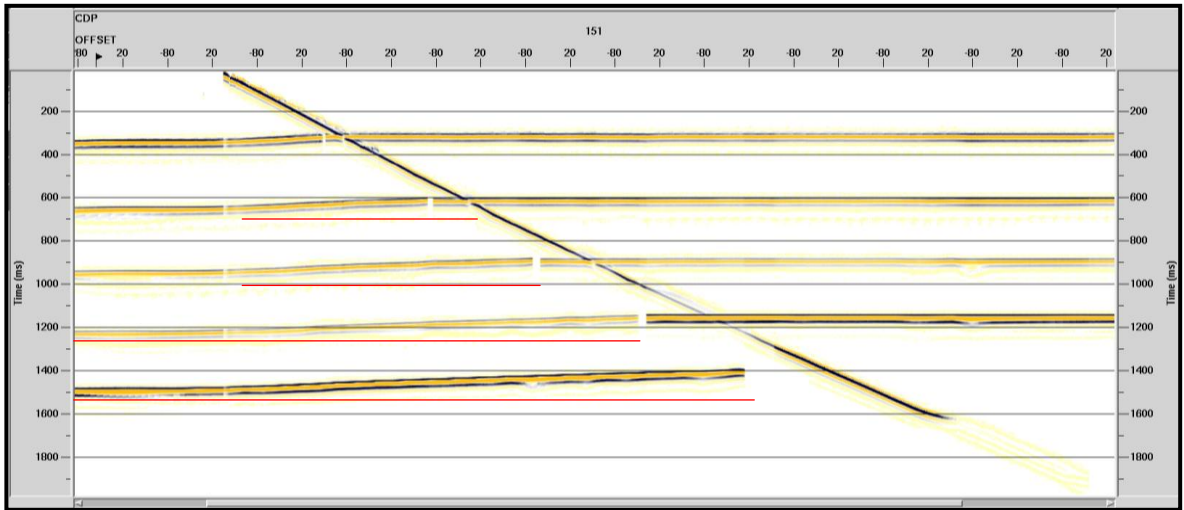
Modelo3\_f15\_g0.4\_stack. Modelo sintético; falla de 15° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Las líneas rojas representan la posición real que debería tener los reflectores; sin embargo se evidencian considerables levantamientos, de manera descendente, desde el segundo reflector hasta el último



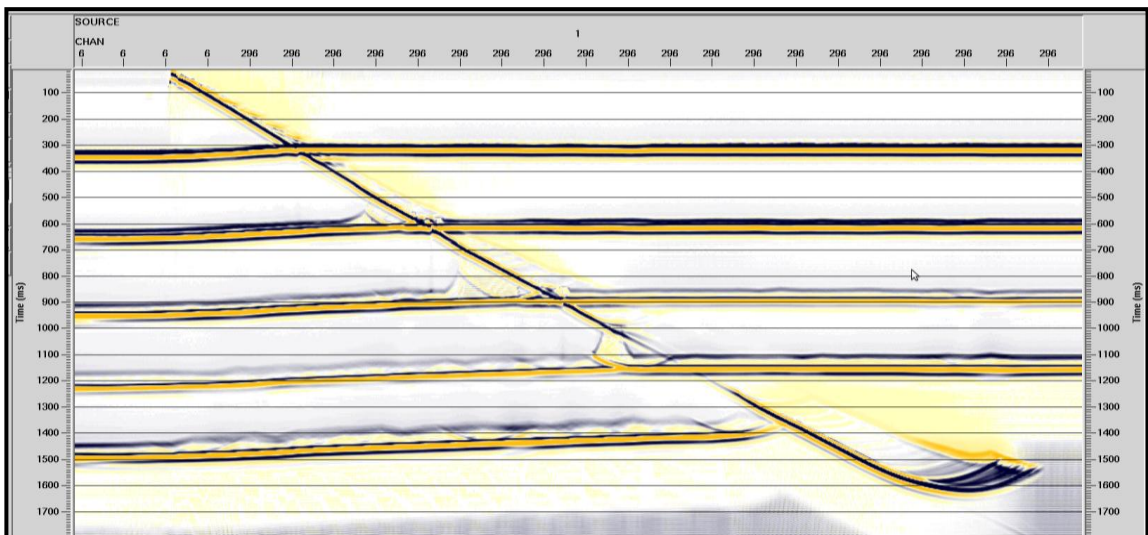
Modelo3\_f15\_g200\_PSTM. Modelo sintético; falla de 15° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.



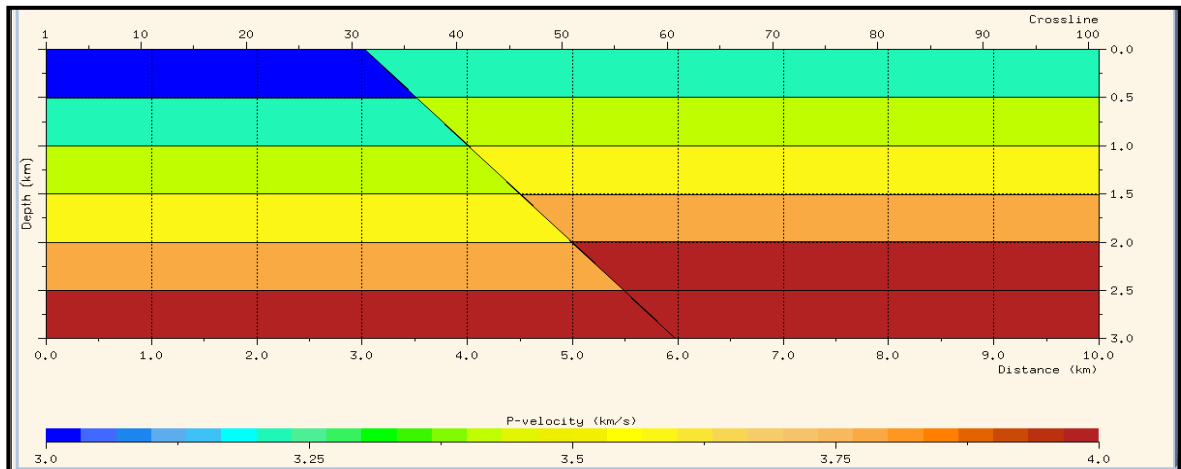
Modelo13\_f30\_g0.4. Modelo sintético; falla de 30° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m.



