



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

METODOLOGÍA PARA REDUCIR EL EFECTO DE SOMBRA DE FALLA EN LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES-COLOMBIA

Claudia Milena Torres Vega

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ciencias, Departamento de Geociencias
Maestría en Ciencias Geofísica
Bogotá, Colombia

2016

METODOLOGÍA PARA REDUCIR EL EFECTO DE SOMBRA DE FALLA EN LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES-COLOMBIA

Claudia Milena Torres Vega

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias - Geofísica

Director:

Profesor Ph.D., Geofísica Luis Alfredo Montes Vides

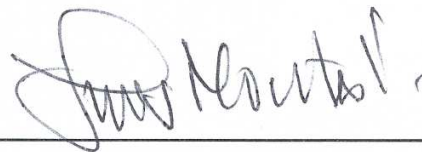
Universidad Nacional de Colombia
Facultad Ciencias, Departamento Geofísica
Maestría en Ciencias Geofísica
Bogotá, Colombia
2016

METODOLOGÍA PARA REDUCIR EL EFECTO DE SOMBRA DE FALLA EN LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES-COLOMBIA

Aprobado por

Director

Ph.D. Luis Alfredo Montes Vides



Bogotá, Agosto de 2016

Querer es poder...

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor,
la electricidad y la energía atómica: *la voluntad.*”

Albert Einstein

Agradecimientos

A Dios porque me dió el don de la perseverancia y voluntad para alcanzar una de mis metas.

A mi director de tesis Ph.D. Luis Alfredo Montes Vides, docente de la Universidad Nacional de Colombia, por su tiempo, asesoría, colaboración y conocimientos, expreso mis agradecimientos.

A la compañía Petróleos Sudamericanos por permitir el acceso a los datos empleados para el desarrollo de este trabajo.

A las compañías CGG e Inforpetrol, por la asesoría y acceso al software empleado en el modelamiento y procesamiento de los datos sísmicos

A mi familia, compañeros y amigos que, con su apoyo, ayuda y comprensión estuvieron presentes en cada una de las etapas del desarrollo de este estudio.

Resumen

En la provincia del Casanare, localizada en la Cuenca de los Llanos Orientales, los datos sísmicos 2D y 3D, debido a la existencia de formaciones de baja velocidad (Fm León) localizada entre capas de velocidad alta y otros factores, se ven afectados por la presencia de distorsiones geométricas (sombra de falla) en cercanías al bloque yacente tanto en fallas normales como en inversas, dando origen a falsas estructuras tales como anticlinales (“pull-up” sísmicos) y sinclinales (“push down” o “sag” sísmicos) reduciendo de este modo, la certidumbre en la interpretación sísmica de los datos. En este trabajo, se analiza el efecto de sombra de falla en zonas extensionales (fallas normales) y se presenta un análisis de los factores que inciden en la formación del efecto de sombra de falla a través de la generación de modelos sintéticos basados en capas plano paralelas y fallas normales y del procesamiento en tiempo y en profundidad de datos sísmicos reales con el objetivo de plantear una metodología que permita identificar, analizar y reducir el efecto producido por estas distorsiones en zonas de fallas normales. Se realizaron 20 modelos sintéticos, variando tanto el ángulo de buzamiento y el salto de falla como el gradiente de velocidad entre las capas. Por medio de estos, se comprobó que el efecto se produce por la inversión de velocidad, la variación lateral de la misma y se acentúa más cuando el ángulo de inclinación de la falla oscila entre 15° y 30°, con saltos de falla superiores a 90m, ya que el área contactada lateralmente entre las capas es mayor. El procesamiento de datos sísmicos reales en tiempo y en profundidad, permitió comprobar que es posible reducir el efecto mediante el empleo de un modelo de velocidades ajustado que refleje las condiciones geológico-geofísicas del subsuelo, conduciendo a una imagen sísmica de mejor calidad en cuanto a continuidad y definición de los eventos sísmicos. La metodología planteada permite verificar la existencia del fenómeno, analizar los factores que lo generan y reducir el efecto en la imagen sísmica.

Palabra Clave: Sombra de Falla, Velocidad, Distorsiones, Falla Normal, Migración, “pull up”, “push down”

Abstract

At the Casanare Province, located in the Llanos Basin, the 2D and 3D seismic data, due to the existence of low velocity layer (Fm. Leon) located between high-velocity layers and others factors, they are affected by the presence of geometric distortions (shadow fault) nearby the hanging wall in both normal and reverse faults, giving rise to false structures such as anticlines ("pull-up" seismic) and synclines ("push down" or "sag" seismic) thereby reducing the uncertainty in seismic data interpretation. In this document, the shadow fault effect is analyzed in extensional fault zones (normal faults) and is showed an analysis of the factors affecting the formation of the shadow fault effect through the generation of synthetic models, based on flat parallel layers and normal faults and the processing in time and depth of real seismic data with the aim to propose a methodology to identify, analyze and reduce the effect of these distortions in areas of normal faults. Twenty synthetic models were made, varying both dip angle and fault trough as the velocity gradient between the layers. Through these, it was found that the effect occurs by velocity inversion and lateral variation and is more noticeable when the fault inclination angle is between 15 and 30 degrees with higher fault trough as 90m due laterally contacted area between layers is greater. The real seismic data processing in time and depth, allowed to prove that it is possible to reduce the effect by using a velocity model adjusted to reflect the subsurface geological-geophysical conditions leading to a better quality seismic image in terms of continuity and definition of the seismic reflectors. The methodology proposed allows checking the existence of the phenomenon, analyze the factors that generate it and reduce the effect on the seismic image.

Keywords: shadow fault, velocity, distortions, normal fault, migration, pull up seismic, push down seismic

Contenido

	Pág.
Resumen	
Abstract	
Lista de Figuras	
Lista de tablas	
1. INTRODUCCION	15
1.1 Definición del Problema.....	15
1.2 Objetivos	16
1.3 Localización del Área de Estudio.....	16
1.4 Datos Utilizados	18
1.5 Metodología	19
1.6 Estado del Arte.....	21
2. Marco Geológico Regional	27
2.1 Generalidades.....	27
2.2 Evolución Geológica y Geología Estructural.....	28
2.3 Estratigrafía, Facies y Sedimentología General del Área de Estudio.....	29
2.3.1 Paleozoico	29
2.3.2 Formación Ubaque	29
2.3.3 Formación Gachetá	30
2.3.4 Formación Guadalupe	30
2.3.5 Formaciones Barco y Los Cuervos	30
2.3.6 Formación Mirador.....	30
2.3.7 Formación Carbonera.....	30
2.3.8 Formación León.....	31
2.3.9 Formaciones Guayabo, Necesidad.....	31
2.4 Variaciones de Velocidad	33
3. Marco Teórico.....	34
3.1 Método Sísmico	34
3.2 Modelamiento.....	40
3.2.1 Modelado sísmico por trazado de rayos	40
3.2.2 Modelado Sísmico por Ecuación de Onda	41
3.2.2.1 Criterio de Estabilidad.....	41
3.2.2.2 Dispersión de Malla	42
3.3 Migración (“Imaging”)	42

3.4	Sombra de Falla.....	43
3.4.1	Falta de Migración o Migración Inadecuada.....	44
3.4.2	Recuperación Excesiva de Amplitudes.....	45
3.4.3	Estáticas Imprecisas.....	45
3.4.4	Ruidos en general.....	46
3.4.5	Variaciones laterales de velocidad.....	47
3.4.6	Deconvolución, Filtrados o Procesos variados.....	48
3.4.7	Zonas poco iluminadas.....	49
4.	Interpretación Sísmica.....	52
5.	Modelamiento de Datos Sintéticos 2D.....	59
5.1	Definición del Modelo en Profundidad.....	59
5.2	Modelamiento y Procesamiento de los Datos Sintéticos 2D.....	63
5.2.1	Carga de datos.....	68
5.2.2	Geometría.....	68
5.2.3	Análisis de Velocidad.....	69
5.2.4	Apilado de trazas sísmicas.....	70
5.2.5	Migración pre apilado en tiempo.....	71
6.	Procesamiento de Datos Reales.....	73
6.1	Parámetros de Adquisición.....	75
6.2	Parámetros Generales.....	75
6.3	Descripción del Procesamiento Sísmico.....	76
6.3.1	Lectura de Datos.....	76
6.3.2	Geometría.....	76
6.3.3	Eliminación de Ruidos.....	79
6.3.4	Recuperación de Amplitudes.....	80
6.3.5	Compensación de Amplitudes.....	81
6.3.6	Deconvolución.....	82
6.3.7	Balanceo Espectral Variable en tiempo (TVSW).....	83
6.3.8	Estáticas de Refracción.....	84
6.3.9	Análisis de Velocidad.....	84
6.3.10	Estáticas Residuales.....	87
6.3.11	Migración Pos-apilado.....	87
6.3.12	Migración Pre-Apilado en tiempo (PSTM).....	91
6.3.13	Migración Pre apilado en Profundidad (PSDM).....	92
6.3.13.1	Preparación de los datos.....	94
6.3.13.2	Secuencia para la PSDM.....	94
7.	Resultados.....	99
7.1	Análisis de los Datos Sintéticos.....	99
7.2	Análisis de Datos Reales.....	115
7.3	Análisis de Efecto de Sombra de Falla en el área de estudio.....	118
8.	Metodología para analizar y reducir el efecto de Sombra de Falla.....	122
9.	Conclusiones.....	124
	Anexo A. Modelos Sintéticos.....	127
	Bibliografía.....	167

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Localización del área de estudio y rasgos fisiográficos más importantes. ...	17
Figura 1-2: Efecto de sombra de falla sobre la línea sísmica R-2005-03 (Pull Up & Pull Down), CMP 200 a 480.	19
Figura 1-3: Secuencia Metodológica propuesta para el desarrollo del proyecto	21
Figura 1-4: Zona de Sombra de Falla-(Martínez y Agudelo, 2009)	22
Figura 1-5A: Sección sísmica mostrando el efecto de sombra de falla (densidad variable)- (Trincheró, 2000).	23
Figura 1-5B: Anomalías en tiempo producto de variaciones verticales y laterales de velocidad.....	26
Figura 2-1: Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca de los Llanos Orientales. (ANH, 2009)	32
Figura 2-2: Velocidad intervállica vs perfil de profundidad a partir de datos sísmicos (A) y velocidad promedio típica vs perfil de profundidad.(B). (Chermak, 2009)	33
Figura 3-1: Etapas del Método Sísmico-(Martínez, 2009).....	34
Figura 3-2: Conversión de una onda incidente P. (Acosta, 2009).	36
Figura 3-3: Los geófonos, situados a distancias conocidas (x_i), registran los diferentes tiempos de llegada de cada tipo de onda (t_j) que está caracterizada para una determinada trayectoria. Con estos tiempos (t_j), la geometría del dispositivo experimental (x_i) y las ecuaciones de las trayectorias de los rayos se calcula la distribución de velocidades del subsuelo ($V_1, V_2; \dots$). (Acosta, 2009).	36
Figura 3-4: Ejemplo de registro de campo en donde se pueden ver todas las ondas procedentes del contacto entre dos capas. (Acosta, 2009)	37
Figura 3-5: Esquema básico de la emisión y recepción de los rayos reflejados en las distintas capas reflectoras. (Acosta, 2009)	38
Figura 3-6: (a) Esquema del recorrido de los rayos reflejados en tres capas para un registro y dos estaciones receptoras (geófonos)-(Acosta, 2009).	39
Figura 3-7: CMP Apilado. (a) Sección apilada en CMP (b) Sección después de la migración de (a). (Yilmaz, 2002).....	43
Figura 3-8: Posición de reflectores sísmicos debido a variaciones verticales y laterales de velocidad. (Acosta, et al, 2009).....	44
Figura 3-9: Sección no migrada (izquierda) e incorporación de fallas en la sección migrada (derecha). (Acosta, 2009)	45
Figura 3-10: Falsas estructuras por problemas no corregidos debidos a variación de velocidad. (Acosta, 2009)	46

Figura 3-11: Efecto de los ruidos sobre la sección sísmica. (Acosta, 2009).....	46
Figura 3-12: Efecto de Sombra de falla por variaciones de velocidad. (Acosta, 2009)....	47
Figura 3-13: Modelado sintético del efecto de sombra de falla-(Acosta, 2009).	48
Figura 3-14: Cambio lateral de carácter geológico-(Acosta, 2009).	48
Figura 3-15: Zonas poco iluminadas. (Acosta, 2009).....	49
Figura 3-16: Imagen de una falla inversa mostrando un esquema del efecto de sombra de falla en el bloque yacente-(Martínez, 2009).....	50
Figura 4-1: Correlación estructural entre los pozos E-2, E-1, E-3	53
Figura 4-2: Calibración sísmica mediante sismograma sintético pozo E-01.....	54
Figura 4-3: Amarre sísmica-pozo e interpretación de las líneas R-2005-03.....	55
Figura 4-4: Amarre sísmica-pozo e interpretación de la línea R-2005-02	56
Figura 4-5: Amarre sísmica-pozo e interpretación de la línea R-2005-01	57
Figura 5-1: Velocidad interválica vs profundidad a partir del registro sísmico del pozo E-1.	60
Figura 5-2: Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 45° y salto de falla 90m.	62
Figura 5-3: Modelo Sintético para un ángulo de 45° y Salto de Falla 90m.....	64
Figura 5-4: Generación de la línea sísmica sintética en Tesseral Pro.....	65
Figura 5-5: Imagen sísmica <i>zero offset</i> para el modelo geológico de 45° y salto de falla 90m. Nótese la presencia de <i>pull up</i> y distorsiones en el bloque yacente de la falla.	66
Figura 5-6: Gathers obtenidos para el modelo de 45° salto de falla 90 mediante diseño Split Spread.....	67
Figura 5-7: Diagrama de cubrimiento obtenido de la carga de datos sintéticos y asignación de geometrías	68
Figura 5-8: Análisis de Velocidades mediante semblanza para el modelo sintético ángulo de 45 salto de falla 90m.	70
Figura 5-9: Sección apilada en tiempo para el modelo sintético 45° salto de falla 90m, a la derecha la imagen generada a partir del diseño Split spread y a la izquierda la sección apilada obtenida a partir de diseño “ <i>Zero offset</i> ”.....	71
Figura 5-10: Sección migrada en tiempo (PSTM) para el modelo sintético 45° salto de falla 90m.....	72
Figura 6-1: Flujo de trabajo empleado en el procesamiento en tiempo de los datos reales.	73
Figura 6-2: Flujo de trabajo empleado en el procesamiento en profundidad de los datos reales.	74
Figura 6-3: Registros de campo de la línea R-2005-03.....	76
Figura 6-4: Geometría de la línea.....	77
Figura 6-5: Shot con geometría (Izquierda) / Sin geometría (derecha)	78
Figura 6-6: QC Geometría.....	78
Figura 6-7: Espectros de Frecuencia y Fase	79
Figura 6-8: Atenuación de <i>Ground Roll</i> . Disparo #5 con <i>Ground Roll</i> (derecha) y sin el efecto de <i>ground roll</i> (izquierda)	79
Figura 6-9: Atenuación de <i>Spikes</i> . Disparo #13 con <i>spikes</i> (derecha) y sin <i>spikes</i> (izquierda)	80

Figura 6-10: Recuperación de Amplitudes (TAR).	81
Figura 6-11: Compensación de Amplitudes (TRC).	82
Figura 6-12: Apilado con Decon + TVSW	83
Figura 6-13: Apilado con estáticas por refracción	85
Figura 6-14: Análisis de Velocidades.....	86
Figura 6-15: Parámetros empleados en la generación del Apilado	86
Figura 6-16: Sección Apilada con estáticas residuales y trim	88
Figura 6-17: Apilado Final para la línea R-2005-03	89
Figura 6-18: Migración Pos-apilado para la línea R-2005-03.....	90
Figura 6-19: Modelo de Velocidad (PSTM) Segunda corrida.....	92
Figura 6-20: Migración Pre apilado en Tiempo línea R-2005-03.....	93
Figura 6-21: PSDM final a partir de las velocidades RMS	95
Figura 6-22: PSDM preliminar a partir del modelo de velocidad obtenido en la PSTM ..	96
Figura 6-23: PSDM_Stack con “Residual Move Out” (RMO)	97
Figura 6-24: Modelo de Velocidades Final.....	97
Figura 6-25: PSDM Final.....	98
Figura 7-1: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con ángulo de buzamiento de 15° y variación del salto de falla: 60m, 90m, 150 y 300m.....	100
Figura 7-2: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con ángulo de buzamiento de 30° y variación del salto de falla: 60m, 90m, 150 y 300m.....	102
Figura 7-3: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con ángulo de buzamiento de 45° y variación del salto de falla: 60m, 90m, 150 y 300m.....	104
Figura 7-4: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con ángulo de buzamiento de 60° y variación del salto de falla: 60m, 90m, 150 y 300m.....	106
Figura 7-5: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con ángulo de buzamiento de 75° y variación del salto de falla: 60m, 90m, 150 y 300m.....	108
Figura 7-6: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con salto de falla 60m y variación del ángulo de buzamiento de la falla: 15°, 30°, 45°, 60°y 75°.....	110
Figura 7-7: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con salto de falla 90m y variación del ángulo de buzamiento de la falla: 15°, 30°, 45°, 60°y 75°.....	111
Figura 7-8: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con salto de falla 150m y variación del ángulo de buzamiento de la falla: 15°, 30°, 45°, 60°y 75°.....	112
Figura 7-9: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con salto de falla 300m y variación del ángulo de buzamiento de la falla: 15°, 30°, 45°, 60°y 75°.....	113

Figura 7-10: Modelo con datos sintéticos Angulo 45° y salto de falla 60m.A. Sección sísmica zero offset. B. Sección apilados en tiempo. C. Sección Migrada en tiempo.....	115
Figura 7-11: Migración PostApilado en tiempo línea R-2005-03. A. Procesamiento Anterior. B. Procesamiento 2015.....	115
Figura 7-12. Interpretación en tiempo línea R-2005-03. A. Procesamiento Anterior. B. Procesamiento 2015	116
Figura 7-13: Reducción del efecto de la zona de sombra de falla sobre la PSDM.....	117
Figura 7-14: Modelo sintético de 45° y 300m mostrando el efecto de sombra de falla en la zona poco iluminada.....	119
Figura 7-15: Línea R-2005-03 (PSTM) mostrando el efecto de sombra de falla en la zona poco iluminada.	119
Figura 7-16: Modelo sintético ángulo de buzamiento de la falla de 45° y salto de falla 300m. A. Modelo sintético en profundidad. B. Modelo Sintético en tiempo, incidencia normal, zero offset. C Imagen sísmica migrada en tiempo a partir de diseño split spread.	121

Lista de tablas

	Pág.
Tabla1-1: Datos de Pozo.	18
Tabla 5-1: Promedio de velocidades intervállica por formación a partir del registro sísmico del pozo E-1	59
Tabla 5-2: Promedio de densidades y velocidades por formación a partir del registro de densidad y sísmico del pozo E-1	60
Tabla 5-3: Gradiente de velocidad para cada una de las formaciones geológicas	61
Tabla 5-4: Estimación del número de capas para cada formación geológica	61
Tabla 5-5: Datos de velocidad intervállica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 45° salto de falla 90m.....	62
Tabla 5-6: Modelos sintéticos con variación de ángulo y salto de falla.....	63
Tabla 5-7: Parámetros definidos para la generación del modelo geológico para un ángulo de 45° con salto de falla 90m.	64
Tabla 5-8: Parámetros empleados en la adquisición sísmica sintética zero <i>offset</i>	65
Tabla 5-9: Parámetros empleados en la adquisición sísmica sintética Split spread	67
Tabla 6-1: Parámetros de adquisición de la línea R-2005-03.....	75
Tabla 6-2: Deconvolución	82
Tabla 7-1: Análisis del comportamiento del efecto de sombra de falla en el modelo sintético con variación del salto de falla y ángulo de buzamiento de falla 15°.....	101
Tabla 7-2: Análisis del comportamiento del efecto de sombra de falla en el modelo sintético con variación del salto de falla y ángulo de buzamiento de falla 30°.....	103
Tabla 7-3: Análisis del comportamiento del efecto de sombra de falla en el modelo sintético con variación del salto de falla y ángulo de buzamiento de falla 45°.....	105
Tabla 7-4: Análisis del comportamiento del efecto de sombra de falla en el modelo sintético con variación del salto de falla y ángulo de buzamiento de falla 60°.....	107
Tabla 7-5: Análisis del comportamiento del efecto de sombra de falla en el modelo sintético con variación del salto de falla y ángulo de buzamiento de falla 75°.....	109

1. INTRODUCCION

1.1 Definición del Problema

Una de las cuencas de mayor interés exploratorio y la mayor productora de crudo actualmente en Colombia es la Cuenca de los Llanos Orientales. En esta cuenca tipo "foreland" (ó de antepaís), la secuencia sedimentaria Meso-Cenozoica esta, frecuentemente cortada por fallas normales. Asociadas a estas fallas normales que en esta área son "antitéticas" (la falla y los estratos se inclinan hacia las direcciones opuestos), se encuentra el mayor número de acumulaciones comerciales conocido, en cuencas de este tipo. Al analizar e interpretar los datos sísmicos existentes en algunas áreas de la provincia del Casanare, se ha encontrado un efecto que genera distorsiones en el bloque yacente (bloque bajo el plano de falla, conocido como "footwall") de las fallas normales denominado *efecto de sombra de falla*, el cual muestra la expresión de estructuras en tiempo que posiblemente no corresponden a la estructura real en profundidad, y que por lo tanto impide la correcta definición de prospectos y desarrollo de campos. En el área de estudio, las interpretaciones realizadas a los datos sísmicos 2D muestran en el bloque yacente de la falla normal, distorsiones en la geometría de la estructura presente, tales distorsiones pueden verse como estructuras antiformes asimétricas (tipo "rollover") adyacentes al plano de falla o como variaciones del ángulo de inclinación de los reflectores bajo el plano de falla, además de esto, las formaciones presentes en el área corresponden a capas de baja velocidad intercaladas con otras de alta velocidad, razones por las cuales es posible interpretar que existe el problema de sombra de falla en la zona. Por tal razón es necesario responder las siguientes formulaciones: ¿Qué factores influyen en la generación del problema de sombra de falla? ¿Es posible mejorar el efecto mediante procesamiento sísmico? ¿Existe realmente una estructura bajo el plano de falla? Por lo anterior, se propone realizar un análisis de los

factores que inciden en el problema de sombra de falla mediante la elaboración de modelos sintéticos y el procesamiento sísmico en tiempo y en profundidad de datos sísmicos 2D con el objetivo de plantear una metodología que permita identificar, analizar o reducir el problema con el fin de mejorar la calidad de las interpretaciones, y así minimizar el riesgo exploratorio y de desarrollo.

1.2 Objetivos

El **objetivo general** de la investigación es desarrollar una metodología que permita analizar o reducir el efecto de la sombra de falla sobre las imágenes sísmicas 2D en la Cuenca de Los Llanos Orientales, específicamente en el área del Casanare.

En este contexto es necesario plantear **objetivos específicos** que contribuyan al logro del objetivo general:

- Entender y cuantificar los factores que producen el efecto de la sombra de falla, específicamente en zonas de fallas normales sobre sísmica 2D.
- Implementar una metodología que permita analizar o reducir el efecto que produce el problema de sombra de falla

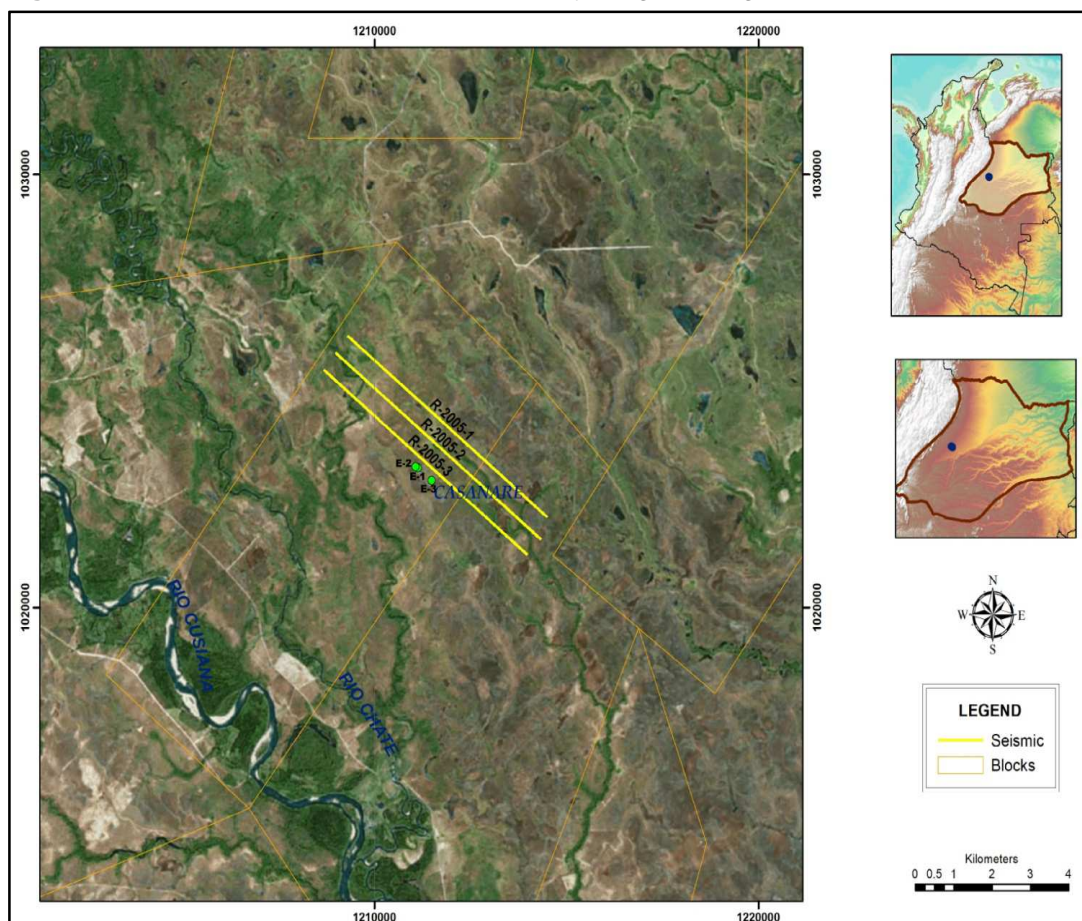
1.3 Localización del Área de Estudio

El área de estudio se ubica geográficamente al oriente del país, en el departamento del Casanare. Se encuentra localizada en la Cuenca de los Llanos Orientales, en inmediaciones del municipio de Maní, a 70 Km al suroriente de la ciudad de Yopal. Corresponde a una extensa zona de plataforma con predominio de fallas normales antitéticas de dirección N-S y ENE – WSW originadas por la existencia de esfuerzos de tipo extensional originadas durante el Paleozoico y reactivadas en el Mioceno y se consideran coetáneas con la orogenia Andina, involucrando el basamento y las secuencias cretácicas y cenozoica. Geológicamente forma parte de la Cuenca de Los Llanos Orientales y estructuralmente, es un monoclinal suave de rumbo NE-SW, al suroeste se interpreta como un anticlinal truncado contra la falla. El bloque está asociado al tren de fallas normales de las cuales hacen parte un importante número de estructuras productoras en este sector de la cuenca. El desplazamiento de las fallas normales antitéticas es generalmente pequeño, aunque en algunos casos alcanzan varias decenas de metros. El Paleozoico representa, generalmente, una sección

delgada que se engrosa hacia el Oeste. La Provincia del Casanare corresponde a un gran monoclin. El monoclin está interrumpido por un sistema de fallas normales antitéticas, de orientación NE-SW que se relevan entre sí. El bloque levantado, que conforma la estructura, está del lado oeste de la falla con un cierre estructural neto al norte y al oriente contra la falla principal. La estructura de relevo, al sur, prácticamente en todos los niveles de interés muestran cierre al norte y están abiertas al sur lo que deja la posibilidad de una potencial estructura al sur.

El desarrollo de este trabajo cuenta con los datos de los pozos E-1, E-2, E-3 (checkshot, sónico, densidad), los datos sísmicos (*shots*) adquiridos en campo y proceso de la línea R-2005-03 y los archivos segy de proceso de las líneas, R-2005-01, R-2005-02 con un cubrimiento de 7.2km². Para efectos del desarrollo de este trabajo, se emplearon los datos del pozo E-1, por ser el que cuenta con el *set* de registros completo y el único que tiene datos de velocidad, y la línea R-2005-03 debido a que es la única que tiene disponible los datos de campo y se encuentra localizada sobre el pozo E-1. En la Figura 1-1, se muestra la ubicación de los datos disponibles y los rasgos fisiográficos más importantes.

Figura 1-1: Localización del área de estudio y rasgos fisiográficos más importantes.



1.4 Datos Utilizados

Los datos utilizados comprenden información sísmica 2D, registros de pozo e información bibliográfica de estudios anteriores. Los datos sísmicos corresponden a un levantamiento sísmico 2D adquirido en el 2005 (“*gather*” o familias y apilados), se seleccionaron las líneas sísmicas, donde es más evidente el problema de sombra de falla, cada línea tiene una extensión de 5.3 km con una ventana de registro de 4.8s pero se seleccionó para el desarrollo del trabajo la línea R-2005-03, por ser la única con datos de campo disponibles, la más cercana al pozo E-01, para el que se adquirieron datos de velocidad y en la que se observa más claro el problema de sombra de falla. En la figura 1-2 se muestra la interpretación de la línea sísmica R-2005-03, en la que se detalla (línea punteada en blanco), la zona afectada por el problema de sombra de falla. Como se muestra, en el bloque yacente se forman distorsiones representadas por falsas estructuras dando origen a lo que se conoce como el efecto de la sombra de falla.

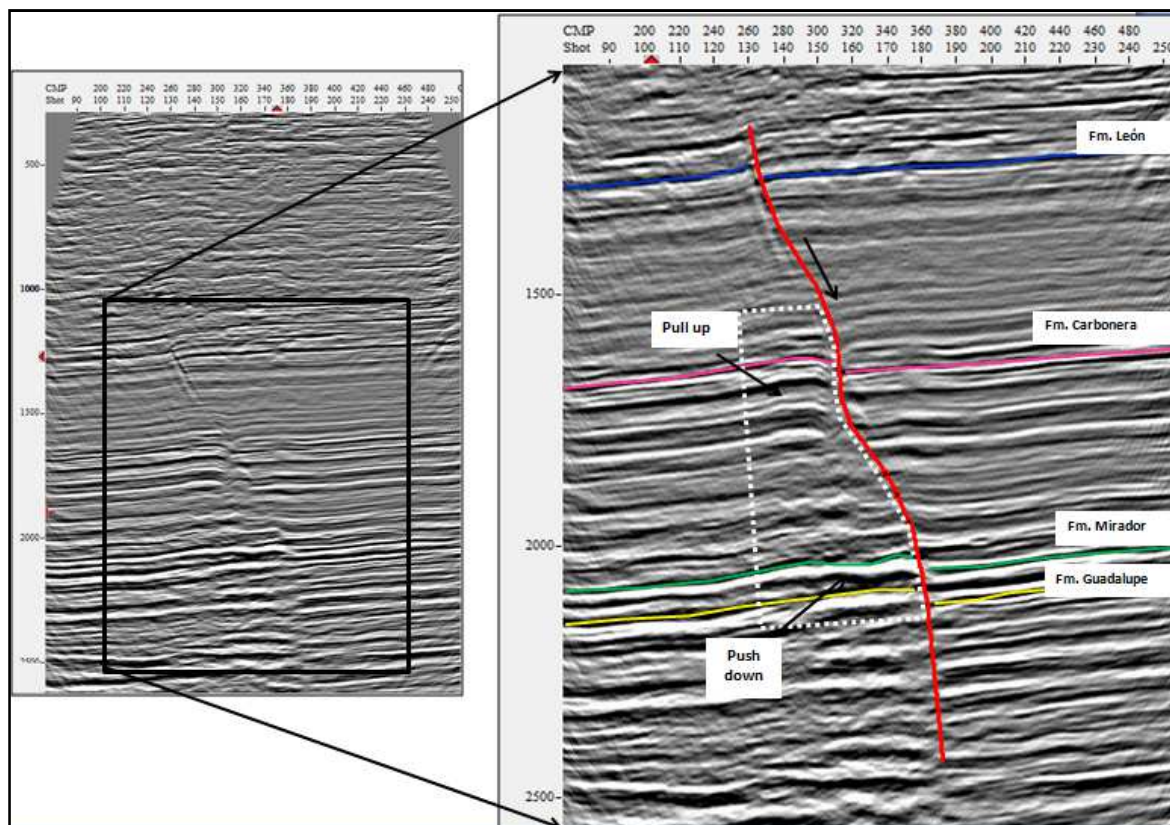
Se utilizó la información de cuatro pozos localizados dentro del campo (E-1, E-2, E-3) los cuales cuentan con el set de registros mostrado a continuación (Tabla 1-1):

Tabla1-1: Datos de Pozo.

POZO	GR	SP	ResD	ResS	NPHI	DT	RHOB
E-1	782'-10742'	3936'-10742'	782'-10742'	782'-10742'	3935'-10602'	782'-10742'	782'-10742'
E-2	100'-10442'	1933'-9524'	100'-9550'	1933'-9550'	8423'-10442'	No	No
E-3	100'-9721'	6791'-9721'	6791'-9721'	6791'-9721'	No	6791'-9695'	No

El pozo E-1 es el único que cuenta con datos de velocidades (registro sísmico y “checkshot” o disparos de chequeo).

Figura 1-2: Efecto de sombra de falla sobre la línea sísmica R-2005-03 (Pull Up & Pull Down), CMP 200 a 480.



1.5 Metodología

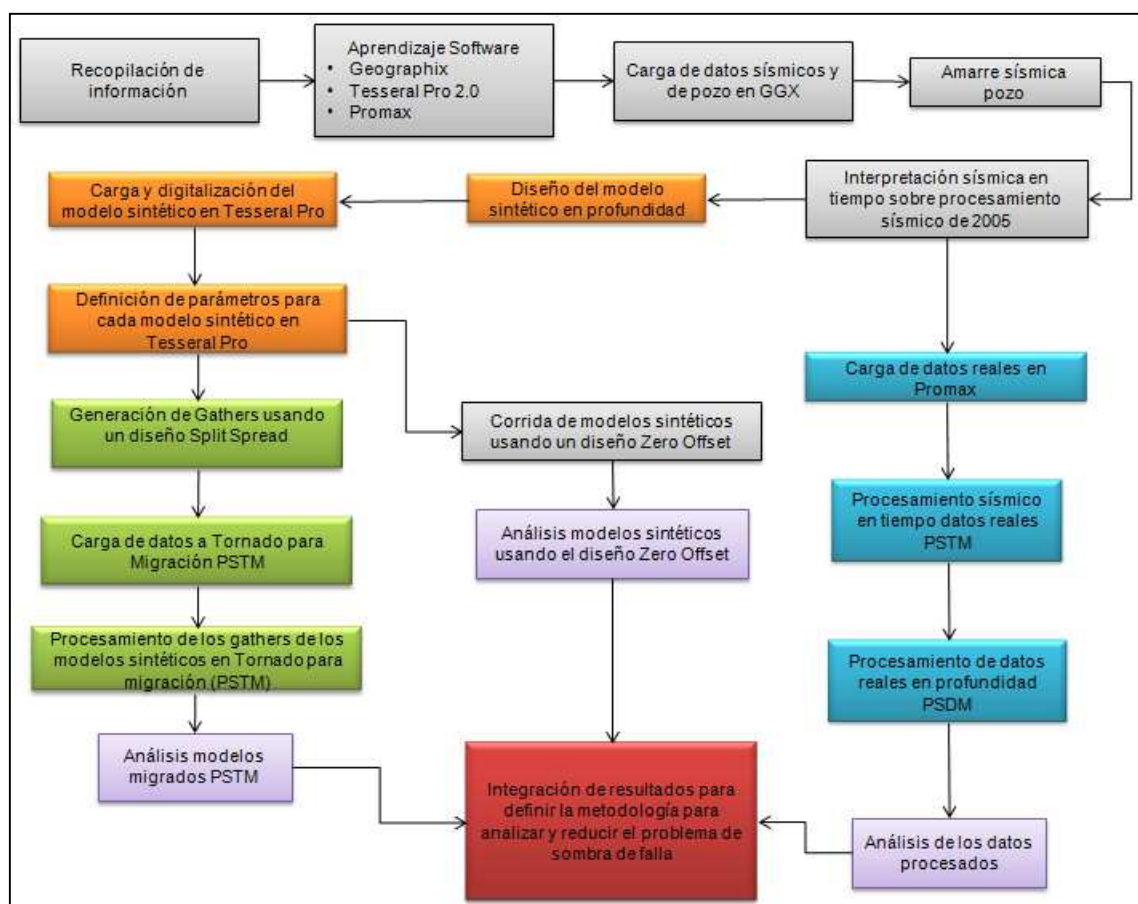
Se realizó una etapa inicial de la documentación y análisis de los estudios existentes referentes al problema de sombra de falla. Posteriormente se recopilaron los datos sísmicos y de pozos a emplear en el desarrollo del trabajo. Se estableció el software necesario para el desarrollo del proyecto, y se realizó una etapa de aprendizaje y entrenamiento de las siguientes herramientas: Geographix empleado en la parte de interpretación, Tesseral Pro 2D utilizado en la elaboración de los modelos sintéticos y Promax usado en el procesamiento de los datos reales. A continuación, a partir de la información sísmica y de pozo recopilada, se realizó la interpretación sísmica del área con el objetivo de definir la estructura presente. Para esto, previamente se amarró la información sísmica teniendo en cuenta los datos de pozo, se realizó la correlación entre pozos para definir los topes formacionales, y finalmente se interpretaron las líneas sísmicas. Teniendo en cuenta el modelo estructural obtenido en la etapa de

interpretación y los datos del pozo E-1 (registro sísmico DT y densidad), se estableció un modelo sintético del área de análisis compuesto de tres capas plano paralelas cortadas por una falla normal. A partir de este modelo y con el objetivo de analizar los factores que generan el problema de sombra de falla, se realizaron 20 modelos sintéticos, cada uno con variación de ángulo, salto de falla y velocidad intervállica. Con el objetivo de obtener una primera respuesta y visualización sintética del efecto de sombra de falla, se realizó una adquisición sísmica sintética *zero offset* para cada uno de estos modelos. Para esto, empleando el software Tesserall Pro 2D, se cargó y digitalizó cada modelo geológico y se pobló cada unidad litológica con los valores de velocidad intervállica de acuerdo al gradiente de velocidad calculado para cada uno. Para cada modelo se definieron los siguientes parámetros: # de capas (definido a partir del espesor), velocidad, gradiente, densidad, longitud y profundidad. Con el modelo geológico sintético ya generado y los parámetros definidos para cada capa de cada formación, se procedió a realizar la adquisición sísmica sintética *zero offset*, teniendo en cuenta parámetros tales como número de fuentes, intervalo entre fuentes, número de receptores, intervalo entre receptores y longitud del registro. A partir del modelo y de los parámetros definidos, se corrió el modelo acústico basado en la ecuación de onda con el objetivo de iluminar cada una de las capas presentes en el modelo teniendo en cuenta los valores de velocidad de la onda P, y densidad de cada unidad litológica. Finalmente, se obtuvo una imagen sísmica en tiempo para cada modelo a partir de la cual se realizó el análisis considerando la variación de ángulo, salto de falla y velocidad.

Con el objetivo de ver los eventos en su verdadera posición y realizar una migración en tiempo, mediante el software Tesserall Pro, se diseñó y generó una adquisición sísmica sintética con un diseño *Split Spread* con la que se obtuvieron los registros sísmicos teniendo en cuenta los parámetros número de fuentes, intervalo entre fuentes, número de receptores, intervalo entre receptores y longitud del registro. Basados en estos parámetros se corrieron los modelos, y se obtuvieron los registros sísmicos con los cuales se realizó el procesamiento de los datos sintéticos. A partir de los registros de disparo obtenidos (shots) se realizó el procesamiento sísmico en tiempo de los datos sintéticos 2D, empleando la aplicación Tornado, (CGG.2004). Los resultados de esta etapa se emplearon para analizar lo que sucede con el problema de sombra de falla en cada uno de los modelos cuando se varían los parámetros tales como ángulo de inclinación de la falla, salto de falla y velocidad de cada capa. Con el objetivo de analizar

el problema de sombra de falla en el área de estudio y relacionarlo con los resultados de los modelos sintéticos, se realizó el procesamiento en tiempo y en profundidad de los datos reales. A partir de estos resultados se propuso una metodología que permite el análisis y reducción del efecto de sombra de falla en zonas de fallas normales. La secuencia de actividades se muestra en la Figura 1-3.

Figura1-3: Secuencia Metodológica propuesta para el desarrollo del proyecto



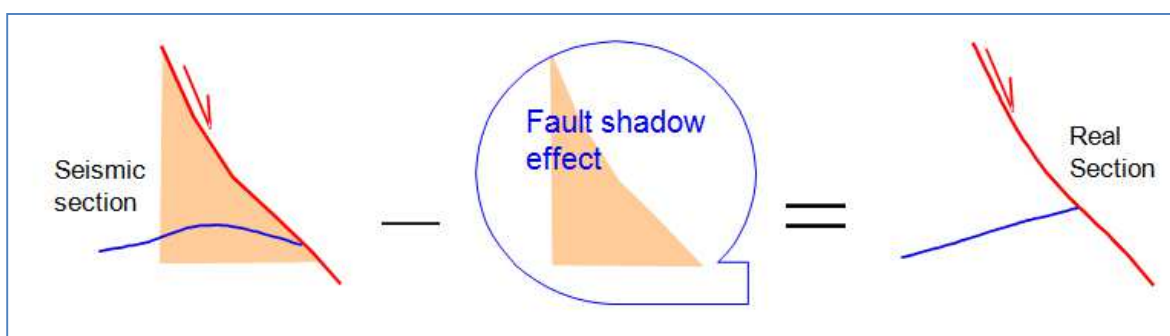
1.6 Estado del Arte

En la Cuenca de los Llanos Orientales, específicamente en el departamento del Casanare, la imagen sísmica es afectada por variaciones verticales y laterales de velocidad generando lo que se conoce como *efecto de sombra de falla*. Principalmente el efecto, parece resultar de formaciones de baja velocidad sísmica como la Formación León que se encuentra localizada entre capas de velocidad alta como la Formación Guayabo y la Formación Carbonera. El efecto de sombra de falla agrupa aquellos

fenómenos de distorsión geométrica observados en imágenes sísmicas apiladas 2D y 3D, atribuibles a las variaciones de velocidad de las ondas al atravesar una zona de falla, y es lo que los intérpretes sísmicos llaman a la zona de la imagen sísmica no confiable en los bloques yacentes de las fallas y suele atribuirse a cambios locales o regionales de velocidad, patrones de adquisición o artefactos de procesamiento. Aunque pueden ocurrir en fallas inversas, el término se aplica usualmente a fallas extensionales (Fagin,1997).

En la Figura 1-4, se observa un diagrama esquemático explicativo del efecto de la sombra de falla. A la izquierda se muestra, la imagen obtenida en las secciones sísmicas en tiempo, en el centro el efecto de sombra de falla y a la derecha la geometría real de la estructura geológica. En la Figura 1-5A, se muestran las distorsiones producidas por el problema de sombra de falla sobre una imagen sísmica, como se observa, hay discontinuidad en los reflectores, el trazo de la falla no es claro, se presentan falsos anticlinales y sinclinales, producto de los cambios de velocidad en el área. Es importante interpretar la existencia de este problema en las imágenes sísmicas ya que numerosos pozos han sido perforados dentro de estructuras en “*rollover*” observados sobre la sísmica en el bloque yacente de la falla con el fin de minimizar resultados no comerciales o pozos secos.

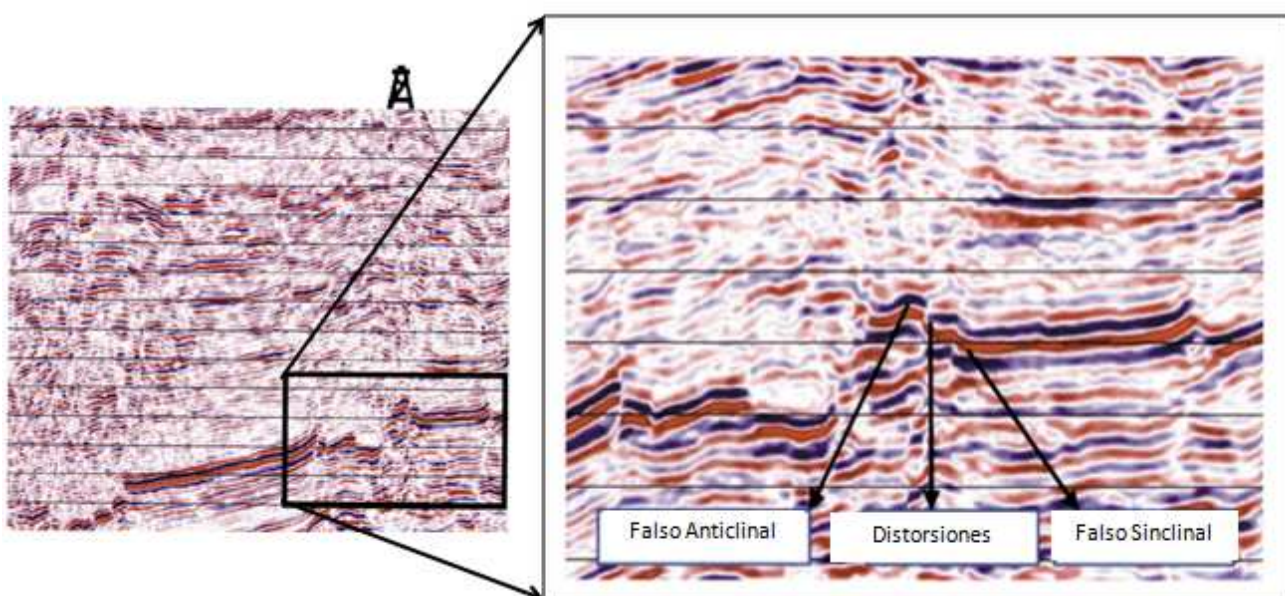
Figura 1-4: Zona de Sombra de Falla-(Martínez y Agudelo, 2009)



Actualmente, en la literatura se tienen trabajos en donde se han realizado análisis de los factores que generan el efecto y mencionan las sombras de falla como un problema en la interpretación sísmica debido a cambios de velocidad conocidas como inversiones de velocidad en fallas normales e inversas y, como solución a ellas la aplicación de PSDM o conversión a profundidad de la sección sísmica. Sin embargo, aún no se ha encontrado

una metodología que permita eliminar el efecto y así visualizar la estructura geológica real.