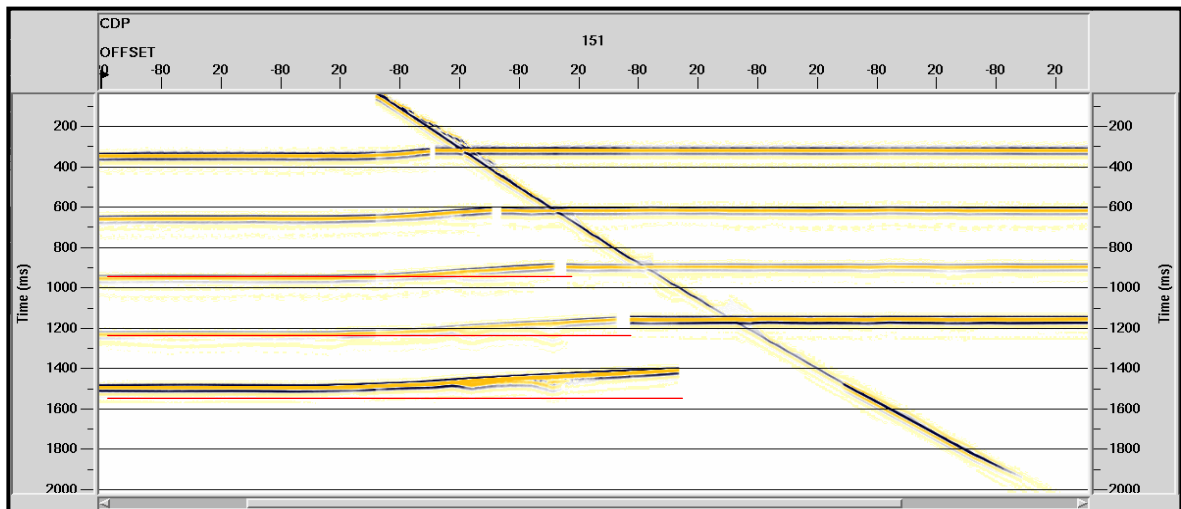
Model13\_f30\_g0.4\_stack. Modelo sintético; falla de  $30^\circ$  con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Las líneas rojas representan la posición real que debería tener los reflectores; sin embargo se evidencian considerables levantamientos, de manera descendente, desde el segundo reflector hasta el último.



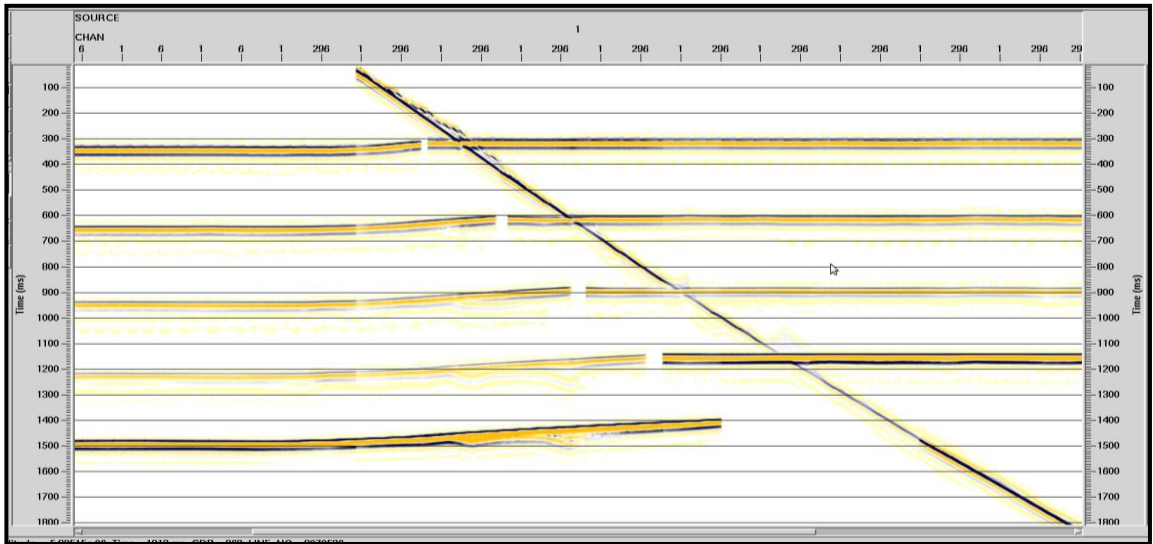
Model13\_f30\_g0.4\_PSTM. Modelo sintético; falla de  $30^\circ$  con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.



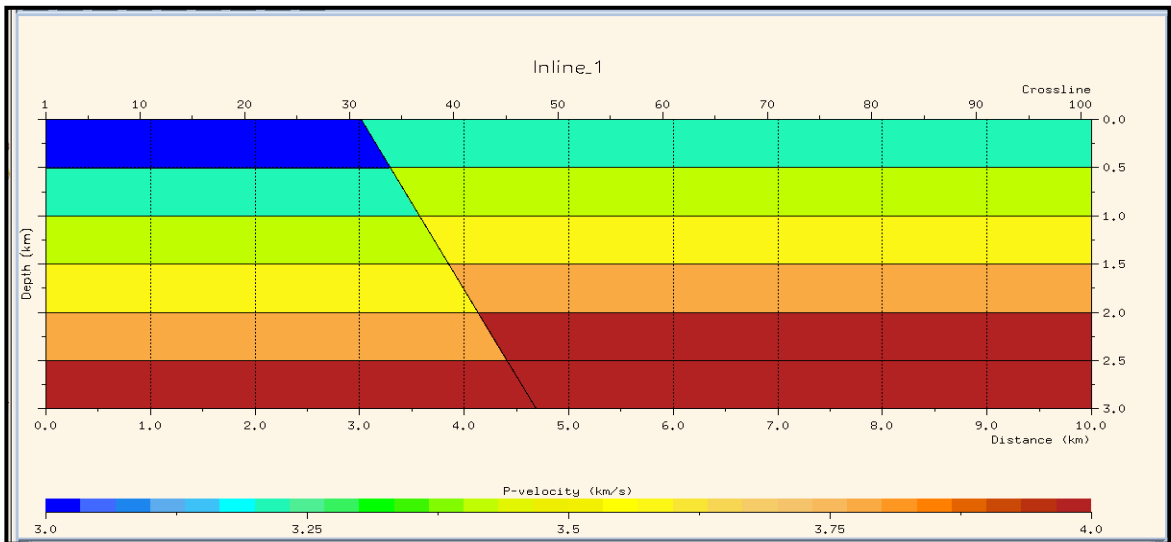
Model015\_f45\_g0.4. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m.



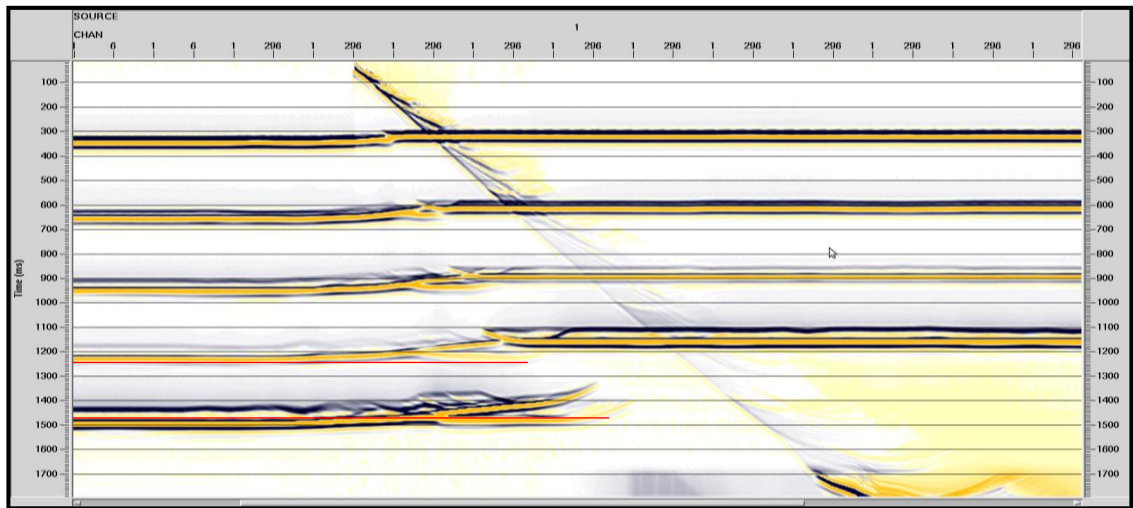
Modelo15\_f45\_g0.4\_stack. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Las líneas rojas representan la posición real que debería tener los reflectores; sin embargo se evidencian considerables levantamientos, de manera descendente, desde el segundo reflector hasta el último.