Figura 1-5A: Sección sísmica mostrando el efecto de sombra de falla (densidad variable)- (Trincheró, 2000).



El artículo “*Efecto de las Velocidades en las Estructuras Subyacentes a Fallas Sombra de Falla*” (Martínez y Agudelo, 2009), describe los factores que afectan el crecimiento de falsas estructuras en las zonas de sombra de falla, y se muestran ejemplos donde se evidencia el efecto. En el artículo, “*The Shadow Fault Problem As An Interpretation Pitfall*” (Trincheró, 2000), con el objetivo de visualizar el efecto de la sombra de falla, se crearon modelos geológicos en profundidad a partir de los cuales se construyeron líneas sísmicas sintéticas. El primer modelo consistió en una serie de capas planas con una falla normal, en el cual la velocidad incrementó con la profundidad, una capa de velocidad mayor se localizó en la mitad del modelo. El modelo en profundidad convertido a tiempo mostró estructuras aparentes en el bloque yacente de la falla, que corresponden a un anticlinal (pull-up) y un sinclinal (sag) de velocidades. Estos efectos de velocidad se producen por la yuxtaposición de una zona de alta velocidad en el bloque yacente o *footwall* contra una zona de baja velocidad en el bloque colgante. El segundo modelo, se asemeja al primero, pero se diferencia en que se presenta una capa de velocidad baja, y de igual forma se aprecian los mismos efectos de velocidad. El tercer modelo, corresponde a un “*fold propagation fold*” en profundidad, que al convertirlo

a tiempo permite visualizar las zonas de *pull-up* y *sag*. Se sugiere la migración a profundidad (PSDM) como herramienta para reducir el efecto de la sombra de falla, pero indica que se debe establecer el modelo de velocidad adecuado que permita mejorar la imagen. El artículo "*Resolving Fault Shadow Problem By Fault Constrained Tomography*" (Birdus, 2006), sugiere una técnica de procesamiento en profundidad llamada "Fault Constrained Tomography" basada en la construcción de un modelo de velocidad interválica de alta resolución para cada unidad analizada, y que combinada con el PSDM (Prestack Depth Migration) permite remover las distorsiones en la zona de sombra de falla. En el artículo: "*The fault shadow problem: Its nature and elimination*" (Fagin, 1996), se sugiere el uso de datos sísmicos sintéticos para identificar el problema de la sombra de falla, se analizan estrategias de *imaging* para removerlo y la causa de las distorsiones. Suponen que el problema se reducirá mediante la aplicación de una conversión a profundidad mediante el método *layer-cake* y proponen el *Prestack depth Imaging*, como un enfoque para reducir las distorsiones de las reflexiones en la imagen. En el artículo: "*Depth Conversion In The Llanos Basin: Workflow To Reduce Fault Shadow Effect*" (Ramón, 2009), se describen métodos de conversión tiempo-profundidad como la metodología más usada para visualizar la estructura correcta en profundidad. El artículo, "*Seismic Modeling of Complex Geological Structures*" (Alaei Behzad, Rocksource ASA), propone el modelamiento sísmico como una herramienta fundamental en el análisis de la propagación de ondas sísmicas en diferentes ambientes con diferentes características geológicas. En éste, se define el problema de sombra de falla teniendo en cuenta que la propagación de ondas sísmicas es compleja por debajo del plano de falla, lo que genera imágenes sísmicas con falsas estructuras debido a la poca iluminación de rayos en la zona. Se propone el modelamiento sísmico con el fin de visualizar la respuesta sísmica a partir de modelos geológicos. En el artículo "*Pitfalls in the seismic interpretation of fault shadow events – Vicksburg formation of south Texas*" (Bain, 2015), se presenta un caso en el cual los datos sísmicos muestran una estructura anticlinal, pero al analizar los datos de pozo (checkshot y dipmeter) no se encontró como interpretar la existencia de dicha estructura, lo que sugirió la existencia del efecto de sombra de falla. Propone la integración de datos de pozo para evaluar la existencia de dicho efecto como una solución de análisis rápido. El artículo, "*3D Illumination study to investigate fault shadow effects over the Hoop Fault Complex*" define el problema de sombra de falla como zonas no reales en las imágenes sísmicas en el bloque yacente de la falla en fallas extensionales. Sugiere que esto ocurre por variaciones laterales de

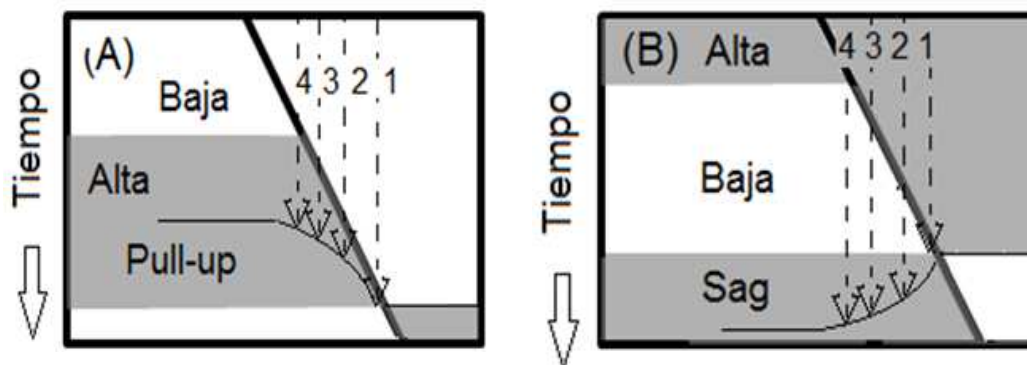
velocidad muy rápidas y altas velocidades las cuales distorsionan la trayectoria de los rayos dando origen a hundimientos sísmicos (*sags*). Sugiere que la causa del problema de sombra de falla es la poca iluminación de los rayos en esta zona, lo cual es el resultado del diseño de los programas sísmicos. Propone el modelamiento del trazado de rayos con el fin de simular la adquisición en una dirección ortogonal la cual permitiría mejorar la iluminación en esta zona. A partir de este modelamiento se pueden generar gathers sintéticos los cuales pueden ser migrados y convertidos a profundidad. Se demostró que los hundimientos (*sags*) pueden ser eliminados mediante una adquisición sintética con otro azimut. El artículo, "*Fault Shadow distortions on 3D seismic data and their removal by depth processing*" (Birdus, Artyomor, 2010), presenta el problema de sombra de falla como un efecto que genera serios cambios en la imagen sísmica originado por variaciones de velocidad asociados a la existencia de fallas. Proponen la migración a profundidad como una solución para eliminar el efecto empleando un modelo de velocidad preciso usando el método de tomografía como una componente fundamental para la solución.

El problema de sombra de falla se presenta tanto en fallas normales como en inversas. En regímenes tectónicos compresivos puede ser más pronunciado que en los sistemas extensionales debido a que el desplazamiento horizontal y la flexión son mayores y al gran contraste de velocidades causado por el desplazamiento lateral del bloque colgante sobre el bloque yacente. Al mismo tiempo, los efectos de la velocidad pueden generar una falsa continuidad de los reflectores originando estructuras más simples de lo que podrían ser en la realidad o estructuras complejas cuya geometría no corresponde a la estructura geológica del subsuelo. Las distorsiones en las imágenes pueden ser de dos tipos, *anomalías en tiempo* ("*pull up*" y "*sags*") y *reflexiones que no tienen continuidad*, las primeras constituyen un problema ya que han sido interpretadas como estructuras prospectivas y las segundas que pueden ser interpretadas como fallas satélites a la principal.

La variación lateral de velocidad y la inversión de velocidad causan anomalías en tiempo identificables como plegamientos y reflexiones discontinuas interpretables como fallas satélites; los plegamientos se deben a los tiempos de viaje de los rayos mientras las discontinuidades se deben a la deflexión de los rayos en la zona fallada. La imagen A de la figura 1.5B, muestra un modelo en tiempo con una capa de alta velocidad entre dos de

baja velocidad, con una falla normal inclinada y tres rayos zero-offset que lo atraviesan desde la superficie a la base de la capa de alta velocidad. El tiempo de viaje del rayo, expresado por su longitud en la imagen A, es menor cuando atraviesa una capa de alta velocidad que cuando es de baja velocidad. El rayo 1 viaja por la capa de baja velocidad mientras el rayo 2 lo hace en parte por la de alta y parte por la de baja velocidad, por lo que su tiempo de viaje es menor. Cuando el rayo atraviesa un mayor espesor en la capa de alta velocidad el tiempo de viaje disminuye, como lo muestra la imagen A para los rayos 3 y 4. Como resultado, la anomalía en tiempo bajo la zona de falla se ve como un levantamiento del reflector en la base de la capa de alta velocidad o “pull-up” como se ve la imagen A de la figura 1.5B. La imagen B de la figura 1.5B, muestra un modelo en tiempo fallado con una capa de baja velocidad entre dos de alta velocidad. Al entrar el rayo a la falla aumenta el recorrido en la capa de baja velocidad y disminuye en la de baja velocidad, por lo tanto el tiempo de viaje del rayo 1 es menor que el del rayo 2, tiempo que se incrementa para los rayos 3 y 4. La anomalía en tiempo asociada en este caso es un descenso del reflector en la base de la capa de baja velocidad o “sag”, como se ve en la imagen B. El tiempo de viaje del rayo depende no solo del espesor recorrido sino de la diferencia de velocidades en la falla, tal que a mayor diferencia de velocidad menor tiempo de viaje. Por otro lado y según la ley de Snell, el ángulo de refracción depende de las velocidades a ambos lados de la falla. En la imagen A, el rayo 1 mantiene su trayectoria recta, pero parte de la energía de los rayos 2,3 y 4 se refractarán a la derecha por debajo de la falla derecha y parte se reflejará a la izquierda alejándose de la falla, y a ángulos de incidencia superior al crítico no iluminará la zona bajo la falla, debilitando así la continuidad del reflector. En la imagen B, el rayo 1 mantendrá su trayectoria recta mientras parte de la energía de los rayos 2,3 y 4 se desviará hacia la izquierda y parte se reflejará debilitando la continuidad del reflector bajo la falla.

Figura 1-6B: Anomalías en tiempo producto de variaciones verticales y laterales de velocidad.



2. Marco Geológico Regional

2.1 Generalidades

La Cuenca de Los Llanos es una cuenca asimétrica, localizada al este de los Andes, y hace parte de las Cuencas subandinas de antepaís. Al sur está separada de la Cuenca del Putumayo por los Arcos de Macarena y Vaupés, y al norte, está separada de la Cuenca de Apure (Venezuela) por el Arco de Arauca. Sus límites geomorfológicos son la Cuenca de Barinas al Norte, La Serranía de la Macarena y el arco de Vaupés al sur, el sistema de fallas de Guaicáramo al oeste y el Escudo de Guyana al este. Se ubica en la parte norte de las cuencas subandinas que se desarrollan al lado este de los Andes, desde Argentina en el sur hasta Venezuela al norte. Cubre un área aproximada de 190.000 km² y geográficamente se divide en tres áreas principales: una zona norte, Arauca, una parte central, Casanare, y un sector sur, Meta. Está limitada al oeste por el piedemonte de la Cordillera Oriental, al este por el Escudo Precámbrico de Guyana y al sur por la Serranía de La Macarena y el arco de basamento del Vaupés. La Cuenca tiene su continuación hacia el norte en las cuencas venezolanas de Apure Occidental y Barinas, las cuales están separadas de la Cuenca de los Llanos Orientales Colombianos, desde el Cenozoico, por el alto estructural del Arco de Arauca.

La historia geológica de esta cuenca comienza en el Paleozoico con una fase extensional (rifting) que permitió la acumulación de sedimentos siliciclásticos sobre un basamento cristalino precámbrico. Entre el Jurásico-Cretácico tardío la cuenca fue el brazo oriental de un gran sistema extensional cubierto por depósitos de plataforma marina. A partir del Maestrichtiano se convierte en una cuenca de antepaís. Del Mioceno al Reciente se han acumulado grandes volúmenes de sedimentos molásicos. Durante el Triásico y Cretáceo Inferior, la cuenca corresponde al tipo extensional de retroarco, mientras que en el Cretáceo Superior llegó a ser una cuenca pasiva de retroarco. La cuenca actuó como

una de tipo plataforma en el Paleoceno Maestrichtiano, y evolucionó en el Mioceno a una de antepais. La estratigrafía del área involucra rocas del Paleozoico, Cretácico y Cenozoico con presencia de múltiples discordancias regionales. Las rocas más antiguas perforadas en el área son las arcillolitas del Ordovícico sobre las cuales yace de manera discordante la secuencia Cretácea, iniciada con las Formaciones Fόμεque y Une (Albiano- Aptiano- Cenomaniano), seguida de la Formación Gachetá (Turoniano- Conaciano-Santoniano) y el Grupo Guadalupe (Campaniano- Maestrichtiano). La secuencia Cenozoica está dada por las Formaciones Barco y Los Cuervos (Paleoceno), Mirador (Eoceno), el Grupo Carbonera y Formación León (Oligoceno- Mioceno), la Formación Guayabo (Mioceno- Pleistoceno).

2.2 Evolución Geológica y Geología Estructural

Hasta finales del Cretácico se depositaron facies marinas y continentales con los sedimentos de plataforma del Mastrichtiense. La subsidencia térmica cesa y la invasión marina es máxima. Se presenta Transgresión incipiente especialmente al noroeste de la cuenca, seguida de erosión regional. Posteriormente un periodo de depositación fluvial (Fms. Barco y Mirador) hasta el Eoceno tardío que cubre toda el área del Llano. Posterior a una etapa de deformación con reactivación de fallas del Paleozoico, durante el Oligoceno y Mioceno inferior se deposita la Formación Carbonera de origen marino somero. Del Mioceno Medio a Superior, con el inicio del levantamiento de la Cordillera Oriental, se depositan en el "foreland" de los Llanos las facies marinas someras de León y la secuencia continental del Guayabo. Finalmente, y hasta hoy, se intensificó la Orogenia Andina resultando la actual Cordillera Oriental. Durante el Pleistoceno Medio a Superior, tuvo lugar la segunda fase de la Orogenia Andina, produciendo levantamiento en bloques de la parte central de la Cordillera Oriental y parte de la Cuenca de los Llanos. Igualmente tuvieron lugar los movimientos compresionales originando fallas inversas y cabalgantes.

En el área de estudio predominan las fallas normales antitéticas de dirección norte-sur y noreste-suroeste. Probablemente son originadas durante el Paleozoico y reactivadas en el Mioceno, y se consideran coetáneas con la orogenia Andina, involucrando el basamento y las secuencias cretácicas y cenozoicas. El desplazamiento de las fallas antitéticas es generalmente pequeño, aunque en algunos casos alcanzan varias decenas de metros. Con el aumento de la exploración petrolera en los últimos años,

especialmente con la adquisición de sísmica 3D se ha podido comprobar que las fallas antitéticas no son muy largas y se extienden haciendo relevos entre sí.

2.3 Estratigrafía, Facies y Sedimentología General del Área de Estudio.

La sección estratigráfica general de la Cuenca de Los Llanos (Figura 2-1) ha sido representada en estudios previos por las unidades litoestratigráficas denominadas Ubaque, Gachetá y Guadalupe del Cretácico, las cuales descansan discordantemente sobre una sección del Paleozoico, y las formaciones Barco, Los Cuervos, Mirador, Carbonera, León, Guayabo, Necesidad y Cometa del Cenozoico. En la figura 4-1, se presenta una correlación de los pozos E-1, E-2 y E-3 indicando la disposición de las unidades presentes en el área de estudio. Los sedimentos más antiguos encontrados en esta área, tienen una edad Paleozoica y se encuentran suprayacidos por sedimentos Cretácicos marinos (Formaciones Ubaque y Guadalupe), Cenozoicos (Formaciones Mirador, Carbonera, León y Guayabo) y depósitos recientes. A continuación, se describen las unidades presentes en el área de estudio:

2.3.1 Paleozoico

Consiste a la base de cuarcitas, conglomerados, calizas, grauvacas con ligero metamorfismo, además de interposiciones de lodolitas y arcillolitas. En la parte superior está constituida por lutitas fosilíferas grises-a negras predominantes sobre arenitas y limolitas de edad Ordovícico. El espesor y disposición de esta unidad sugiere un depósito de plataforma somera donde la sedimentación marina es preponderante sobre depósitos litorales de granulometría más gruesa.

2.3.2 Formación Ubaque

Esta unidad se presenta discordante sobre el Paleozoico, consiste de cuarzoarenitas macizas de grano fino a medio, localmente conglomeráticas, interestratificadas con capas delgadas de limolitas carbonosas y arcillolitas. Presenta un espesor promedio de 300 pies en el sector de estudio.

2.3.3 Formación Gachetá

Sucesión de lutitas grises y negras con locales interestratificaciones de capas delgadas de calizas y arenitas finogranulares. En el sector de estudio, presenta un espesor promedio de 385 pies. Constituye una unidad de roca sello regional para la potencial roca almacén de la Formación Ubaque.

2.3.4 Formación Guadalupe

Sucesión de arenitas cuarzosas de grano fino a medio, con delgadas intercalaciones de lodolitas, porcelanitas y localmente carbón. El espesor en el sector de este estudio fluctúa entre 170 y 300 pies.

2.3.5 Formaciones Barco y Los Cuervos

Una caída grande en el nivel relativo del mar en el Paleoceno condicionó un cambio en el ambiente de depósito, presentándose un hiato estratigráfico importante en el área de Los Llanos. Por lo tanto, no se registra la presencia de las formaciones Barco y Los Cuervos en el sector de este estudio, presentándose por lo tanto una inconformidad de carácter regional entre la suprayacente Formación Mirador y la subyacente Formación Guadalupe.

2.3.6 Formación Mirador

Está constituida por areniscas de grano grueso a muy fino, en algunos casos con cemento calcáreo; limolitas grises, pardas micro carbonosas y lutitas grises verdosas. Las areniscas son de mayor grosor hacia la base, de colores blancos, grises, a veces verdosas, cuarzosas, eventualmente calcáreas y en algunos casos con chert y glauconita. Esta formación, se caracteriza como la formación productora del área de estudio.

2.3.7 Formación Carbonera

En el área de estudio, la Formación Carbonera (Oligoceno-Mioceno temprano) se subdivide en varios miembros arenosos, los cuales se han representado con números impares (C1, C3, C5, C7), mientras que los dominios lutíticos se les reconoce por su identificación con números pares (C2, C4, C6, C8). La Formación Carbonera representa

cuatro ciclos mayores de depósitos de llanuras costeras con creciente influencia marina (C8-C7, C6-C5, C4-C3, C2-C1). Cada una de estas 4 secuencias se identifica por sus superficies de inundación marina identificadas en los miembros pares. El nivel C8 correspondería a la inundación marina localizada en el límite entre las formaciones Mirador y Carbonera. Por otro lado, la Formación Carbonera desarrolla un incremento gradual de arena y llega a ser de carácter más continental a medida que se aproxima al Escudo de Guyana, al Este. Las arenitas de la Formación Carbonera son cuarzosas, a sublitoarenitas, algunas presentan restos vegetales diseminados, o matriz arcillosa variable.

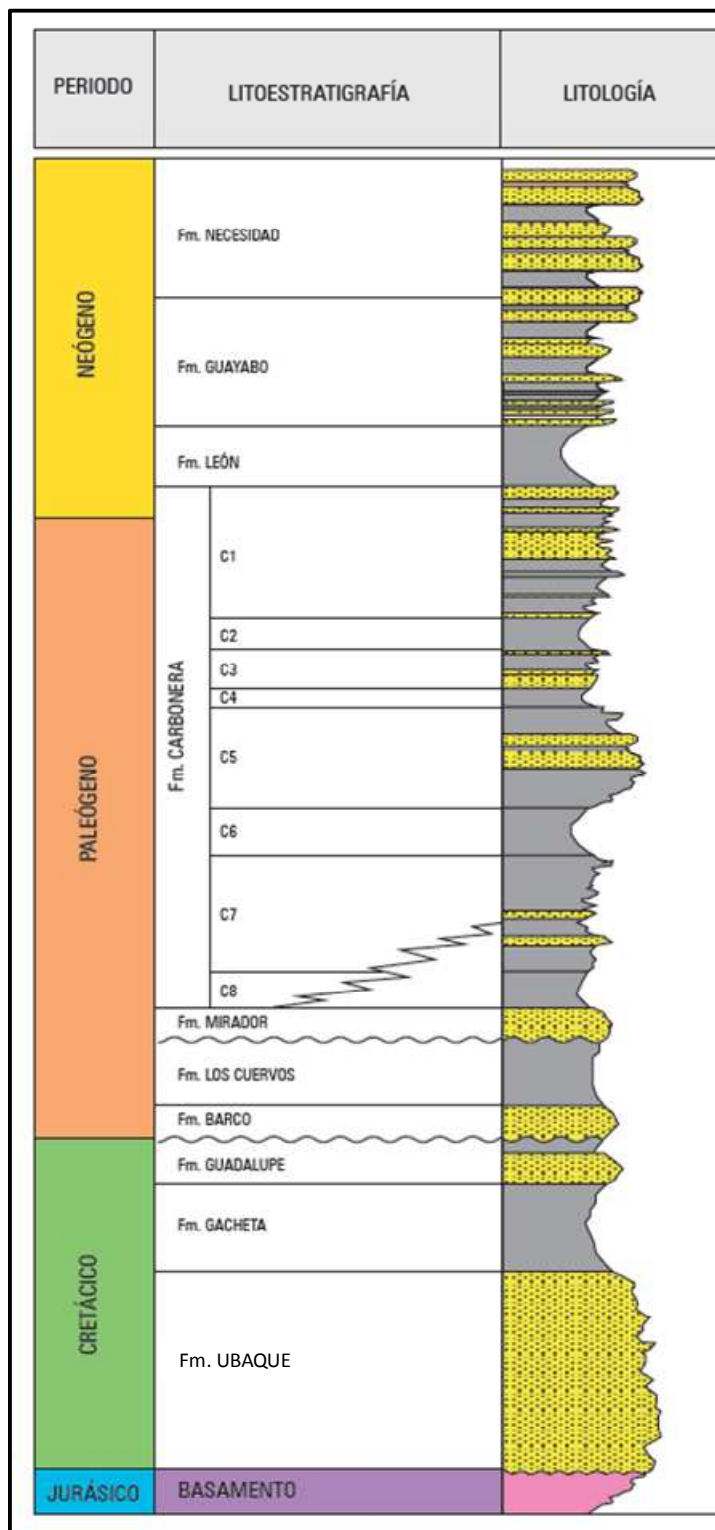
2.3.8 Formación León

La Formación León de edad Mioceno Medio está constituida por arcillolitas y lodolitas de carácter marino somero a lacustre y parece registrar un intervalo de tiempo donde la subsidencia tectónica sobrepasó la sedimentación. Esta unidad es un marcador importante y constituye una roca sello regional.

2.3.9 Formaciones Guayabo, Necesidad

En la cuenca, se ha documentado un espesor de 3000 a 3500 metros de depósitos clásticos de origen continental los cuales fueron depositados en los últimos 10 millones de años como respuesta al levantamiento y erosión de la Cordillera Oriental. Estos depósitos que se identifican en el área como pertenecientes a las formaciones Guayabo, Necesidad y Cometa, presentan en dicha área espesores superiores a 1200 metros.

Figura 2-1: Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca de los Llanos Orientales. (ANH, 2009)

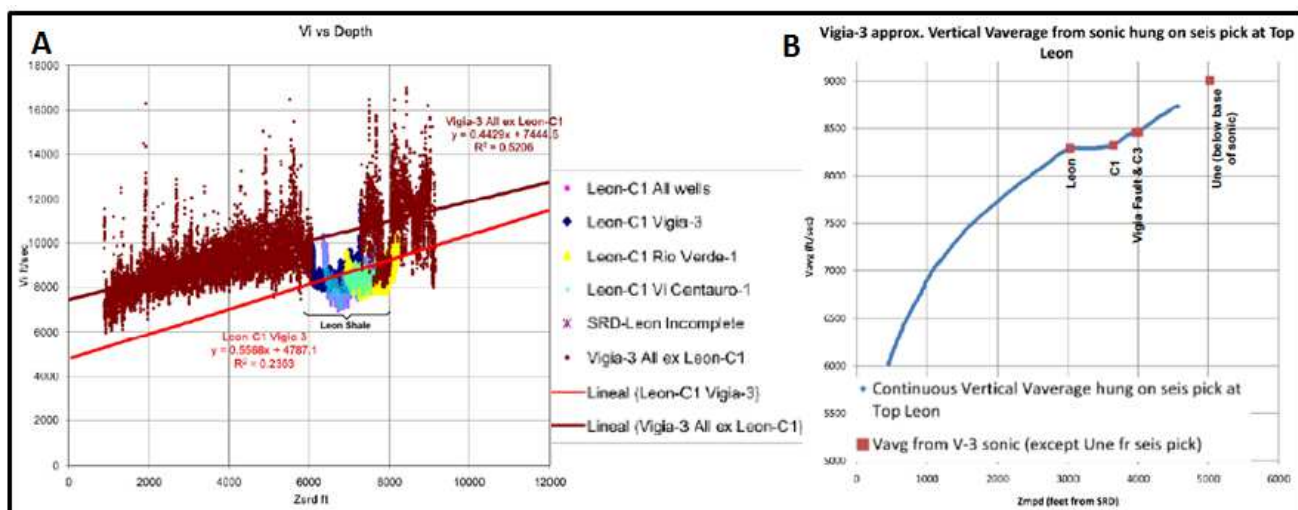


2.4 Variaciones de Velocidad

En la Cuenca de los Llanos Orientales, específicamente en el Departamento del Casanare, la información sísmica es afectada por variaciones verticales y laterales de velocidad generando lo que se conoce como efecto de sombra de falla. Principalmente el efecto parece resultar de formaciones de baja velocidad sísmica como lo es la Formación León que se encuentra localizada entre capas de velocidad alta como lo es la Formación Guayabo y la Formación Carbonera.

En la Figura 2-2, se observan dos gráficas, la figura A representa la velocidad interválica vs perfil de profundidad a partir de datos sísmicos y la figura B la velocidad promedio típica vs perfil de profundidad. En las dos figuras, se representa la variación e inversión de velocidad por efecto de una capa de baja velocidad de ondas P (Fm. León) con aproximadamente 1200ft de espesor localizada entre los 6000ft y 7200 ft de profundidad ubicada entre dos capas de alta velocidad como lo es la Formación Guayabo y Carbonera. Esta anomalía, es una de los causantes de la generación del problema de sombra de falla generando distorsiones sobre las imágenes sísmicas de varias zonas localizadas en la Cuenca de los Llanos Orientales.

Figura 2-2: Velocidad interválica vs perfil de profundidad a partir de datos sísmicos (A) y velocidad promedio típica vs perfil de profundidad.(B). (Chermak, 2009)



3. Marco Teórico

3.1 Método Sísmico

El método sísmico comprende tres etapas fundamentales (Figura 3-1) en el cual, la interpretación de las reflexiones sísmicas es el resultado final de las dos etapas previas conocidas como adquisición y procesamientos de datos sísmicos.

Figura 3-1: Etapas del Método Sísmico-(Martínez, 2009).



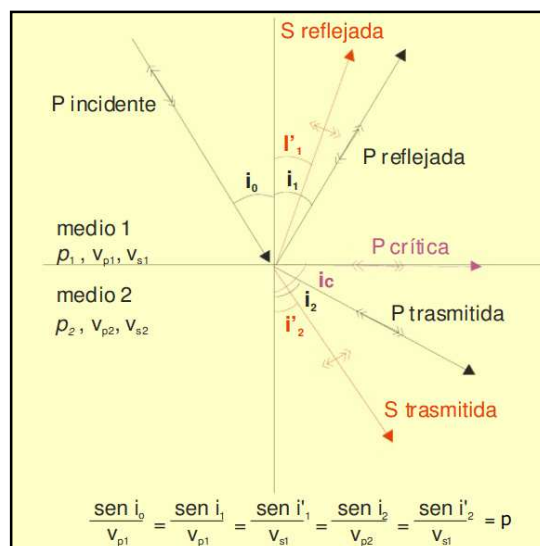
La prospección sísmica es una herramienta de investigación indirecta que emplea las ondas elásticas que se propagan a través del terreno y que han sido generadas artificialmente. Su objetivo es el estudio del subsuelo en general, lo cual permite obtener información geológica de los materiales que lo conforman. La prospección sísmica es una herramienta de investigación, ya que con ella se puede inspeccionar con buena resolución desde los primeros metros del terreno (sísmica superficial) hasta varios kilómetros de profundidad (sísmica profunda). Así, para la sísmica profunda se utilizan fuentes de energía (explosivos o camiones vibradores) capaces de generar ondas elásticas que llegan a las capas profundas del subsuelo, mientras que para la sísmica superficial se utilizan martillos de impacto, rifles sísmicos y explosivos de baja energía. De manera que el diseño de una campaña sísmica (equipo y material a utilizar) está en función del objetivo del estudio. Según esto, la sísmica profunda se emplea en la detección de reservorios petrolíferos (ya sea terrestre o marítima), grandes estructuras geológicas (plegamientos montañosos, zonas de subducción, etc.), yacimientos minerales, domos salinos, etc

El método sísmico se basa en la propagación de ondas a través de las rocas y su expresión en superficie mediante la grabación de tiempos de arribo. Durante este proceso, la energía sísmica se genera artificialmente y las ondas generadas viajan a través del subsuelo reflejándose en las interfases. Las ondas reflejadas son grabadas en la superficie y los tiempos de viaje son analizados para inferir estructuras en el subsuelo.

Cuando una onda sísmica encuentra un cambio en las propiedades elásticas del material, como es el caso de una interfase entre dos capas geológicas; parte de la energía continúa en el mismo medio (onda incidente), parte se refleja (ondas reflejadas), y el resto se transmite al otro medio (ondas transmitidas) con cambios en la dirección de propagación, en la velocidad y en el modo de vibración (Figura 3-2). Las leyes de la reflexión y la refracción se derivan por el principio de Huygens cuando se considera un frente de onda que incide sobre una interfase plana. El resultado final es que ambas leyes se combinan en un único planteamiento: en una interfase el parámetro de rayo, debe tener el mismo valor para las ondas incidentes, reflejadas y transmitidas. Si el medio consta de un cierto número de capas paralelas, la ley de Snell establece que el parámetro del rayo tiene que ser el mismo para todos los rayos reflejados y refractados resultantes de un rayo inicial dado.

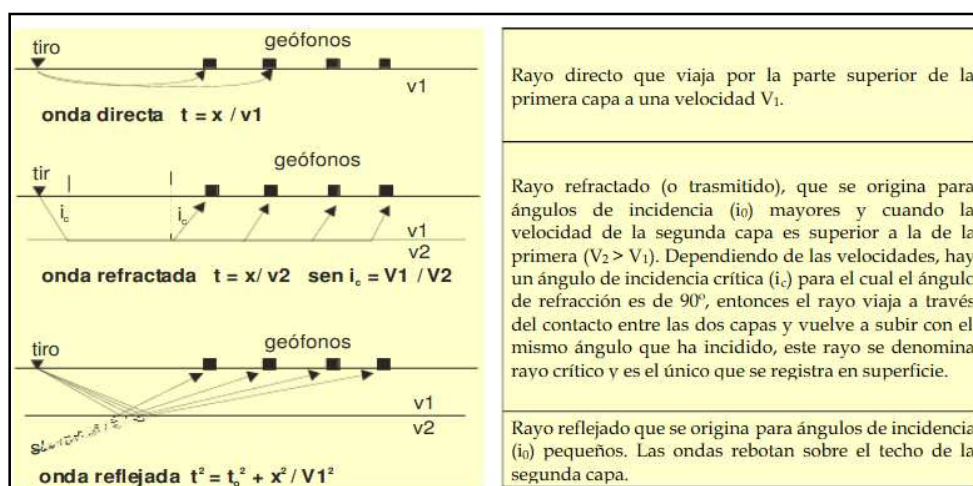
Figura 3-2: Conversión de una onda incidente P. (Acosta, 2009).

Las ondas sísmicas que viajan por subsuelo se reflejan y se refractan siguiendo la ley de Snell. La cantidad de energía de las ondas incidentes se reparte entre las ondas reflejadas, las transmitidas y la absorción natural.



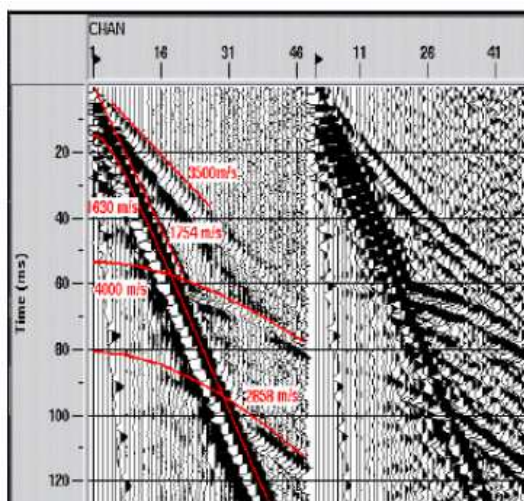
Cuando $V_1 < V_2$, $i_0 > i_2$, los rayos se refractan por la segunda capa y los geófonos situados en la superficie no registran el fenómeno. En el caso en el que i_2 alcanza los 90° , se define como $i_1 = \text{sen}^{-1}(V_1/V_2)$ el ángulo de incidencia crítica para el cual el rayo viaja a través de la interfase. La ley de Snell proporciona información sobre las trayectorias de los rayos, los tiempos de llegada y la posición de los refractores, pero no proporciona información alguna sobre las amplitudes de las ondas. (Figura 3-3).

Figura 3-3: Los geófonos, situados a distancias conocidas (x_i), registran los diferentes tiempos de llegada de cada tipo de onda (t_j) que está caracterizada para una determinada trayectoria. Con estos tiempos (t_j), la geometría del dispositivo experimental (x_i) y las ecuaciones de las trayectorias de los rayos se calcula la distribución de velocidades del subsuelo ($V_1, V_2; \dots$). (Acosta, 2009).



En el registro sísmico que se presenta en la Figura 3-4 se pueden identificar claramente las ondas elásticas producto del contacto entre dos capas. Se aprecia la onda directa (1754 m/s), la onda refractada (3500 m/s) y las ondas P reflejadas (1630 m/s primera capa, y 4000 m/s segunda capa), así como la onda reflejada SV (2858 m/s).

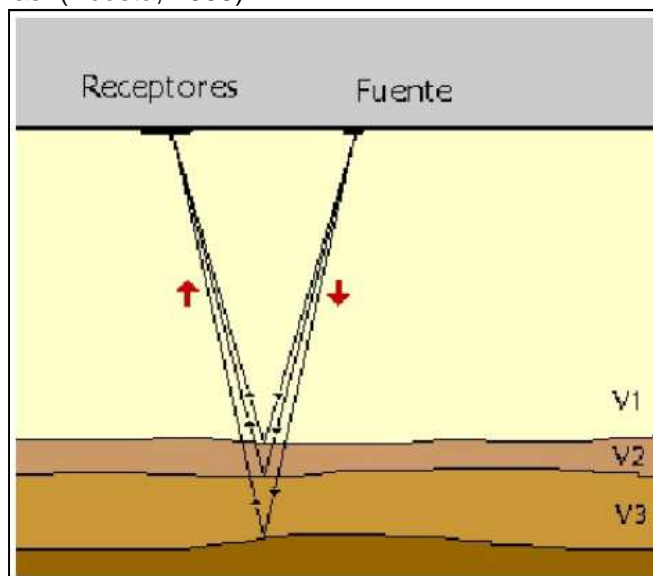
Figura 3-4: Ejemplo de registro de campo en donde se pueden ver todas las ondas procedentes del contacto entre dos capas. (Acosta, 2009)



El método sísmico puede ser dividido en sísmica de refracción y sísmica de reflexión, esta última es la empleada en la prospección de hidrocarburos. El método sísmico de reflexión se basa en las reflexiones del frente de ondas sísmico sobre las distintas interfases del subsuelo. Estas interfases (reflectores) responden a contrastes de impedancia que posteriormente se relacionaran con las distintas capas geológicas. Las reflexiones son detectadas por los receptores (geófonos) que se ubican en superficie y que están alineados con la fuente emisora.

Dado que las distancias entre la fuente y los geófonos son pequeñas respecto a la profundidad de penetración que se alcanza (Figura 3-5) el diseño sísmico, soporta que se esté operando en "corto ángulo"; asegurando así la obtención de reflexiones y, distinguiéndose de la sísmica de refracción o de "gran ángulo".

Figura 3-5: Esquema básico de la emisión y recepción de los rayos reflejados en las distintas capas reflectoras. (Acosta, 2009)



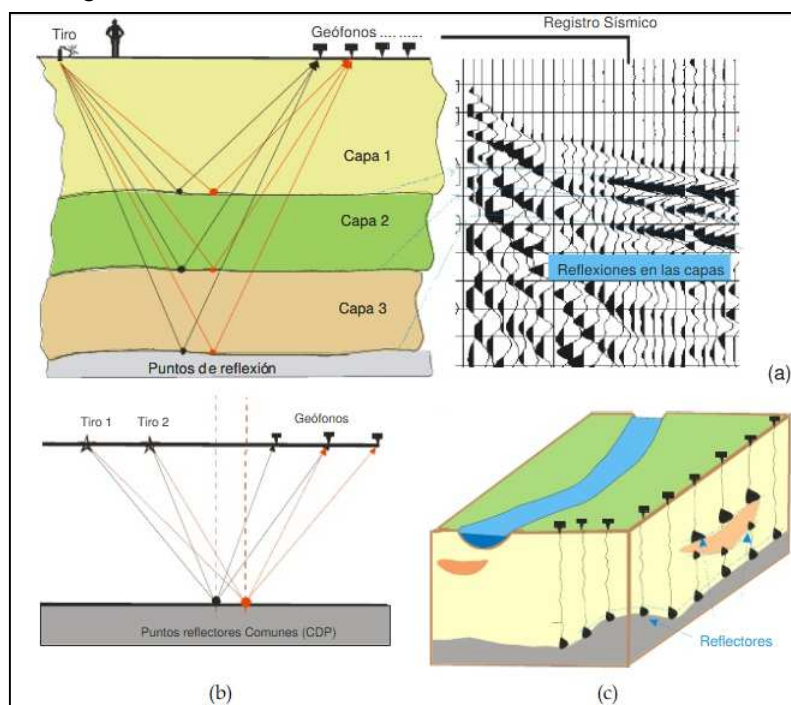
Con el objetivo de conseguir un mejor reconocimiento de la zona de estudio, se realiza un número de disparos mayor y se aumenta la cantidad de geófonos en comparación con los empleados en un perfil de refracción de longitud equivalente. El resultado es un grupo de trazas sísmicas procedentes de todos los tiros que se analizan, se procesan y luego se reordenan en conjuntos de “puntos de reflexión común” (CMP), los cuales contienen la información de todas las reflexiones halladas (Figura 3-6-a). Una vez todas las trazas de un mismo CMP se han agrupado, se suman y se obtiene una traza CMP. El conjunto de todas las trazas CMP constituye la denominada sección sísmica de reflexión que es el resultado final de este método. Una sección sísmica es una imagen del subsuelo en donde las reflexiones se ven en forma de lóbulos negros de mayor amplitud y definen las capas reflectoras que después se asociarán a las estructuras geológicas (Figura 3-6-b).

Posterior a la adquisición de los datos sísmicos en campo, se realiza el procesamiento de los mismos, el cual tiene como objetivo obtener un conjunto de trazas sísmicas denominadas “Secciones” cuya gráfica corresponde a una representación de la estructura de las interfases reflectoras sobre cortes o secciones de la corteza. Además de obtener esta representación de las estructuras geológicas, los datos sísmicos al ser procesados deben permitir obtener información adicional de las rocas, principalmente V_p y V_s y a partir de velocidades otros parámetros de interés. Durante esta etapa se realizan correcciones geométricas y procesos para mejorar la señal, las primeras se realizan debido a las variaciones geométricas de los arreglos de fuentes y receptores, e incluyen

los procesos de NMO, correcciones estáticas, apilado y migración. La segunda, mejora la resolución y nitidez de los eventos de reflexiones primaria mediante supresión o reducción de eventos no deseados en las trazas, incluyen procesos de corrección por pérdidas de amplitud, atenuación de ruidos lineales como *ground roll* y refracciones mediante filtros de velocidad, deconvolución, atenuación de reflexiones múltiples, atenuación de ruidos por efectos de apilamiento, filtrado de frecuencia, entre otros.

Figura 3-6:(a) Esquema del recorrido de los rayos reflejados en tres capas para un registro y dos estaciones receptoras (geófonos)-(Acosta, 2009).

Debido a la ecuación de propagación, las reflexiones quedan marcadas en el registro sísmico como trayectorias hiperbólicas. (b) Una vez todas las reflexiones de un mismo CDP se han agrupado, se suman y se obtiene una traza CDP. (c) Las trazas CDP proporcionan la imagen sísmica del terreno, llamada sección sísmica.



La secuencia de procesamiento está determinada parcialmente por razones de eficiencia.

Una secuencia normal de proceso es la siguiente:

- Carga de Datos y asignación de geometría
- Atenuación de ground roll y eliminación de ruido
- Recuperación de amplitudes

-
- Deconvolución
 - Correcciones estáticas
 - Análisis de Velocidad
 - Estáticas Residuales
 - CDP Gathers
 - Apilado Final
 - Migración Post apilado o Migración pre apilado a partir de los CDP Gathers

3.2 Modelamiento

El modelado sísmico es una herramienta que permite estudiar el comportamiento de los campos de ondas durante su propagación en el subsuelo, desde que parten de una fuente hasta que regresan a superficie y son captados por receptores. Para ello, es necesario e importante generar un modelo geológico y de velocidades que ayude a describir de la manera más precisa posible las estructuras presentes en el subsuelo. En este sentido el modelo geológico puede representar al subsuelo través de una secuencia apilada de capas homogéneas cercanas llamadas formaciones, cuya geometría puede ser simple o compleja. Los contactos entre las formaciones se llaman horizontes.

Una vez generado el modelo geológico y realizado el modelado sísmico, es posible comparar las trazas sintéticas resultantes con las adquiridas en campo, probablemente de forma iterativa, hasta alcanzar el modelo geológico que bajo un cierto nivel de precisión se ajuste mejor a la realidad. Asimismo, si se les aplica un procesamiento a los datos sintéticos generados, la imagen obtenida pueda ser evaluada en términos de continuidad de los horizontes y las amplitudes en función del contenido litológico (Krebs, 2004).

A continuación, se describen las técnicas de modelamiento sísmico:

3.2.1 Modelado sísmico por trazado de rayos

En esta técnica, los tiempos de viaje son calculados empleando la denominada Teoría de rayos, en la cual se estiman las trayectorias de los rayos que unen fuentes y receptores (si las condiciones geométricas permiten su existencia) y se calcula el tiempo de viaje a lo largo de los rayos (Caicedo y Mora, 2004). La mayoría de los algoritmos de trazado de rayos se basan en la ley de Snell para seguir la trayectoria de un rayo en un modelo de

velocidades, de acuerdo al ángulo de salida establecido, mientras que el cálculo de las amplitudes de los rayos reflejados que llegan a superficies se realiza a través de la resolución de las Ecuaciones de Zoeppritz o alguna aproximación a estas (Pérez, 2010). Las técnicas de trazado de rayos se realizan principalmente a través del método “*shooting*” y el método “*bending*”. El primer método consiste en emitir un abanico de rayos de la fuente con direcciones iniciales dadas, que después serán modificadas hasta que ciertos rayos emerjan del objetivo deseado y alcance receptores, mientras que el segundo método implica que el rayo vaya variando su curvatura iterativamente partiendo de un camino de rayo inicial y punto final fijo, hasta obtener trayectoria que permita alcanzar el objetivo en un tiempo mínimo, teniendo en cuenta el principio de Fermat. En este último método, las ecuaciones diferenciales para el rayo son expresadas en términos de las variaciones de la trayectoria del rayo y las ecuaciones resultantes son resueltas a través del método de diferencias finitas (DF). Los dos métodos son aplicados iterativamente debido a que las ecuaciones de los rayos no son lineales.

3.2.2 Modelado Sísmico por Ecuación de Onda

La técnica de Ecuación de Onda realiza el cálculo de tiempos de viaje en términos de la ecuación Eikonal, la cual puede resolverse con métodos de diferencias finitas (Caicedo y Mora, 2004). Según KREBES, 2004, el método de Diferencias Finitas (DF) es un método numérico para resolver ecuaciones de derivadas parciales. Puede ser aplicado a la ecuación de onda sísmica para calcular el desplazamiento o en cualquier punto de un modelo geológico a fin de generar sismogramas sintéticos que puedan ser comparados con sismogramas reales. La idea principal del método DF es calcular el campo de ondas $u(x,y,z,t)$ en un conjunto discreto de puntos x_i, y_m, z_n, t_q contenidos en un mallado (donde $l,m,n,q=0,1,2,3,4,5\dots$) aproximando las derivadas de la ecuación de onda con fórmulas de diferencias finitas y resolviéndola de manera recursiva.