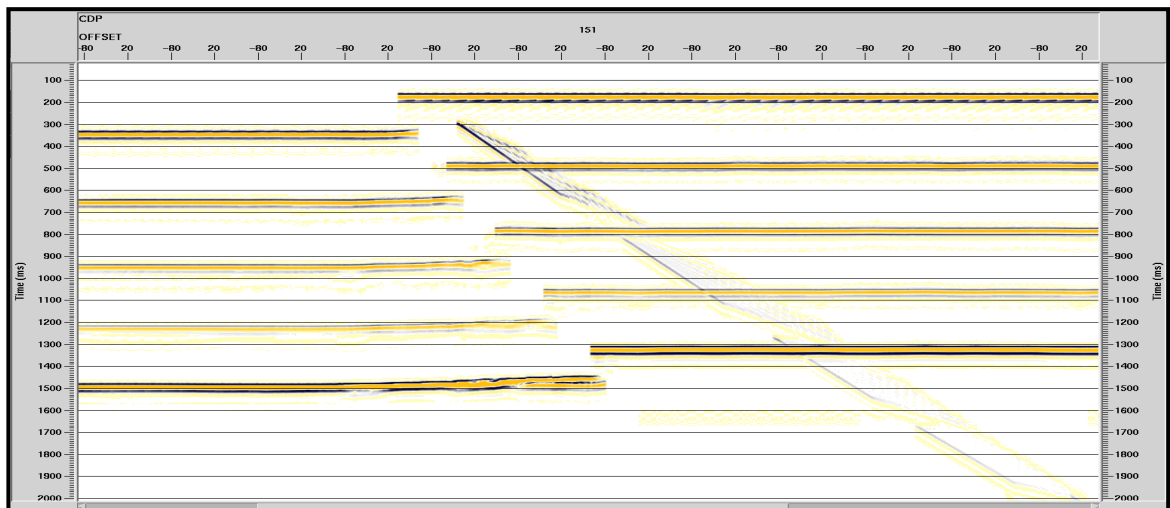
Model15\_f45\_g0.4\_PSTM. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.



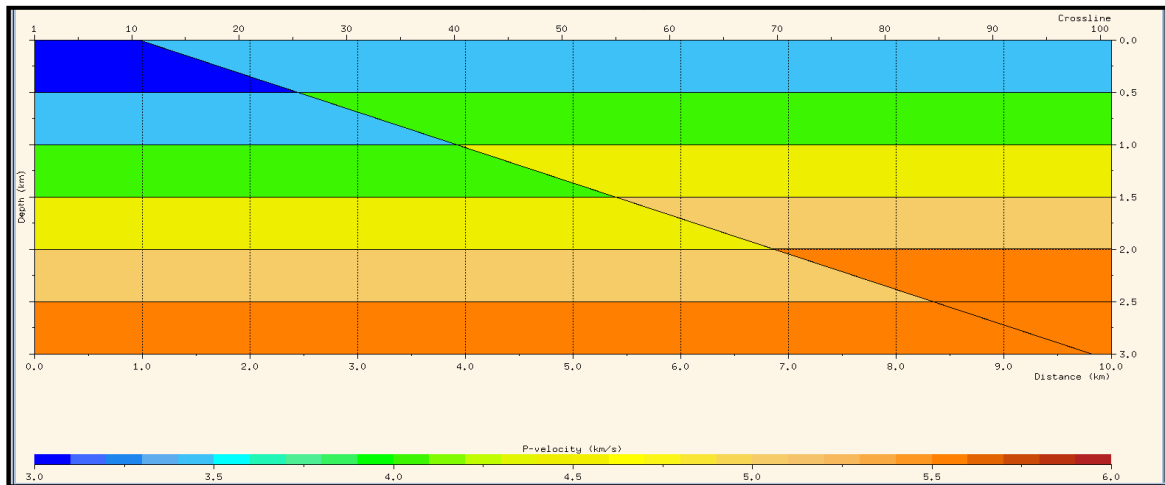
Modelo17\_f60\_g0.4. Modelo sintético; falla de 60° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m.



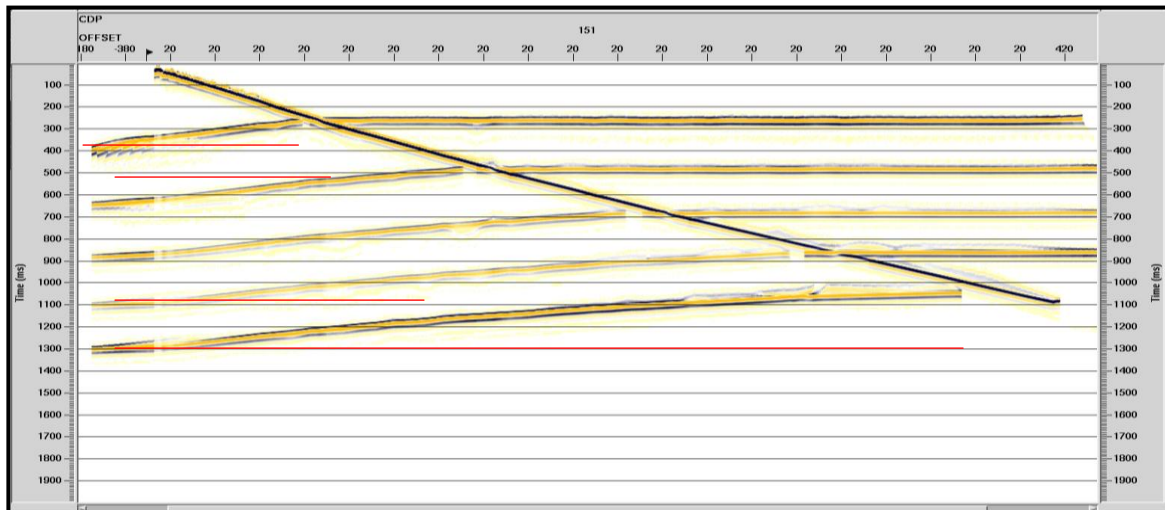
Modelo17\_f60\_g0.4\_stack. Modelo sintético; falla de 60° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Las líneas rojas representan la posición real que debería tener los reflectores; sin embargo se evidencian considerables levantamientos, de manera descendente, desde el cuarto reflector hasta el último.



Modelo17\_f60\_g0.4\_PSTM. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.

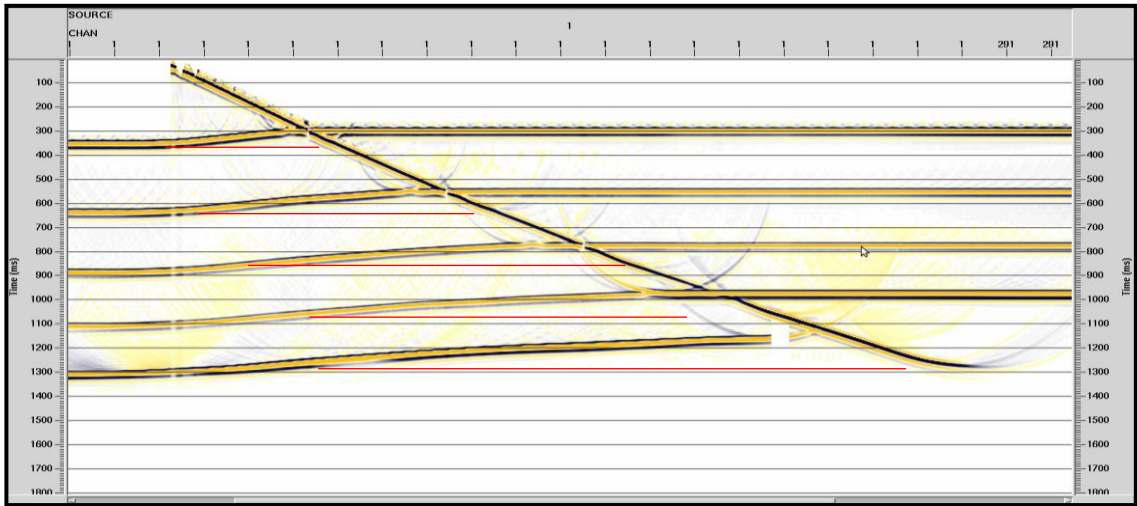


Modelo12\_f15\_g1. Modelo sintético; falla de 15° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m.

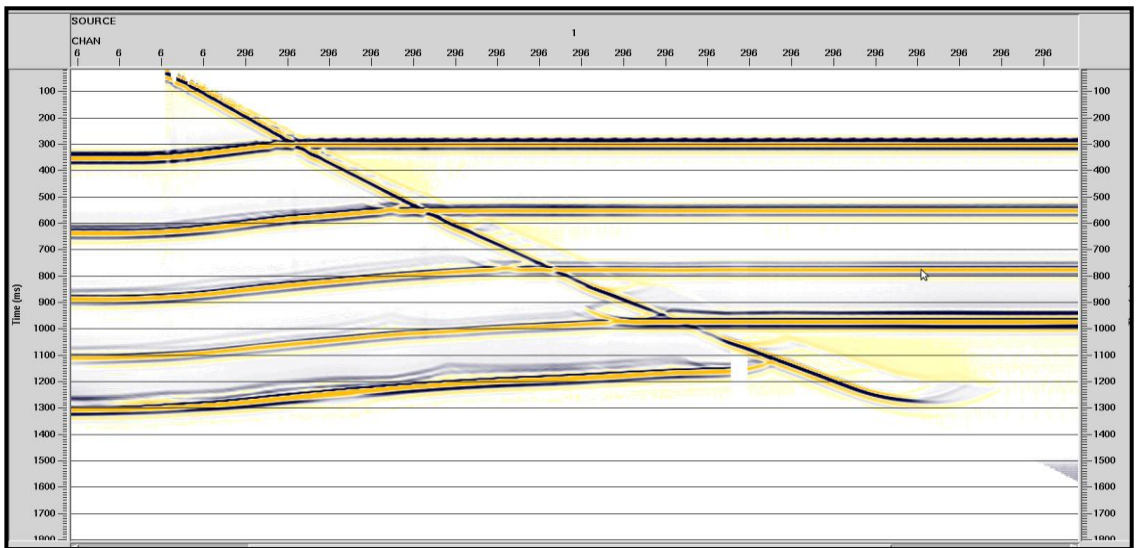


Modelo12\_f15\_g1\_stack. Modelo sintético; falla de 15° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m. Las líneas rojas representan la posición real que debería tener los reflectores; sin embargo se evidencian considerables levantamientos, de manera descendente, desde el primer reflecto hasta el último.

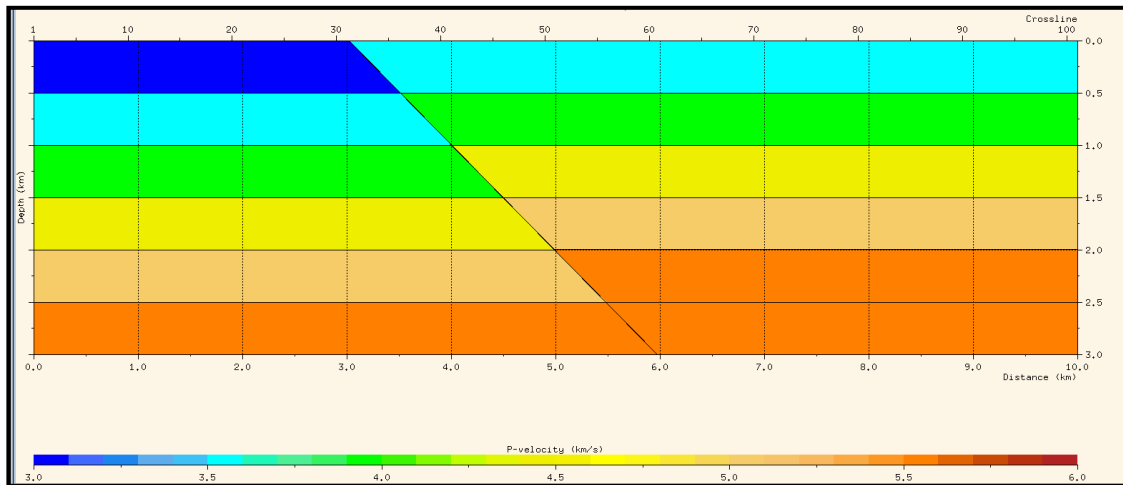




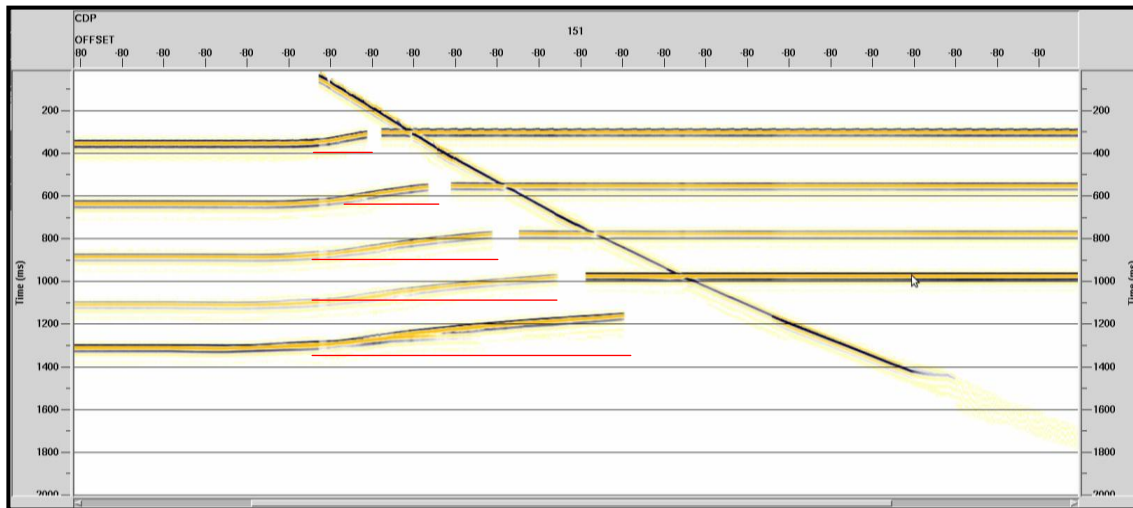
Modelo14\_f30\_g1\_stack. Modelo sintético; falla de 30° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m. Las líneas rojas representan la posición real que debería tener los reflectores; sin embargo se evidencian considerables levantamientos, de manera descendente, desde el primer reflector hasta el último.