3.2.2.1 Criterio de Estabilidad

El uso de un intervalo temporal en cálculo por diferencias finitas, causa inestabilidad en ciertas circunstancias. Esto quiere decir, que las amplitudes del campo pueden crecer sin límites lo largo del tiempo. Para evitar esta inestabilidad, se utiliza la condición de estabilidad que se muestra en la siguiente ecuación (Margrave, 2003), donde V_{max} es la velocidad máxima del modelo.

Ecuación 1

$$\frac{V_{max} \Delta t}{\Delta x} \leq \frac{2}{\alpha}$$

3.2.2.2 Dispersión de Malla

En el subsuelo, la dispersión es un fenómeno producto de la absorción y consiste en la variación la velocidad respecto a la frecuencia. Al emplear un algoritmo de diferencias finitas es posible que surja este fenómeno de manera artificial cuando se emplea un mallado muy grueso. En consecuencia, creando un mallado mucho más fino se evita que la dispersión de malla afecte las longitudes de onda más cortas. El efecto que produce la dispersión de malla consiste en la distorsión de los reflectores, así como también que la ondicula aparente se muestre mucho más elongada, y con dispersión disminuyendo la precisión.

3.3 Migración (“Imaging”)

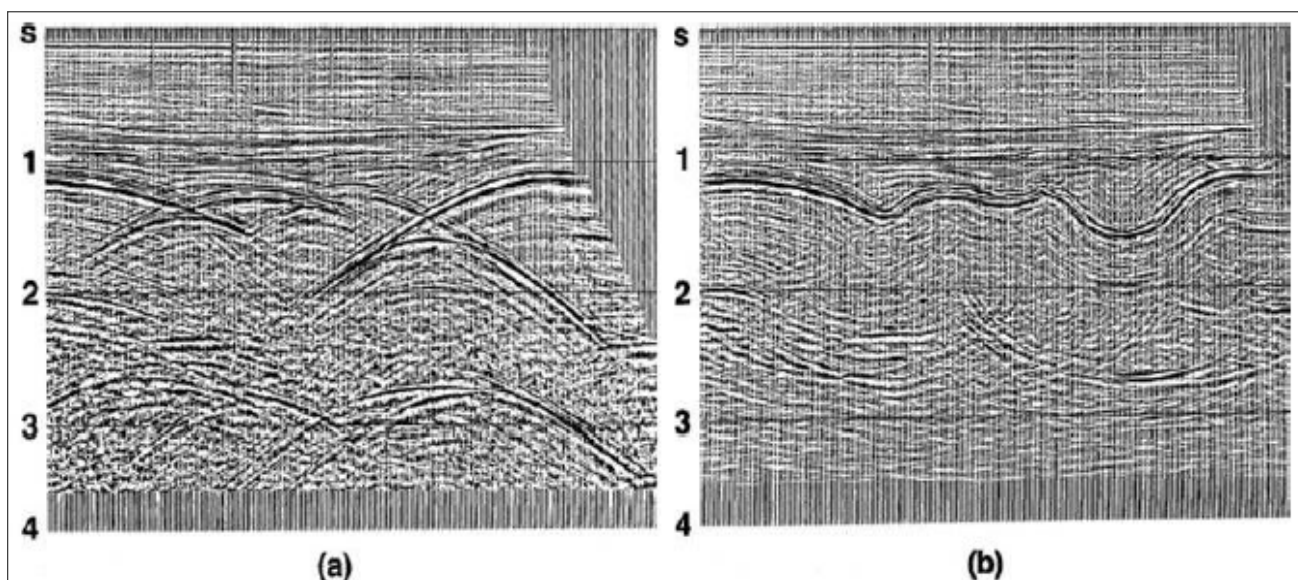
El procesamiento de datos sísmicos rutinario en la industria del petróleo, incluye una etapa de migración o *imaging* donde la sección apilada en tiempo es migrada para corregir la longitud, inclinación y posición de los reflectores, así como colapsar las difracciones. El campo de velocidades utilizado en dicho proceso suele ser el mismo campo utilizado para la corrección de NMO, conociéndose este tipo de migración como migración en tiempo y dando como resultado final una imagen en tiempo. Un segundo paso de complejidad, consiste en obtener mediante algún proceso de inversión, un campo de velocidades en profundidad, y a partir de la imagen apilada en tiempo producir una imagen migrada en profundidad, comúnmente denominada conversión a profundidad.

En medios con estructuras sub superficiales complejas, como las asociadas a cuerpos de sal, estructuras falladas, cabalgamientos, etc., las cuales poseen gradientes de velocidades verticales elevados y fuertes variaciones laterales de velocidad, la obtención misma de una sección apilada se ve comprometida generándose secciones 2D o volúmenes 3D “deformados” y carentes de todo sentido geológico, imposibles de ser interpretados. En estos casos se ha recurrido a la migración pre-apilado, la cual utiliza simultáneamente el proceso de modelado y retro-propagación de los campos de onda sísmica, dentro de un macro modelo de velocidades en profundidad, obtenido por técnicas de tomografía sísmica.

La migración sísmica mueve las reflexiones a su verdadera posición en el subsuelo, y colapsa las difracciones para lograr incrementar la resolución espacial y producir una imagen más exacta del subsuelo que las imágenes obtenidas en el procesamiento convencional sísmico, (Yilmaz, 2002). (Figura 3-7). Las técnicas más utilizadas para migración pre-apilado en profundidad son: Kirchhoff, RTM y OWWE.

Figura 3-7: CMP Apilado. (a) Sección apilada en CMP (b) Sección después de la migración de (a). (Yilmaz, 2002).

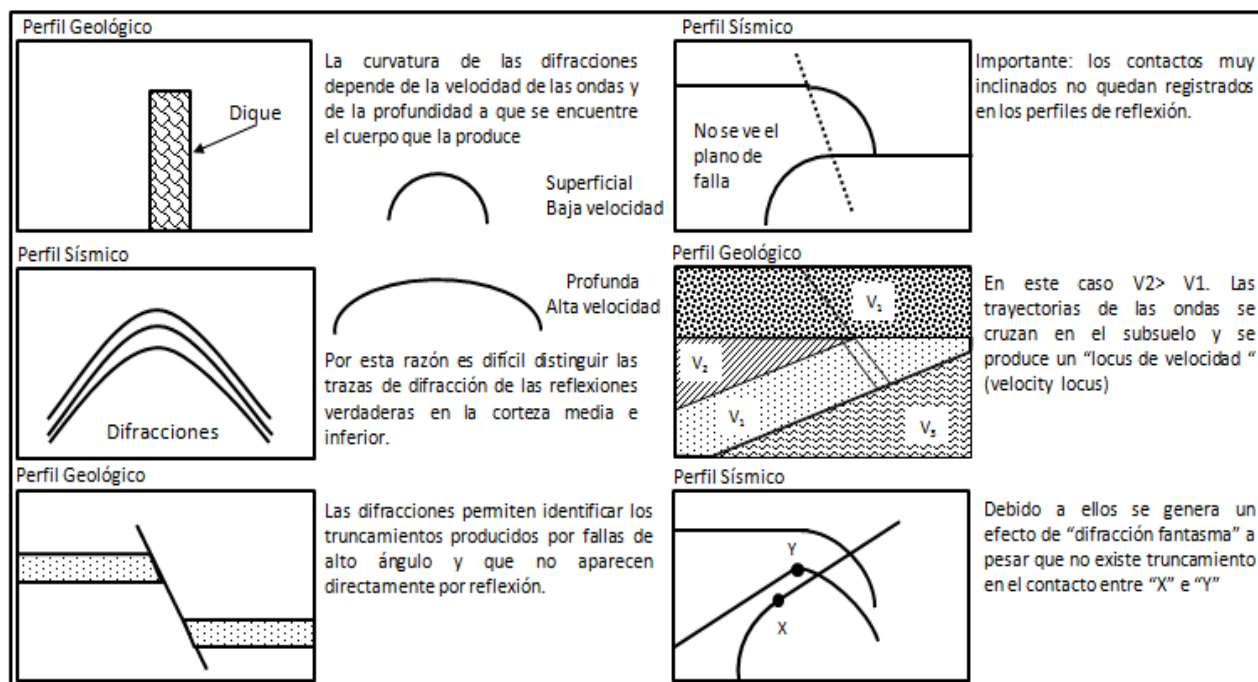
En el proceso de migración se eliminan “las sonrisas” de la imagen y se convierten sinclinales.



3.4 Sombra de Falla

Cuando se observa una sección vertical procesada puede tenerse problemas significativos si ésta no ha sido migrada, sobre todo si se está en un área de buzamientos regulares o altos: los reflectores sísmicos no estarán en su verdadera posición relativa, y además se tendrán difracciones sobre planos de falla y toda geología que presente variaciones verticales y laterales significativas (intrusiones, diapiros, arrecifes, lentes arenosas, etc.), como muestra la figura 3-8, en cuyo caso se deberá ser cauto, y eventualmente intentar al menos algunas migraciones de los reflectores de mayor interés.

Figura 3-8: Posición de reflectores sísmicos debido a variaciones verticales y laterales de velocidad. (Acosta, et al, 2009)

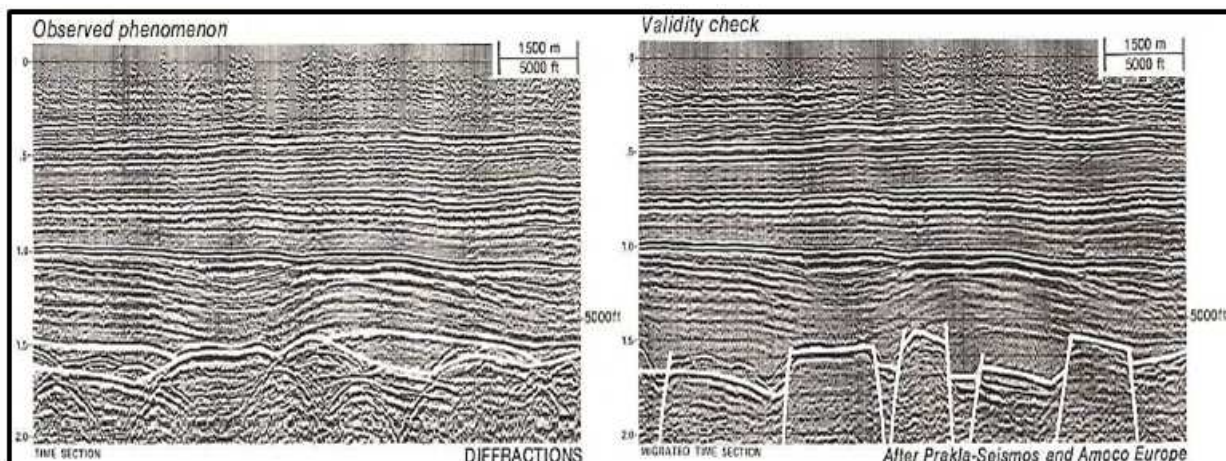


Existen varios engaños sísmicos en la interpretación sísmica de reflexión. Algunos de los más frecuentes se deben a:

3.4.1 Falta de Migración o Migración Inadecuada

Puede generar buzamientos erróneos, falsas estructuras, difracciones y cambios laterales de velocidad no corregidos. Durante el proceso de migración si no se aplica el modelo de velocidad adecuado, no se colapsarán las difracciones (si la velocidad empleada es menor a la requerida) o se generarán sonrisas (si la velocidad aplicada es mayor). En la figura 3-9, se muestra un ejemplo en el que en la sección no migrada (izquierda) las difracciones llevan a una interpretación errónea, que cambia en la sección migrada (derecha) con la incorporación de fallas en un esquema de pilares (horsts) y bloques hundidos (grabens).

Figura 3-9: Sección no migrada (izquierda) e incorporación de fallas en la sección migrada (derecha). (Acosta, 2009)



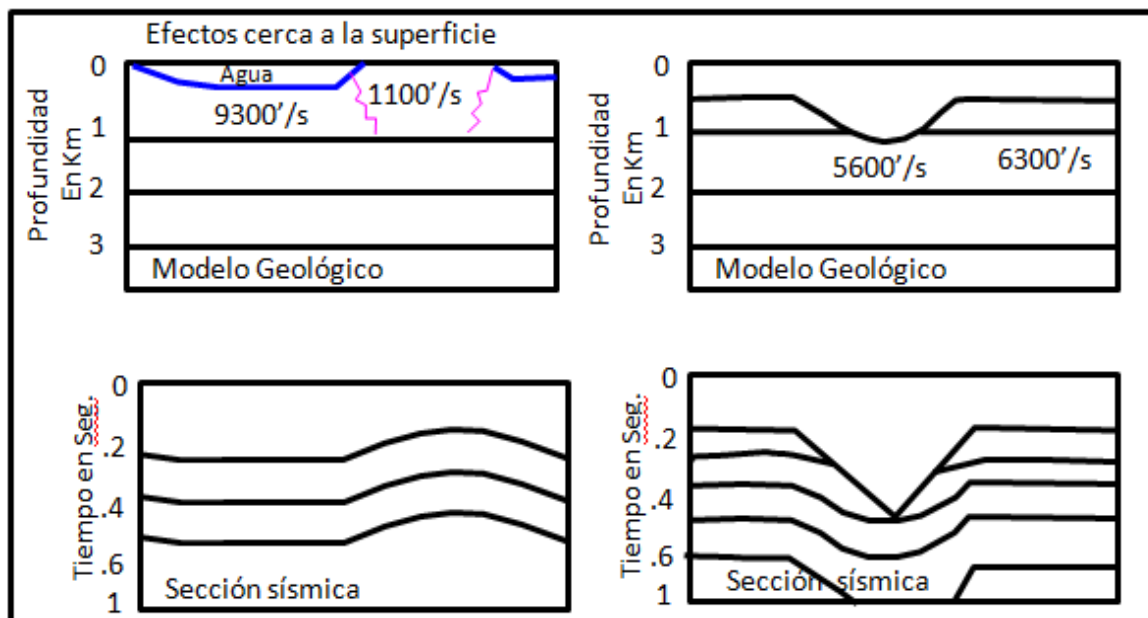
3.4.2 Recuperación Excesiva de Amplitudes

Donde la tendencia a ecualizar y escalar en exceso hace indistinguibles secuencias de bajos contrastes internos respecto a otras que contienen altos contrastes. La correcta recuperación es la mejor opción para poder realizar interpretaciones sismoestratigráficas acertadas o para poder aplicar adecuadamente inversión de trazas o método AVO.

3.4.3 Estáticas Imprecisas

Que pueden dar tirones o empujones de velocidad (*pull up, push down*) resultantes de emplear velocidades o espesores por exceso o por defecto para la capa meteorizada. Resultan entonces intervalos temporales respectivamente por defecto o por exceso para dicha capa superficial, lo que a su vez levanta o empuja las trazas generando falsos anticlinales o falsos sinclinales a lo largo de toda la sísmica. En la figura 3-10, se esquematizan y presentan casos reales de falsas estructuras por problemas no corregidos debidos a velocidades subsuperficiales lateralmente cambiantes. A la izquierda forma anticlinal ya la derecha sinclinal, en ambos casos con preservación de la curvatura a lo largo de toda la sección sísmica

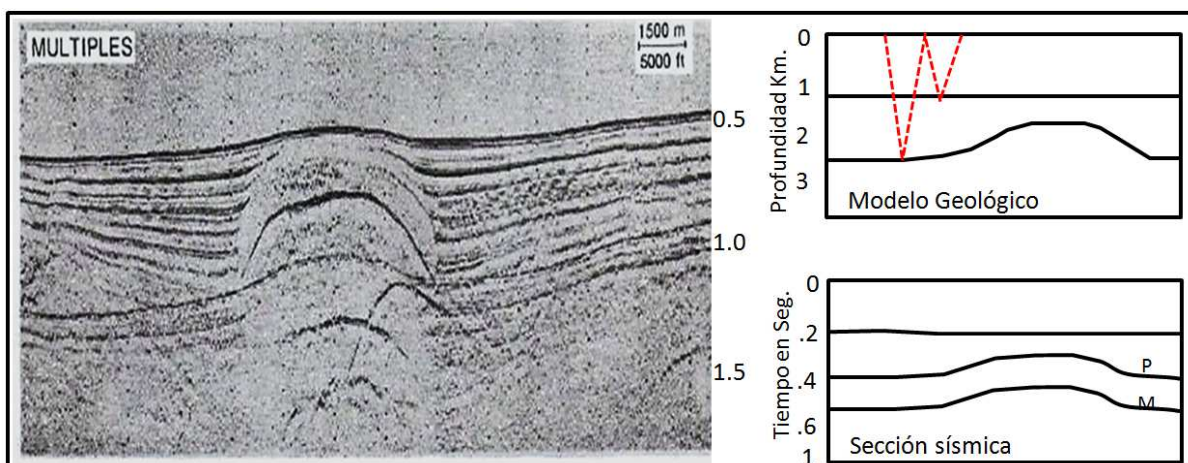
Figura 3-10: Falsas estructuras por problemas no corregidos debidos a variación de velocidad. (Acosta, 2009)



3.4.4 Ruidos en general

Ruidos que no han podido ser removidos durante la adquisición ni tampoco en el procesamiento de los datos, por lo cual pueden dificultar la interpretación de la geología e incluso generar falsas interpretaciones. Las reflexiones múltiples son un caso típico cuando no se ha recurrido a todas las herramientas disponibles para eliminarlas. En la figura 3-11 se observa a la derecha el modelo geológico con su correspondiente imagen sísmica y a la izquierda caso real de una sección sísmica en la que se presentan reflexiones múltiples por reverberación en el fondo marino. Se repite el reflector del lecho marino y también un reflector fuerte dentro de la antiforma.

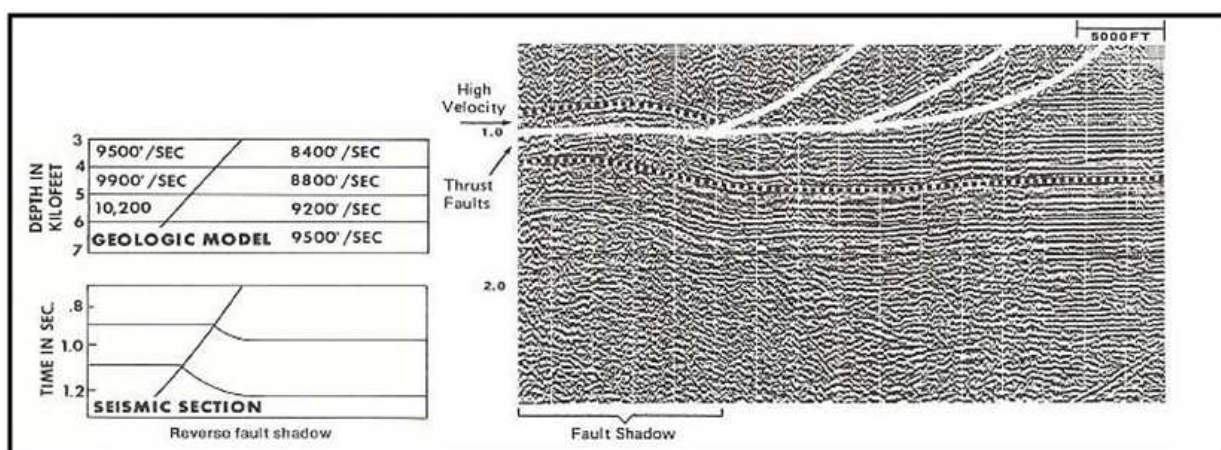
Figura 3-11: Efecto de los ruidos sobre la sección sísmica. (Acosta, 2009)



3.4.5 Variaciones laterales de velocidad

Generadas sobre todo por rasgos estructurales (sobrecorrimientos, fallas gravitacionales o transcurrentes, pliegues por inversión tectónica, diapirismo, intrusiones, u otras muchas posibilidades), como en menor medida también por rasgos estratigráficas (crecimientos arrecifales, lentes arenosos, etc). El resultado es similar al de las estáticas erróneas (tirones y empujones de velocidad), aunque en estos casos no hay nada que corregir en el proceso convencional. Si el fenómeno ocurre bajo una superficie de falla recibe el nombre alternativo de Sombra de Falla (*Fault Shadow*), que se muestra a continuación.

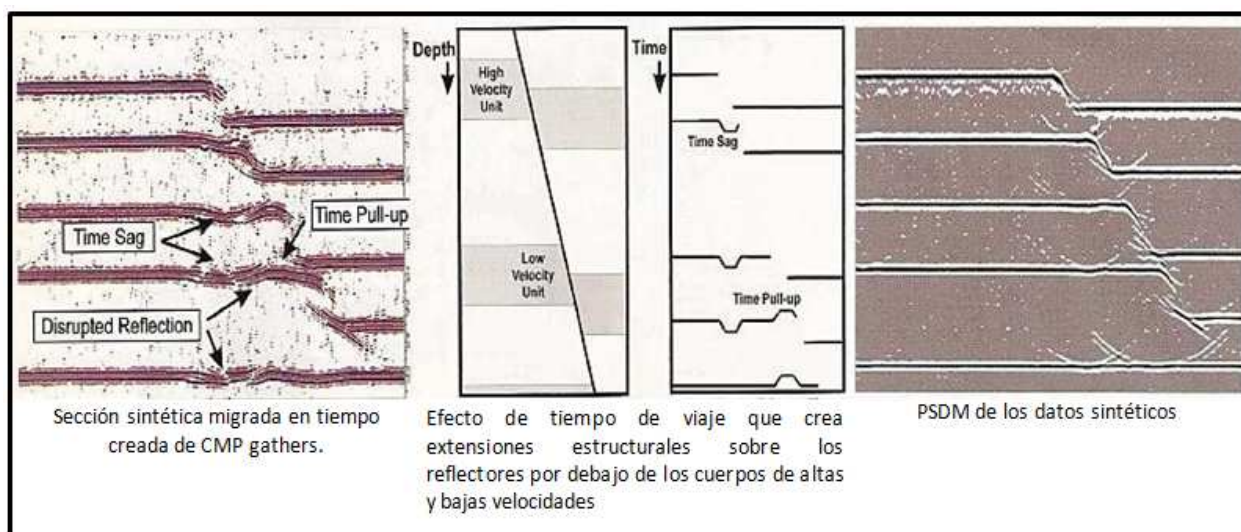
Figura 3-12: Efecto de Sombra de falla por variaciones de velocidad. (Acosta, 2009)



En ocasiones la sombra de falla produce una sucesión de pequeños anticlinales y sinclinales. Sólo se puede entender este tipo de problemas haciendo modelos sintéticos hasta encontrar la probable geología causante de tales levantamientos o hundimientos en la sísmica, o bien pueden ser corregidos, al menos parcialmente, con migración por trazado de rayos, preferentemente antes de suma, pero el problema es saber si la imagen lograda es la del subsuelo realmente.

A continuación, se muestra un modelo sintético que ilustra el problema de sombra de falla:

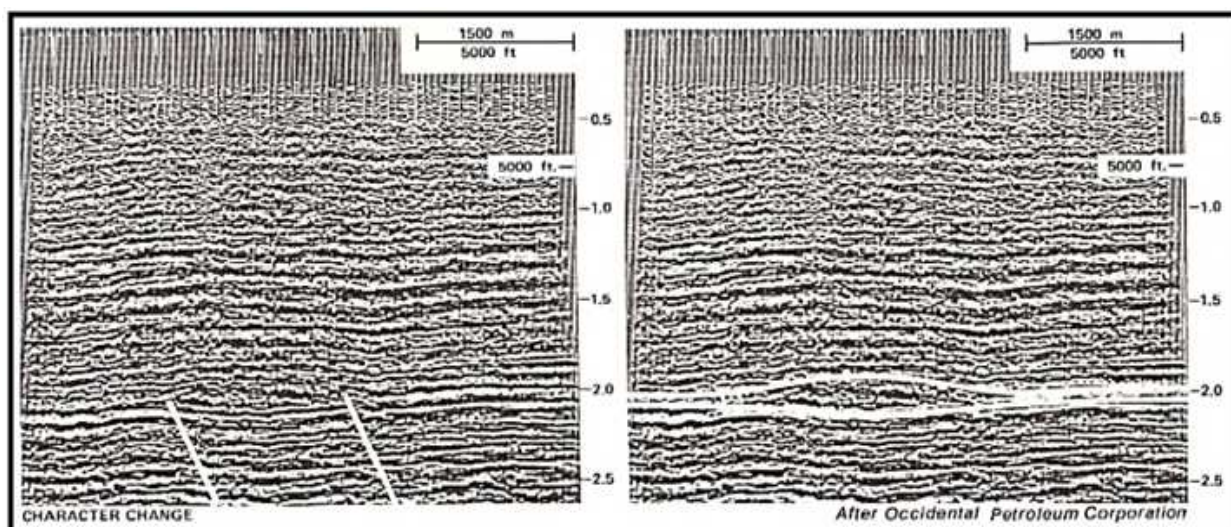
Figura 3-13: Modelado sintético del efecto de sombra de falla-(Acosta, 2009).



3.4.6 Deconvolución, Filtrados o Procesos variados

El flujo de trabajo aplicado durante el procesamiento, es determinante en la obtención de la imagen que representa las estructuras presentes en el subsuelo. Algunos de los procesos pueden a veces alterar, significativamente, la forma como se visualizan los rasgos sobre la sísmica por ejemplo se pueden presentar cambios laterales que permiten realizar diferentes interpretaciones en una misma área. En la figura 3-14, se observa la misma línea con dos interpretaciones diferentes debido al cambio de carácter lateral en la zona.

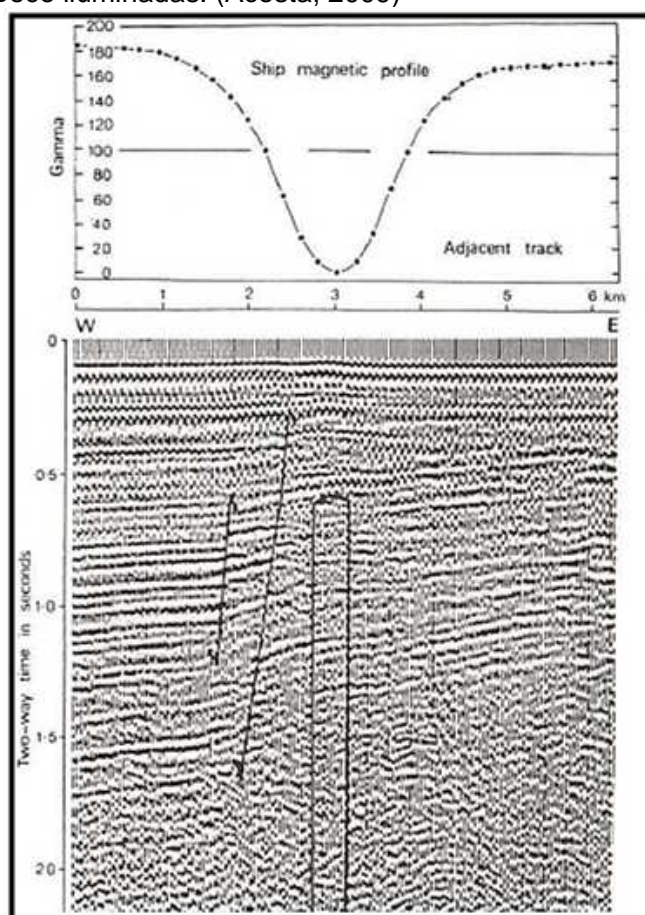
Figura 3-14: Cambio lateral de carácter geológico-(Acosta, 2009).



3.4.7 Zonas poco iluminadas

Generadas por los frentes de onda, lo que puede ser debido al alto buzamiento de las capas, como en la figura 3-15, en la que un dique ígneo denunciado por el perfil magnético prácticamente no se ve en la sísmica, excepto por muy sutiles indicios. También ocurren zonas poco iluminadas en capas subyaciendo fuertes contrastes de impedancia acústica (de gran amplitud) que actúan como espejos, bajo los cuales muy poca energía logra pasar. Es el caso de diapirismo evaporítico, carbón o lentes gasíferas, en este último caso sólo si se registran ondas P, ya que las S son indiferentes al fluido poral. También bajo intrusiones ígneas, como el filón de la sección de abajo, con un tirón de velocidad combinado con poca energía en los estratos infrayacentes y un anticlinal real por encima de la intrusión.

Figura 3-15: Zonas poco iluminadas. (Acosta, 2009)



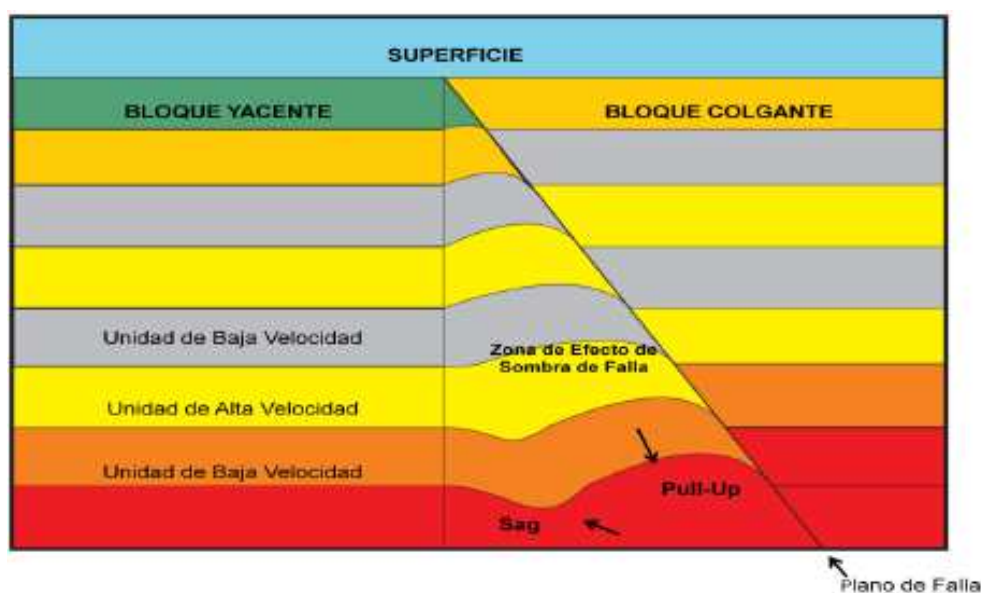
Las fallas son estructuras geológicas en donde un cuerpo rocoso después de fracturarse sufre un desplazamiento, dividiéndose así en: bloque colgante y bloque yacente, los cuales se encuentran separados por el plano de falla. De acuerdo a este desplazamiento

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, ya que son consideradas como una de las estructuras sello del sistema petrolífero, lo que contribuye a la acumulación de hidrocarburos y evita su migración, además los estratos que hacen parte de la falla pueden formar estructuras geológicas como anticlinales propicios para la acumulación. Sin embargo, en zonas de falla, se forman lo que se conoce como “el problema de la sombra de falla” y consiste en la formación de una imagen sísmica poco confiable en el bloque yacente del subsuelo debida a uno de los factores expuestos.

A continuación (figura 3-16), se muestra una falla de tipo inverso en el cual se observan 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 de sombra de falla y sus dos tipos de falsas estructuras denominadas falso sinclinal (*sag* o *pull down*) y falso anticlinal (*pull up*), 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 caso de una capa de baja velocidad a una capa de alta velocidad. (Martínez, Agudelo. 2009)

Figura 3-16: Imagen de una falla inversa mostrando un esquema del efecto de sombra de falla en el bloque yacente- (Martínez, 2009)



El efecto de sombra de falla es definido principalmente como anomalías en tiempo atribuibles a unidades de mayor velocidad que subyacen a cuerpos de menor velocidad (Fagin,1996), aunque autores como Carvajal (1992) y Trincheró (2000) describen el problema de falla como falsas estructuras creadas en la sísmica debido a los cambios laterales de velocidad producidos en áreas cercanas a la falla, patrones de adquisición y errores de procesamiento. El efecto de sombra de falla se presenta tanto en fallas inversas como en las normales. Uno de los métodos para eliminar este artefacto es convertir la imagen a profundidad usando técnicas como el PSDM. La migración sísmica se puede explicar como un método de inversión que involucra el reordenamiento de las reflexiones y difracciones ubicándolas en la posición real en el subsuelo y requiere de un campo de velocidad apropiado.

4. Interpretación Sísmica

A partir de los datos disponibles, se realizó la correlación entre los registros de los pozos existentes, para definir los topes formacionales y se interpretaron las imágenes sísmicas del área amarrando previamente los datos sísmicos a los datos de pozo. Como se muestra en la Figura 4-1, empleando los registros de pozo de rayo gamma, potencial espontáneo, resistivos, densidad y sónico, se correlacionaron los pozos E-1, E-2 y E-3, a partir de los cuales se determinó la secuencia perforada que corresponde a las formaciones paleógenas Guayabo, León, Carbonera, Mirador y Cretácicas Guadalupe y Gacheta y Ubaque. En relación con lo descrito en el capítulo 2, numeral 2.3-(figura 2-1), la Formación León representa un marcador importante y constituye una roca sello regional, de aproximadamente 1200 ft de espesor constituida por arcillolitas y lodolitas de carácter marino somero a lacustre. La Formación Carbonera de 1900ft espesor aproximadamente corresponde a un ambiente continental transicional, el nivel arenoso C1 es el producto de depósitos de canales fluviales. La Formación Mirador, de 70 ft de espesor en el área, tiene desarrollos arenosos que corresponden a depósitos de canales y a rellenos de bahías o de estuarios; se considera la formación productora del área. La Formación Guadalupe, está constituida predominantemente, por areniscas y algunas intercalaciones de limolitas y lodolitas con un espesor de 330ft.

Se interpretaron las líneas R-2005-01, R-2005-02, R-2005-03, para esto inicialmente se realizó la calibración de los datos sísmicos a los datos de pozo, teniendo en cuenta la tabla tiempo-profundidad (Checkshot) del pozo E-01, y un sismograma sintético generado a partir de los topes interpretados y de los registros sónico y densidad (Figura 4-2). Se calibraron e interpretaron los reflectores correspondientes a los topes de las formaciones Cenozoicas León, Unidad C1 de la Formación Carbonera y Formación mirador y las formaciones Cretácicas Gacheta y Ubaque como se observa en la Figura 4-3, 4-4 y 4-5.

Figura 4-1: Correlación estructural entre los pozos E-2, E-1, E-3

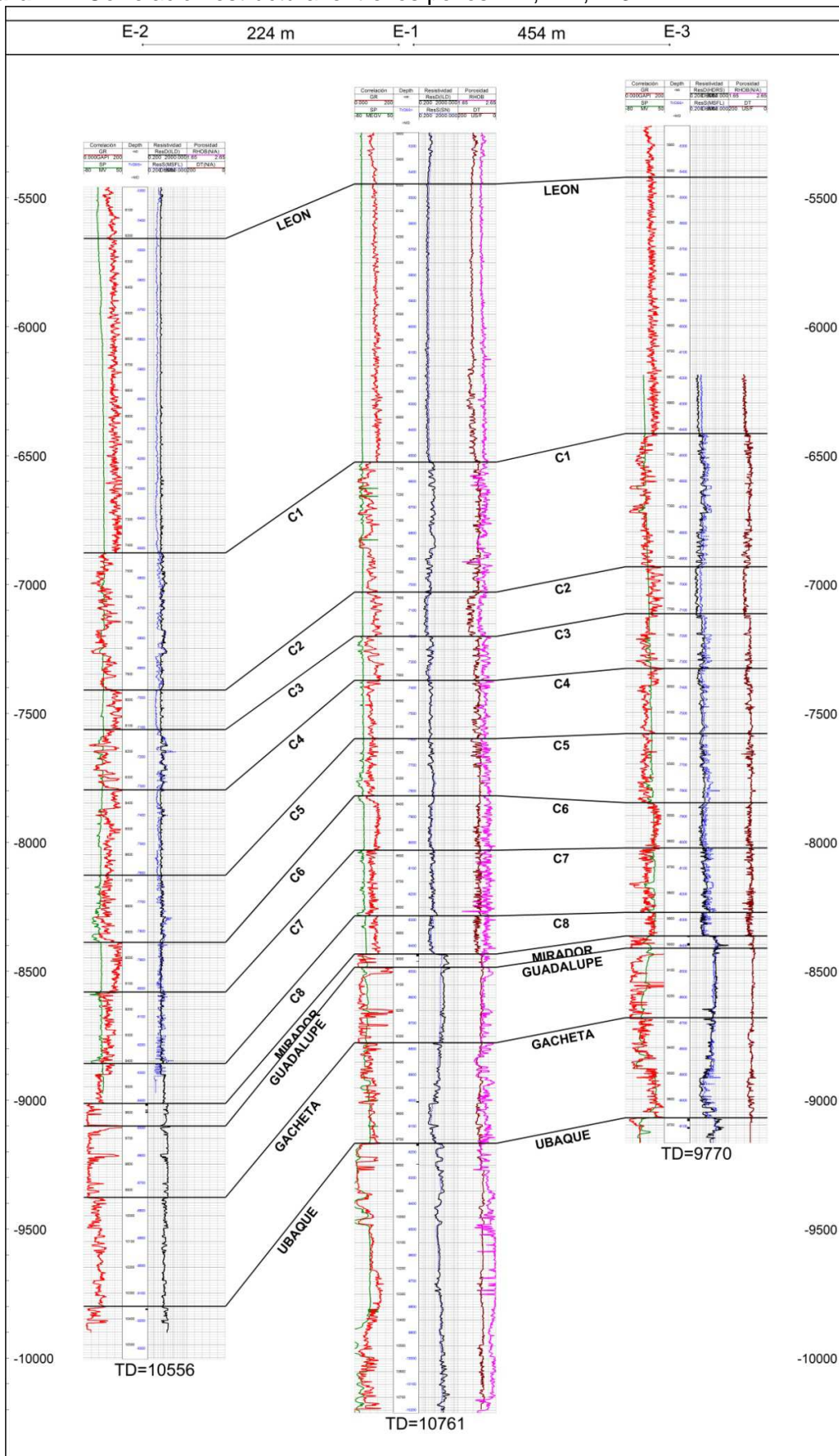
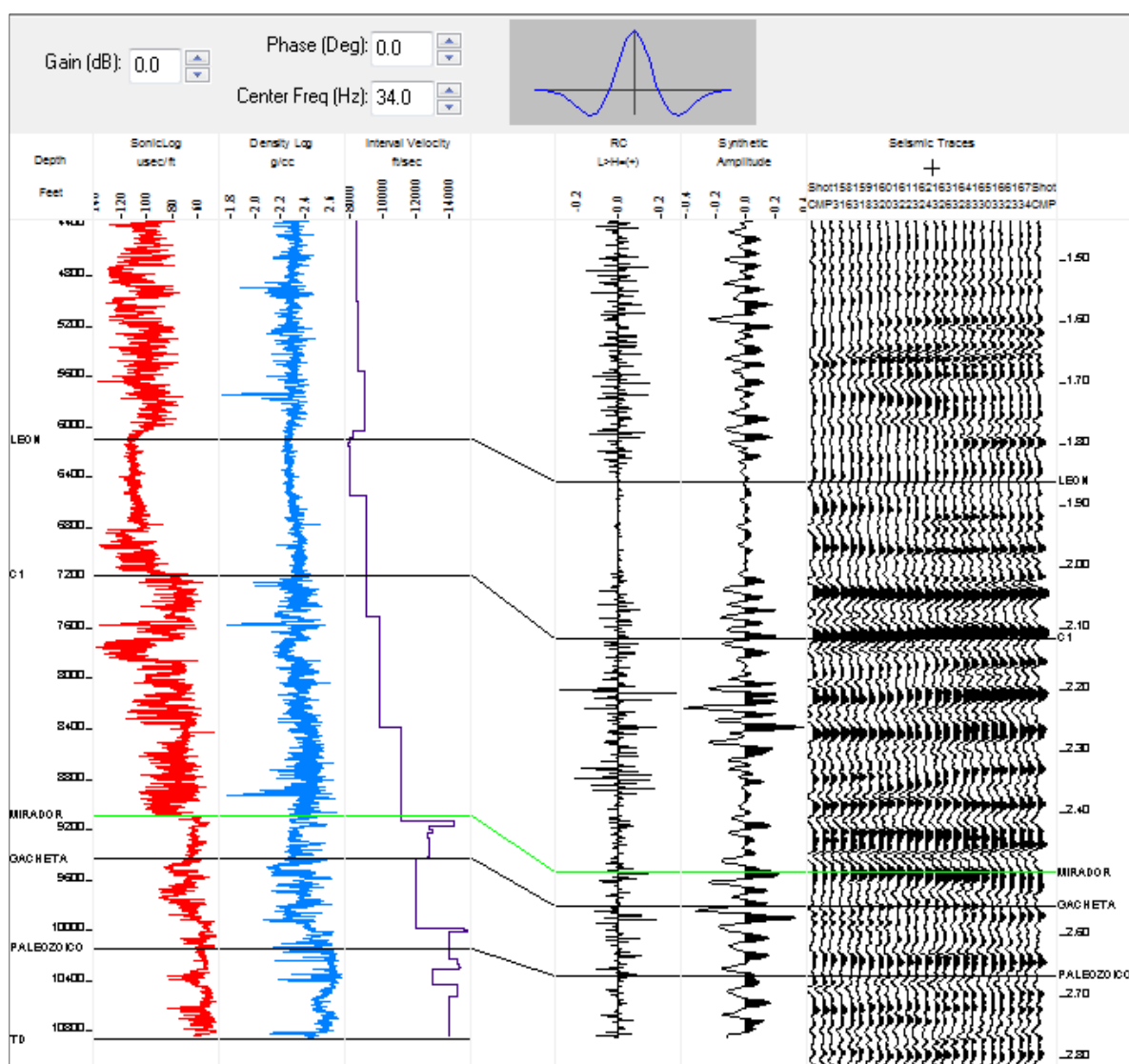


Figura 4-2: Calibración sísmica mediante sismograma sintético pozo E-01



El sismograma sintético (figura 4-2), se realizó tomando con datos de entrada el registro sónico y de densidad de pozo E-1. A partir del registro sónico (DTC) se calculó la velocidad (V_p) que junto al registro de densidad (RHOB) permitieron determinar la impedancia acústica, que al convolucionarla con la ondícula Ricker permitió definir la traza sintética correlacionable con los datos sísmicos de la línea R-2005-03.