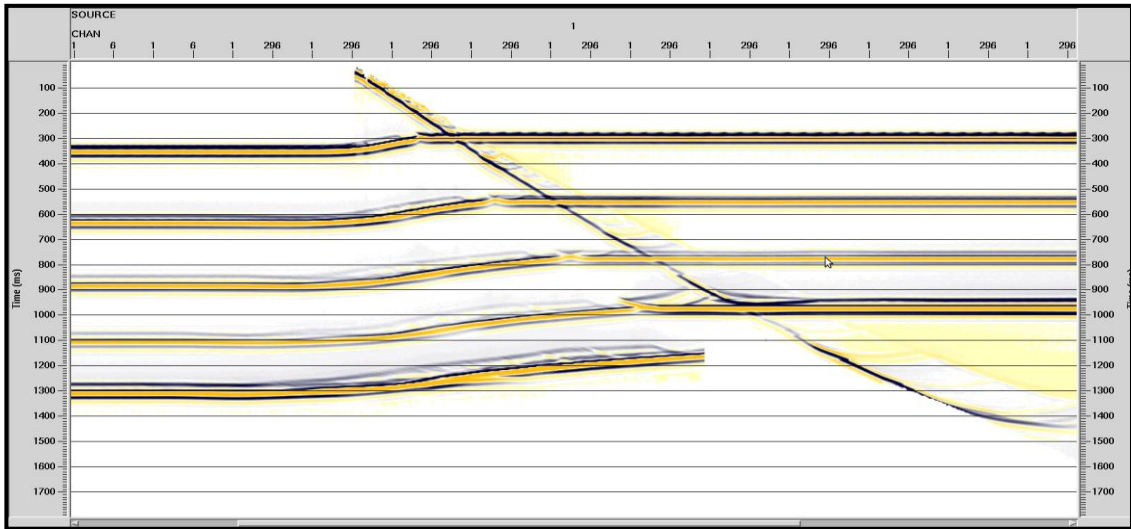
Modelo14\_f30\_g1\_PSTM. Modelo sintético; falla de 30° con un gradiente de 1.0[m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.



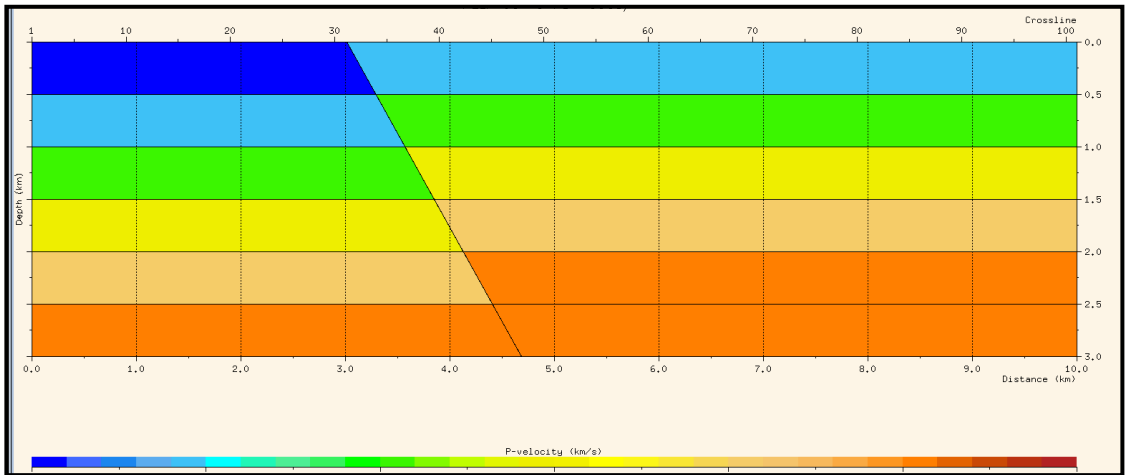
Modelo16\_f45\_g1.0. Modelo sintético; falla de 30° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m.



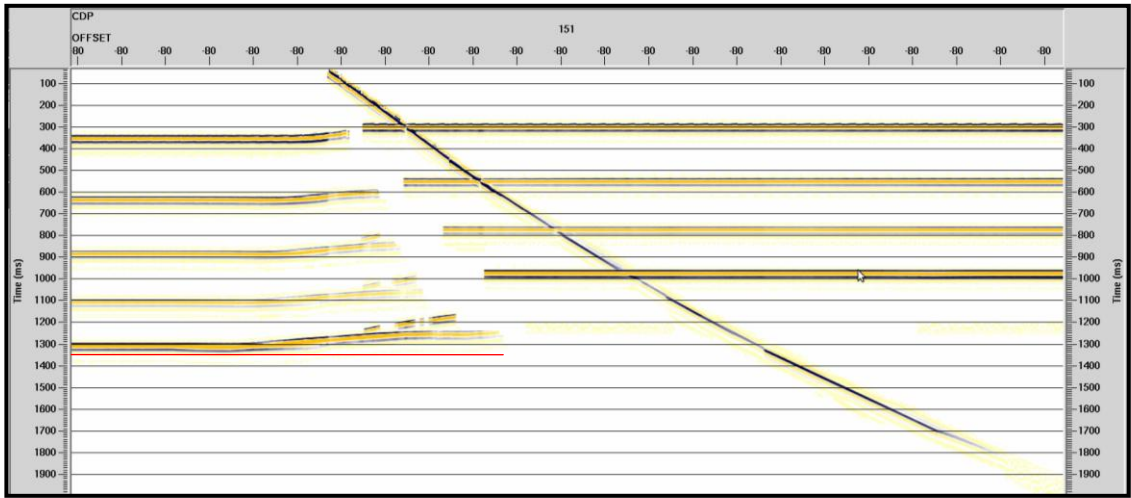
Modelo16\_f45\_g1.0\_stack. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m. Las líneas rojas representan la posición real que debería tener los reflectores; sin embargo se evidencian considerables levantamientos, de manera descendente, desde el primer reflector hasta el último.



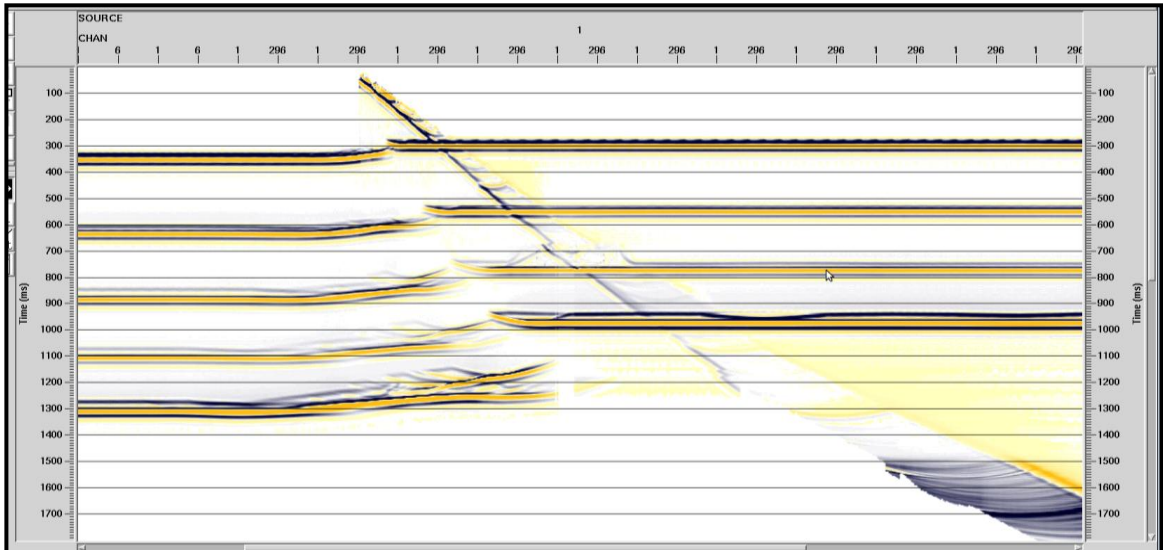
Model16\_f45\_g1.0\_PSTM. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 1.0[m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.



Modelo18\_f60\_g1.0. Modelo sintético; falla de 30° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m.



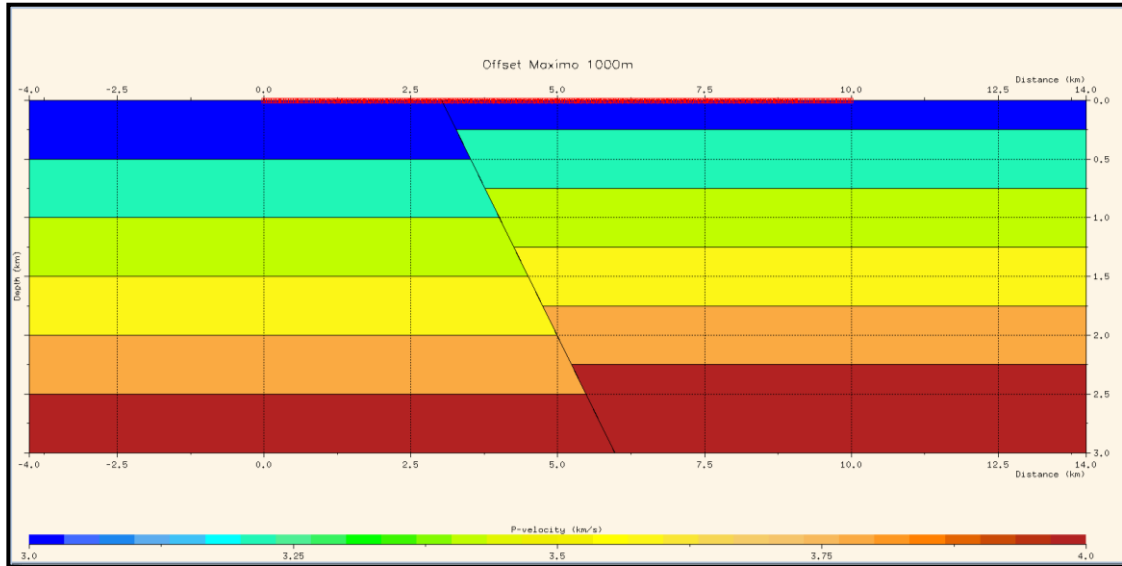
Model18\_f60\_g1.0\_stack. Modelo sintético; falla de 60° con un gradiente de 1.0 [m/s]/m. La línea roja representa la posición real que debería tener el reflector; sin embargo se evidencian de manera considerable un levantamiento, lo cual genera el pull-up.



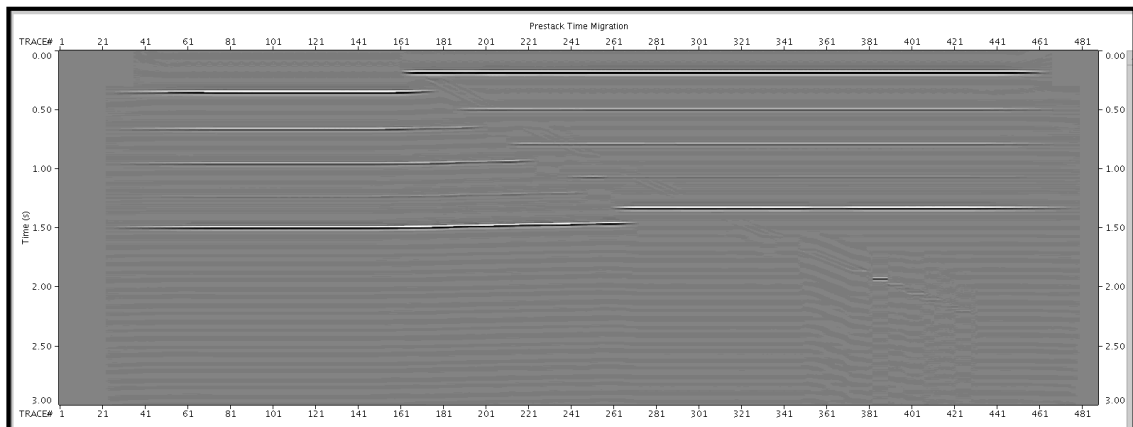
Model18\_f60\_g51.0\_PSTM. Modelo sintético; falla de 60° con un gradiente de 1.0[m/s]/m. Los reflectores son llevados a su posición original en tiempo.

## ANEXO C.

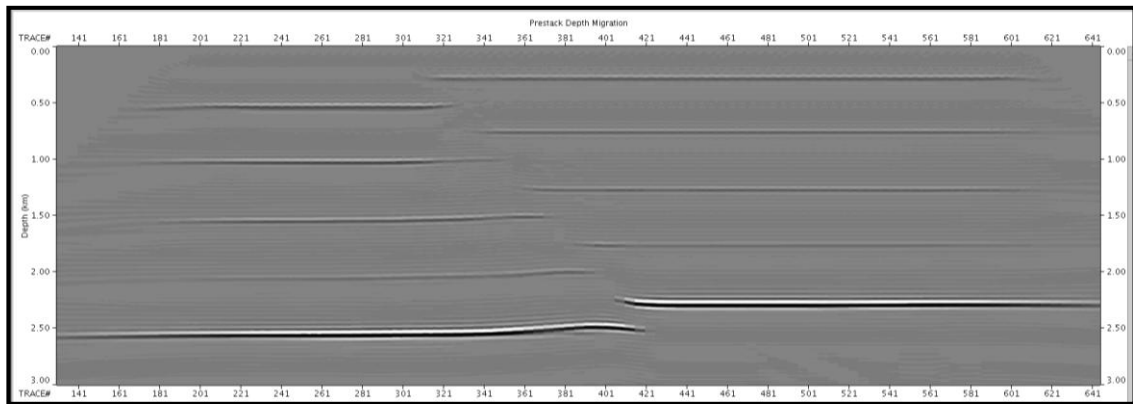
### MODELOS SINTÉTICOS CON SALTO DE FALLA DE 500 (m); OFFSET DE 1000(m), 2000(m), 3000(m) y 4000 (m)