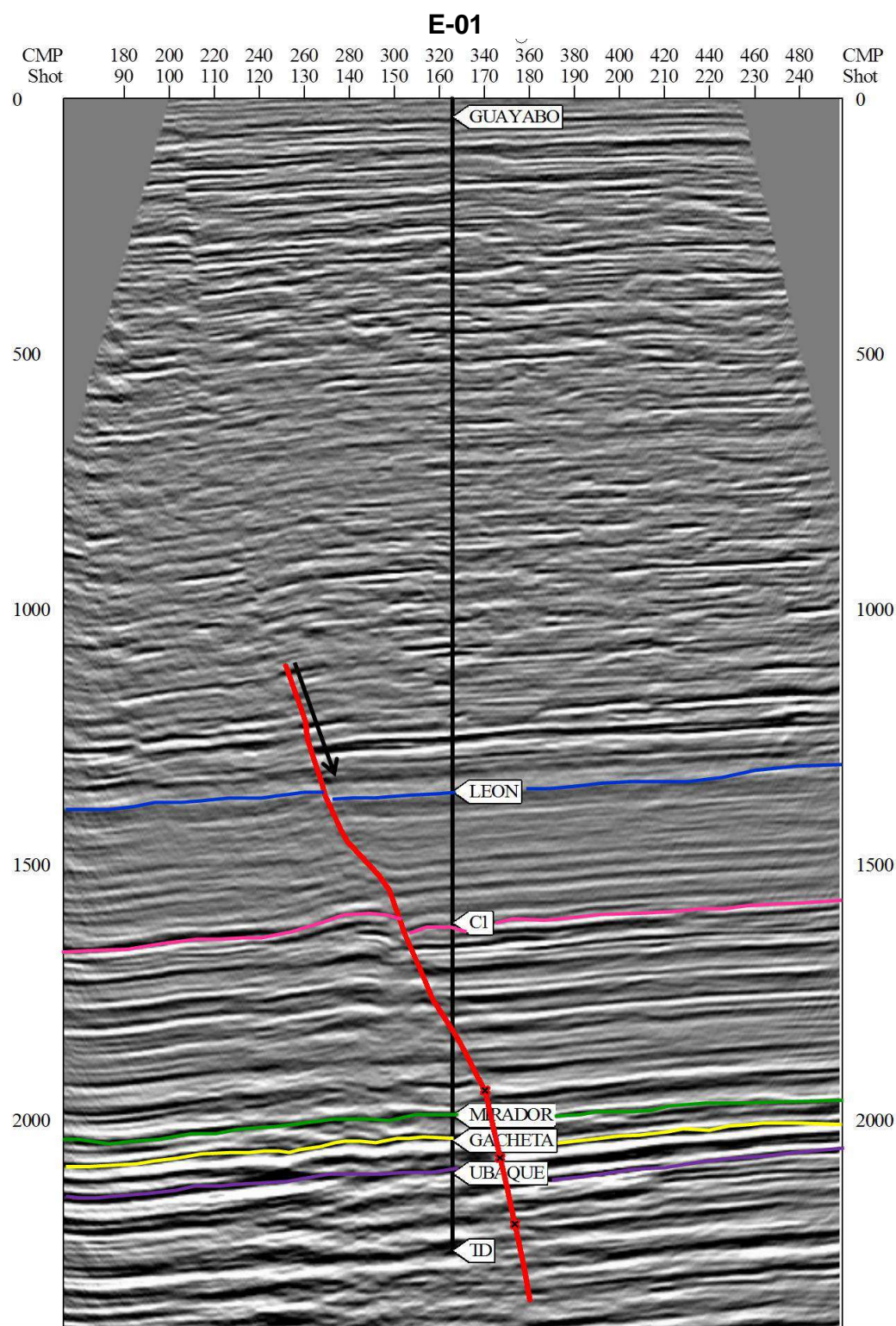
Figura 4-3: Amarre sísmica-pozo e interpretación de las líneas R-2005-03

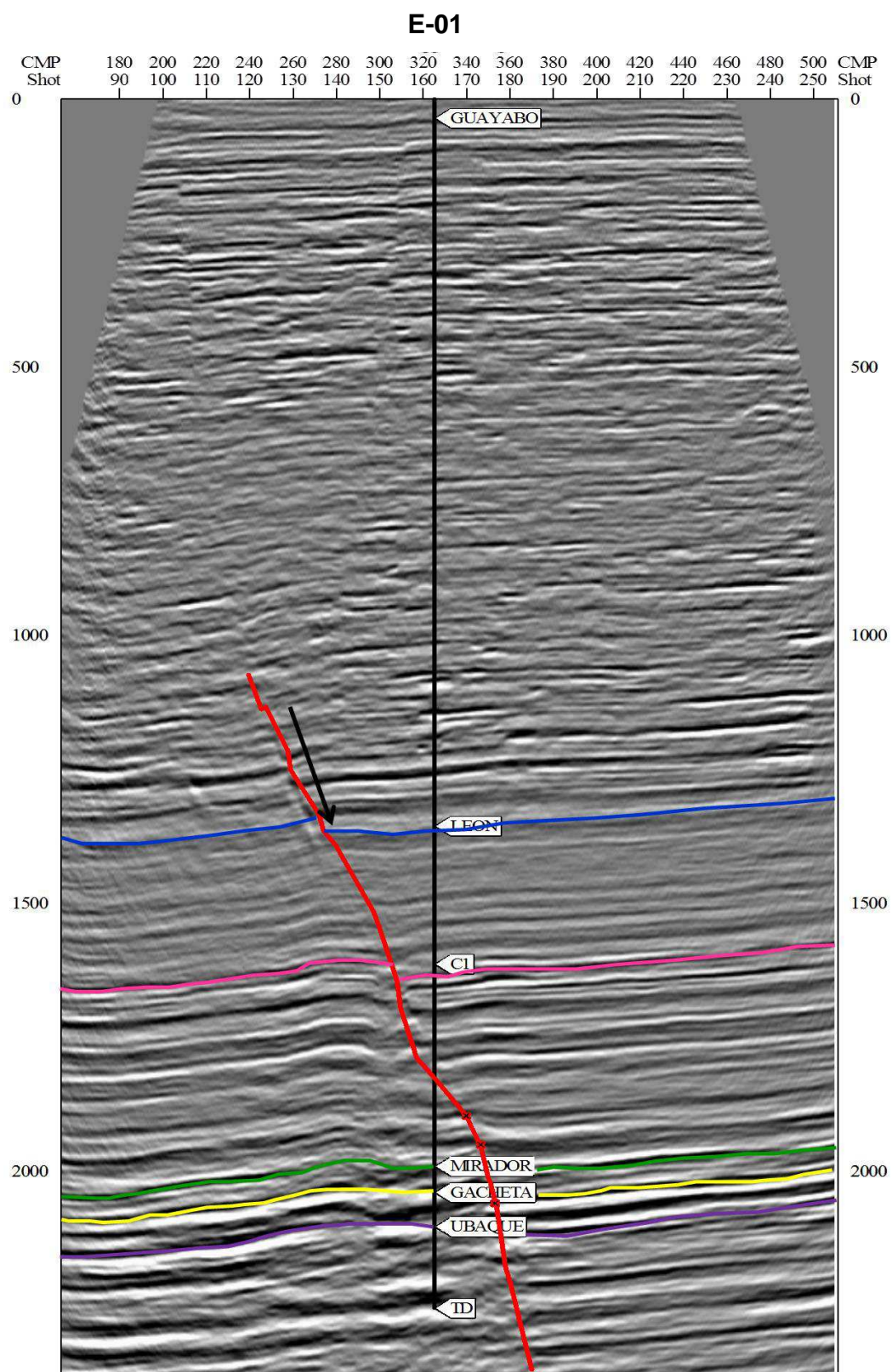
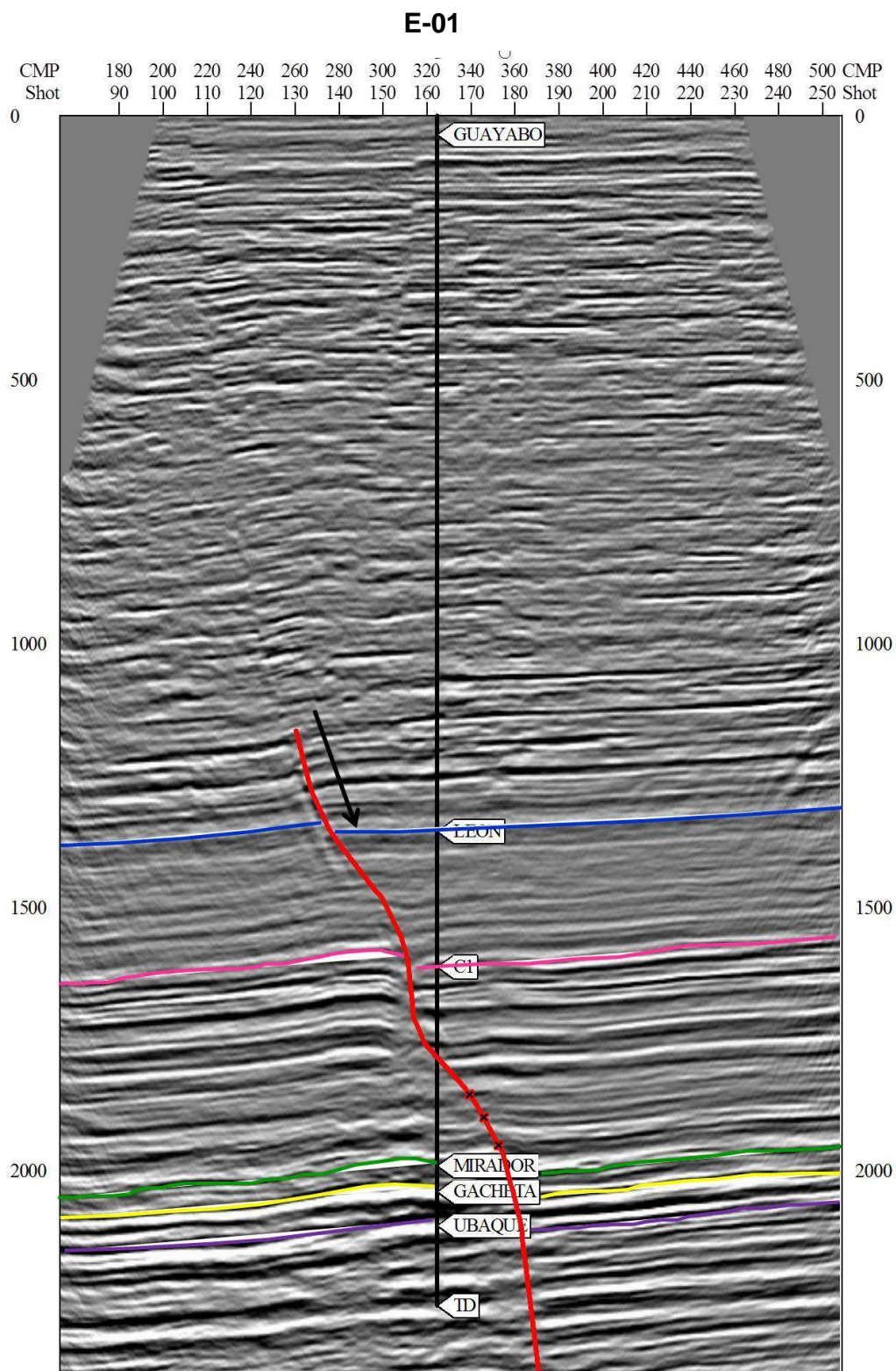
Figura 4-4: Amarre sísmica-pozo e interpretación de la línea R-2005-02

Figura 4-5: Amarre sísmica-pozo e interpretación de la línea R-2005-01

De acuerdo a la información existente y a la interpretación realizada para este trabajo, el área de estudio pertenece a una cuenca es de tipo antepaís de carácter extensional. La trampa que acumula los hidrocarburos de este campo es de tipo estructural, asociada a una falla normal antitética de alto ángulo y alcanza un desplazamiento vertical hasta de 190 pies aproximadamente; el desplazamiento no es constante a lo largo de la falla, incluso en algunos sectores, se pueden medir desplazamientos mayores en niveles superiores como al tope de las formaciones Cenozoicas León y Carbonera, a diferencia de las formaciones Cretácicas Gachetá y Ubaque en las cuales los desplazamientos son menores. En este caso, no existe una componente de rumbo importante, como una compactación diferencial de los sedimentos, donde los sedimentos propios de las formaciones León y Carbonera tienen un alto contenido de arcilla; dado esto tienen un comportamiento dúctil a diferencia de los niveles cretácicos de las formaciones Guadalupe y Ubaque, que tienen un comportamiento incompetente, lo que hace que estos dos paquetes diferenciados en esta interpretación, respondan de manera diferente al mayor esfuerzo, σ_1 vertical, propio de un ambiente extensional. El trazo de la falla se observa claramente a nivel de algunos paquetes o grupos de reflectores, como lo es en la Fm. Guayabo, Fm León, pero al entrar a la Fm. Carbonera y Fm Mirador se observan variaciones verticales y laterales (*pull up* y *pull down*) que no permiten identificar claramente por donde continúa el trazo de la falla, de modo que como se observa en la Figura 4-3, 4-4 y 4-5, la falla no tiene un trazo continuo, tanto que pareciera existir más de una falla en la imagen.

El rumbo de la falla en el sector central, es de N40°E, generando un pliegue que tiene la misma orientación. La geometría de la trampa corresponde a un monoclinal que buza hacia el noroeste y buzamiento arriba, hacia el sureste, cierra contra la falla antitética descrita.

5. Modelamiento de Datos Sintéticos 2D.

5.1 Definición del Modelo en Profundidad

Teniendo en cuenta el modelo estructural obtenido en la etapa de interpretación, los datos del pozo E-1 (registros sísmico (DT), densidad (RHOB)), se estableció un modelo geológico sintético del área de análisis compuesto de tres capas plano paralelas cortadas por una falla normal. Se realizaron 20 modelos en profundidad, cada uno con variación de ángulo, salto de falla y gradiente de velocidad intervállica. (Tabla 5-6).

A partir del registro sísmico (DT), se calculó la velocidad intervállica para cada una de las formaciones presentes en el área (Fms. Guayabo, León, Carbonera, Mirador, Gacheta, Ubaque). En la tabla 5-1 se presenta el promedio de velocidad para cada una de las formaciones presentes en el área.

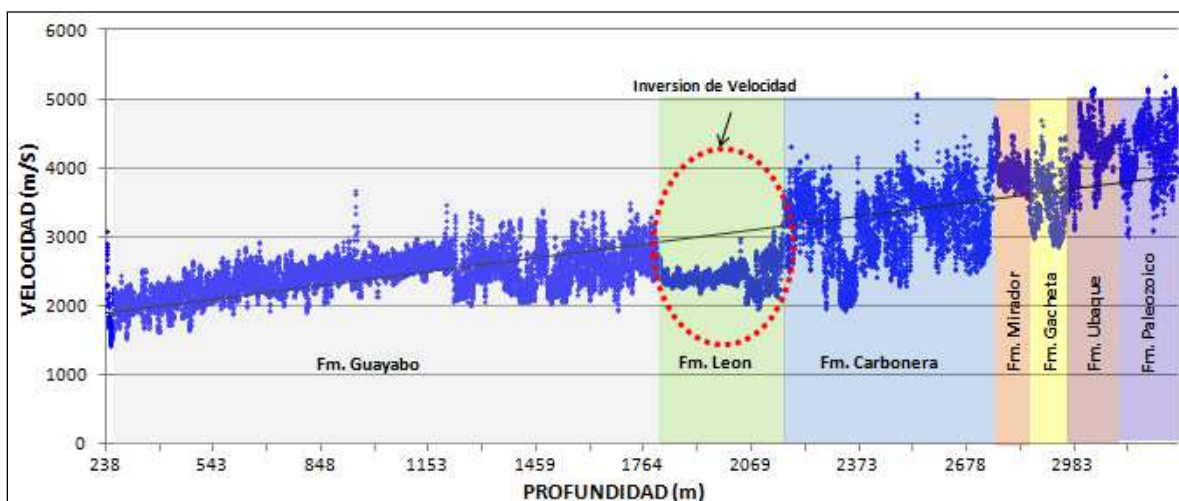
Tabla 5-1: Promedio de velocidades intervállica por formación a partir del registro sísmico del pozo E-1

FORMACION	MD (ft)	VEL (m/s)
Fm Guayabo	0	3600
Fm. Leon	5995	2450
Fm. Carbonera	7074	3229
Fm. Mirador	8982	3999
Fm. Gacheta	9326	3536
Fm. Ubaque	9716	4242

Como se observa en la tabla 5-1, la Formación León es una capa de baja velocidad localizada entre dos capas de alta velocidad resultando así una inversión de velocidad en el área, la cual origina posiblemente falsas estructuras (*pull up*, *pull down*, distorsiones) a lo largo del plano de falla en el bloque yacente visualizado en las imágenes sísmicas.

De acuerdo al análisis realizado hasta aquí, el efecto de sombra de falla es evidente en el área de estudio. Con el objetivo de corroborar el efecto, se realizó una gráfica de $V(m/s)$ vs Profundidad (m) (Figura 5-1), en la cual se evidencia la anomalía de velocidad en la interface entre la Fm León y Fm Mirador, que es justo donde en la imagen sísmica se visualiza el efecto (Figuras 4-3, 4-4 y 4-5).

Figura 5-1: Velocidad intervállica vs profundidad a partir del registro sísmico del pozo E-1.



Empleando el registro de densidad del pozo E-1, se estimó la densidad (gr/cc) para cada una de las formaciones objeto de análisis, dato necesario en el software Tesseral Pro 2D junto con la velocidad intervállica para la generación de los modelos sintéticos. Los datos obtenidos se despliegan en la tabla 5-2:

Tabla 5-2: Promedio de densidades y velocidades por formación a partir del registro de densidad y sísmico del pozo E-1

FORMACION	MD (ft)	V_p (m/s)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	0	3600	2.0376
Fm. León	5995	2450	2.3064
Fm. Carbonera	7074	3229	2.3636
Fm. Mirador	8982	3999	2.3478
Fm. Gacheta	9326	3536	2.3548
Fm. Ubaque	9716	4242	2.4179

Con el objetivo de modelar correctamente en Tesseral Pro 2D, se hizo necesario calcular para cada formación el número de capas con el fin de asignar a cada una, un valor de

velocidad intervállica de acuerdo a un gradiente. Para esto, se calculó de acuerdo al promedio de velocidad intervállica y a los espesores de cada formación, el gradiente de velocidad. En la tabla 5-3 se muestra el incremento de velocidad para cada formación.

Tabla 5-3: Gradiente de velocidad para cada una de las formaciones geológicas

FORMACION	MD (m)	Velocidad (m/s)	Espesores (m)	Gradiente ([m/s]/m)
Fm Guayabo	0	3600	1827	1.97
Fm. Leon	1827	2450	329	7.45
Fm. Carbonera	2156	3229	582	5.55
Fm. Mirador	2738	3999	105	38.14

Posteriormente teniendo en cuenta la interpretación sísmica, se definieron los saltos de la falla objeto de análisis, para este caso 60m, 90m, 150m y 300m. De acuerdo a estos y a los espesores de cada formación, se calculó el número de capas en que se divide y a cada una se asignó su velocidad como se muestra en la tabla 5-4.

Tabla 5-4: Estimación del número de capas para cada formación geológica

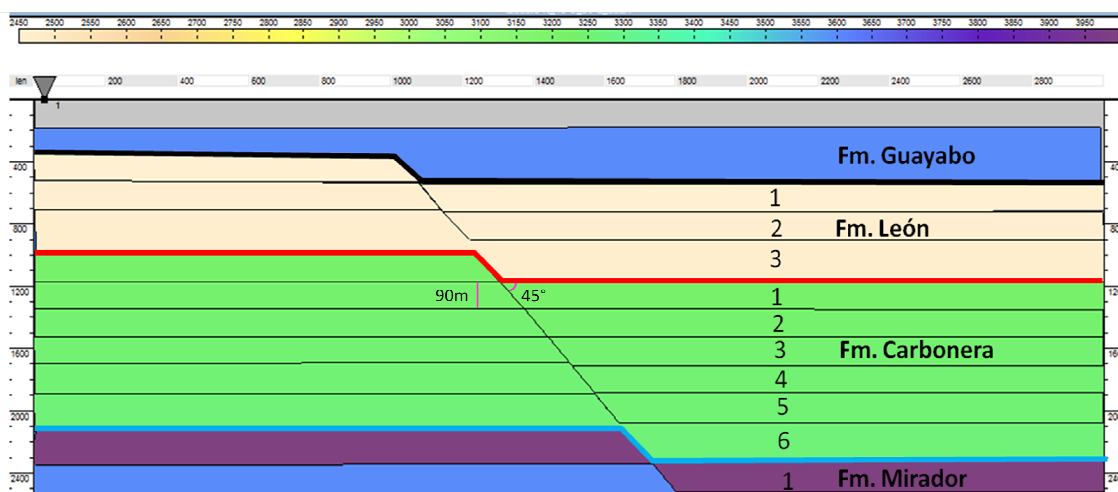
		Salto Falla (m)				# Capas Modelo
		60	90	150	300	
	Espesores (m)					
Fm. Leon	329	5	3	2	1	# Capas Modelo
Fm. Carbonera	582	9	6	4	2	
Fm. Mirador	105	2	1	1	0	

A partir del modelo estructural interpretado, el número de capas calculado por formación, la velocidad intervállica y la densidad, se definió el modelo en profundidad a emplear en el modelado sintético de los datos 2D. En la tabla 5-5, se presenta un ejemplo de la definición del modelo en profundidad para el ángulo de 45° con salto de falla 90m, como se muestra los datos requeridos para definir el modelo geológico en el *software* son el número de capas, la velocidad, el gradiente de velocidad, la densidad y en la figura 5-2 se muestra el modelo geológico en profundidad teniendo en cuenta los datos calculados anteriormente., como se observa cada formación se dividió en capas con el objetivo de analizar el efecto lateral y vertical cuando se producen cambios de velocidad.

Tabla 5-5: Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 45° salto de falla 90m.

ANGULO DE FALLA $\theta=45$ vs Salto Falla=90m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
	3	2464.91		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
	5	3251.35		
	6	3256.90		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Figura 5-2: Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 45° y salto de falla 90m.



5.2 Modelamiento y Procesamiento de los Datos Sintéticos 2D

De acuerdo al modelo geológico definido, la velocidad interválica establecida para cada capa, la densidad del medio, el *offset* máximo, la variación de salto y ángulo de buzamiento de falla, se generaron 20 modelos sintéticos con el objetivo de obtener una respuesta sintética mediante un diseño *zero offset* y un diseño *Split Spread* para el cual se realizó el procesamiento sísmico 2D para obtener imágenes de apilado y migración (*PSTM*) a fin de visualizar y analizar la respuesta del efecto de sombra de falla bajo variaciones de velocidad vertical, lateral, ángulo y salto de falla.

La tabla 5-6 relaciona los 20 modelos sintéticos generados y analizados:

Tabla 5-6: Modelos sintéticos con variación de ángulo y salto de falla

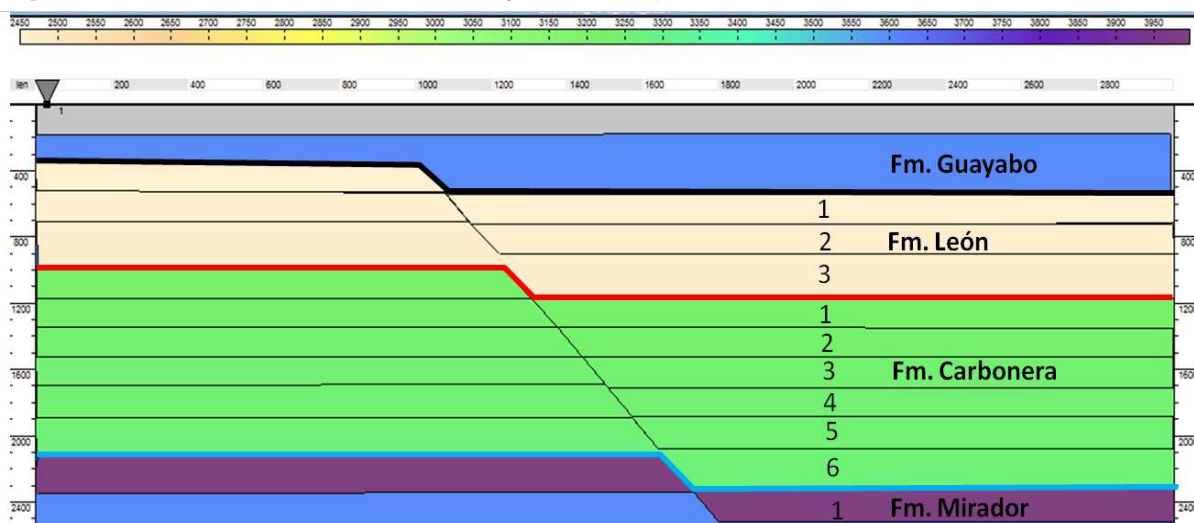
MODELO	ANGULO DE FALLA θ	SALTO DE FALLA ΔS (m)	OFFSET MAXIMO X(m)
1	15	60	3000
2	15	90	3000
3	15	150	3000
4	15	300	3000
5	30	60	3000
6	30	90	3000
7	30	150	3000
8	30	300	3000
9	45	60	3000
10	45	90	3000
11	45	150	3000
12	45	300	3000
13	60	60	3000
14	60	90	3000
15	60	150	3000
16	60	300	3000
17	75	60	3000
18	75	90	3000
19	75	150	3000
20	75	300	3000

Con el objetivo de obtener una primera respuesta y visualización sintética del efecto de sombra de falla, se generaron sismogramas sintéticos zero offset para cada uno de estos modelos. Para esto, empleando la aplicación Tesserat Pro 2D, se cargó, digitalizo cada modelo geológico y se pobló cada unidad litológica con valores de densidad y velocidad interválica de acuerdo al gradiente de velocidad calculado para cada uno. En la tabla 5-7 se muestran como ejemplo, los parámetros definidos para el modelo de 45° con salto de falla 90m, de la misma forma se definieron para cada uno de los modelos sintéticos mencionados en la tabla 5-6. El modelamiento para los distintos ángulos y saltos se muestran en el Anexo A.

Tabla 5-7: Parámetros definidos para la generación del modelo geológico para un ángulo de 45° con salto de falla 90m.

ANGULO DE FALLA $\theta=45$ vs Salto Falla=90m						
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)	Longitud (m)	Profundidad (m)
Fm Guayabo	1	3600		2.037	3000	0 - 3000
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306		
	2	2457.45				
	3	2464.91				
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364		
	2	3234.69				
	3	3240.25				
	4	3245.80				
	5	3251.35				
6	3256.90					
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348		

Figura 5-3: Modelo Sintético para un ángulo de 45° y Salto de Falla 90m



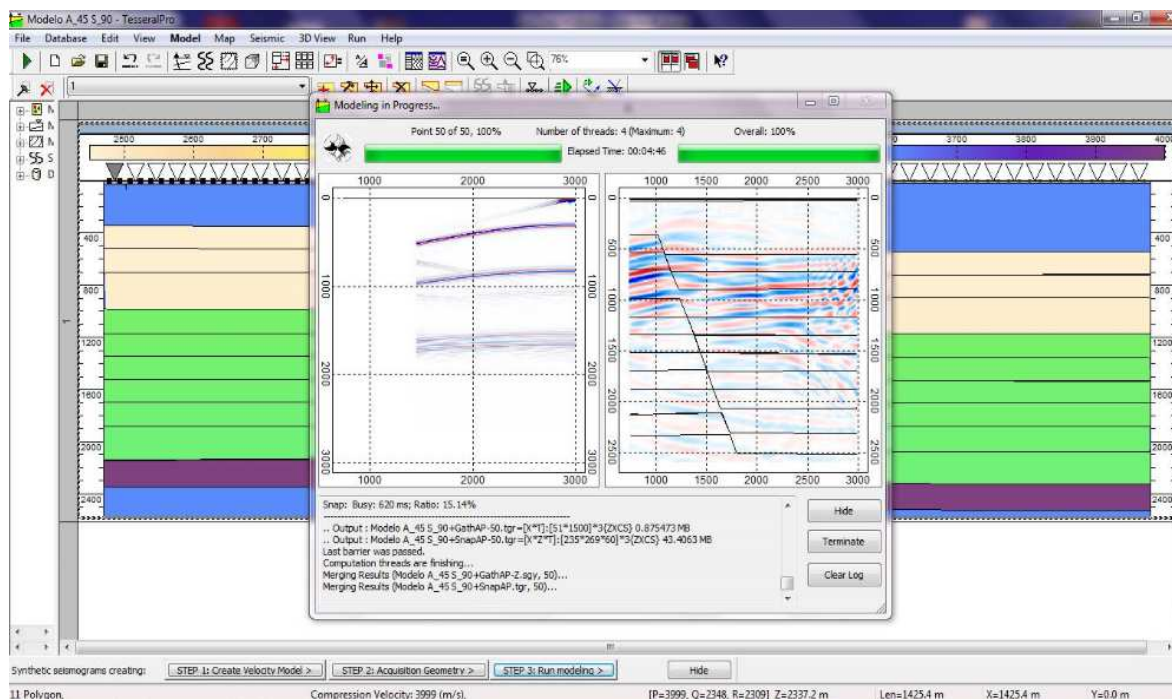
Con el modelo geológico sintético ya generado, se procedió a realizar la generación de los sismogramas sintéticos zero *offset* teniendo en cuenta los parámetros mostrados en la tabla 5-8

Tabla 5-8: Parámetros empleados en la adquisición sísmica sintética zero *offset*

Numero de Fuentes	50
Intervalo entre Fuentes (m)	60
Numero de Receptores	1
Intervalo entre receptores (m)	60
Longitud del registro (m)	3000

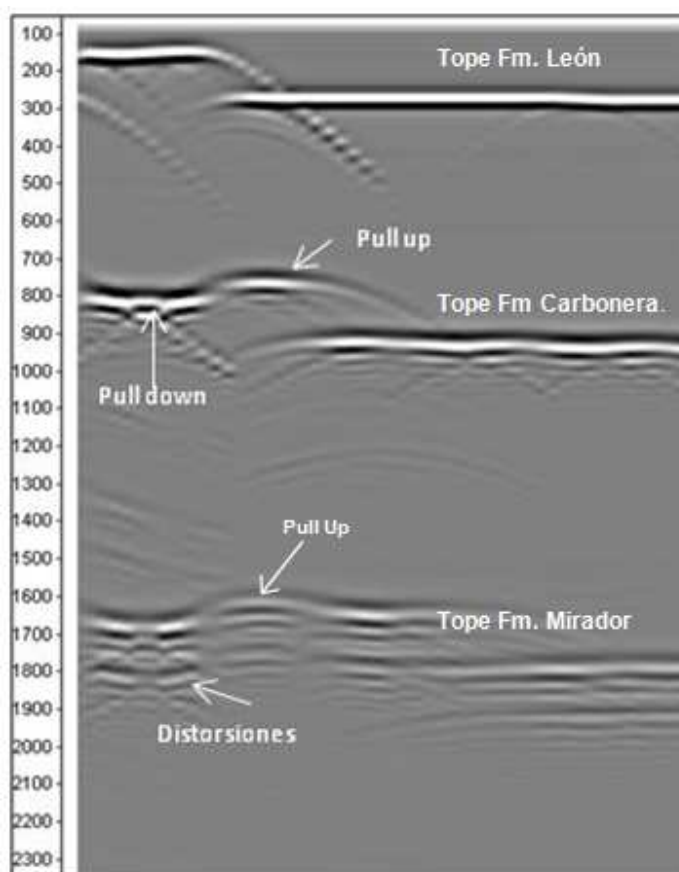
A partir del modelo y de los parámetros definidos, se corrió el modelo acústico basado en la ecuación de onda con el objetivo de iluminar cada una de las capas presentes en el modelo y tener en cuenta los valores de velocidad de la onda P, y densidad de cada unidad litológica como es mostrado a continuación en la figura 5-4, en la que se observa cómo se va generando cada registro así como la disposición de los reflectores en los dos bloques de la falla, obsérvese que en el bloque yacente ya se ven levantados los reflectores.

Figura 5-4: Generación de la línea sísmica sintética en Tesseral Pro.



Finalmente, se obtuvo una imagen sísmica en tiempo para cada modelo a partir de las cuales se realizó el análisis del problema de sombra de falla teniendo en cuenta la variación de ángulo, salto de falla y velocidad. En la figura 5-5 se muestra la imagen sísmica zero offset obtenida para el modelo de 45° y salto 90m, como se observa, se presenta una falsa estructura en el bloque yacente de la falla (de forma anticlinal) debido a la presencia de la Fm. León (capa de baja velocidad) ubicada entre dos capas de alta velocidad, este cambio brusco de velocidad entre las formaciones mencionadas, hace que se originen una serie de distorsiones a nivel de la Fm. Carbonera.

Figura 5-5: Imagen sísmica *zero offset* para el modelo geológico de 45° y salto de falla 90m. Nótese la presencia de *pull up* y distorsiones en el bloque yacente de la falla.



Con el objetivo de ver los eventos en su verdadera posición y realizar una migración en tiempo, se generaron los *gathers* de los modelos sintéticos mediante el software Tesseral Pro, para esto, se realizó un diseño *Split Spread* y se generó una adquisición sísmica

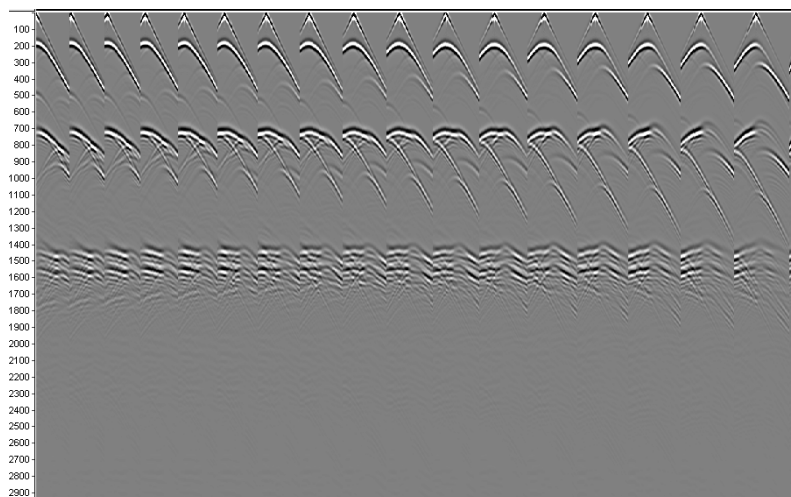
sintética teniendo en cuenta los parámetros usados en la adquisición de las líneas del programa sísmico 2005 los cuales se muestran en la tabla 5-9

Tabla 5-9: Parámetros empleados en la adquisición sísmica sintética Split spread

Numero de Fuentes	50
Intervalo entre Fuentes (m)	60
Numero de Receptores	100
Intervalo entre receptores (m)	30
Longitud del registro (m)	3000

Basados en estos parámetros se corrieron los modelos teniendo en cuenta el diseño *Split Spread* y se obtuvieron los *gathers* con los cuales se realizó el procesamiento. La imagen de la figura 5-6 es una muestra de los *gathers* obtenidos para el modelo de 45° y 90m de salto de falla utilizados en la etapa de procesamiento (PSTM).

Figura 5-6: Gathers obtenidos para el modelo de 45° salto de falla 90 mediante diseño Split Spread



Empleando la aplicación de procesamiento Tornado (CGG), y los registros sintéticos obtenidos a partir del modelamiento, se realizó el procesamiento sísmico de los datos sintéticos 2D.

Las etapas del procesamiento se describen a continuación.

5.2.1 Carga de datos

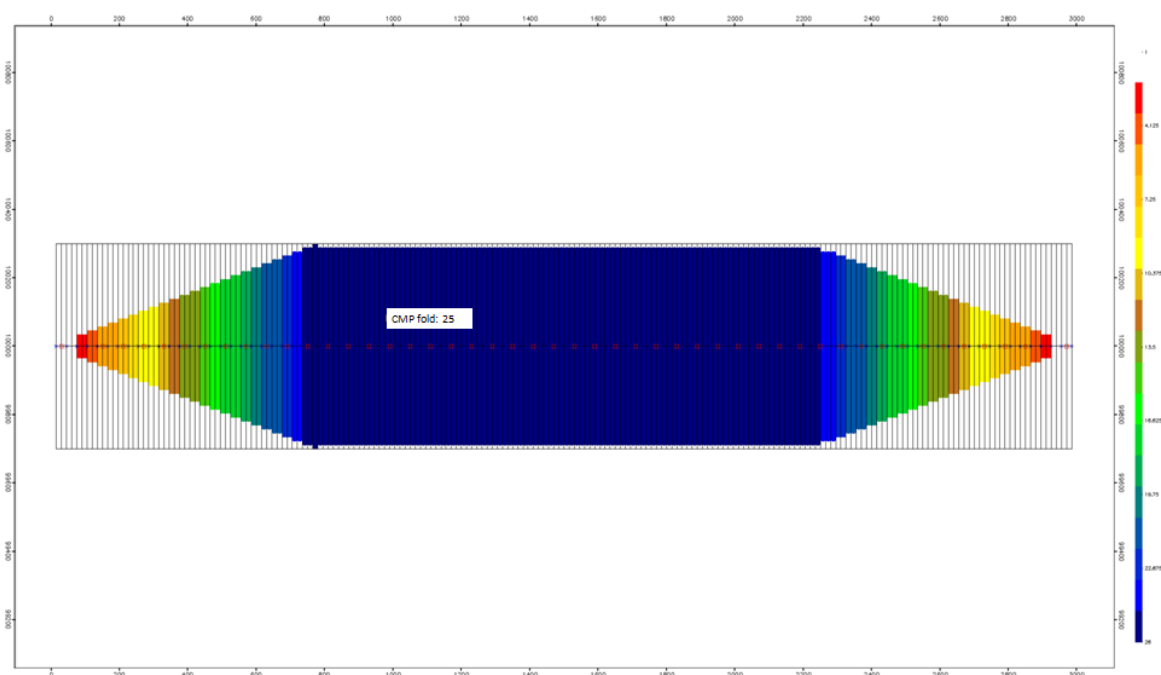
Cada uno de los modelos en tiempo generados en Tesseral Pro, se cargaron en formato. sgy al software Tornado (CGG).

5.2.2 Geometría

La etapa de asignación de geometría, es la más importante porque es el primer paso para realizar el ordenamiento de puntos comunes en profundidad. Punto común en profundidad (CDP) se define como la suma de trazas que corresponden al mismo punto de reflexión en el subsuelo, que se encuentran en diferentes registros y tienen diferentes distancias (distancia fuente receptor), (Sheriff, SEG 1999).

En esta etapa de acuerdo a los datos obtenidos para cada modelo sintético, se definieron correctamente las coordenadas (X, Y) de cada una de las estaciones (fuentes y receptores), la distancia entre fuentes, la distancia entre receptores, el número de trazas por registro, las elevaciones y el offset y se asignó esta geometría a cada modelo. El cubrimiento obtenido para los datos modelados sintéticamente es de 25 trazas por CDP y el diagrama obtenido se muestra en la Figura 5-7.

Figura 5-7:Diagrama de cubrimiento obtenido de la carga de datos sintéticos y asignación de geometrías



Una vez cargados los datos sintéticos, se procedió a eliminar el ruido correspondiente al ground roll y los spikes, teniendo en cuenta los espectros de frecuencia y fase. Para la recuperación de amplitudes se empleó el método TAR con una corrección constante de 6dB/s. A continuación, se eliminó el ruido residual empleando una deconvolución predictiva consistente en superficie. Debido a que los datos son sintéticos y se referenciaron un plano constante, no se aplicaron estáticas de refracción. Posteriormente, se realizó un reordenamiento de las trazas sísmicas en dominio CDP y se procedió a realizar el análisis de velocidad.

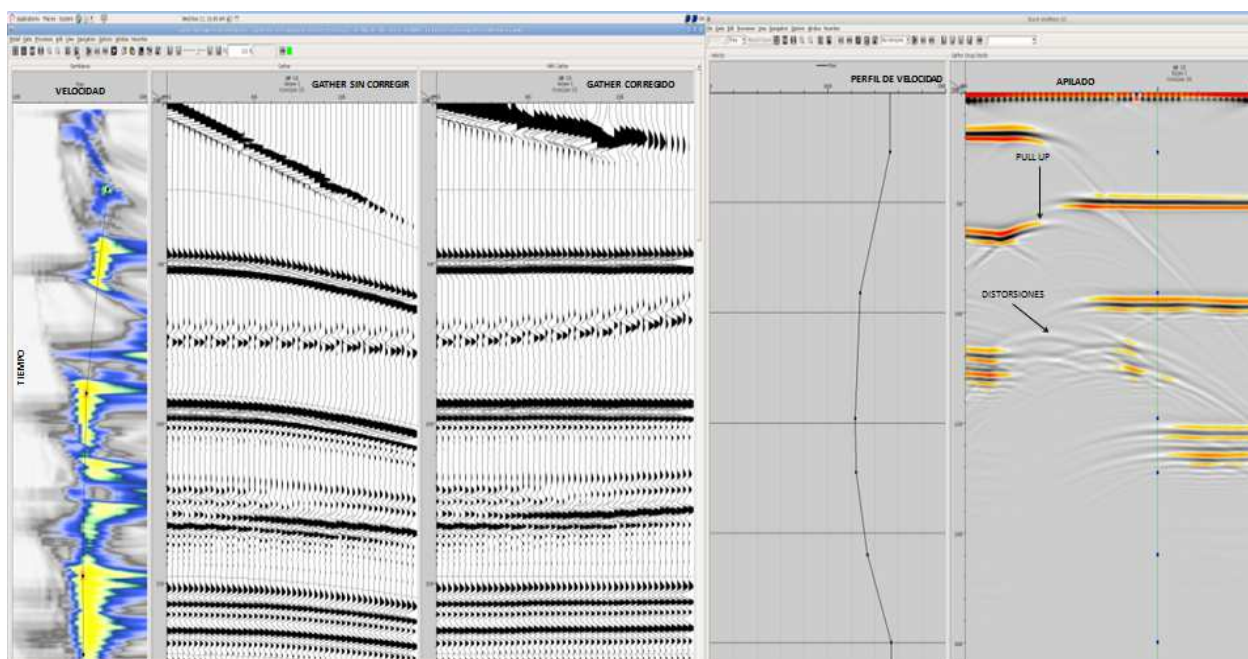
5.2.3 Análisis de Velocidad

Una vez cargados y editados los registros sísmicos, se realizó un reordenamiento de las trazas sísmicas en dominio CDP. Posteriormente, como se muestra en la figura 5-8, se realizó el picado de velocidades basado en semblanza con el objetivo de identificar los eventos sísmicos que presentan mayor coherencia y buena relación señal-ruido consiguiendo al final un campo de velocidades empleado posteriormente en la etapa de apilamiento para obtener la sección sísmica. La semblanza, es la relación normalizada de energía entre la energía que sale tras el apilado y la energía antes de él.

En la figura 5-8, se observa el análisis de velocidades para uno de los modelos sintéticos, de izquierda a derecha se encuentra el panel de semblanza, el *gather* sin corrección, el *gather* con la corrección, el perfil de velocidades y finalmente un apilado preliminar de la línea. En esta etapa se realizó el posicionamiento de los reflectores a lo largo del perfil de velocidad, para esto se determinaron los máximos que corresponden a la mejor coherencia lateral de la señal a lo largo de la trayectoria hiperbólica en toda la longitud el CDP *gather*, los valores de la energía resultante para las diferentes estimaciones se representan en un espectro de velocidades (semblanza) donde los máximos corresponden a cada CDP considerado, posteriormente, se realizó la corrección de las hipérbolas hasta conseguir los reflectores alineados (mediante la corrección NMO) utilizando para esto las velocidades obtenidas mediante el análisis de semblanza, en este punto se llevó cabo la corrección NMO para toda la serie de velocidades RMS desde la más baja hasta la más alta, aquí como en la zona se encuentran variaciones de velocidad, en las zonas donde la velocidad es más alta los reflectores aparecen inclinados hacia abajo y en las zonas donde son bajas los reflectores se inclinan hacia arriba, en la figura 5-8 se observa, que en las zona donde

sucede el cambio de velocidad de baja a alta, los reflectores tienden a formar zonas de pull up. Es importante resaltar que los resultados obtenidos se lograron luego de realizar varios análisis con el fin de encontrar la velocidad adecuada para la cual los eventos apilan mejor es decir se ve una reflexión de amplitud más fuerte.

Figura 5-8: Análisis de Velocidades mediante semblanza para el modelo sintético ángulo de 45 salto de falla 90m.

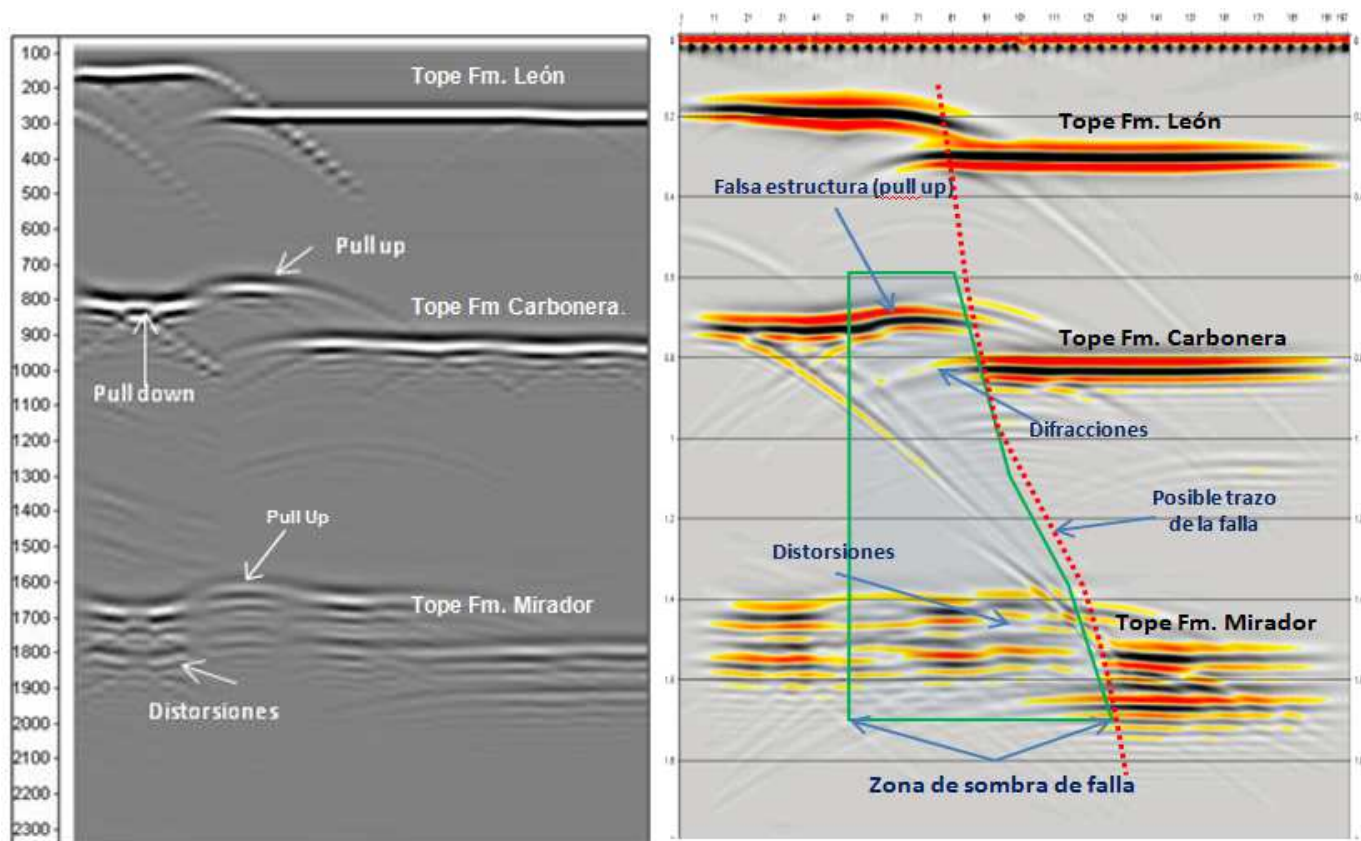


5.2.4 Apilado de trazas sísmicas

Con los resultados del análisis de velocidad y una vez aplicadas las correcciones NMO se procedió mediante la suma a obtener la sección sísmica apilada en tiempo. En la figura 5-9 se muestra a la derecha la sección apilada del modelo sintético 45° salto de falla 90m (migración post apilado) generada a partir del diseño Split spread, y a la izquierda la sección apilada obtenida a partir de diseño "Zero offset" (Tabla 5-8, Figura 5-5). Como se puede observar, en las dos imágenes se observa una serie de difracciones indicando la zona que define el trazo de la falla; hacia el bloque colgante, se presenta una serie de distorsiones y falsas estructuras representadas por el levantamiento de los reflectores contra la falla al nivel del tope de la Fm. León. En las imágenes resultado, se observan varios reflectores debido a que como se indicó anteriormente, fue necesario

dividir cada unidad litológica en capas para adicionar a cada una un valor de velocidad, cada una de estas capas es interpretada por el software como un intervalo diferente, y por esto se observan varios reflectores hacia el tope de cada formación.