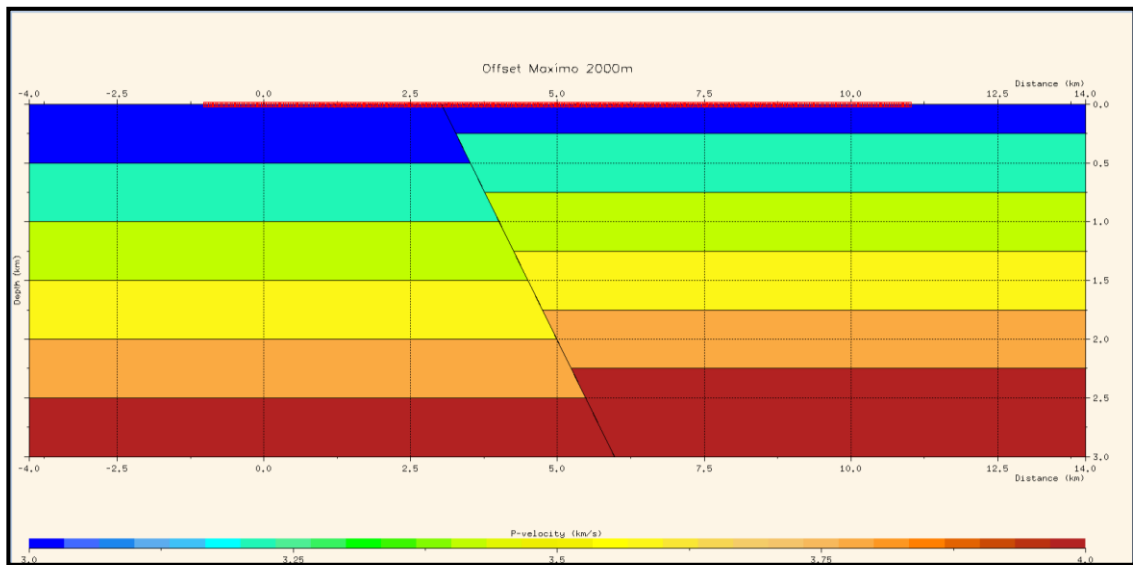
Modelo19\_f45\_g0.4\_1000. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m y offset de 1000 m.



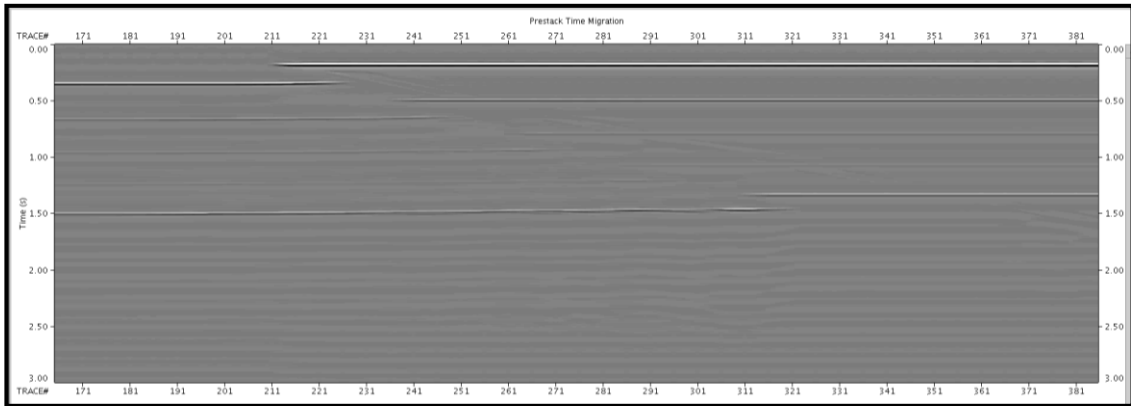
Modelo19\_f45\_g0.4\_1000PSTM. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m y offset de 1000 m.



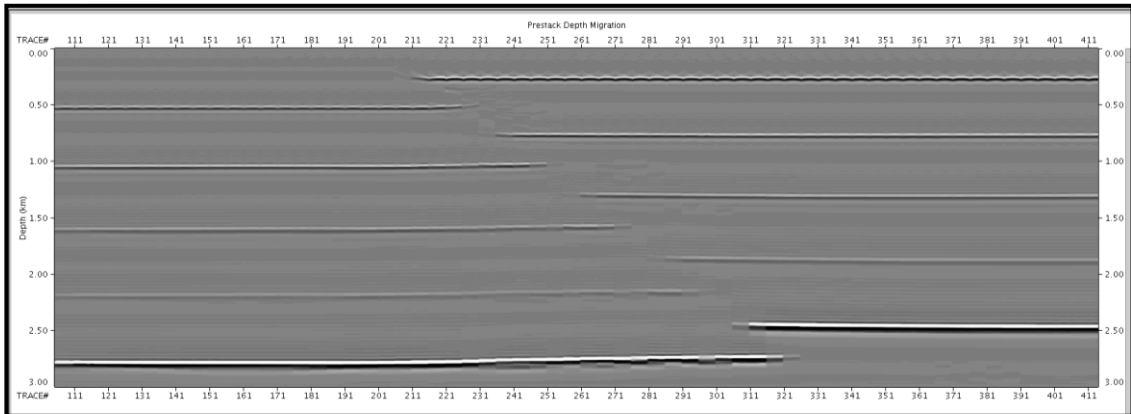
Modelo19\_f45\_g0.4\_1000PSDM. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m y offset de 1000 m.



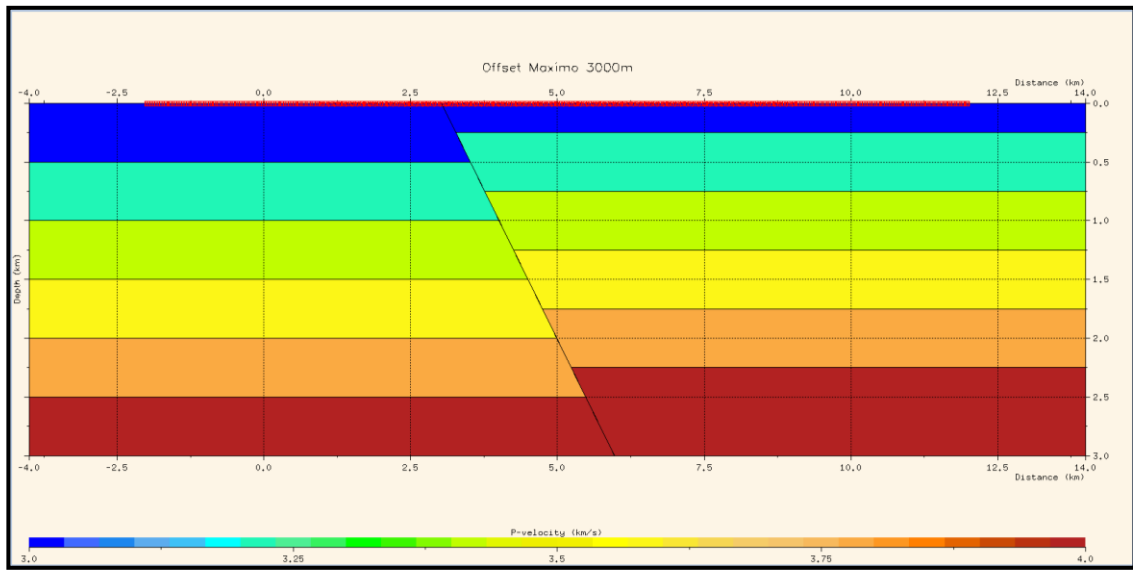
Modelo20\_f45\_g0.4\_2000. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m y offset de 2000 m.



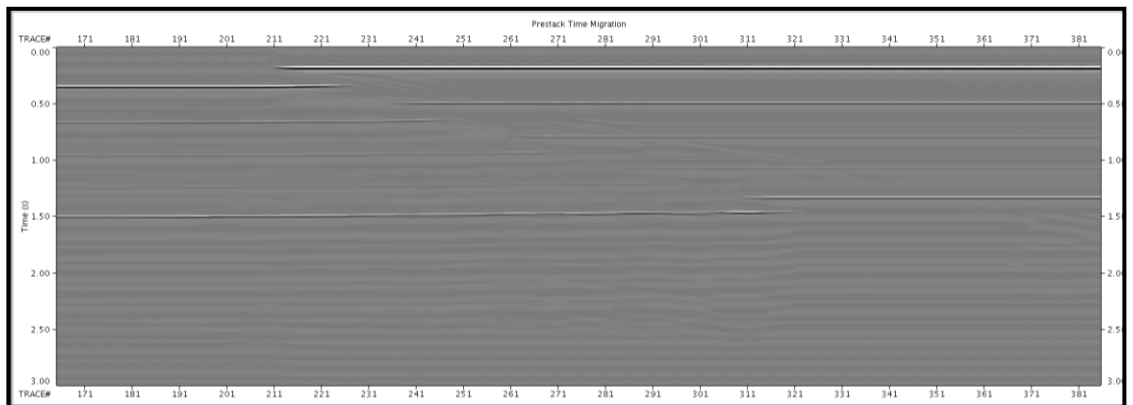
Modelo20\_f45\_g0.4\_2000PSTM. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m y offset de 2000 m.



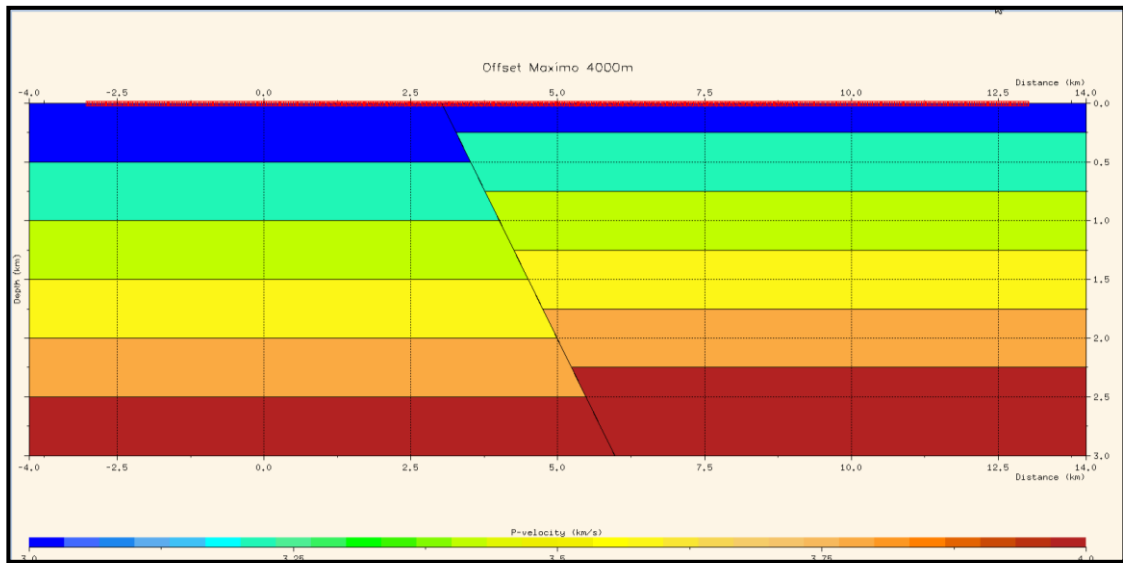
Modelo20\_f45\_g0.4\_2000PSDM. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m y offset de 2000 m.



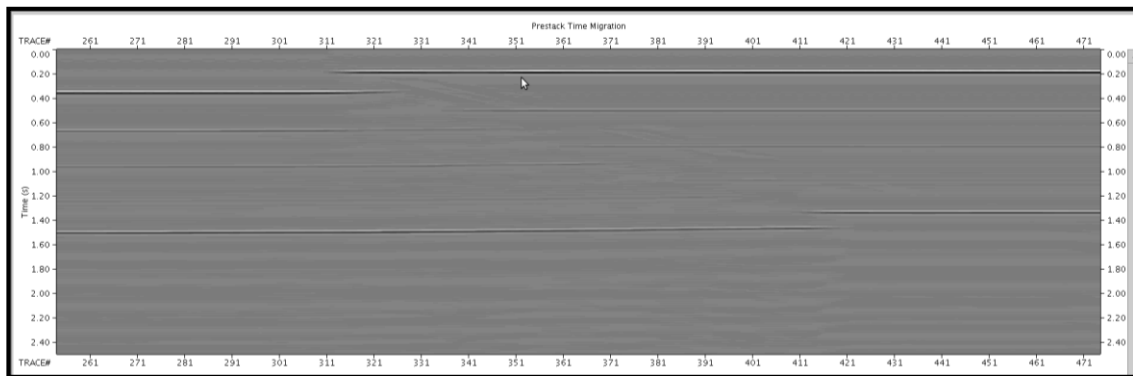
Model21\_f45\_g0.4\_3000. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m y offset de 3000 m.



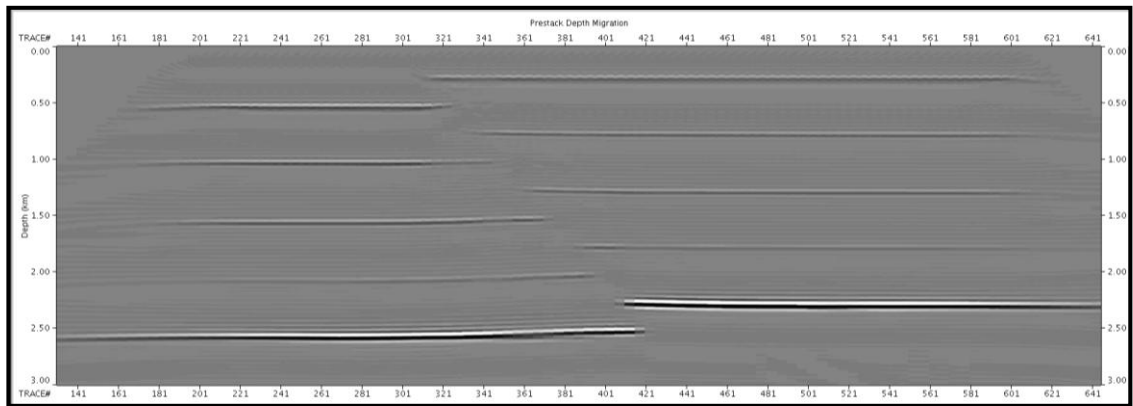
Model21\_f45\_g0.4\_3000PSTM. Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m y offset de 3000 m.



Model22\_f45\_g0.4\_4000. . Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m y offset de 4000 m.



Model22\_f45\_g0.4\_4000PSTM. . Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m y offset de 4000 m.



Modelo22\_f45\_go.4\_4000PSDM. . Modelo sintético; falla de 45° con un gradiente de 0.4 [m/s]/m y offset de 4000 m.