Figura 5-9: Sección apilada en tiempo para el modelo sintético 45° salto de falla 90m, a la derecha la imagen generada a partir del diseño Split spread y a la izquierda la sección apilada obtenida a partir de diseño "Zero offset"



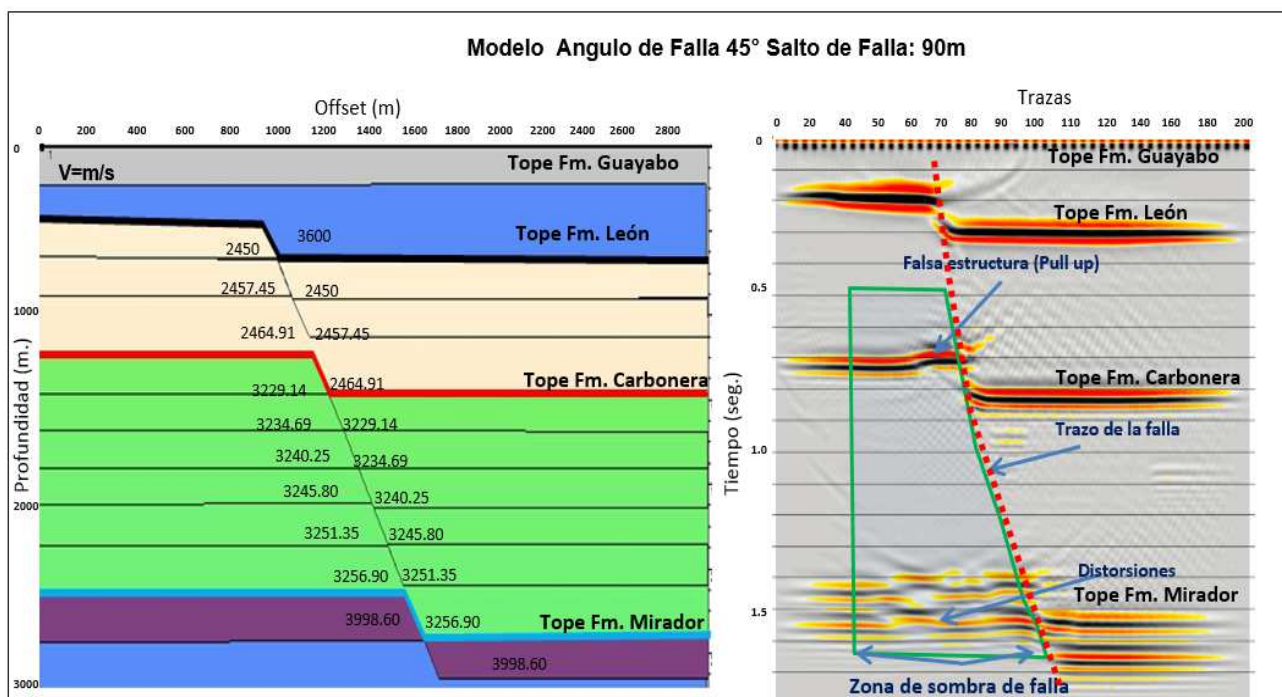
5.2.5 Migración pre apilado en tiempo

Es un proceso que se aplica para mover los reflectores buzantes a su verdadera posición en el subsuelo y colapsar las difracciones. Su objetivo es reubicar la energía a su verdadera posición, y esto se realiza provocando el colapso de estas difracciones actuando en sentido opuesto. Entre los principales algoritmos se encuentran la migración de Kirchhoff, se basa en la solución integral de la ecuación de onda. La respuesta a un punto de difracción es una hipérbola definida por una determinada

velocidad y por tanto la suma sobre su inversa coloca en fase a la difracción. La información de velocidad es importante para calcular correctamente el operador.

En el presente estudio, el algoritmo de migración utilizado fue Kirchhoff, se probaron diferentes ángulos de inclinación de los reflectores, el *dip* máximo utilizado es de 80°, la apertura de migración 3000m, el anti alias fue del 50% con el fin de evitar el *aliasing* espacial, sin embargo, no se logró eliminar. En la Figura 5-10, se muestra el modelo sintético en profundidad y la imagen sísmica en tiempo obtenida para el ángulo de 45° y salto 90m, nótese en la imagen de la derecha el desarrollo de levantamientos “pull up” y distorsiones sísmicas.

Figura 5-10: Sección migrada en tiempo (PSTM) para el modelo sintético 45° salto de falla 90m.



Como se observa en la sección migrada (PSTM) de la figura 5-10, hacia el tope de la formación carbonera se interpreta un “pull up” por efecto del cambio brusco de velocidad vertical y lateral, hacia la base de la Fm. Carbonera y tope de la Fm. Mirador se producen una serie de distorsiones producto también de los cambios de velocidad; el trazo de la falla en esta imagen se puede interpretar mejor; nótese que en la zona en donde no hay variación lateral de velocidad no son claros los reflectores.

6. Procesamiento de Datos Reales

La metodología empleada para realizar el procesamiento sísmico 2D de la línea R-2005-03 en tiempo y en profundidad se relaciona en los diagramas de flujo mostrados en las figuras 6-1 y 6-2.

Figura 6-1: Flujo de trabajo empleado en el procesamiento en tiempo de los datos reales.

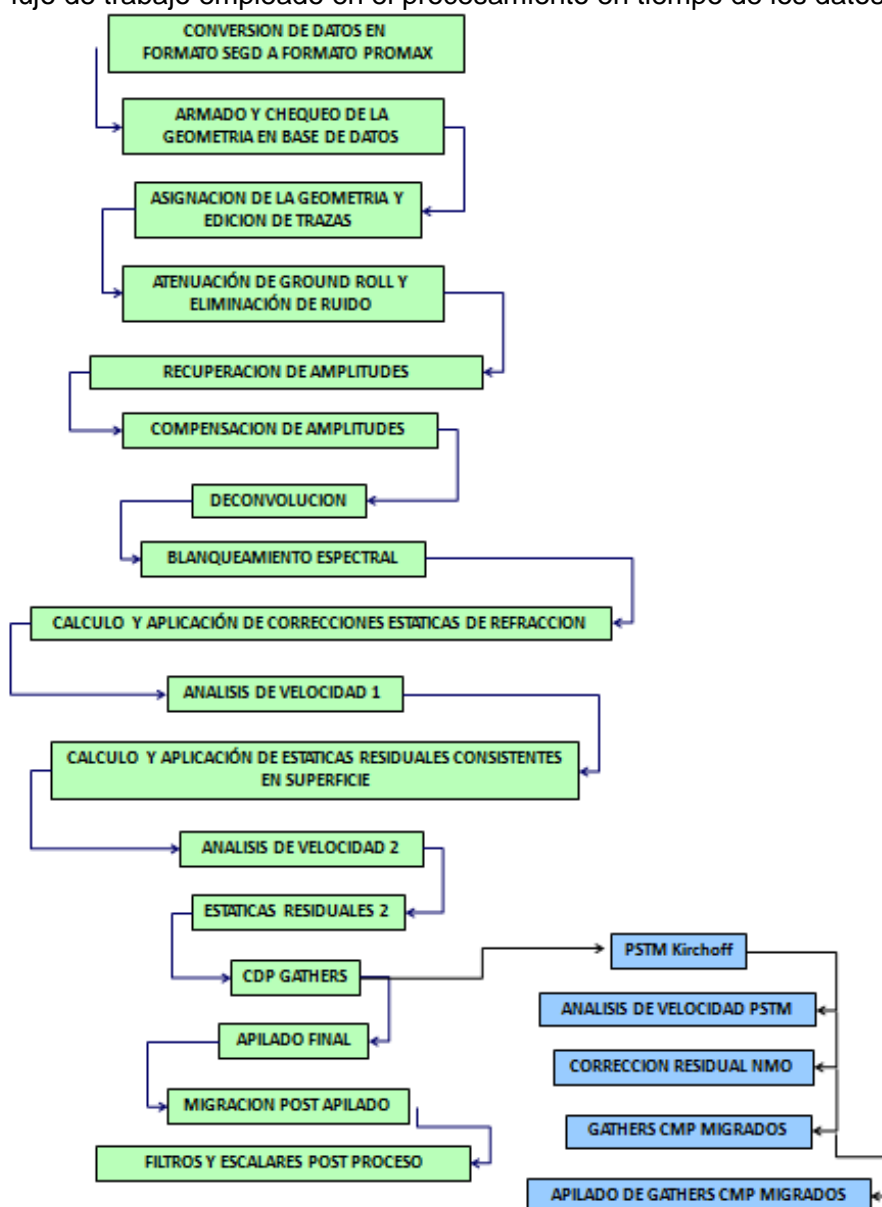
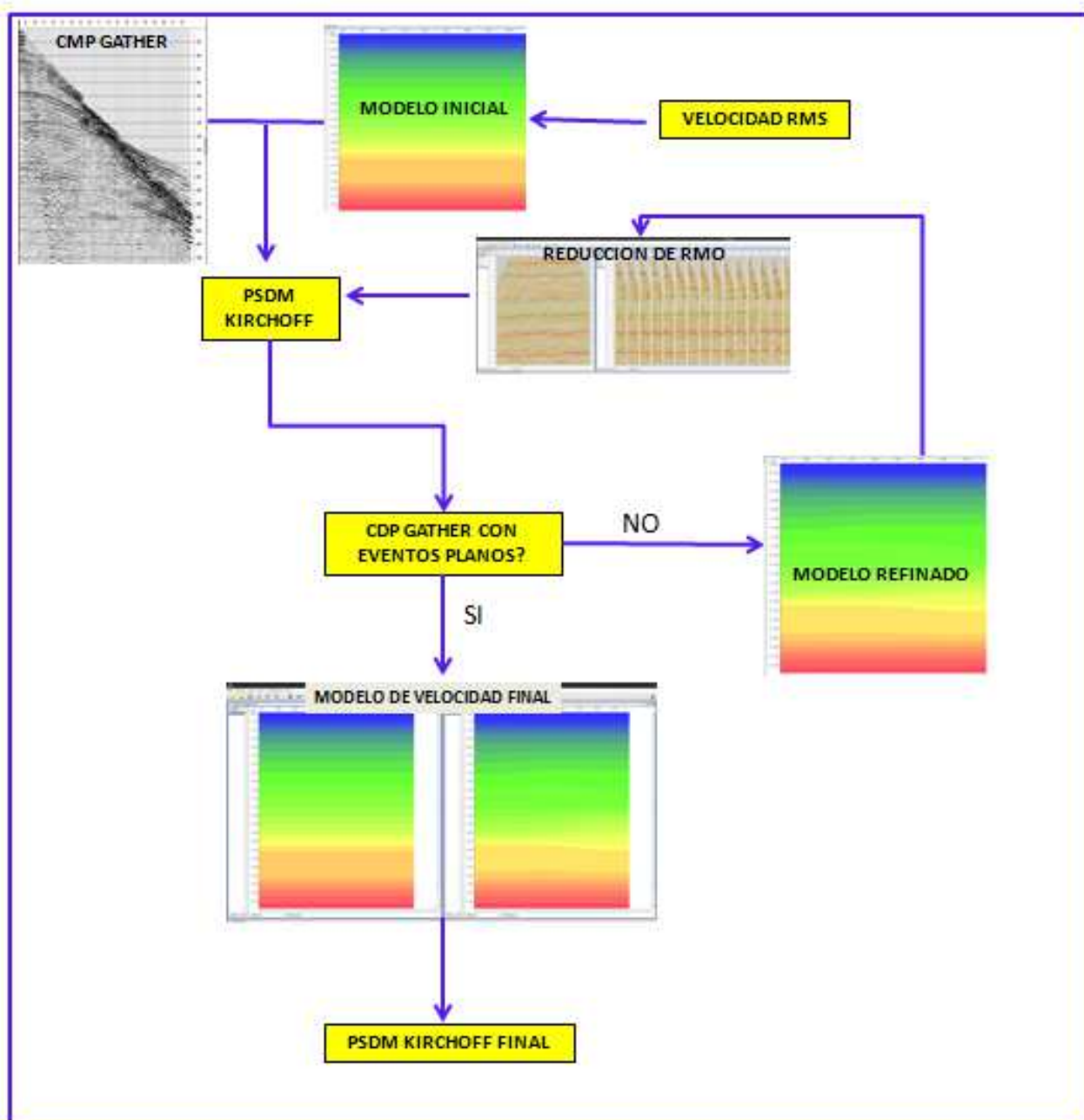


Figura 6-2: Flujo de trabajo empleado en el procesamiento en profundidad de los datos reales.



6.1 Parámetros de Adquisición

La tabla 6-1, relaciona los parámetros de adquisición de la línea sísmica a procesar:

Tabla 6-1: Parámetros de adquisición de la línea R-2005-03

PARAMETRO	LINEA R-2005-03
Instrumento de Registro	I/O SYSTEM TWO
Firmato de Grabacion	SEGD
Filtros	Filtro Bajo: Fuera Filtro Alto:0.75 Nyquist Fase Minima
Longitud Tendido	1500-15-15-5280
Longitud del registro	6s
Intervalo de muestreo	2ms
Numero de Canales	228
Tipo de Fuente	Dinamita
Profundidad y carga	9.1m/900gr
Numero de Pozos	1
Tipo de Geofono	Pantano SM-24U-B
Arreglo de geofonos	6 centrados en estaca
Longitud del arreglo	25m
Intervalo entre geofonos	5m
Intervalo de grupo	30m
Intervalo de disparos	60m
Fold Nominal	50%
Primer disparo	101.5
Ultimo Disparo	229.5
Disparos Procesados	66
Longitud (km)	6.8

6.2 Parámetros Generales

En el procesamiento del proyecto se usaron los siguientes parámetros:

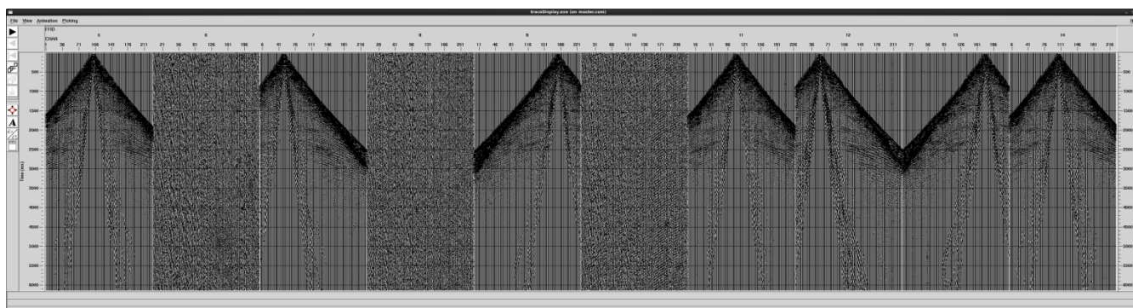
- Plano de Referencia del proceso: 200 m/s
- Velocidad de reemplazamiento: 1800m/s
- Tiempo máximo a procesar: 6s
- Intervalo de muestreo: 2ms

6.3 Descripción del Procesamiento Sísmico

6.3.1 Lectura de Datos

Los datos de la línea en formato SEG-D se leyeron y cargaron en el sistema Promax, posteriormente se revisó el número de canales constante en este caso, los “*spikes*”, amplitudes anómalas, *shots* ruidosos y se realizó un listado de los disparos anómalos que no se tendrán en cuenta en el procesamiento. La figura 6-3, muestra los datos originales de la línea, nótese algunos disparos anómalos:

Figura 6-3: Registros de campo de la línea R-2005-03.



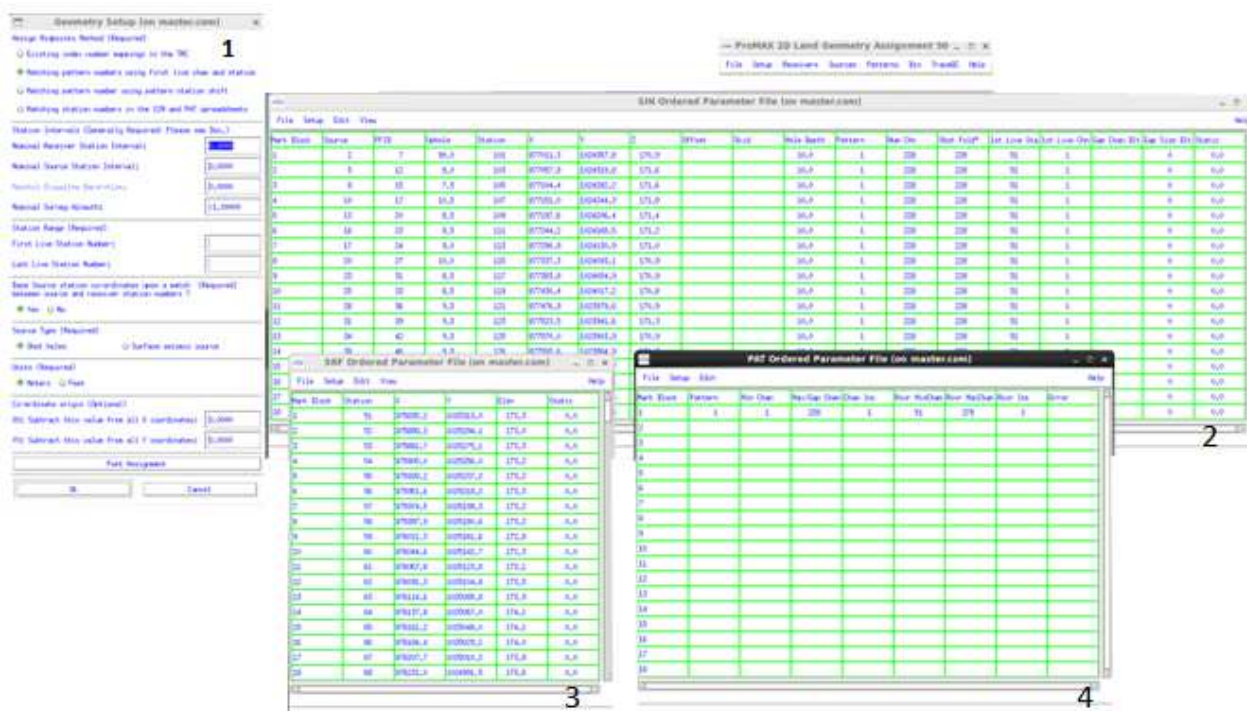
6.3.2 Geometría

A partir de la información de los archivos de ukooa y reporte de observador se construyó y asigno la geometría de los registros.

Como se muestra en la figura 6-4, se generan 4 ventanas con la información de la línea:

1. Suministra la información general de la línea
2. Muestra el identificador de campo de la línea (FFID), la profundidad del pozo, las estaciones vivas, coordenadas.
3. La tabla de receptores, que indica la estación y coordenada del receptor.
4. PAT: muestra que receptores estaban prendidos en cada disparo.

Figura 6-4: Geometría de la línea



Se organizó la información de las tablas y se calcularon los CMPs, Se determinó la relación entre la geometría y los datos por FFID y se asignaron coordenadas a los datos.

En la imagen de la figura 6-5, se observa un shot sin la geometría y otro con la asignación de la geometría.

Como se muestra en la figura 6-6, se realizó el control de calidad de los datos, con el fin de corroborar si la posición de los disparos y su geometría era la correcta. Se identificó la posición fuente y receptor y se desplego sobre los registros la envolvente predictiva en función de la distancia del par fuente-receptor calculada automáticamente por el software y verificando los canales activos en cada punto de disparo.

Figura 6-5: Shot con geometría (Izquierda) / Sin geometría (derecha)

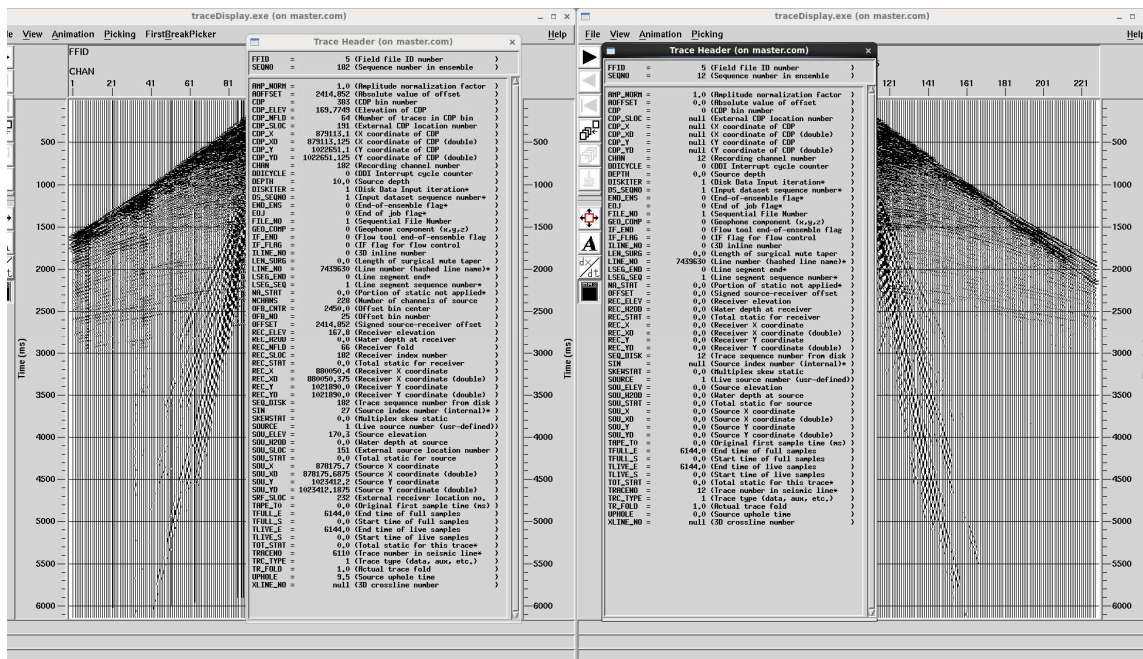
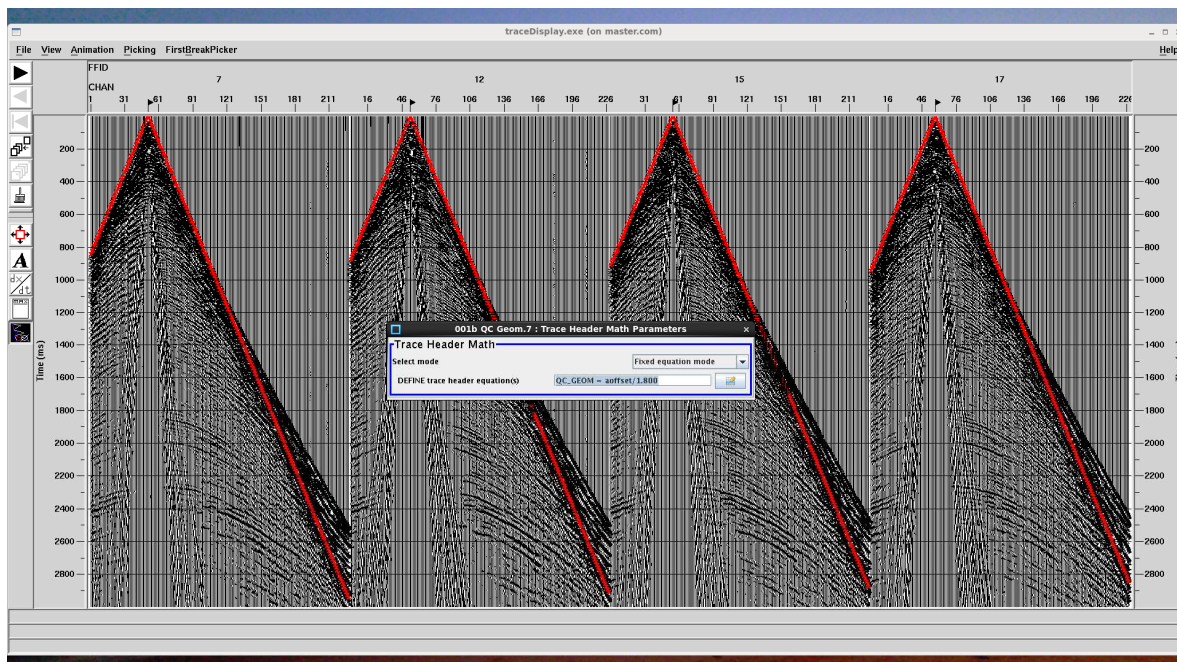


Figura 6-6: QC Geometría



6.3.3 Eliminación de Ruidos

De acuerdo al análisis de los espectros de frecuencia y fase, los ruidos a atenuar corresponden al *ground roll* y los *spikes*. Como se observa en la figura 6-7, el rango de frecuencias en el que se encuentra el *ground roll* oscila entre 0-12 Hz. Teniendo en cuenta este análisis se eliminó el efecto de *ground roll* y *spikes* sobre los registros como es mostrado en las figuras 6-8 y 6-9.

Figura 6-7: Espectros de Frecuencia y Fase

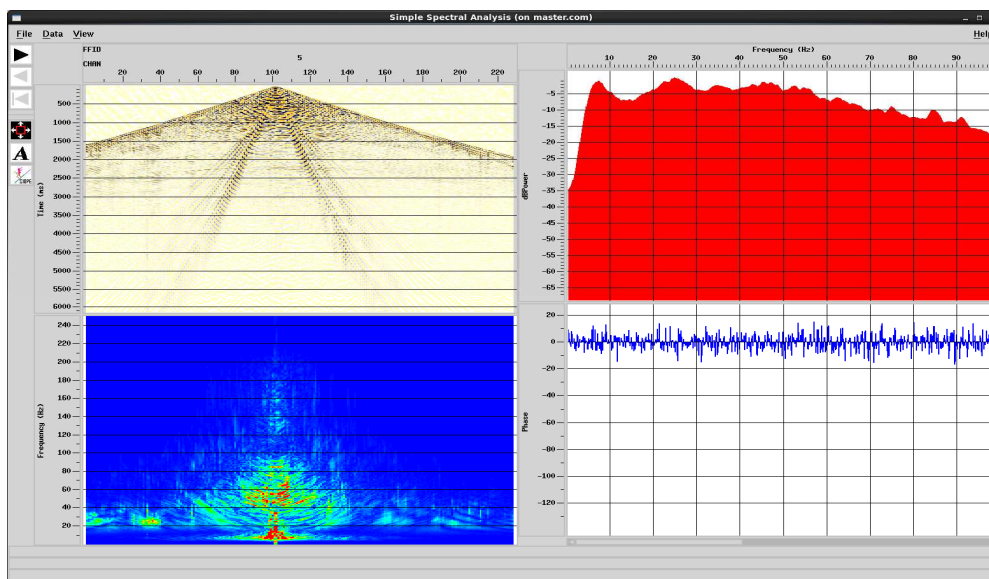


Figura 6-8: Atenuación de *Ground Roll*. Disparo #5 con *Ground Roll* (derecha) y sin el efecto de *ground roll* (izquierda)

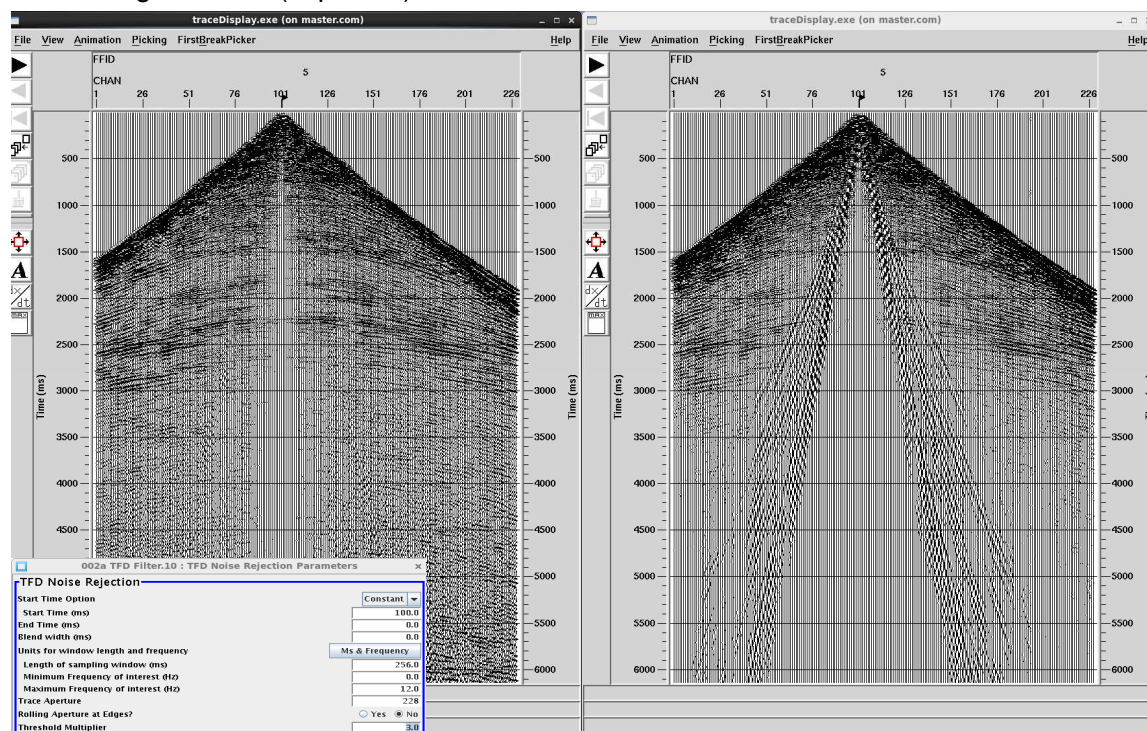
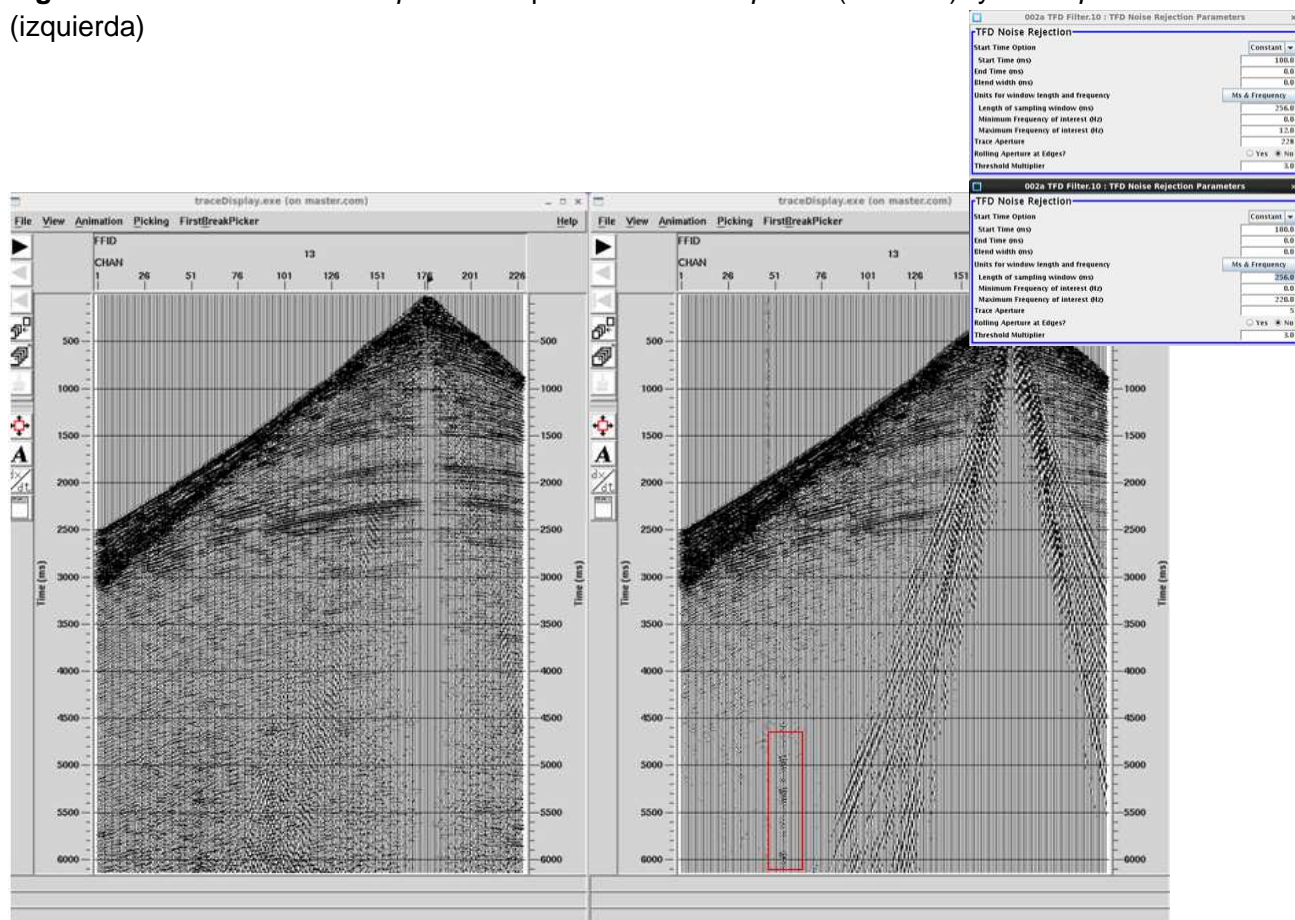


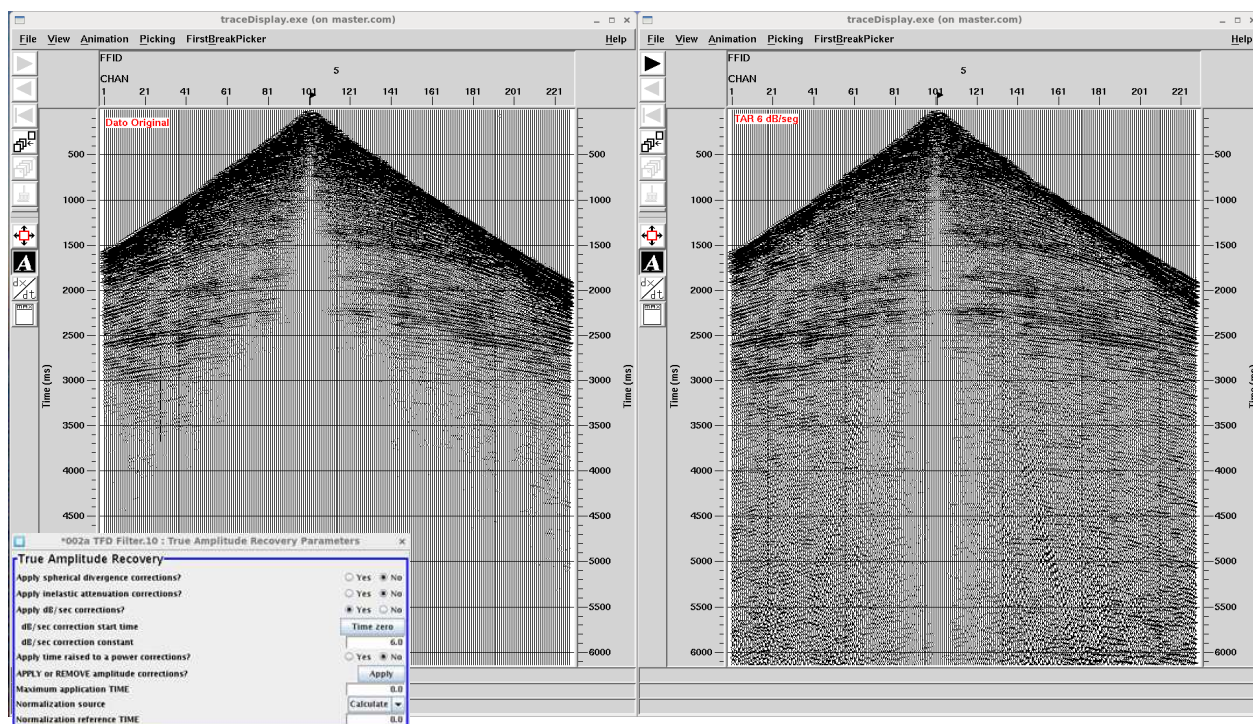
Figura 6-9:Atenuación de *Spikes*. Disparo #13 con *spikes* (derecha) y sin *spikes* (izquierda)



6.3.4 Recuperación de Amplitudes

Toda señal sísmica que se propaga en un medio estratificado sufre una pérdida de energía, debido factores físicos, tales como la divergencia esférica y la absorción de energía del medio. Para este caso, la amplitud de los datos sísmicos varía dentro de un amplio rango debido al efecto que tienen sobre ella los coeficientes de reflexión y el decaimiento de la energía con la distancia. Para compensar esto se aplican varios tipos de algoritmos basados cada uno en criterios específicos como son el TAR y el AGC. El método aplicado para recuperar las amplitudes fue TAR empleando una corrección constante de 6 dB/s luego de haber realizado pruebas con 3, 6, 9, y 12 dB/s. En la figura 6-10, se muestran dos imágenes, la de la izquierda corresponde al dato sísmico original y la de la derecha al dato con la recuperación de amplitudes, como se observa el método permitió recuperar la señal hacia la parte central y en los niveles por encima de los 3 segundos.

Figura 6-10:Recuperación de Amplitudes (TAR).



Se corrieron las **Estáticas de topografía por elevación** teniendo el cuenta el datum= 200m y la velocidad=1800m/s tomada de los primeros arribos, se realizo el alineamiento primeros arribos observándose muy poco cambio.

6.3.5 Compensación de Amplitudes

La compensación de amplitudes es un proceso consistente con la superficie mediante el cual se busca compensar las variaciones de amplitudes en el dominio del disparo, del receptor y de la distancia disparo-receptor. En este proceso no se altera la relación señal/ruido de una traza dada.

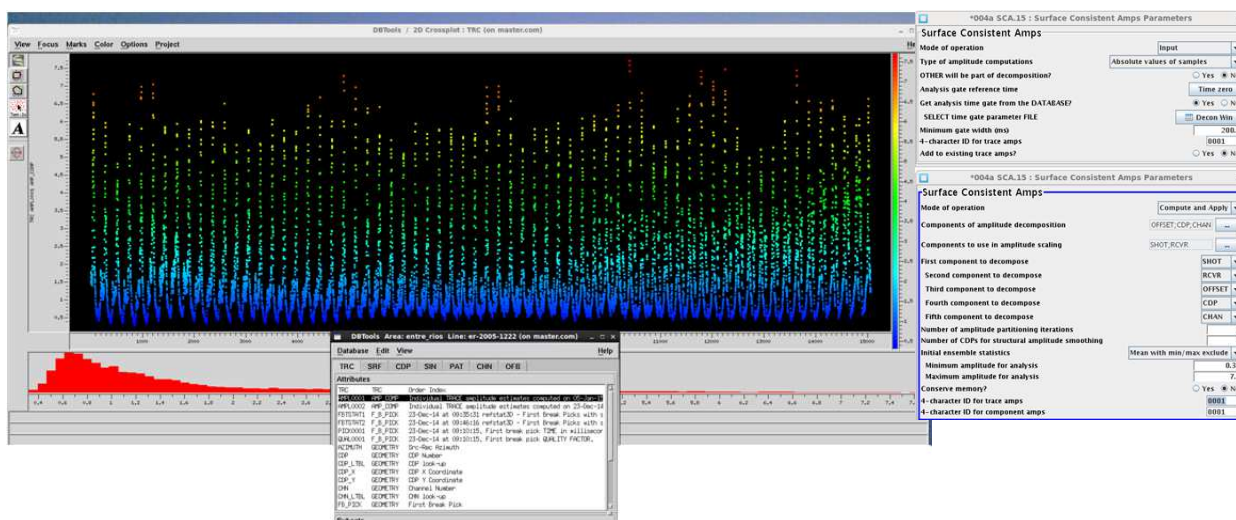
El proceso se realiza en tres pasos de la siguiente manera:

- Calcula valores medios absolutos de amplitudes para una ventana de tiempo dada.
- Descompone las amplitudes del paso anterior en términos consistentes en la superficie para disparo, detector y distancia tiro-receptor.

- En el tercer paso calcula y aplica factores escalares a cada traza en la ventana de tiempo dada. La variación de amplitudes con la distancia tiro-receptor y con el tiempo será más uniforme después de aplicado este proceso.

Para este caso se definió una ventana y se realizó un espectro de amplitud vs #trazas el cual muestra las diferencias de amplitudes que permiten determinar las posibles zonas anómalas. El proceso se realizó teniendo en cuenta el dominio “shot” o disparo, receptor, offset, canal. Se revisó la línea objeto de estudio y no se observaron mayores descompensaciones, posiblemente en el rango de amplitudes 0.35 a 0.7 correspondiente a las primeras trazas, como se muestra en la figura 6-11.

Figura 6-11:Compensación de Amplitudes (TRC).



6.3.6 Deconvolución

Con la deconvolución se busca una disminución en el ruido ground roll residual, un aumento en el contenido de frecuencias adicional a una mejora en la resolución temporal de los eventos. Se realizaron pruebas de deconvolución traza a traza y consistente en superficie predictiva variando la longitud del operador y el gap de predicción. Después de realizar las pruebas, la deconvolución que presenta una mejor resolución temporal y espacial de los eventos se presenta en la tabla 6-2.

Tabla 6-2:Deconvolución

Tipo de deconvolucion	Predictiva Consistente en superficie
Distancia de prediccion	6ms
Longitud del operador	160ms
Ventana de diseno	500 - 3100ms
Ruido blanco	0.01%

- Remuestreo: Originalmente la longitud de muestreo de la línea es 2ms, con frecuencias hasta los 80Hz, se realizó un remuestreo a 4ms (125Hz) sin perder información.

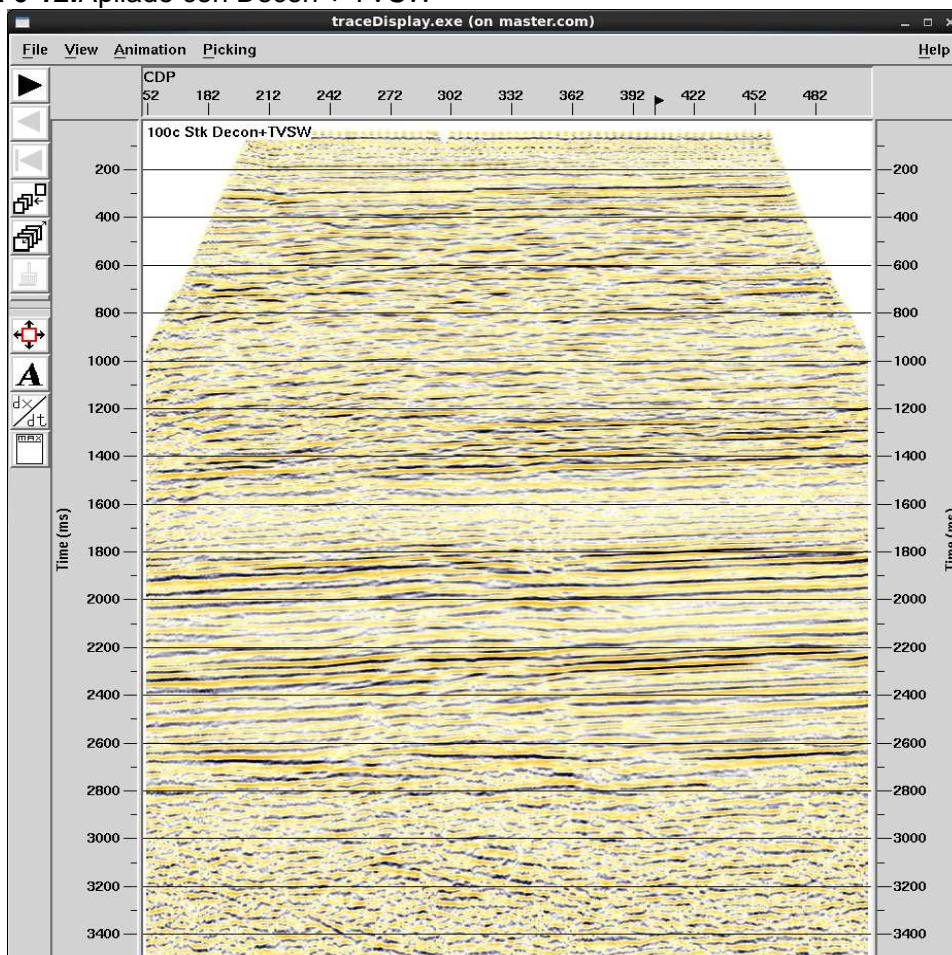
6.3.7 Balanceo Espectral Variable en tiempo (TVSW)

Proporciona un blanqueo espectral dependiente del tiempo mediante la aplicación de diferentes ganancias a bandas de frecuencias con lo que se compensa hasta cierto punto la pérdida de frecuencias altas en las partes profundas de los registros.

Basándose en el contenido de frecuencias observable en los datos se realizaron pruebas de balanceo del espectro de los datos con diferentes rangos de frecuencias y después de observar el resultado de estas pruebas se optó por el balanceo con el filtro 3-16-80-100 Hz, teniendo específicamente como rango de análisis 16-80Hz ya que el resto de frecuencias están atenuadas.

En la imagen de la figura 6-12, se observa un apilado preliminar con la deconvolución y el balanceo espectral.

Figura 6-12:Apilado con Decon + TVSW



6.3.8 Estáticas de Refracción

La capa meteorizada está caracterizada por ser altamente heterogénea, por poseer bajas velocidades, por presentar un relieve y espesor irregular. Estas características influyen en la trayectoria de los rayos, de manera que se hace preciso corregirlas a fin de obtener el buen emplazamiento, en profundidad de los reflectores de interés.

El objetivo de esta corrección es determinar los tiempos de arribo que habrían de ser observados si todas las mediciones se hubieran hecho en un plano de referencia o datum sin material meteorizado o de baja velocidad. Los tiempos de primeras llegadas atribuidos a la capa meteorizada definen las curvas tiempo-distancia a partir de las cuales se calcula la profundidad y la velocidad de esta primera superficie. Una vez caracterizada esta superficie se elige el nivel del datum y se calculan los intervalos de tiempo que deben corregirse para cada rayo de la línea sísmica.

Para calcular las estáticas de refracción se usó un plano de referencia de 200m.s.n.m y una velocidad de reemplazamiento de 1800m/s

Con los primeros arribos y un rango de offset de 100 a 1000m y una capa se realizaron pruebas con el método Gauss Seidel, la mejor solución fue:

- Una capa con velocidad de 1000 m/s.
- Velocidad de Reemplazamiento 1800 m/s.
- Datum 200 m
- Rango de offset: 100 m a 1000 m.

La figura6-13, muestra la sección sísmica apilada en tiempo con las estáticas finales por refracción

6.3.9 Análisis de Velocidad

Se definió la curva de velocidad empleando el método interactivo de velocidades con semblanzas sobre los *gather* o *supergathers* corregidos por NMO, mini-apilados y análisis de coherencia como lo muestra la figura 6-14. Para el análisis se prepararon los "SUPERGATHERS" (formados por el agrupamiento de hasta 9 CDP's continuos) a analizar, el análisis se realizó en la zona de cubrimiento ("full fold") de acuerdo al diagrama de cubrimiento (220 a 440) el intervalo de estudio de velocidades fue cada 50

CDP para el apilado inicial y cada 25 CDP para los siguientes análisis. El rango de velocidades para los análisis fue entre 1600m/s a 4600m/s.

Figura 6-13:Apilado con estáticas por refracción

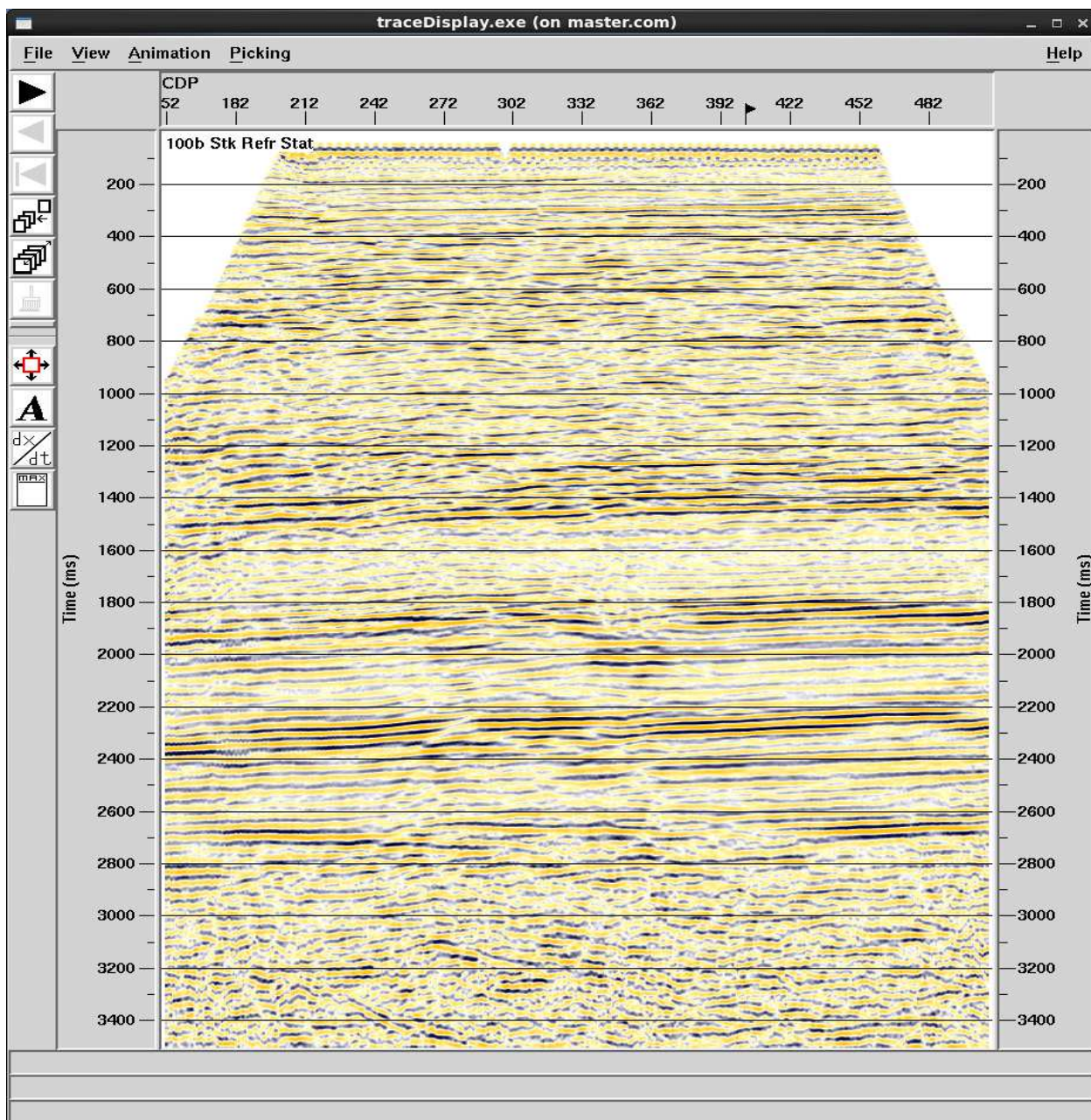
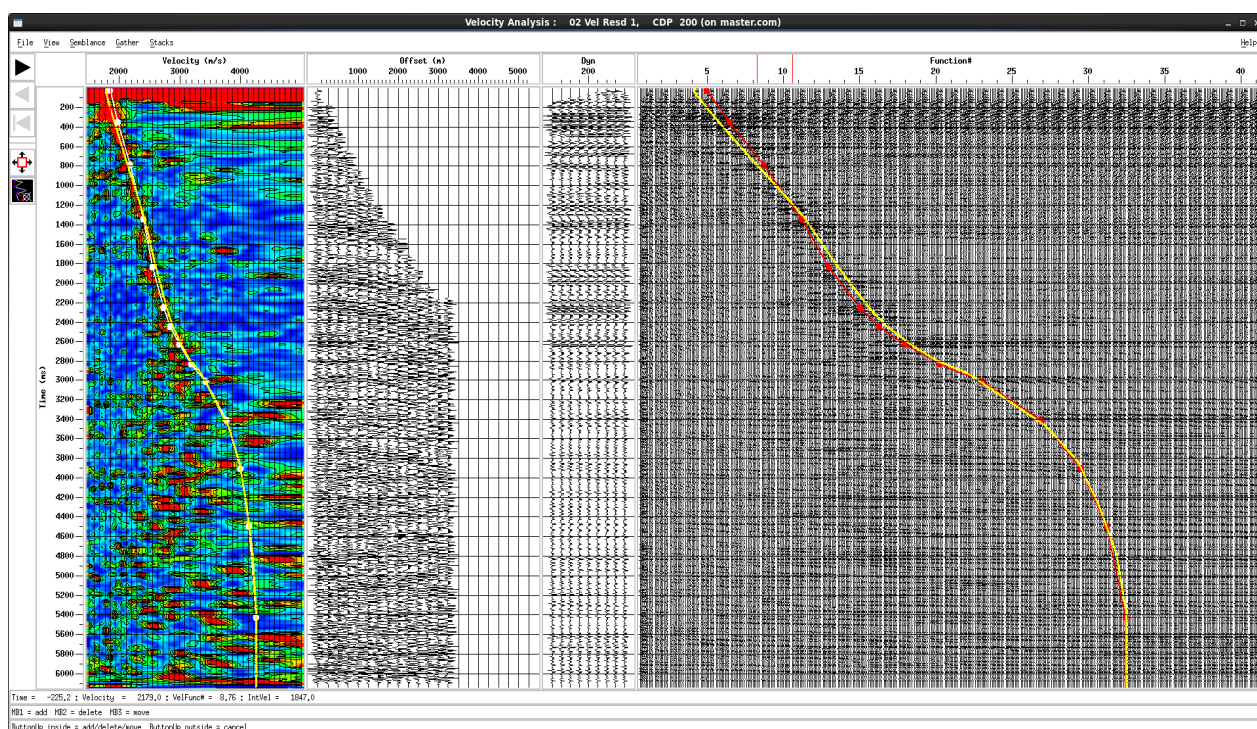
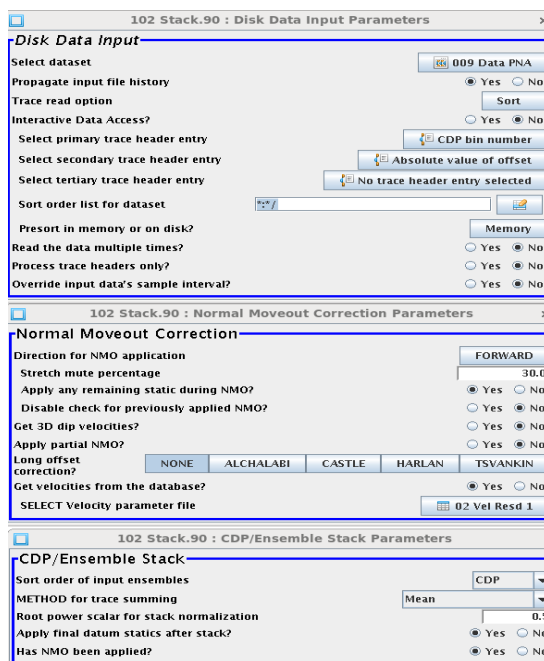


Figura 6-14: Análisis de Velocidades



Teniendo en cuenta las estáticas de refracción y el análisis de velocidades se generó el apilado en el dominio CDP de acuerdo a los parámetros mostrados en la figura 6-15.

Figura 6-15: Parámetros empleados en la generación del Apilado



6.3.10 Estáticas Residuales

El objetivo del cálculo de las correcciones estáticas residuales es tratar de identificar la componente residual para los términos consistentes en superficie como son la fuente y el receptor y la componente residual par el término consistente en CDP.

La secuencia de proceso cuenta con dos pasos de estáticas residuales utilizando un modelo interno para el cálculo de las mismas. Se optó por definir varias ventanas siguiendo reflectores con buen contraste correspondientes a datos sísmicos con buena información y buena señal/ruido.

Para el primer paso de residuales se usaron los siguientes parámetros:

- Tipo: 2D/3D Maximum Power
- Ventana: Variable
- Desplazamiento permitido: +/- 30ms
- Numero de iteraciones:3

Para el segundo paso de residuales se usaron los siguientes parámetros:

- Tipo: 2D/3D Maximum Power
- Ventana: Variable
- Desplazamiento permitido: +/- 15ms
- Numero de iteraciones:3

Se realizó un análisis para Estáticas TRIM para una muestra de 4ms mediante el picado de horizontes en una ventana de 250ms por encima y debajo para la corrección con el fin de remover estáticas residuales remanentes. La figura 6-16, muestra en una sección apilada los resultados obtenidos a partir de la corrección por estáticas residuales y trim.

6.3.11 Migración Pos-apilado

Los datos previamente antes de apilarlos se prepararon para posteriores procesos, esto es se les aplicaron algunos procesos para mejorar la señal (*FK Filter, F-X Decon, AGC*), luego se apilaron y a partir de este (Figura 6-17), se realizó la migración postapilado, para esto se llevaron las velocidades de datum flotante al datum fijo y se emplearon las velocidades finales de apilado suavizadas. Se migro utilizando porcentajes de velocidades del 80%, 85%, 90%, 95% y 100%. Finalmente, se escogió la migración con porcentaje de velocidad del 95% (Figura 6-18)

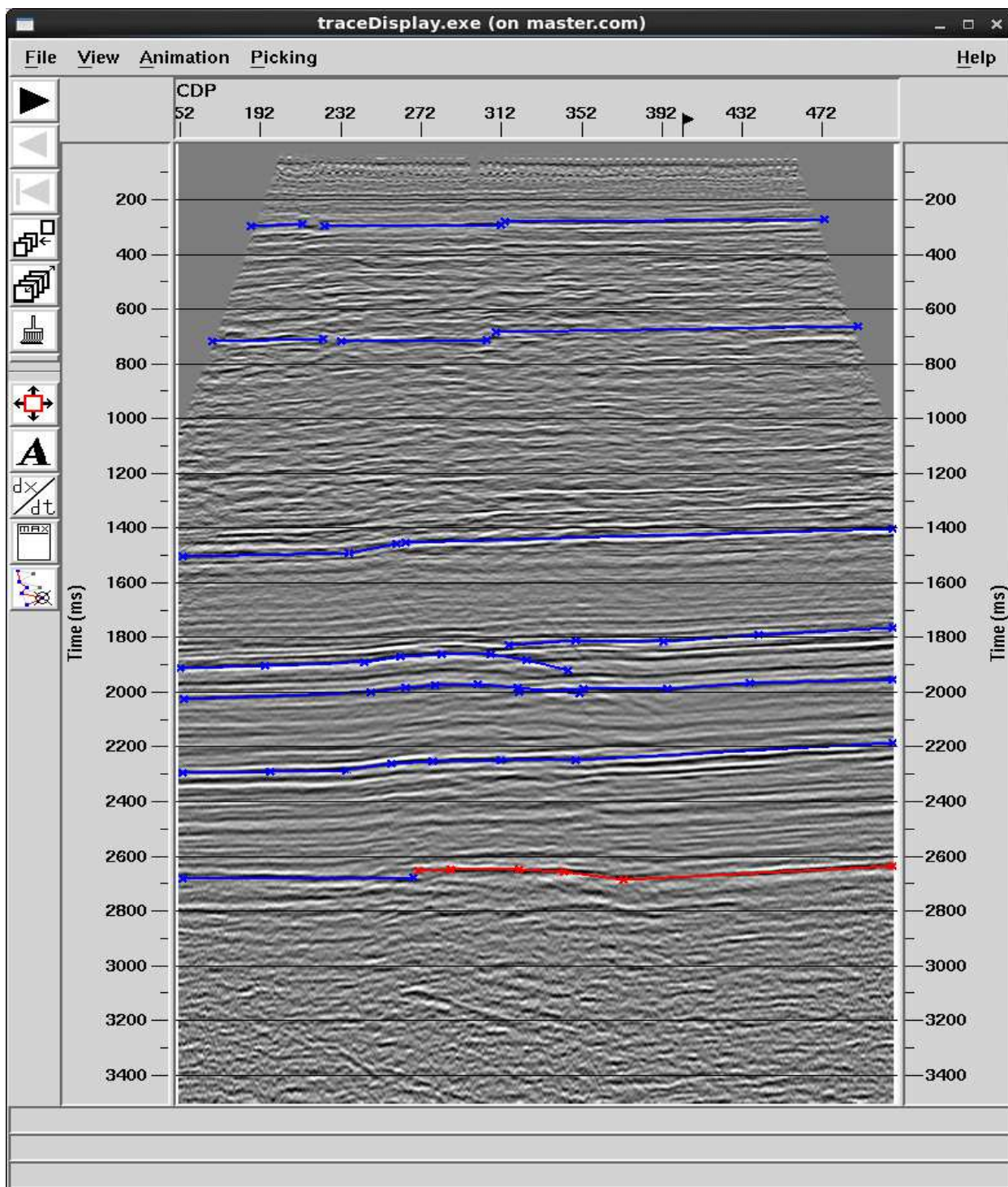
Figura 6-16: Sección Apilada con estáticas residuales y trim

Figura 6-17: Apilado Final para la línea R-2005-03

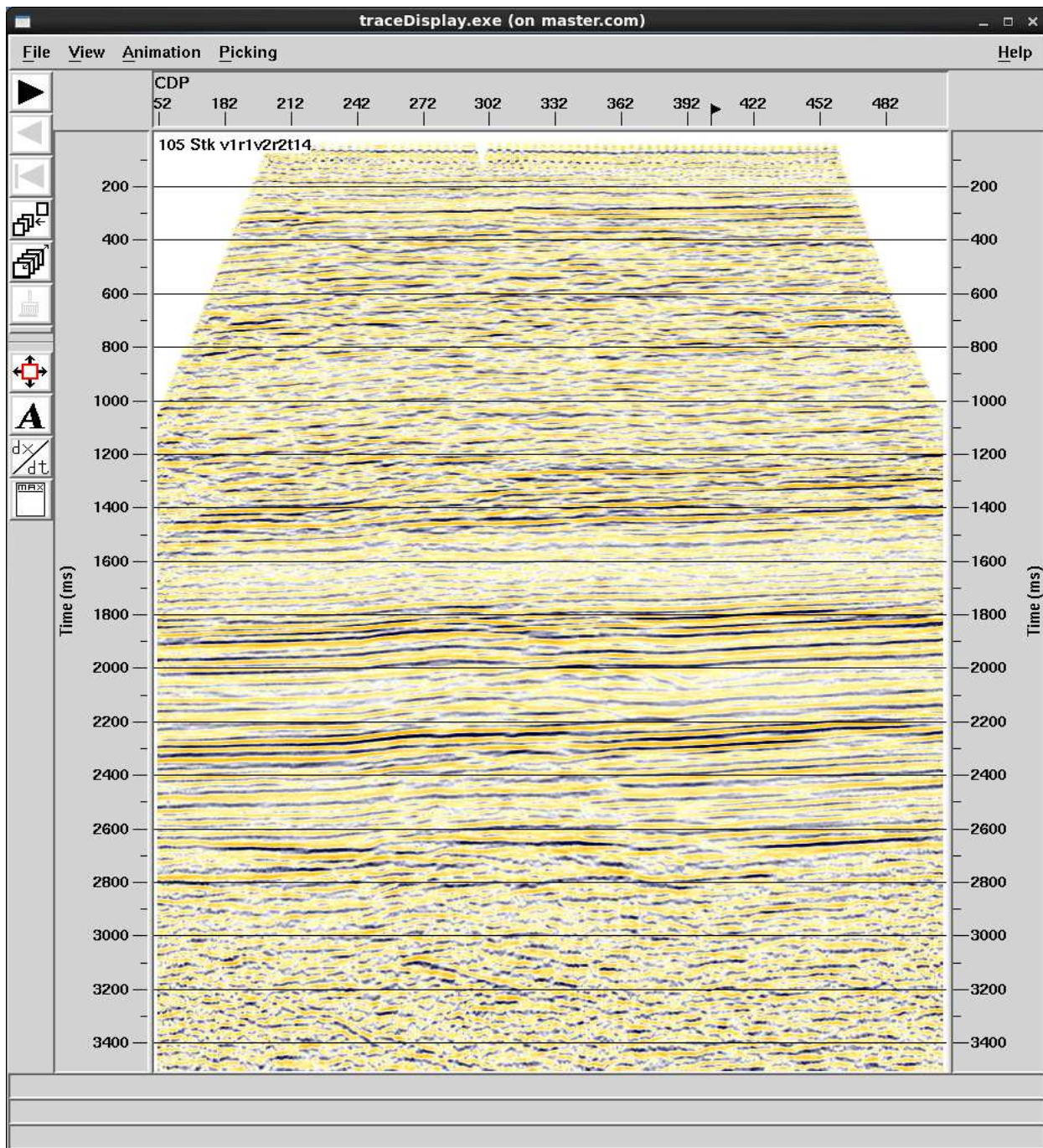
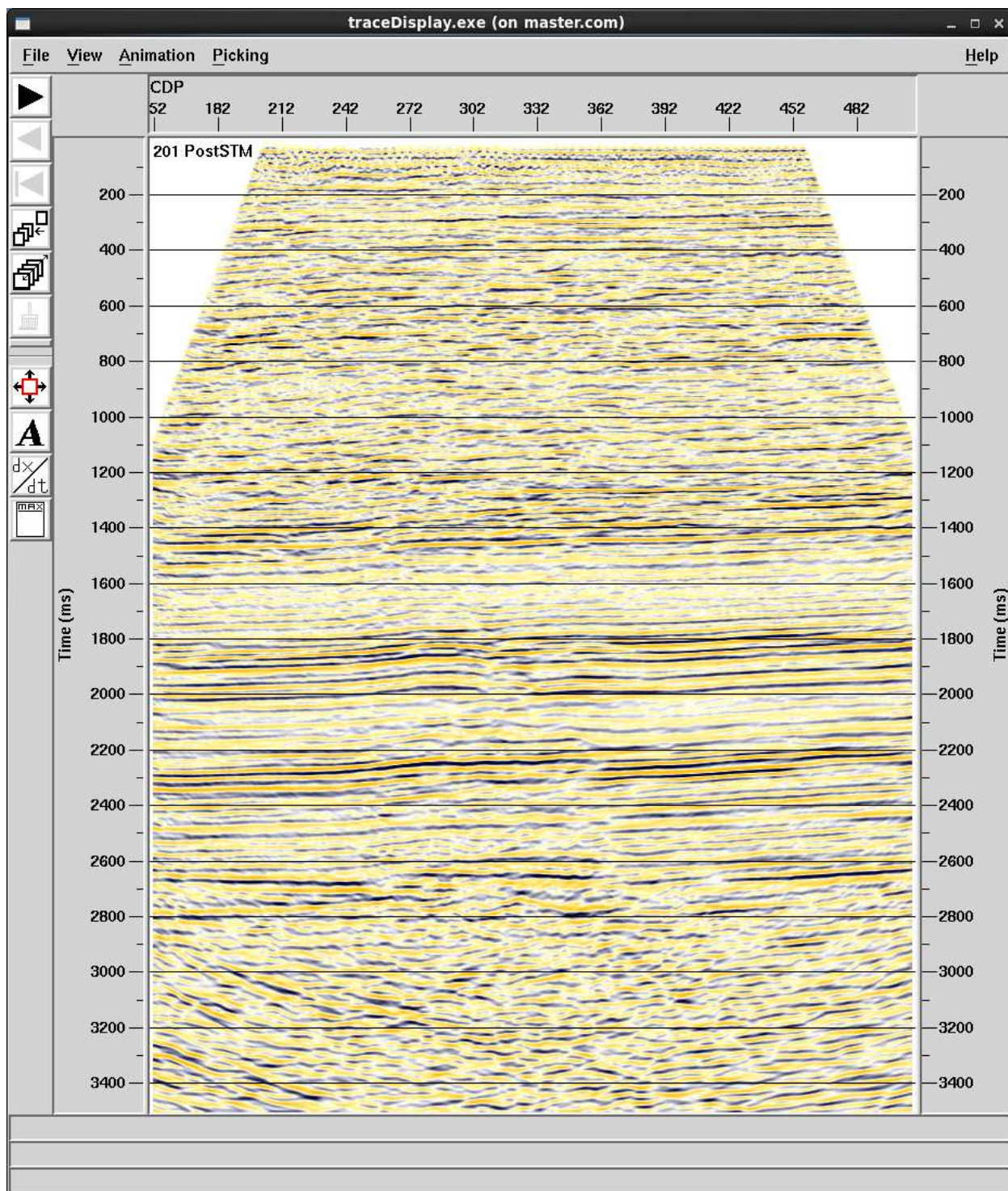


Figura 6-18: Migración Pos-apilado para la línea R-2005-03



6.3.12 Migración Pre-Apilado en tiempo (PSTM)

Las velocidades de apilado son dependientes del buzamiento de los reflectores, así cuando un evento plano coincide con otro buzante se debe escoger la velocidad para uno de ellos, por lo cual el apilado normal no preserva igualmente estos eventos por el hecho de que la sección apilada no es equivalente a una sección zero-offset. Para solucionar este problema se sugiere que la migración se realice antes del apilado.

En este proceso se utilizaron como datos de entrada los conjuntos de familias de CDP (*gathers*) a los cuales se les había aplicado los procesos de: deconvolución, blanqueo espectral, estáticas de refracción y estáticas residuales y el campo de velocidad del apilado.

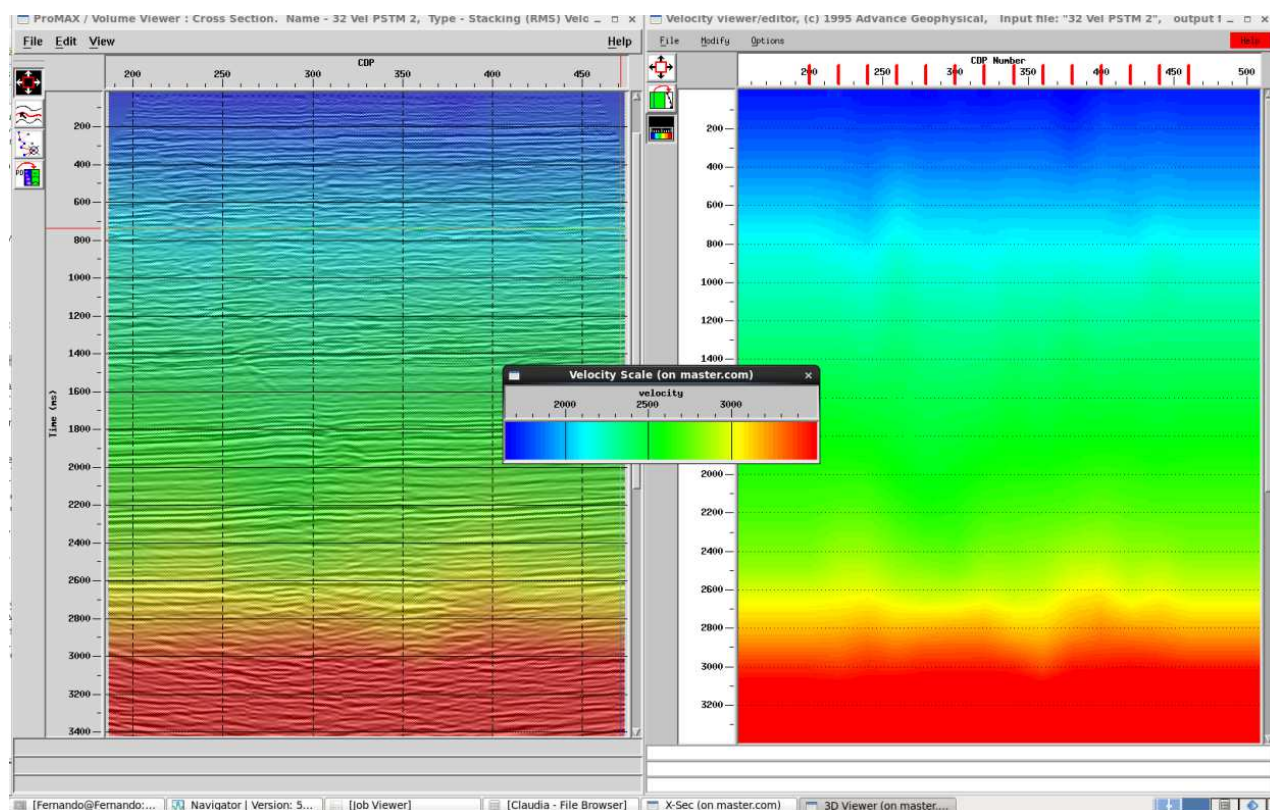
Para ejecutar la migración antes de apilar se procedió a la regularización de *offsets*, los CDP *gathers* fueron reorganizados por conjuntos de distancias (*offsets*), tomando para ello desde el offset más cercano a la fuente, 0m hasta el offset más lejano, 5000m, agrupando los conjuntos por separaciones sucesivas de 20m (250 planos de *offsets*) generando una familia de *gathers* con una nueva opción de ordenamiento por longitud del offset.

Al nuevo *gather* se le hizo un control de calidad mediante observación del comportamiento de los reflectores visibles en todas las diferentes configuraciones de *offsets* y en las distintas zonas de la sección, con el fin de determinar cuáles *offsets* contribuirían mejor a la imagen durante la migración.

Para generar el campo de velocidad inicial se empleó el campo de velocidad obtenido en el análisis de velocidades con estáticas residuales 2. A continuación se procedió a correr la migración pre-apilado en tiempo preliminar con el algoritmo Kirchoff con una apertura de migración de 2000m y un ángulo máximo de migración de 65 grados, se generaron nuevos *gathers* de trazas migradas analizados en configuración CDP en contraste con el campo de velocidad para estimar en los reflectores migrados si el campo de velocidad era alto o bajo. A continuación, se aplicó un filtro para eliminar cualquier ruido remanente y se realizó un primer apilado de la PSTM

Posteriormente, se realizó un análisis de velocidades 2 presentado en la Figura 6-19 para la PSTM a partir del cual se generó la migración pre apilado final mostrada en la Figura 6-20 y el apilado final de la PSTM.

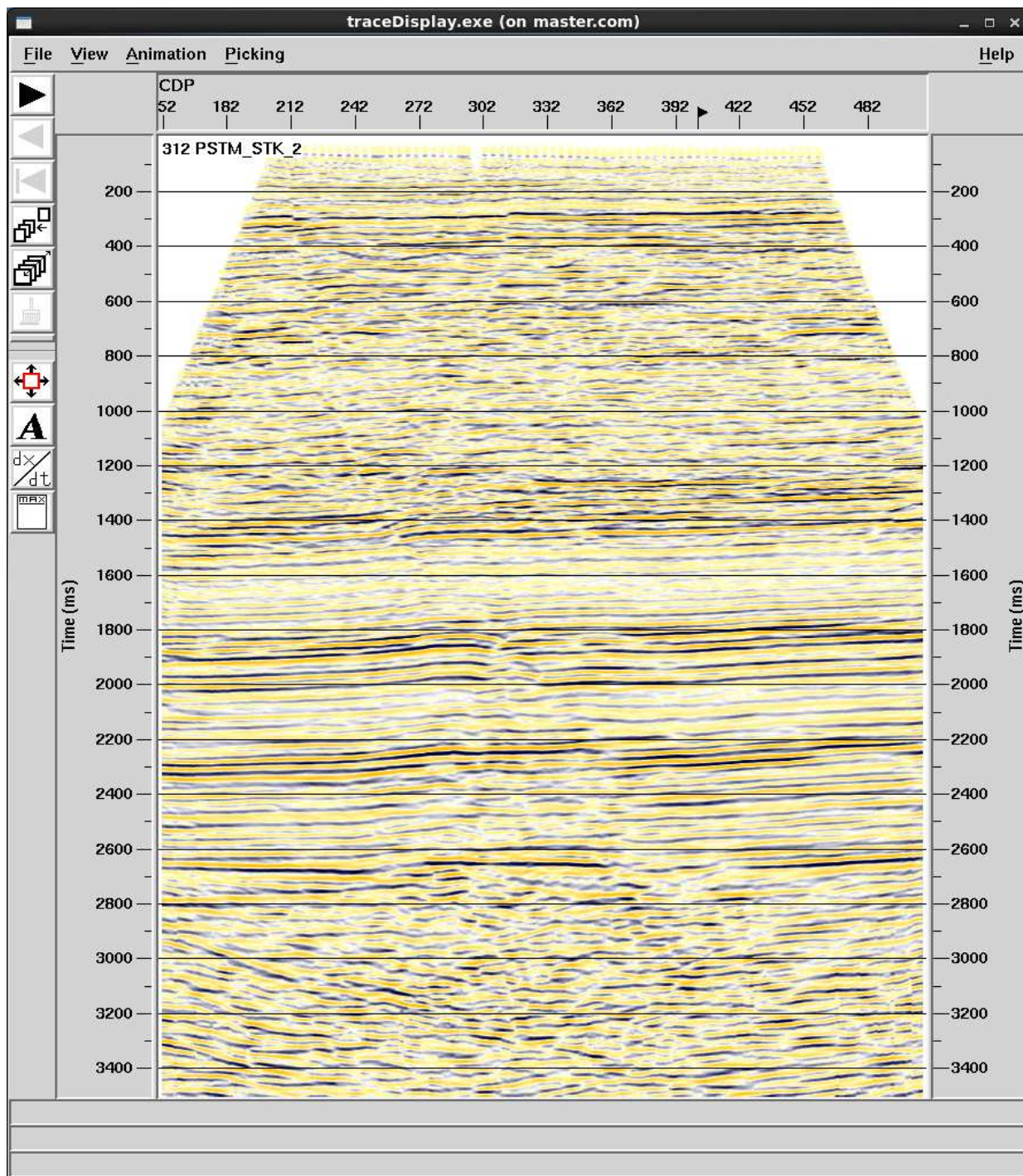
Figura 6-19: Modelo de Velocidad (PSTM) Segunda corrida



6.3.13 Migración Pre apilado en Profundidad (PSDM)

La migración pre apilado en profundidad, es una técnica de imagen sísmica que teóricamente es más exacta en la representación de la geometría del subsuelo. Tiene ventajas sobre la migración en tiempo ya que ayuda en el posicionamiento correcto de reflectores para resolver estructuras complejas, sombras de falla, *pull ups*, *pull down* causadas por variaciones en velocidades laterales y verticales. Los resultados de la PSDM también son afectados por la calidad de los datos sísmicos adquiridos, el modelo geológico interpretado y los campos de velocidad asociados, tratamiento propio de variaciones topográficas y estáticas cerca de la superficie. LA PSDM es el proceso en el cual las reflexiones de los datos sísmicos son movidas a sus posiciones correctas en el espacio, incluyendo la posición relativa a los puntos de tiro, en aéreas donde hay significativos cambios laterales de velocidades que distorsionan la imagen en tiempo. Este paso requiere un conocimiento preciso de las variaciones verticales y horizontales de velocidades de intervalo.

Figura 6-20: Migración Pre apilado en Tiempo línea R-2005-03



6.3.13.1 Preparación de los datos

- A. Registros de campo con todo el pre-proceso aplicado ordenados por CDP (CDP_Gathers), estáticas de refracción y residuales aplicadas.
- B. Velocidades de PSTM, suavizadas y remuestreadas.

6.3.13.2 Secuencia para la PSDM

Se realizaron dos pruebas para PSDM, una empleando las velocidades RMS y otra a partir del modelo de velocidad obtenido de la migración prestack (PSTM).

Con la PSTM obtenida, se construyó un modelo inicial estructural de horizontes que junto con las velocidades RMS permitieron obtener una primera versión de la línea en profundidad. Se usaron distancias comunes iguales a las usadas en la PSTM y un ángulo de migración de 65 grados. La apertura máxima de migración es el máximo offset 5000m. Se realizaron varias iteraciones, pero a pesar de esto no se logró reducir el efecto de sombra de falla. En la Figura 6-21, se presenta la imagen sísmica PSDM obtenida a teniendo en cuenta las velocidades RMS.

Posteriormente en el software Tsunami e INT Viewer, se hizo un control de calidad de los datos y se tomó como input inicial de velocidad, el modelo que se obtuvo en la migración prestack, con este se realizó un trazado de rayos para determinar tiempos de tránsito que junto con los *gathers* de procesamiento permitieron obtener los *gathers* en profundidad. Luego en Promax, se cargaron los *gathers* obtenidos, se aplicaron filtros y nuevamente se apiló. La imagen de la Figura 6-22 muestra la primera sección sísmica PSDM obtenida a partir del modelo de velocidad obtenido en la PSTM.

Para garantizar una buena calidad de apilado de la sección sísmica, se aplicó un “mute” con el fin de eliminar el ruido remanente en los *gathers* (RMO), un ejemplo se muestra en la imagen de la Figura 6-23.

Nuevamente en la aplicación Tsunami, se realizó una interpretación del modelo para el análisis de velocidad, se hizo un autopicado y se corrigió manualmente las anomalías observadas y luego se aplicó la tomografía para generar un nuevo modelo de velocidad.

Con el modelo actualizado de velocidades, se hizo una segunda corrida de migración preapilado en profundidad con los mismos parámetros de la primera corrida, se hizo el

control de calidad de los *gathers* migrados para determinar zonas donde se evidenciarán errores en el modelo de velocidad. Cuando se encontraron zonas que no se observaban calibradas se procedió a picar de nuevo velocidades residuales en esos sitios específicos y posteriormente a actualizar la tomografía. En la Figura 6-24, se muestra una corrida de modelo de velocidad utilizado en la generación del PSDM. La migración PSDM final, se calculó con el mismo algoritmo y los mismos parámetros de las anteriores corridas para finalmente obtener la imagen sísmica que se presenta en la Figura 6-25

Figura 6-21: PSDM final a partir de las velocidades RMS

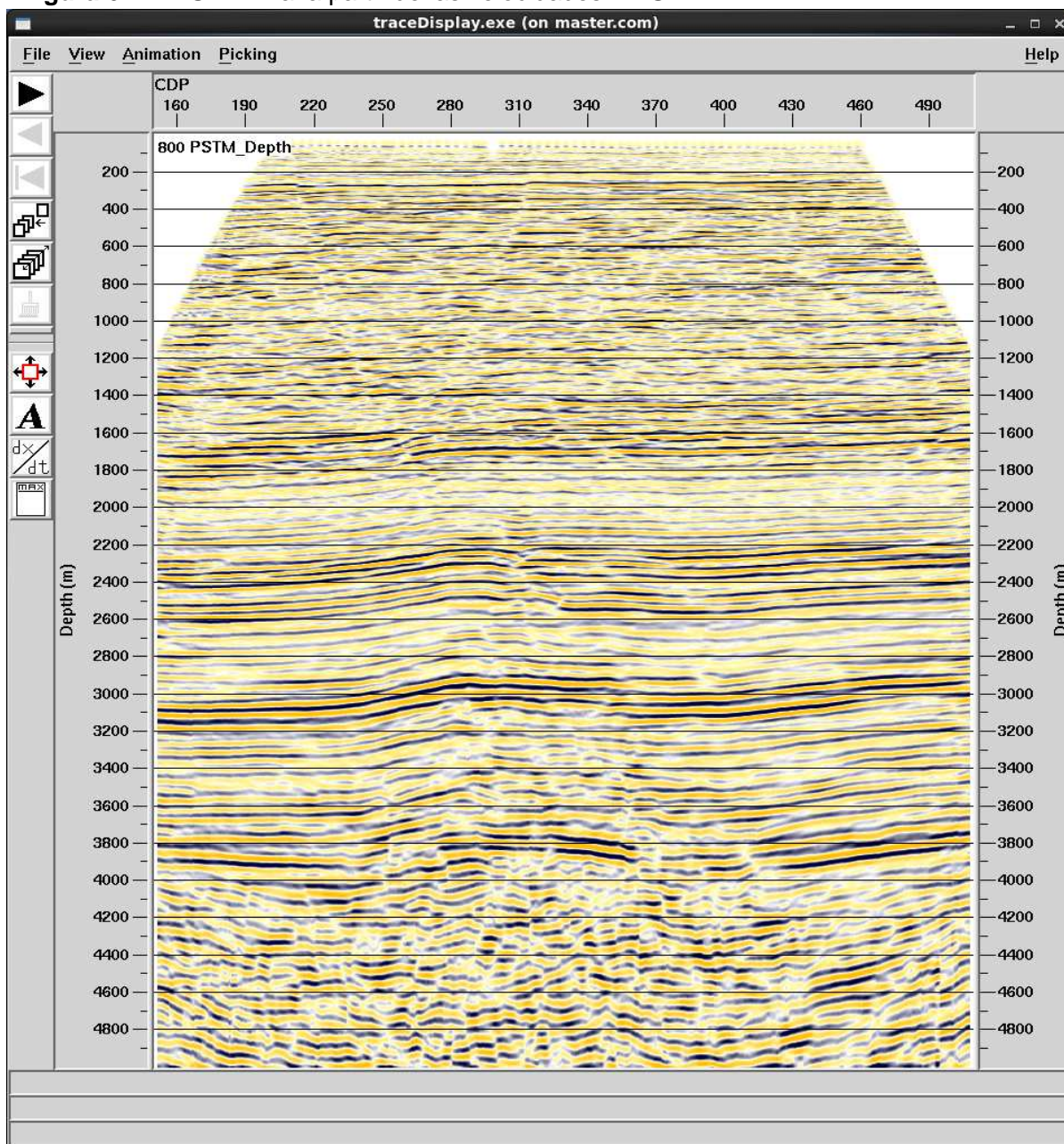


Figura 6-22: PSDM preliminar a partir del modelo de velocidad obtenido en la PSTM

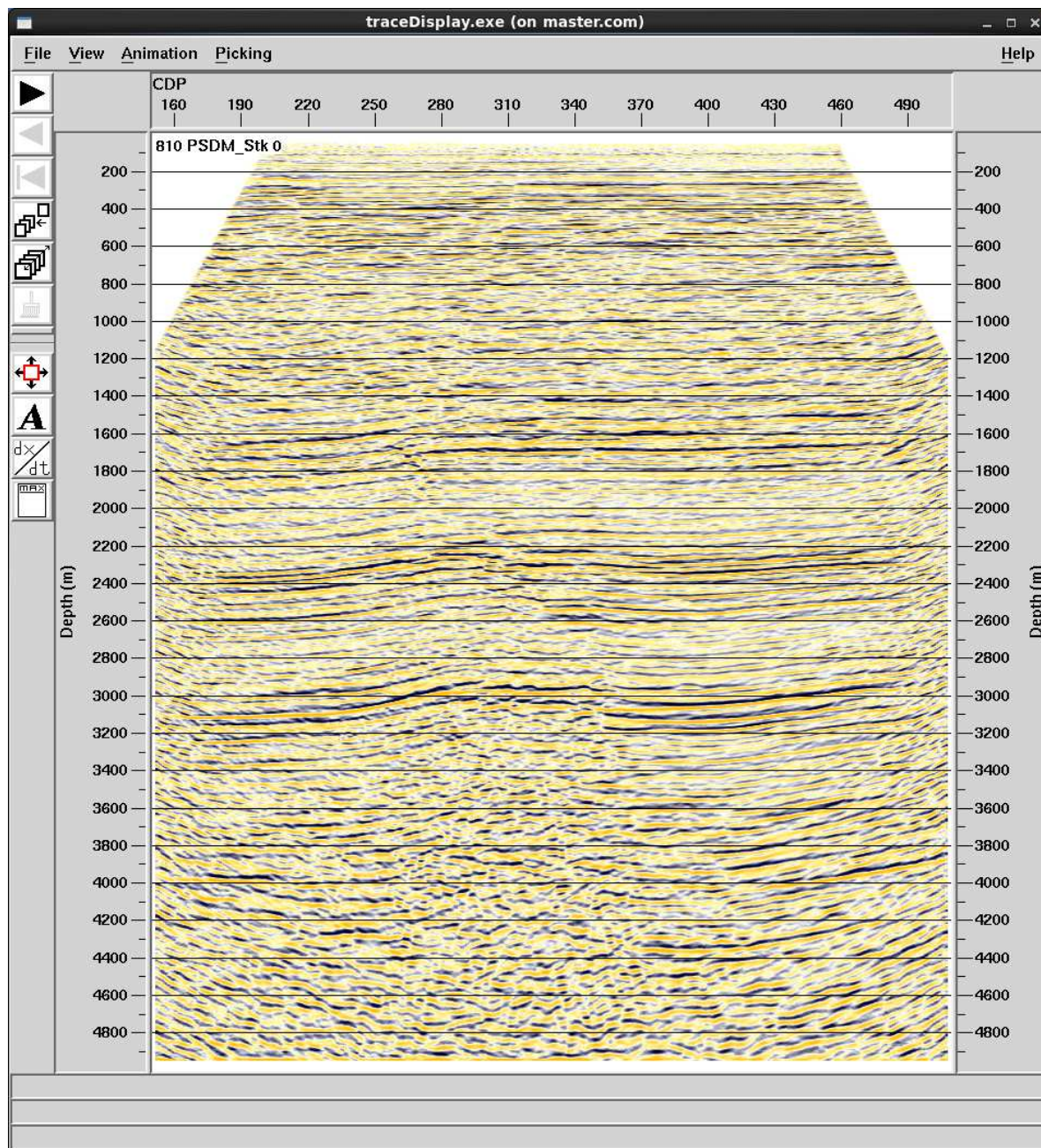


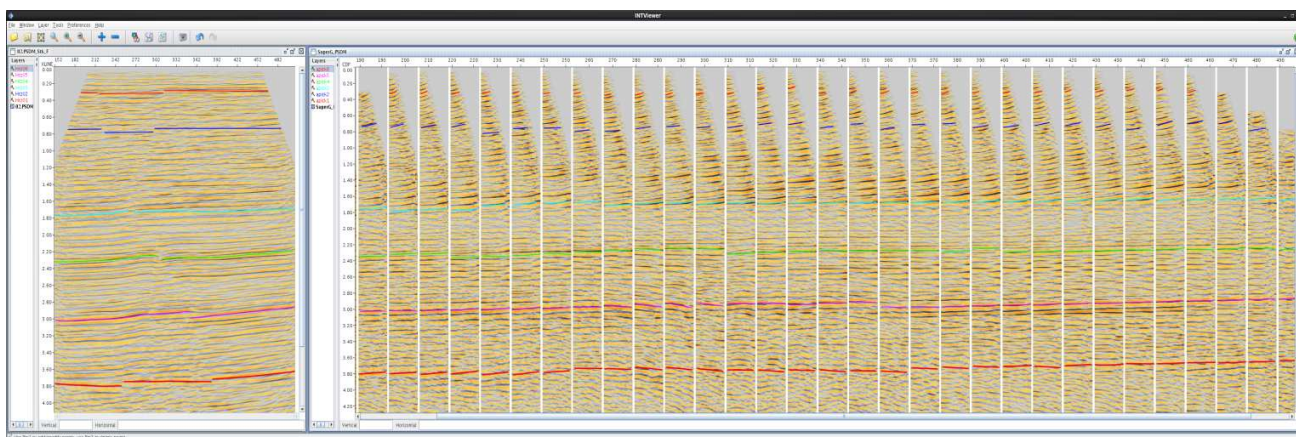
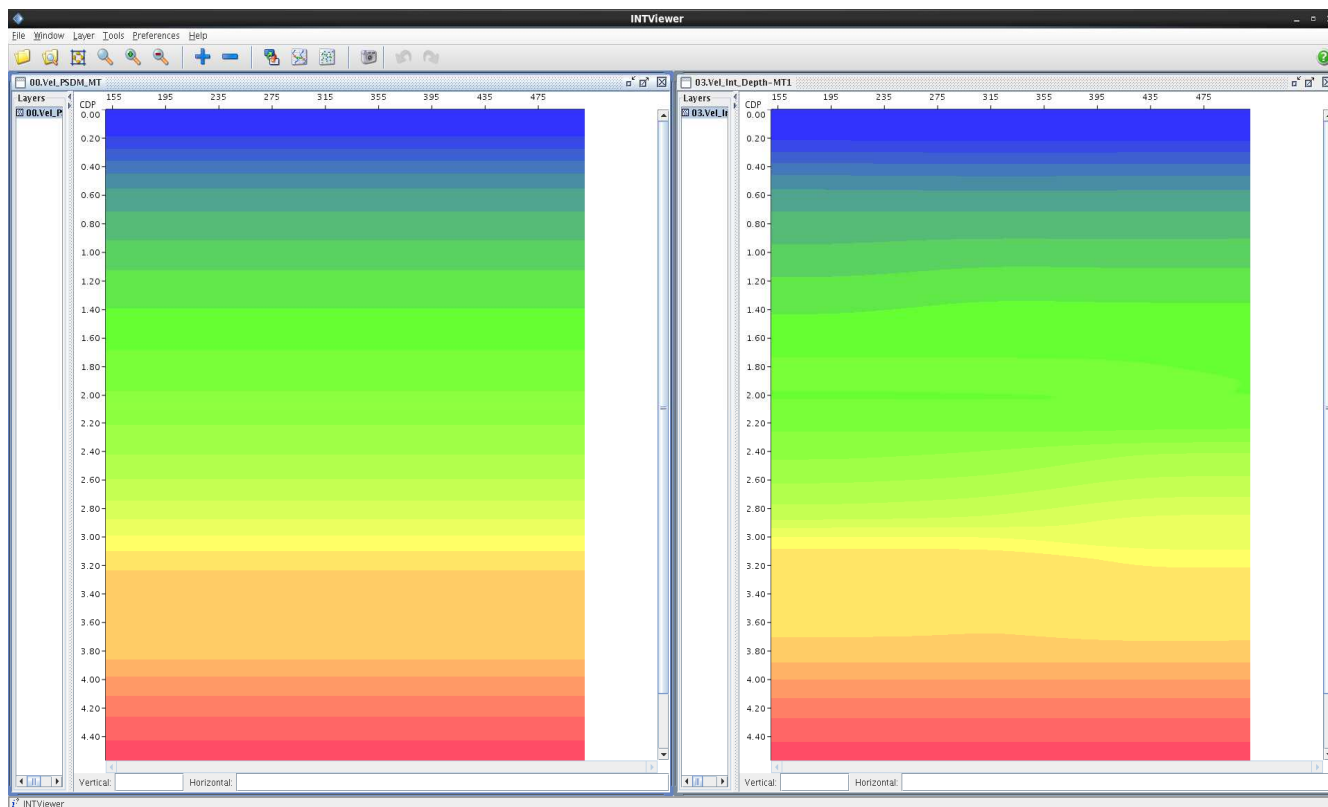
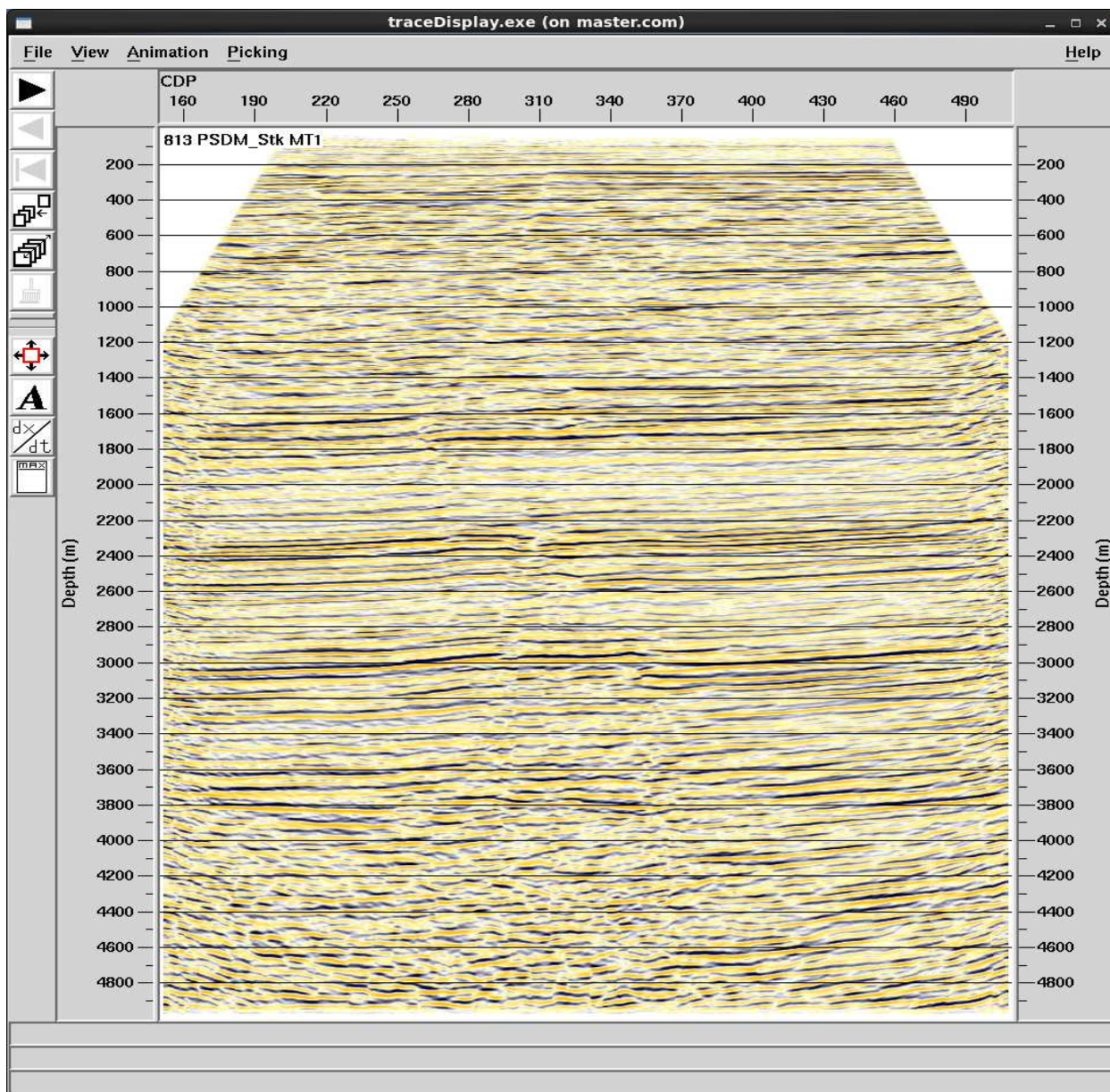
Figura 6-23:PSDM_Stack con “Residual Move Out” (RMO)**Figura 6-24:Modelo de Velocidades Final**

Figura 6-25:PSDM Final



7. Resultados

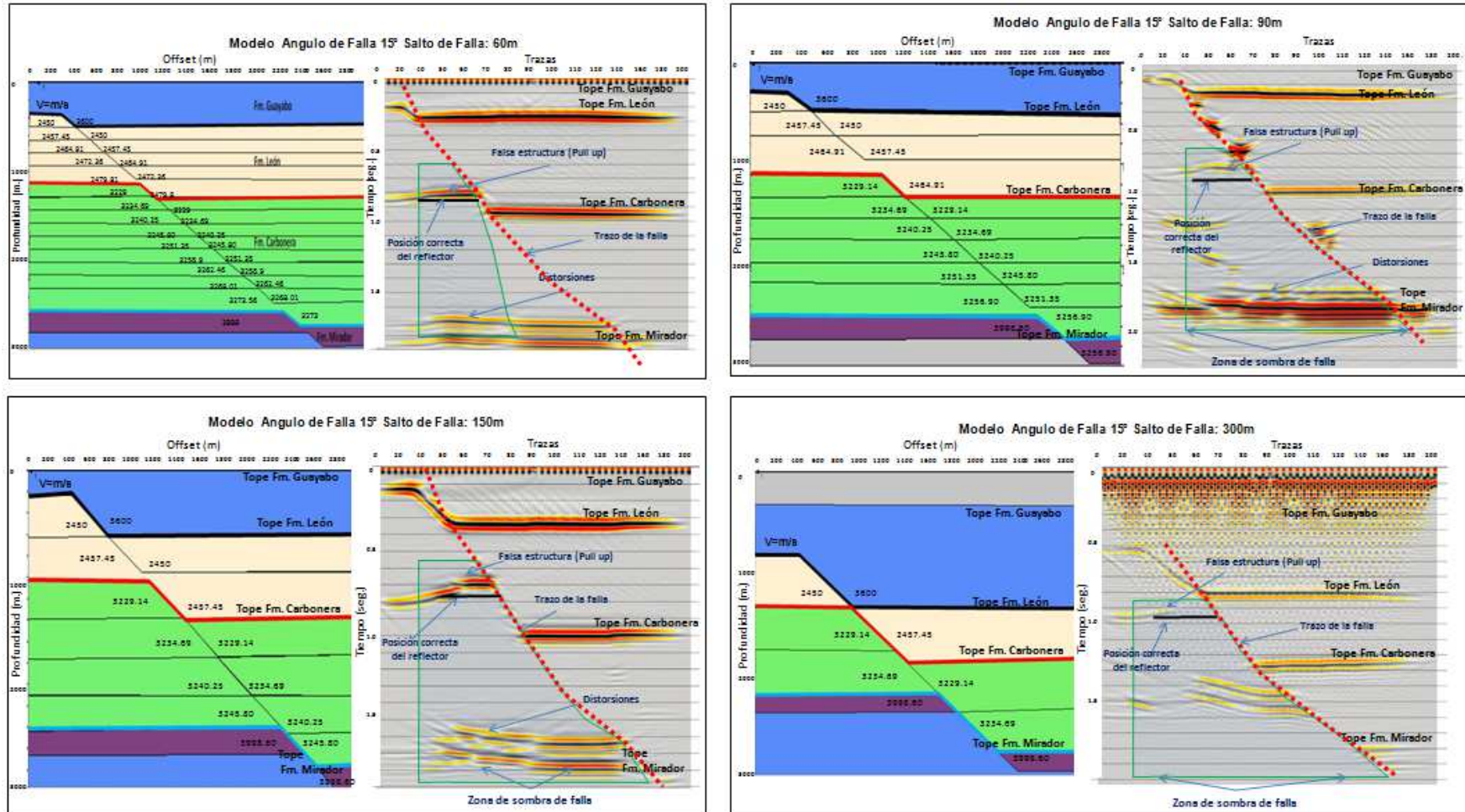
7.1 Análisis de los Datos Sintéticos

Se realizó el análisis de cada uno de los modelos sintéticos procesados en tiempo, teniendo en cuenta la variación de ángulo, salto de falla y contrastes de velocidad vertical y lateral.

Para los modelos sintéticos se hicieron dos tipos de análisis, el primero con el fin de analizar cómo afecta el ángulo de buzamiento en la generación del problema de sombra de falla, para esto, se interpretaron este efecto en las imágenes que tienen el mismo ángulo de buzamiento de la falla, pero diferentes saltos de falla y el segundo analizando el factor salto de falla como común denominador de las imágenes con diferente ángulo de buzamiento de la falla.

Para el primer análisis, las figuras 7-1 a 7-5 muestran una comparación entre un set de imágenes, en donde se comparan los modelos que tienen ángulo de 15°, 30°, 45°, 60° y 75°, cada uno con diferentes saltos de falla: 60m, 90m, 150 y 300m. A la izquierda de cada par de imágenes se encuentra el modelo sintético con sus velocidades por capa y a la derecha la sección migrada en tiempo mostrando en cada una en verde el área afectada por el efecto de sombra de falla, en rojo el trazo de la falla normal y se indican las zonas en donde se presentan los “*pull up*” y distorsiones. Las tablas 7-1 a 7-5 muestran el análisis de los modelos presentados en las figuras 7-1 a 7-5, en estas se analiza cómo afecta la variación del salto de falla en la generación del problema de sombra de falla teniendo en cuenta que los modelos tienen el mismo ángulo de buzamiento de la falla.

Figura 7-1: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con ángulo de buzamiento de 15° y variación del salto de falla: 60m, 90m, 150 y 300m.

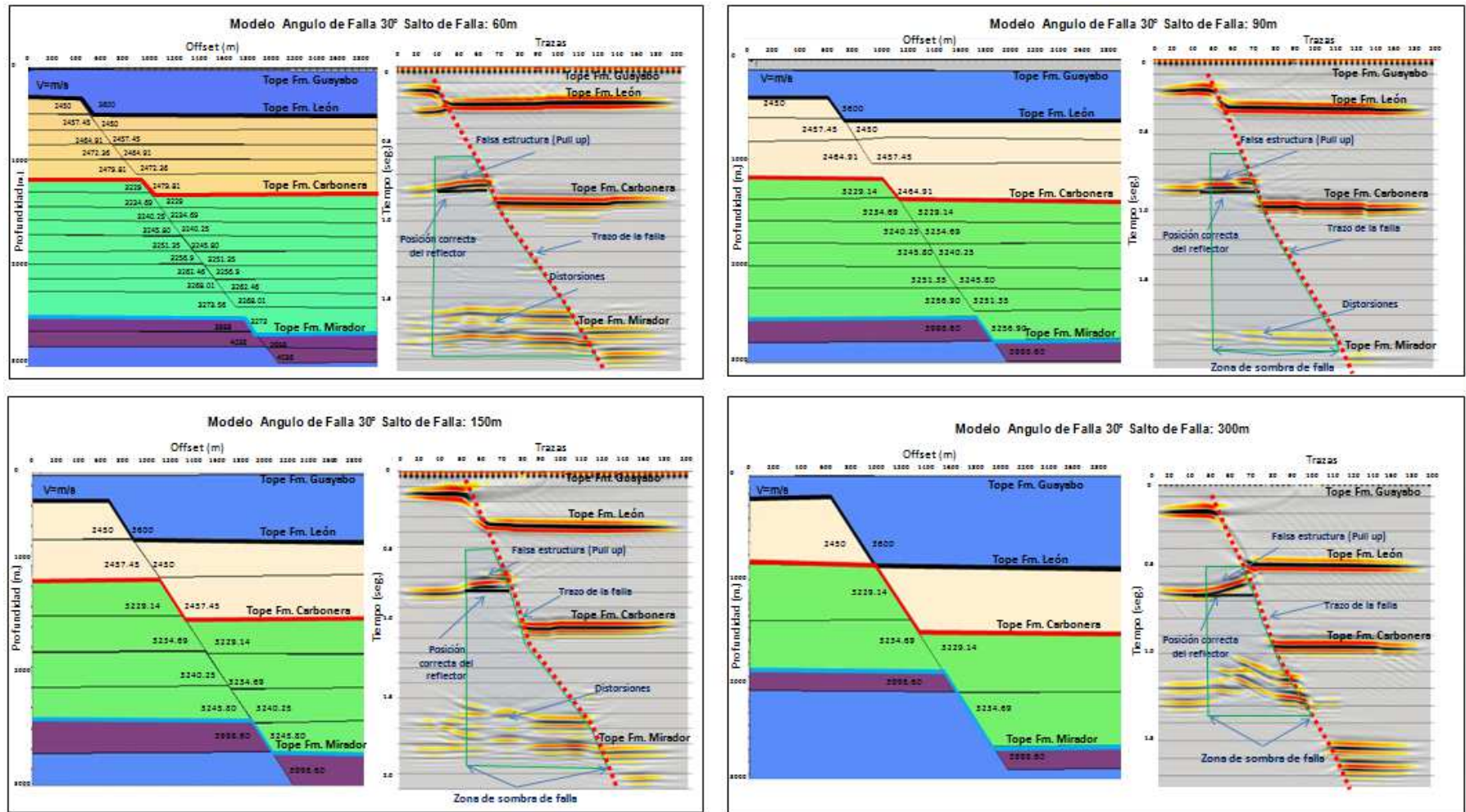


En la tabla 7-1, se presenta el análisis de la figura 7-1, en donde los modelos mantienen el ángulo de buzamiento de la falla de 15° con variación de salto de falla de 60m, 90m, 150m y 300m

Tabla 7-1: Análisis del comportamiento del efecto de sombra de falla en el modelo sintético con variación del salto de falla y ángulo de buzamiento de falla 15°.

		Salto Falla (m)			
		60	90	150	300
Angulo 15°	<p>* En este modelo a nivel del tope de la Fm. Leon, la falla pone en contacto una capa de baja velocidad en el bloque yacente con una capa de velocidad alta en el bloque colgante pero como el salto de falla es bajo y el espesor menor, a este nivel no se observa mayor variación en la imagen sísmica obtenida.</p> <p>* En el tope de la Fm. Carbonera la inversión de velocidad se ve reflejada en el contacto entre dos capas de alta velocidad (bloque yacente) y una de baja velocidad (bloque colgante). Como se observa en la imagen sísmica, hacia el tope de la fm Mirador se forma el pull up debido a la variación de velocidad vertical y lateral. En esta sección, con un ángulo de 15° y salto 60m el pull up se observa suave y elongado.</p>	<p>* Se producen las mismas inversiones de velocidad que en el modelo de 60m pero a diferencia del anterior se observa un incremento en la curvatura de los reflectores en el bloque yacente de la estructura posiblemente por el incremento en el área de contacto o espesor entre las capas de los dos bloques donde se produce el cambio vertical y lateral de velocidad.</p>	<p>* La magnitud del salto de falla aumenta poniendo en contacto nuevas áreas con cambios de velocidad vertical y lateral.</p> <p>* Como se observa en las secciones sísmicas sintéticas, se observa en el bloque yacente el incremento de la curvatura de los reflectores y un pull up al tope de la Fm. Carbonera y Fm. Mirador por efecto de la inversión de velocidad vertical entre estas formaciones.</p>	<p>* A diferencia de los anteriores modelos, el salto de 300m pone en contacto directo, zonas de baja velocidad con alta velocidad a lo largo de todo el espesor. En este se observan pronunciados pull up a nivel de Fm. Carbonera y Mirador producto del efecto de cambio lateral y vertical de velocidades. La figura 1.5B, muestra teóricamente el efecto que se observa en este modelo.</p>	

Figura 7-2: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con ángulo de buzamiento de 30° y variación del salto de falla: 60m, 90m, 150 y 300m.

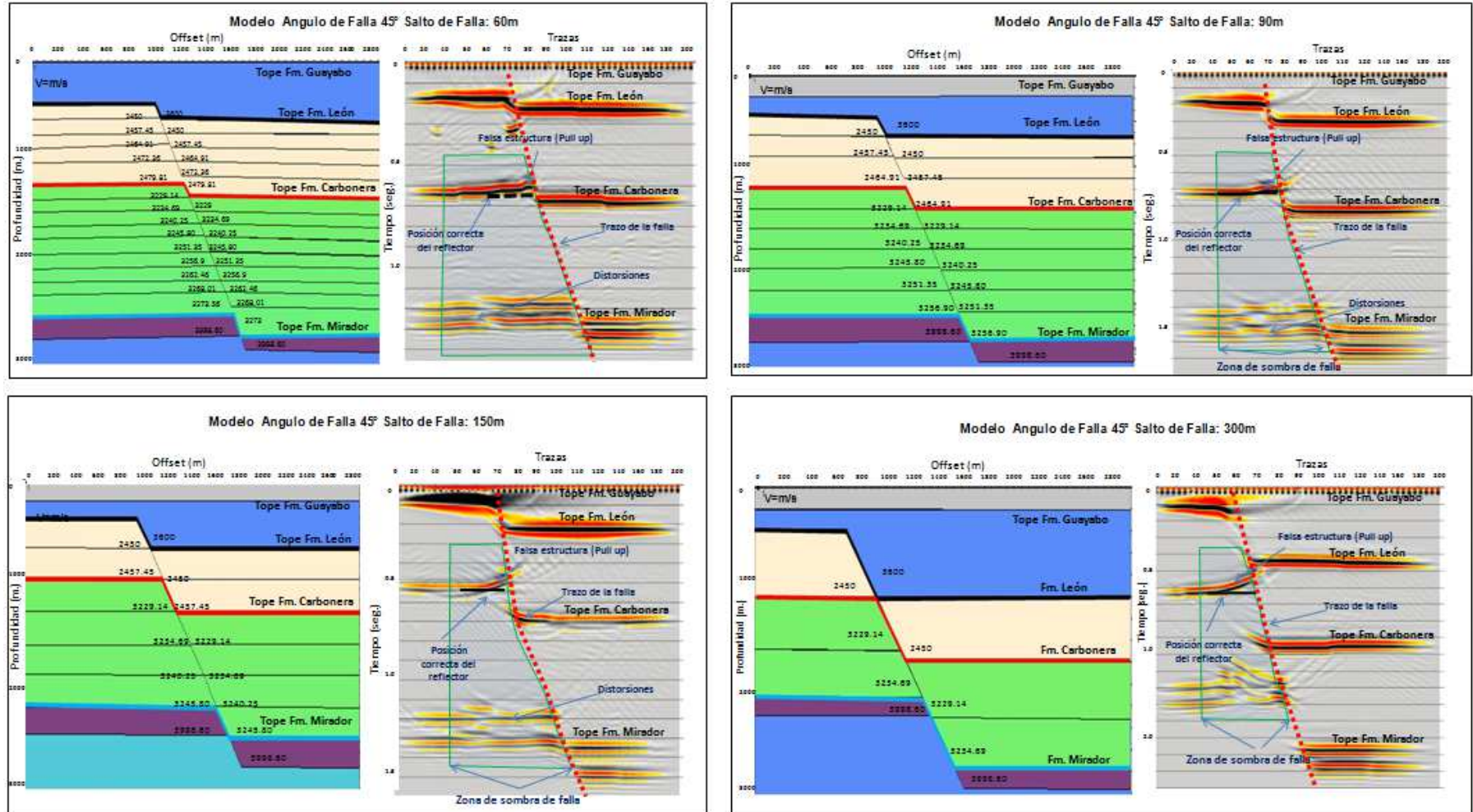


En la tabla 7-2, se presenta el análisis de la figura 7-2, en donde los modelos mantienen el ángulo de buzamiento de la falla de 30° con variación de salto de falla de 60m, 90m, 150m y 300m

Tabla 7-2: Análisis del comportamiento del efecto de sombra de falla en el modelo sintético con variación del salto de falla y ángulo de buzamiento de falla 30°.

		Salto Falla (m)			
		60	90	150	300
Angulo 30°					
	<p>* El modelo esta constituido por tres formaciones geologicas cada una dividida en unidades cuyo espesor corresponde al salto de falla de analisis con el objetivo de poblar cada una de estas con su velocidad correspondiente de acuerdo al gradiente de velocidad calculado.</p> <p>* Este modelo comparado con el modelo de 15° y salto de falla 60m, evidencia en el bloque yacente, aunque elongado, una zona de pull up en el tope de la Fm. Carbonera y Fm Mirador</p>	<p>* Hacia de tope de la Fm. Leon, se evidencia un aumento en la curvatura de los reflectores conformando un pull up.</p> <p>* A nivel del tope de la Fm. Mirador se observan pequeños pull down y pull up de velocidades debidas a que durante la trayectoria vertical los rayos atraviesan zonas de alta y baja velocidad.</p> <p>* En este modelo es posible definir el trazo del plano de falla.</p>	<p>* En este modelo incrementa el salto de falla bajo el mismo angulo, el espesor de las capas es mayor de modo que se evidencia claramente un pull up al tope de las formaciones Leon y Mirador debido a cambios en el tiempo de transito que experimentan los rayos al atravesar zonas de alta y baja velocidad. En los niveles mas profundos se evidencia pull down y distorsiones de los reflectores.</p>	<p>* Modelo constituido por tres capas principales subdivididas con el fin de adiconar a cada una un valor de velocidad intervalica de acuerdo al gradiente de velocidad calculado.</p> <p>* Se evidencia con mayor definicion el efecto de sombra de falla representado por la generacion de pull up y pull down a nivel de las Fm Leon, Fm Carbonera y Fm. Mirador.</p> <p>* A diferencia de los modelos de 60, 90 y 150, el area de contacto entre las capas donde se produce la variacion de velocidad es mayor de modo que se acentua mas el area de sombra de falla, la curvatura de los reflectores es mas pronunciada a nivel del tope de las tres formaciones. En las zonas centrales de las formaciones, no se observan cambios bruscos debido a que la velocidad es</p>	

Figura 7-3: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con ángulo de buzamiento de 45° y variación del salto de falla: 60m, 90m, 150 y 300m.

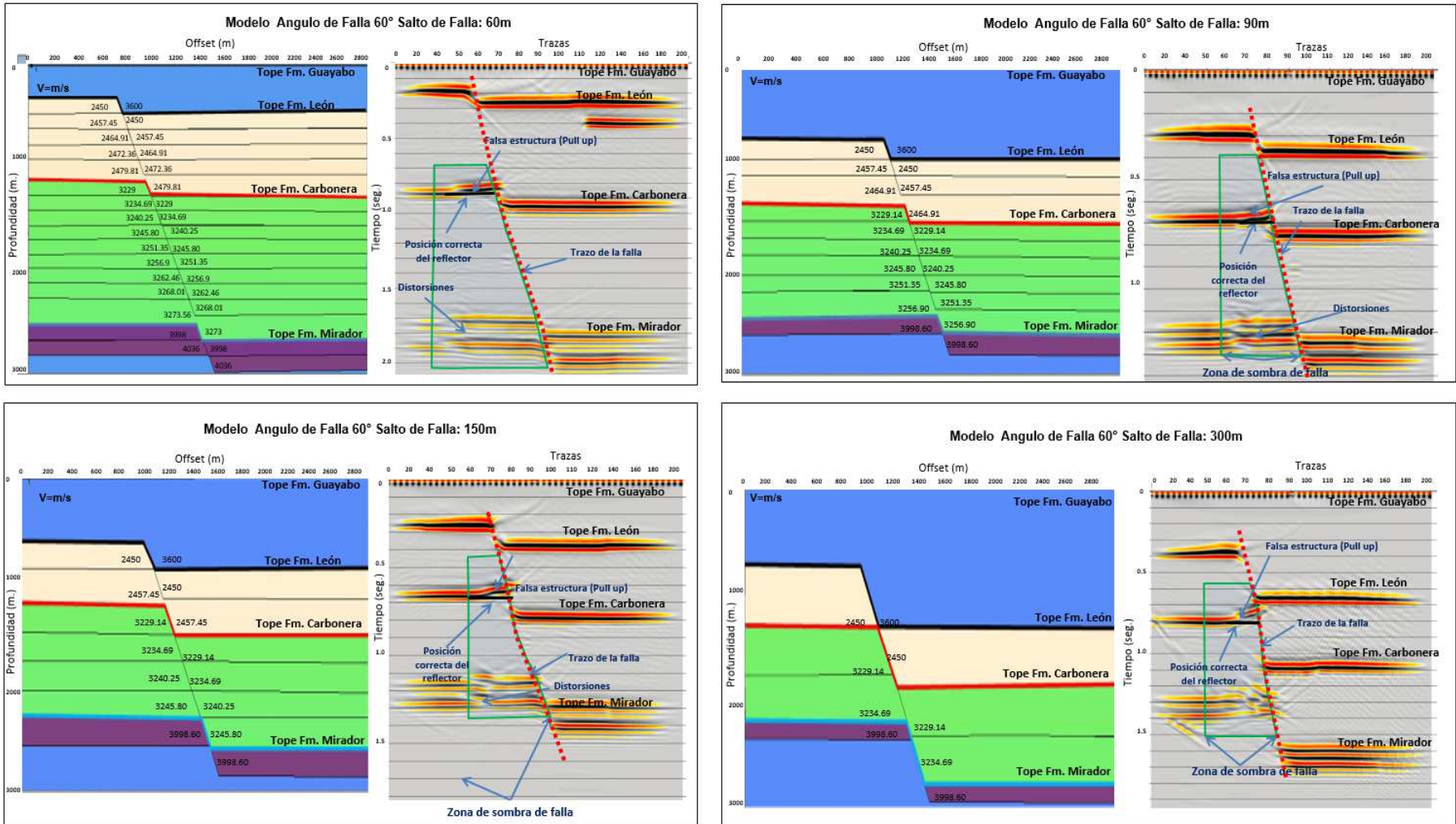


En la tabla 7-3, se presenta el análisis de la figura 7-3, en donde los modelos mantienen el ángulo de buzamiento de la falla de 45° con variación de salto de falla de 60m, 90m, 150m y 300m

Tabla 7-3: Análisis del comportamiento del efecto de sombra de falla en el modelo sintético con variación del salto de falla y ángulo de buzamiento de falla 45°.

		Salto Falla (m)			
		60	90	150	300
Angulo 45°	<p>*El modelo representa 4 capas geologicas plano paralelas cortadas por una falla a 45° y salta de 60m. El modelo esta poblado con velocidades intervalicas teniendo en cuenta un gradiente de velocidad calculado de acuerdo a los valores reales encontrados en el area de estudio.</p> <p>* A 45° y 60m de salto de falla, se puede definir bien el trazo de la falla pero se observa en el bloque yacente el pull up generado por el cambio de velocidad vertical y lateral a nivel de las Fm, Leon, Carbonera y Mirador.</p>	<p>* Al igual que en el modelo anterior se ejemplifica un modelo estructural compuesto de 4 capas geologicas y una falla cuyo inclinacion es 45° y salto de falla 90m, aquí como se observa en la imagen el plano de falla se puede definir, tambien se forma el pull up se genera con mayor curvatura a nivel de la Fm. Carbonera y Mirador y es mas evidente en la imagen, debido a la curvatura, generando distorsiones y una falsa estructura.</p>	<p>* En este modelo bajo el mismo angulo, el salto incrementa poniendo en contacto una mayor area entre las capas y haciendo mas evidente el cambio y contraste vertical y lateral de velocidades. al atravesar el rayo mayor espesor de la capa de baja velocidad (Fm. Leon) se generan pull down a diferencia de cuando el rayo atraviesa en la mayor parte de su recorrido la capa de alta velocidad, para este caso genera un pull up. En este modelo, el area de influencia de la falsa estructura es mayor, se generan distorsiones y pequenas zonas de pull</p>	<p>* Con 300m de salto de falla se pone directamente en contacto lateral una capa de baja velocidad con una alta velocidad durante todo el espesor de la misma a diferencia de los modelos de 60m, 90m 150m en los cuales solo una parte de la capa varia con respecto a la del bloque lateral. En este modelo el pull up alcanza la maxima curvatura debido a que el rayo atraviesa en su mayoria mayor espesor de la capa de alta velocidad y no es posible definir bien el trazo de la falla debido a las distorsiones que observan en la imagen resultado.</p>	

Figura 7-4: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con ángulo de buzamiento de 60° y variación del salto de falla: 60m, 90m, 150 y 300m.

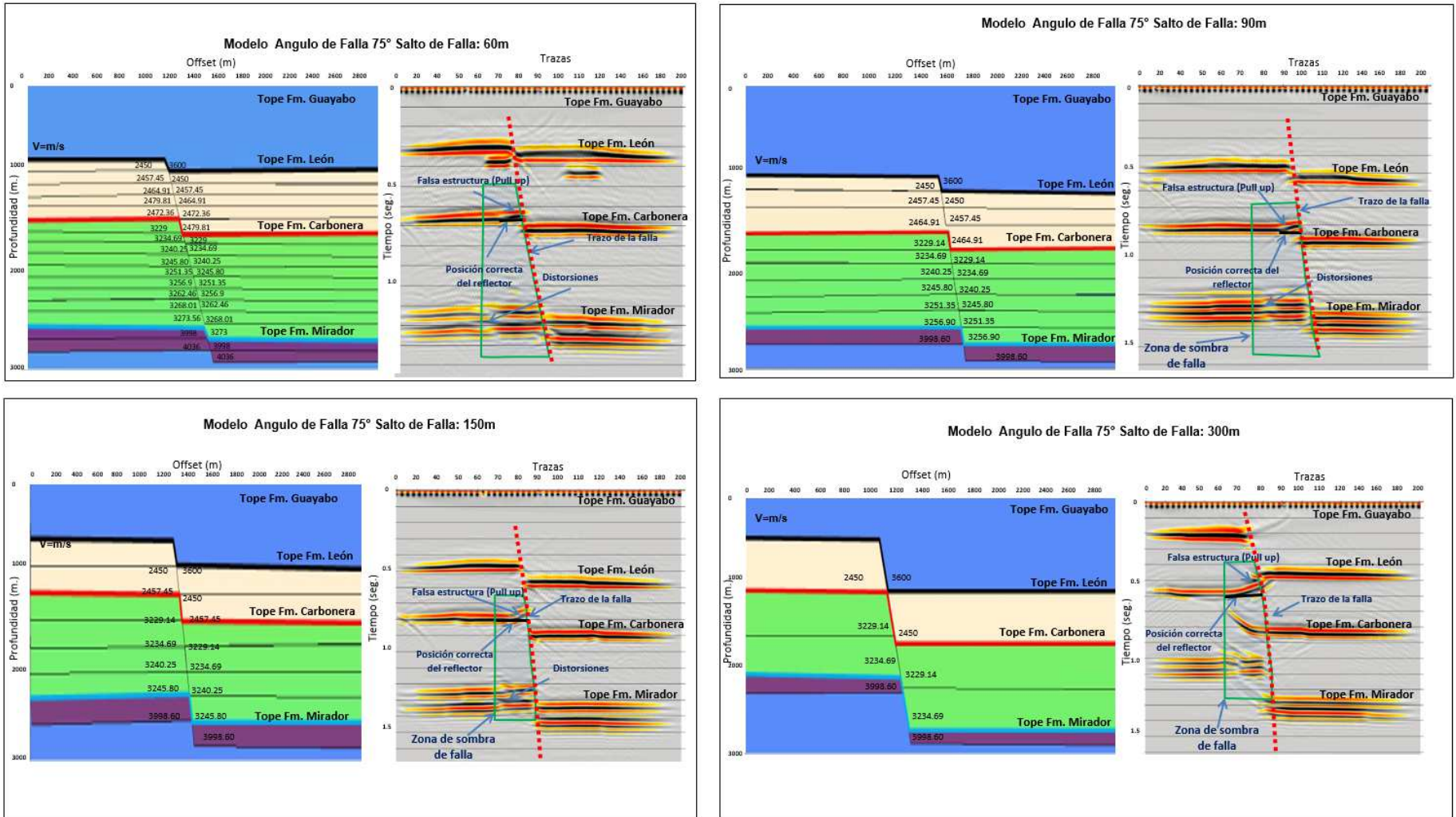


En la tabla 7-4, se presenta el análisis de la figura 7-4, en donde los modelos mantienen el ángulo de buzamiento de la falla de 60° con variación de salto de falla de 60m, 90m, 150m y 300m

Tabla 7-4: Análisis del comportamiento del efecto de sombra de falla en el modelo sintético con variación del salto de falla y ángulo de buzamiento de falla 60°.

	Salto Falla (m)			
	60	90	150	300
Angulo 60°	* Se considera un modelo de 60° con salto de falla de 60m, en el cual se observan distorsiones a nivel de la Fm Mirador y una zona de pull up hacia el tope de la Fm Carbonera. Con este ángulo y salto el efecto de sombra de falla no es tan pronunciado.	* En este modelo el salto incrementa, se definen mejor los paquetes de roca, se evidencia el trazo de la falla, se observan distorsiones en la Fm Mirador en comparación con el modelo anterior, sin embargo se conserva el pull up en el bloque yacente.	* A 60° y 150m de salto, la curvatura del pull up a nivel de la Fm, Mirador es más pronunciada. A nivel de la Fm. Mirador además del falso anticlinal parece formarse un splay de la falla principal	* En este modelo, se observa más acentuado el efecto de sombra de falla en el bloque yacente, el pull up es mayor. A nivel de la Fm. Mirador el cambio de espesor, la variación vertical y lateral de velocidad produce discontinuidad en los reflectores, pull down y pull up.

Figura 7-5: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con ángulo de buzamiento de 75° y variación del salto de falla: 60m, 90m, 150 y 300m.



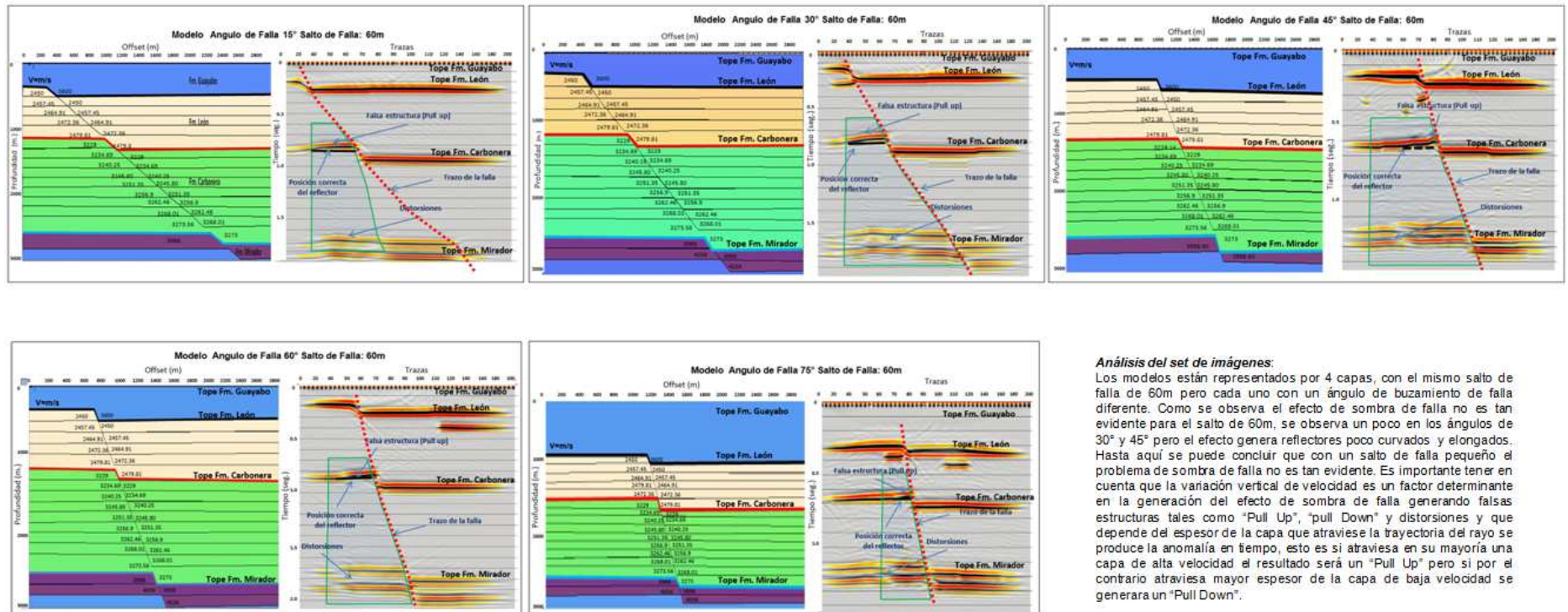
En la tabla 7-5, se presenta el análisis de la figura 7-5, en donde los modelos mantienen el ángulo de buzamiento de la falla de 60° con variación de salto de falla de 60m, 90m, 150m y 300m

Tabla 7-5: Análisis del comportamiento del efecto de sombra de falla en el modelo sintético con variación del salto de falla y ángulo de buzamiento de falla 75°.

	Salto Falla (m)			
	60	90	150	300
Angulo 75°	* En este modelo la falla es casi vertical, a 60m se observan distorsiones, el efecto de pull up elongado, se puede definir el trazo de la falla.	* El salto de falla incrementa, se define el plano falla, en el bloque yacente de la falla se insinua un zona de pull up.	* En el modelo con 150m el pull up incrementa a diferencia de los modelos de 60m y 90m pero aquí es claro el trazo de la falla.	* Se generan distorsiones y zonas de pull up en el bloque yacente de la falla principal.

Para el segundo análisis, las figuras 7-6 a 7-9 muestran una comparación entre un set de imágenes, en donde se comparan los modelos que tienen saltos de falla: 60m, 90m, 150 y 300m con cada uno de los modelos con ángulos de buzamiento de la falla de 15°, 30°, 45°, 60° y 75°. A la izquierda de cada par de imágenes se encuentra el modelo sintético con sus velocidades por capa y a la derecha la sección migrada en tiempo mostrando en cada una en verde el área afectada por el efecto de sombra de falla, en rojo el trazo de la falla normal y se indican las zonas en donde se presentan los “pull up” y distorsiones. A diferencia del primer análisis, en cada figura, se presenta un análisis de lo que sucede con el problema de sombra de falla cuando se mantiene el mismo salto, pero se varía el ángulo de buzamiento de la falla en cada uno de los modelos sintéticos planteados para fallas normales que es el objeto de este trabajo.

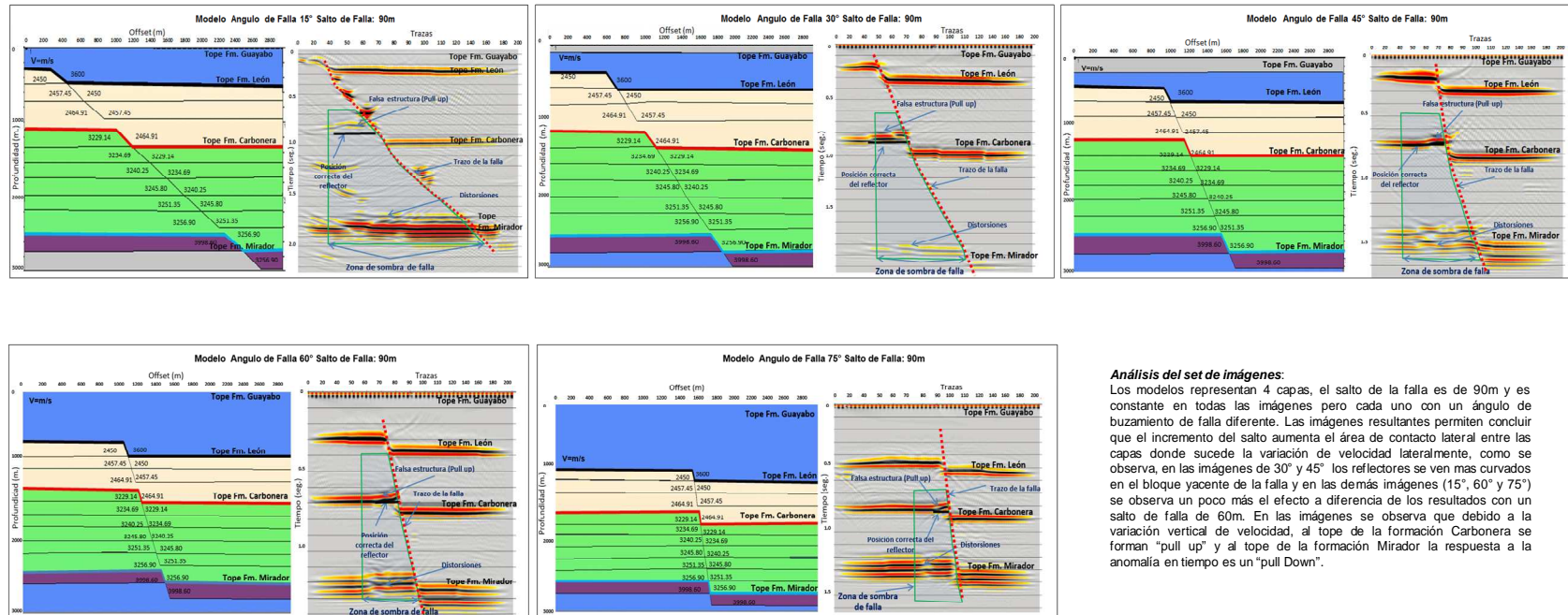
Figura 7-6: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con salto de falla 60m y variación del ángulo de buzamiento de la falla: 15°, 30°, 45°, 60° y 75°.



Análisis del set de imágenes:

Los modelos están representados por 4 capas, con el mismo salto de falla de 60m pero cada uno con un ángulo de buzamiento de falla diferente. Como se observa el efecto de sombra de falla no es tan evidente para el salto de 60m, se observa un poco en los ángulos de 30° y 45° pero el efecto genera reflectores poco curvados y elongados. Hasta aquí se puede concluir que con un salto de falla pequeño el problema de sombra de falla no es tan evidente. Es importante tener en cuenta que la variación vertical de velocidad es un factor determinante en la generación del efecto de sombra de falla generando falsas estructuras tales como "Pull Up", "pull Down" y distorsiones y que depende del espesor de la capa que atraviese la trayectoria del rayo se produce la anomalía en tiempo, esto es si atraviesa en su mayoría una capa de alta velocidad el resultado será un "Pull Up" pero si por el contrario atraviesa mayor espesor de la capa de baja velocidad se generará un "Pull Down".

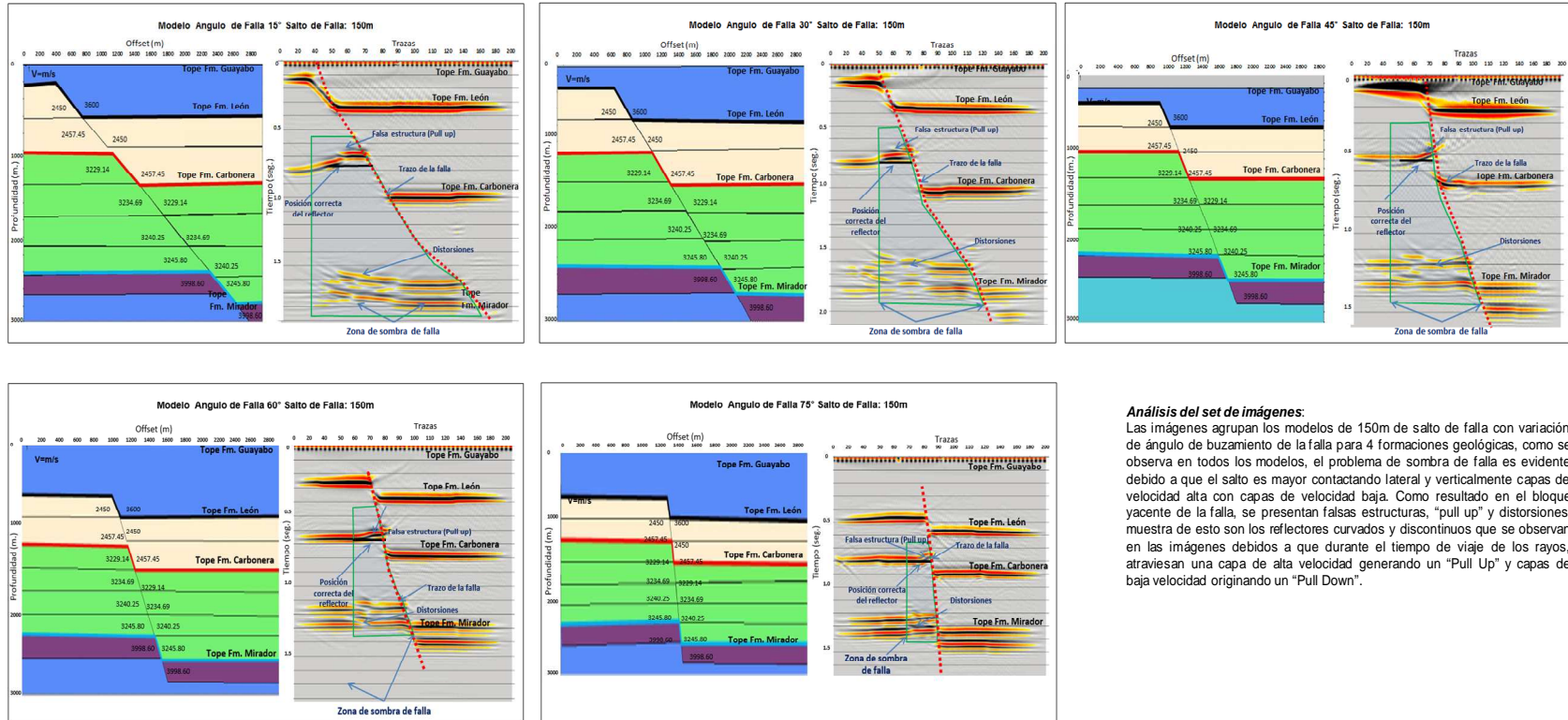
Figura 7-7: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con salto de falla 90m y variación del ángulo de buzamiento de la falla: 15°, 30°, 45°, 60° y 75°.



Análisis del set de imágenes:

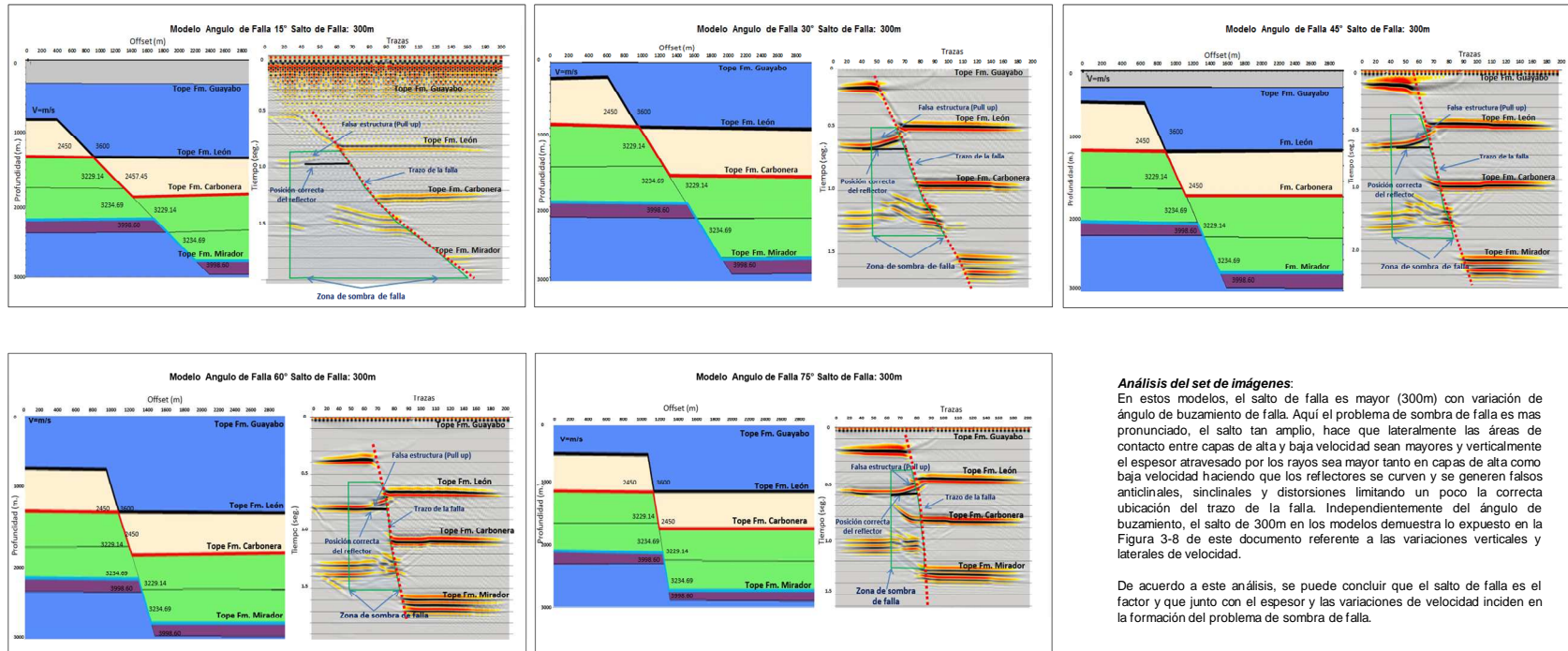
Los modelos representan 4 capas, el salto de la falla es de 90m y es constante en todas las imágenes pero cada uno con un ángulo de buzamiento de falla diferente. Las imágenes resultantes permiten concluir que el incremento del salto aumenta el área de contacto lateral entre las capas donde sucede la variación de velocidad lateralmente, como se observa, en las imágenes de 30° y 45° los reflectores se ven más curvados en el bloque yacente de la falla y en las demás imágenes (15°, 60° y 75°) se observa un poco más el efecto a diferencia de los resultados con un salto de falla de 60m. En las imágenes se observa que debido a la variación vertical de velocidad, al tope de la formación Carbonera se forman "pull up" y al tope de la formación Mirador la respuesta a la anomalía en tiempo es un "pull Down".

Figura 7-8: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con salto de falla 150m y variación del ángulo de buzamiento de la falla: 15°, 30°, 45°, 60°y 75°.



Análisis del set de imágenes:
 Las imágenes agrupan los modelos de 150m de salto de falla con variación de ángulo de buzamiento de la falla para 4 formaciones geológicas, como se observa en todos los modelos, el problema de sombra de falla es evidente debido a que el salto es mayor contactando lateral y verticalmente capas de velocidad alta con capas de velocidad baja. Como resultado en el bloque yacente de la falla, se presentan falsas estructuras, "pull up" y distorsiones, muestra de esto son los reflectores curvados y discontinuos que se observan en las imágenes debidos a que durante el tiempo de viaje de los rayos, atraviesan una capa de alta velocidad generando un "Pull Up" y capas de baja velocidad originando un "Pull Down".

Figura 7-9: Secciones sísmicas migradas comparando el efecto de sombra de falla en el modelo con salto de falla 300m y variación del ángulo de buzamiento de la falla: 15°, 30°, 45°, 60°y 75°.



Análisis del set de imágenes:

En estos modelos, el salto de falla es mayor (300m) con variación de ángulo de buzamiento de falla. Aquí el problema de sombra de falla es mas pronunciado, el salto tan amplio, hace que lateralmente las áreas de contacto entre capas de alta y baja velocidad sean mayores y verticalmente el espesor atravesado por los rayos sea mayor tanto en capas de alta como baja velocidad haciendo que los reflectores se curven y se generen falsos anticlinales, sinclinales y distorsiones limitando un poco la correcta ubicación del trazo de la falla. Independientemente del ángulo de buzamiento, el salto de 300m en los modelos demuestra lo expuesto en la Figura 3-8 de este documento referente a las variaciones verticales y laterales de velocidad.

De acuerdo a este análisis, se puede concluir que el salto de falla es el factor y que junto con el espesor y las variaciones de velocidad inciden en la formación del problema de sombra de falla.

De acuerdo a la comparación de las secciones y al análisis realizado en el área de estudio y teniendo en cuenta que el objeto de estudio son las zonas donde se presentan fallas normales, se puede determinar qué:

- a. Los factores que generan la zona de sombra de falla son el ángulo de inclinación de la falla, el salto de falla, espesor y la variación vertical y lateral de velocidad que ponen con contacto capas de baja velocidad (Fm. León) con capas de alta velocidad.
- b. De acuerdo a los resultados del modelamiento en fallas normales, el efecto de sombra se falla se observa más pronunciado cuando el salto de falla es mayor o igual a 150m, la diferencia de velocidad lateral es del orden de 700m/s y el ángulo de buzamiento oscila entre los 30° a 45°.
- c. Para ángulos mayores o iguales a 60° y saltos de falla menores a 90m, por ejemplo, en el modelo de 75° y 60m la generación de distorsiones, *pull up* y *pull down* es poco menos acentuada debido a que el área de sombra de falla se reduce y los reflectores en esta zona se observan curvados, pero en una zona más pequeña.
- d. Para ángulos menores a 60° y saltos mayores a 150m, el efecto de sombra de falla se evidencia con mayor claridad, este es el caso del modelo sintético con ángulo de inclinación 15° y salto 300m, en este, debido a la inclinación el área de sombra de falla incrementa, hay mayor área de contacto lateralmente entre las capas con diferente velocidad y debido al ángulo el efecto se extiende horizontalmente observándose los reflectores curvados en un área más grande.
- e. La comparación entre los modelos sintéticos variando el salto de falla permite concluir que a medida que el salto de falla incrementa la curvatura del *pull up* en el bloque yacente es mayor generando reflectores curvados comparables con una falsa estructura anticlinal. Se observa que el efecto de sombra de falla es más evidente cuando la falla tiene una inclinación de 15, 30 y 45 grados. En ángulos de 60 ° y 75° los *pull up* se reducen y se ven más elongados. El trazo de la falla es claro cuando la inclinación de la falla es de 60° y 75°. Las capas conservan su horizontalidad en los modelos sintéticos de 60° y 75° a diferencia de los de menor ángulo donde se generan distorsiones y zonas de *pull down* en el bloque yacente de la falla.

7.2 Análisis de Datos Reales

Con el objetivo de realizar una comparación entre el modelado de datos sintéticos (figura 7-10) y reales (figura 7-11 y 7-12), se determinó el ángulo y salto de falla para los datos reales, 45 a 50 grados y 60m respectivamente y se comparó con los datos sintéticos modelados para 45 grados y salto de 60m.

Figura 7-10: Modelo con datos sintéticos Angulo 45° y salto de falla 60m. A. Sección sísmica zero offset. B. Sección apilados en tiempo. C. Sección Migrada en tiempo

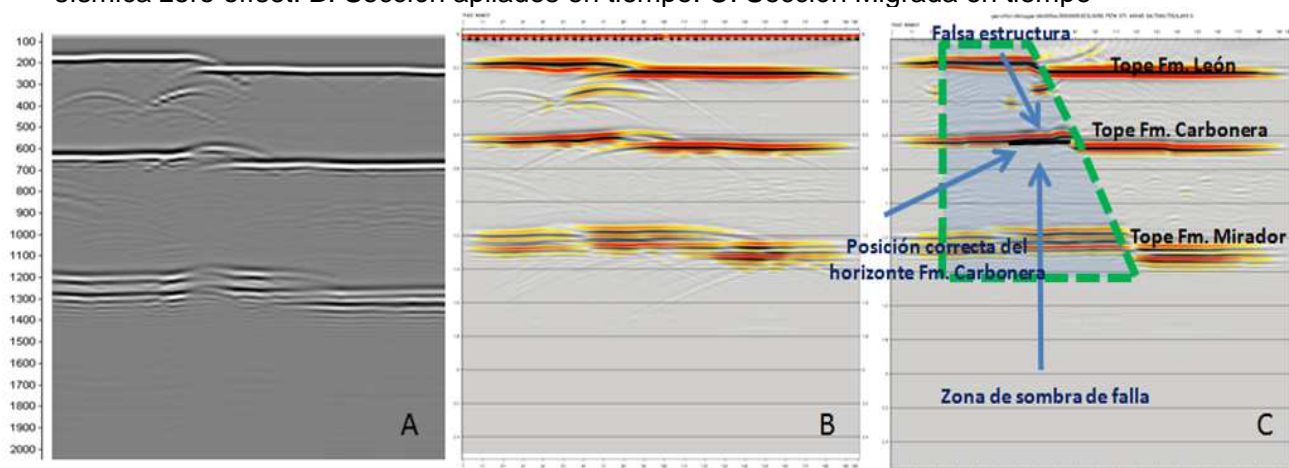


Figura 7-11: Migración PostApilado en tiempo línea R-2005-03. A. Procesamiento Anterior. B. Procesamiento 2015

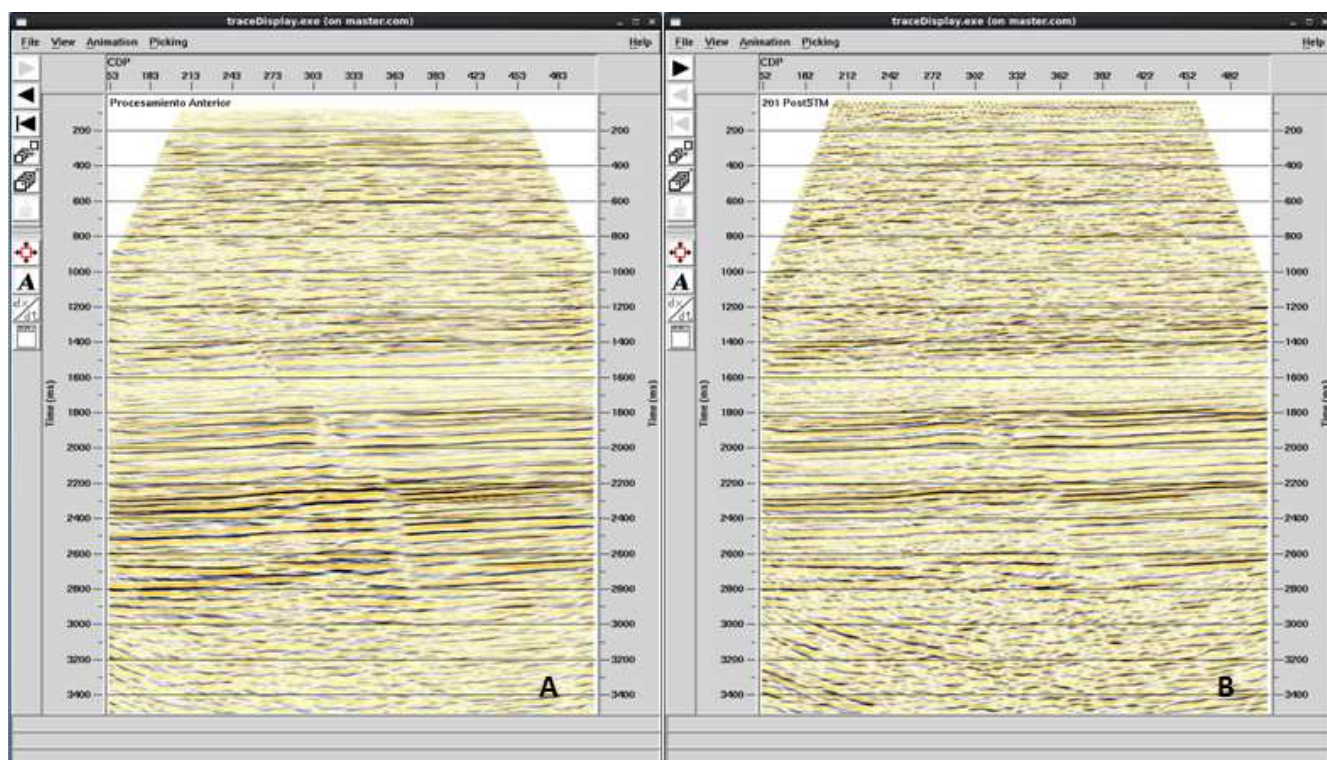
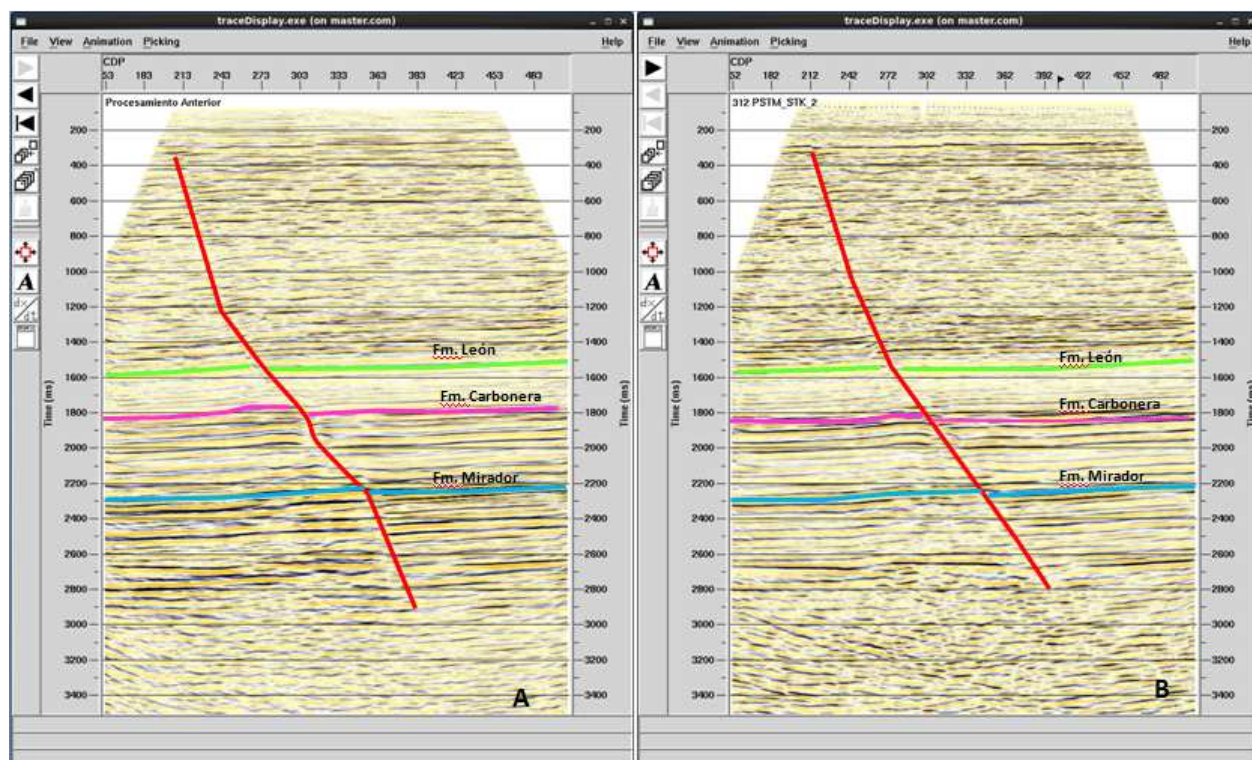


Figura 7-12. Interpretación en tiempo línea R-2005-03. A. Procesamiento Anterior. B. Procesamiento 2015



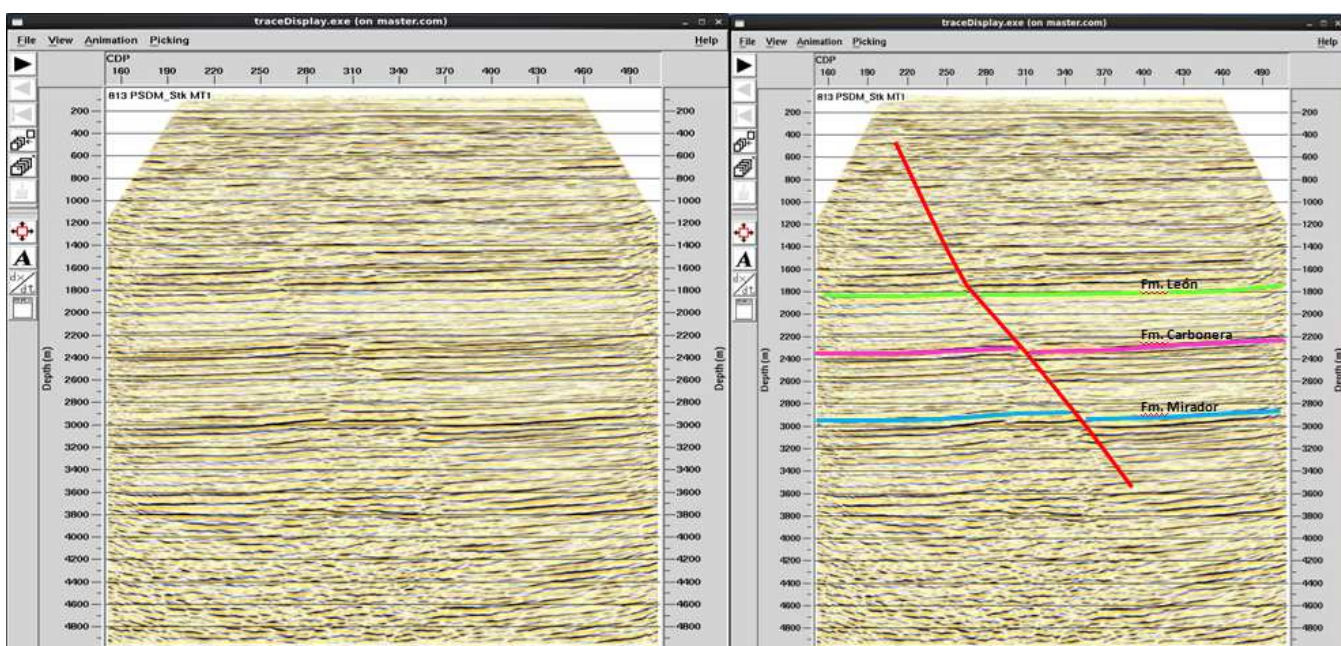
Como se observa en la figura 7-10, el efecto de sombra de falla, es evidente al tope de la Fm. Carbonera producto de la inversión vertical de velocidad mostrada en la figura 5-1 y su variación lateral, los reflectores forman un *pull up* en el bloque yacente de la falla y se producen distorsiones en la geometría de la estructura. Las mismas variaciones se observan en los datos reales presentados en la figura 7-11A, en esta, al igual que en los datos sintéticos se puede observar que el proceso de migración en tiempo de la línea R-2005-03 realizado en el 2005 no permitió reducir el efecto de sombra de falla, a diferencia de la migración realizada en el 2015 (figura 7-11B), en donde se obtuvo una imagen de mejor calidad, los eventos se ven más claros y continuos, aunque aún está presente aun el efecto de sombra de falla.

La línea originalmente procesada (Figura 7-11A, 7-12A), permite interpretar fuertes cambios de buzamiento en los reflectores, variaciones en la inclinación de los reflectores bajo el plano de falla y distorsiones en el trazo del plano de la falla a diferencia de la línea procesada para este trabajo (Figura 7-11B, 7-12B) en la cual se minimizo el efecto, se observa mayor definición de los reflectores, se observan los cambios entre las

formaciones, el trazo de la falla está más definido. De acuerdo a lo anterior, aunque no se eliminó el efecto de sombra de falla, se comprobó que existen factores a nivel de procesamiento diferentes a las variaciones de velocidad, que inciden en la generación de este tipo de falsas estructuras como son la falta de migración o migración inadecuada y la aplicación de estáticas imprecisas.

Como se comprobó anteriormente la migración en tiempo (PSTM) aunque mejora la calidad de la imagen, no resuelve el problema de sombra de falla por tal razón se hizo necesario realizar la migración a profundidad de la línea cuyos resultados se observan en la figura 7-13 a fin de reducir el efecto de la sombra de falla en la imagen sísmica. Como se puede interpretar en la imagen de la línea, se redujo el *pull up* visualizado en tiempo (Figura 7-11A y B), los reflectores se ven más planos y el trazo de la falla está más definido. La PSDM, es un algoritmo que usa la ecuación de onda y la teoría de rayos para convertir una sección sísmica de tiempo a profundidad a partir de un modelo suavizado de velocidades interválica. Gracias a que este proceso no trabaja con tiempos de viajes es posible generar imágenes sin los efectos de *pull up*. Para la migración en tiempo se asume la variación de la velocidad tanto en la vertical como en la horizontal mientras que, en la migración en profundidad, se tiene en cuenta el modelo de velocidad obtenido a partir del modelo geológico interpretado, la variación de las velocidades interválica con el objetivo de reordenar las reflexiones y difracciones a su verdadera posición.

Figura 7-13:Reducción del efecto de la zona de sombra de falla sobre la PSDM



7.3 Análisis de Efecto de Sombra de Falla en el área de estudio

El efecto de sombra falla se produce tanto en fallas normales como en inversas como resultado de cambios verticales y laterales de velocidad, patrones empleados en la adquisición o errores en el flujo de procesamiento. Uno de los factores que se debe tener en cuenta en el análisis geométrico de este efecto además del salto de falla, es el espesor de la formación, la disposición de cada capa respecto de la otra de acuerdo al tipo de falla y al ángulo de inclinación de la falla.

Es así como de acuerdo a la disposición de las capas respecto a la falla, al espesor, a la inclinación de la falla y a fuertes contrastes de impedancia acústica, se observan zonas poco iluminadas en las capas subyacentes, las cuales actúan como espejos, bajo los cuales muy poca energía logra pasar e iluminar totalmente la zona, en respuesta a esto se visualizan zonas que representan falsas estructuras anticlinales y sinclinales como resultado de un jalón o tirón de velocidad combinado con la poca energía que llega a los estratos (Figura 7-14).

En la siguiente figura se observan las falsas estructuras y distorsiones producidas en la zona poco iluminada efecto de los contrastes de impedancia acústica, el espesor de las capas, la inclinación de la falla (45°) y el salto de falla (300m) (Figura 7-14). Nótese hay una capa de baja velocidad (Fm. León) en medio de capas de alta velocidad, como se observa en la figura de la izquierda, en la zona de sombra de falla se forman *pull up* en el bloque colgante, los reflectores presentan mayor curvatura y hacia el tope de la Fm Mirador se producen una serie de distorsiones.

La figura 7-15, corresponde a una comparación entre la imagen sísmica del procesamiento realizado en el 2005 para la línea R-2005-03 y el modelo de 45° salto de falla 90m, en esta se corrobora la existencia del efecto de sombra de falla en el área y se interpreta en el bloque colgante la zona poco iluminada y las falsas estructuras que se generan producto de la inversión de velocidad vertical presente en el área.

Figura 7-14: Modelo sintético de 45° y 300m mostrando el efecto de sombra de falla en la zona poco iluminada.

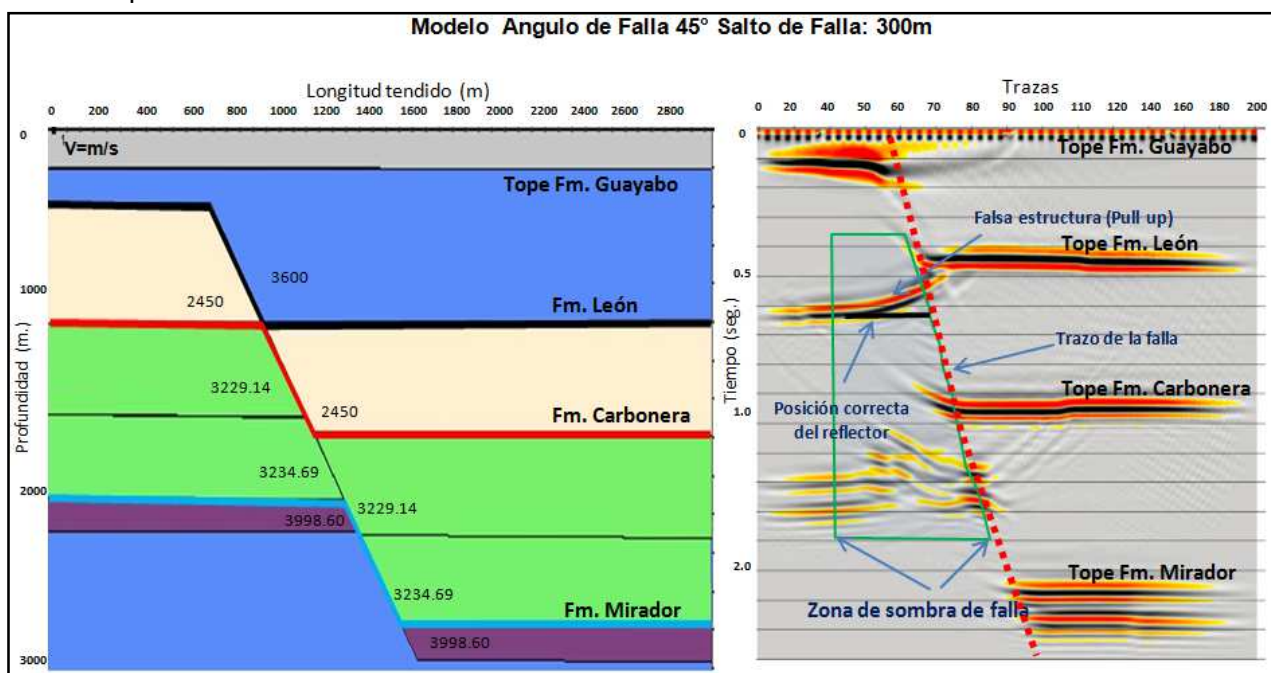
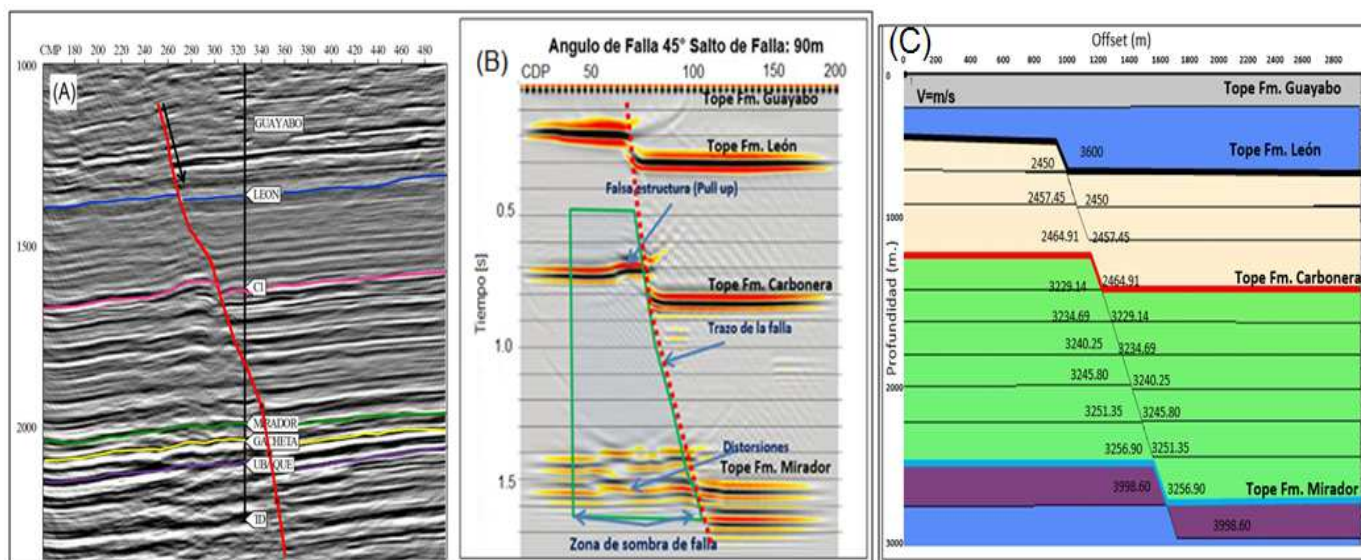


Figura 7-15: Línea R-2005-03 (PSTM) mostrando el efecto de sombra de falla en la zona poco iluminada.



(A) Interpretación en tiempo línea R-2005-03 en vecindad de la falla

(B) Sección sísmica sintética PSTM del modelo con 90m de salto e inclinación de falla de 45°.

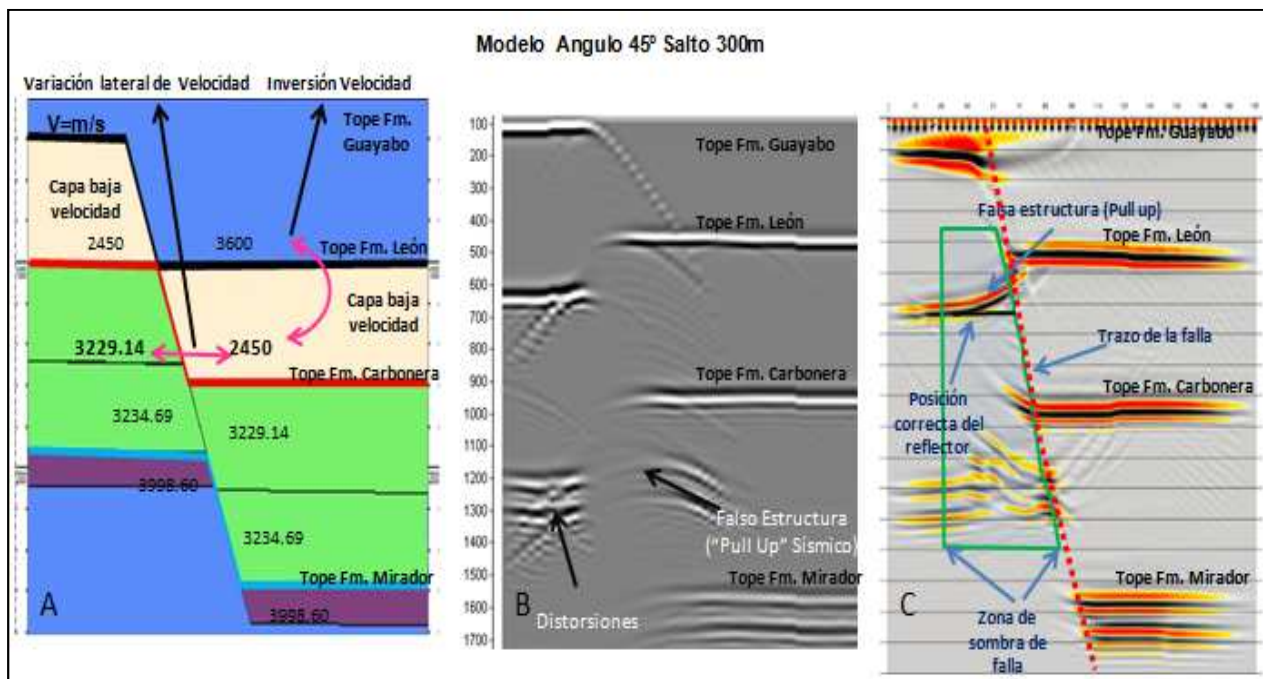
(C) Modelo Geológico para 90m de salto e inclinación de falla de 45°.

En el análisis de la variación vertical y lateral de velocidad, se debe tener en cuenta que la propagación de ondas sísmicas es compleja por debajo del plano de falla (en el bloque yacente de las fallas) debido a la poca iluminación lo cual genera imágenes sísmicas poco confiables de la zona. Generalmente, cuando se aplican algoritmos para el procesamiento o mejoramiento de la imagen, estos no tienen en cuenta las variaciones laterales de velocidad y por esta razón no se obtiene una imagen correcta de la estructura real por debajo del plano de falla. Uno de los principales factores que genera el efecto de sombra de falla es la variación lateral y la inversión de velocidades reflejado en la formación de falsas estructuras y distorsiones en la continuidad de los reflectores por debajo del plano de falla, esto como producto de la existencia de fallas gravitacionales trascurrentes, sobrecorrimientos, lentes arenosas, etc.

En el presente estudio, se observó verticalmente, una inversión de velocidad, producto de la existencia de una capa de baja velocidad (Fm. León) intercalada con capas de alta velocidad (Fm. Guayabo y Fm. Carbonera). Cada una de estas capas al entrar en contacto lateralmente con otra capa de velocidad diferente genera variaciones verticales y laterales de esta propiedad lo que origina que se produzcan fuertes contrastes de impedancia acústica representados de distorsiones sísmicas (jalones o tirones de velocidad: "pull up & push down o sag"). Es importante resaltar que entra más grande sea el salto de falla mayor será el área de contacto entre las capas y mayor será la variación lateral de velocidades.

En la figura 7-16, se muestran los resultados del modelo sintético en profundidad para un ángulo de 45° y salto de falla 300m, se observa que la inversión de velocidad (producto de la inserción de una capa de baja velocidad (Fm León) entre capas de alta velocidad) y la variación lateral de la misma generan el efecto de sombra de falla como se describe en la imagen sísmica. Se seleccionó este modelo ya que con este salto se observa claramente el problema de sombra de falla en el bloque colgante ya que por el salto tan grande el área de contacto lateral de velocidades es mayor. Como se observa una capa de velocidad 3229m/s entra en contacto lateral con una capa de baja velocidad 2450m/s, y la respuesta a esta anomalía en tiempo es un pull up de velocidades a nivel del tope de la formación Carbonera por debajo del plano de falla, así como al tope de la formación Mirador, se observan discontinuidades en los reflectores, push down y pull up.

Figura 7-16: Modelo sintético ángulo de buzamiento de la falla de 45° y salto de falla 300m. A. Modelo sintético en profundidad. B. Modelo Sintético en tiempo, incidencia normal, zero offset. C. Imagen sísmica migrada en tiempo a partir de diseño split spread.



De acuerdo a los resultados, para resolver el problema de la sombra de falla debido a estas variaciones de velocidad, se requiere, realizar una migración a profundidad PSDM de los datos sísmicos utilizando modelos de velocidad apropiados a través de tomografía de manera que se pueda reducir la existencia de esos jalones de velocidad producto de los cambios verticales y laterales de velocidad.

8. Metodología para analizar y reducir el efecto de Sombra de Falla

Como resultado de la realización de este trabajo y con el fin de tener una guía que permita identificar, analizar y reducir el problema de sombra de falla se plantea la siguiente metodología. Se sugiere aplicar esta metodología en áreas donde se tenga disponibles datos de sísmica y pozo, no para áreas exploratorias en donde no se cuente con algún tipo de dato.

- Realizar el análisis desde el punto de vista regional del régimen estructural en el cual se encuentran los datos a evaluar, esto es, establecer si es el régimen que predomina en el área es compresivo o distensivo con el objetivo de identificar las estructuras geológicas presentes y tipos de fallas.
- Teniendo en cuenta el análisis regional, se debe realizar la interpretación estructural del área de interés para definir orientación de las capas, ángulo de buzamiento y salto de la falla, tipos de falla y posibles fallas satélites con el fin de establecer el modelo geológico que representa el subsuelo.
- Se deben analizar los datos de velocidad existentes en el área y verificar si existen capas de baja velocidad intercaladas con capas de alta velocidad.
- Diseñar un modelo en profundidad y analizar si existen variaciones laterales de velocidad, inversión vertical de velocidad y estimar de acuerdo al salto de falla cuales serían las áreas lateralmente que ponen en contacto capas de alta velocidad con capas de baja velocidad que pueden estar afectadas por el problema de sombra de falla.
- Con la ayuda de un software para modelamiento geofísico (Ej: Tesserat, Norsar) se genera un modelo sintético en tiempo (puede ser *zero offset*) teniendo en cuenta los datos de espesores, buzamiento de la falla, densidad y gradiente de velocidad de cada capa. Este modelo preliminar en tiempo, dará una idea de la respuesta que

tienen los reflectores para el modelo definido con el objetivo de interpretar si existe el problema de sombra de falla identificando distorsiones, levantamientos (pull up) o hundimientos (sag) de los reflectores en el área de análisis.

- Posteriormente es necesario realizar una migración (PSTM) de los datos obtenidos en tiempo, esto permitirá determinar las estructuras verdaderas presentes en el área o la posición de las falsas estructuras.
- Los resultados de los datos sintéticos permitirán identificar los principales factores que afectan el plano de falla entendiendo su origen con el fin de proponer la mejor estrategia de procesamiento según los datos para remover el problema de sombra de falla.
- Como se observó durante el desarrollo de este trabajo, durante el procesamiento en tiempo (PSTM) se pudo reducir el problema de sombra de falla, para esto es necesario tener correctamente las estáticas, filtros, deconvolución y evitar la recuperación excesiva de amplitudes.
- Finalmente, la migración de los datos en tiempo a profundidad (PSDM) permitirá reducir o eliminar el efecto de sombra de falla en las imágenes sísmicas. Para esto es indispensable al definir los perfiles de velocidad ser muy cuidadosos hasta lograr construir el modelo de velocidad adecuado que permita obtener la imagen sísmica que representa las condiciones reales del subsuelo.
- Es importante resaltar, que los resultados de la PSDM dependen de la buena relación señal/ruido que se tenga en el área. De igual manera, la PSDM no siempre se puede realizar debido a su costo, por tal razón es necesario analizar la relación costo-beneficio en el área donde se requiera aplicar, para estos casos se sugiere llegar hasta una migración en tiempo antes de apilar (PSTM).

9. Conclusiones

En este trabajo se simuló la respuesta sísmica de varios modelos que permitieron comprender el fenómeno de sombra de falla y sus causas.

El procedimiento incluyó la simulación de la respuesta sísmica de un modelo cuyas características fueron estimadas de la interpretación estructural y de la información de pozos.

Los modelos sintéticos generados representan una herramienta para el análisis de anomalías en las imágenes sísmicas producto de las variaciones de velocidad lateral y vertical en el área de análisis.

El efecto de sombra de falla se visualizó e interpretó a través de la generación de los modelos sintéticos en tiempo, variando el ángulo de buzamiento de la falla, el salto de falla y la velocidad entre las capas obteniendo geometrías que representan falsas estructuras como anticlinales (pull up) y sinclinales (push down) en todos los modelos.

De acuerdo a los modelos realizados:

- a. La generación de estas geometrías es más evidente cuando se tienen ángulos entre los 15° y 45° y saltos superiores a 90m.
- b. A mayor ángulo y menor salto de falla, como en el modelo de 75° y 60m la generación de distorsiones, pull up y pull down es mínima casi nula
- c. A menor ángulo y mayor salto de falla, el efecto de sombra de falla se evidencia con mayor claridad, este es el caso del modelo sintético de inclinación 15° y salto 300m
- d. La comparación entre los modelos sintéticos variando el salto de falla, pero conservando el mismo ángulo de inclinación permite concluir que a medida que el salto de falla incrementa la curvatura del pull up en el bloque yacente es mayor

generando una falsa estructura anticlinal. El trazo de la falla se puede definir con mayor claridad en los modelos con ángulos de 60 ° y 75°.

La generación de un modelo sintético en tiempo, se sugiere como una metodología rápida y eficaz en el análisis de la existencia del efecto de sombra de falla en zonas en donde por efecto de las variaciones de velocidad vertical y lateral se tenga incertidumbre de la disposición estructural.

Teóricamente, se plantea como solución al problema de sombra de falla, la migración a profundidad (PSDM) de los datos sísmicos. Se aplicó esta técnica de procesamiento con el fin de analizar el flujo y verificar el mejoramiento de la imagen sísmica sobre una línea sísmica perteneciente a la cuenca de los llanos orientales, provincia del Casanare dando como resultado una reducción del efecto sobre la imagen.

Durante el desarrollo del flujo de trabajo sobre los datos reales se verificó que en la línea se presentaban geometrías producto de una variación de velocidad vertical y lateral que mejoraron inicialmente con el procesamiento en tiempo (PSTM) realizado en el 2015 en comparación con la línea procesada en el 2005.

Se comprobó que, a nivel de procesamiento en tiempo, existen factores diferentes a las variaciones de velocidad, que inciden en la generación de este tipo de falsas estructuras como son la falta de migración o migración inadecuada y la aplicación de estáticas imprecisas.

La migración en tiempo (PSTM) no resolvió el problema de sombra de falla por tal razón se hizo necesario realizar la migración a profundidad (PSDM) mediante la cual se obtuvo una imagen sísmica de mejor calidad en donde los reflectores se ven más planos y el trazo de la falla está más definido.

Los análisis realizados, permitieron identificar que en el área de estudio en la Cuenca de los Llanos Orientales, específicamente en el área del Casanare, el efecto de sombra de falla se debe principalmente a la inversión de velocidad presente y al ángulo de inclinación de la falla en comparación con el análisis realizado para los resultados de los datos sintéticos en donde además de los anteriores factores se comprobó que el salto de

falla y la posición del plano de falla es el otro factor que hace que se genere el problema de sombra de falla.

Como resultado se logró modificar el campo de velocidad en profundidad y crear un modelo detallado para la migración PSDM. En la nueva sección migrada fueron corregidas las distorsiones bajo la falla, generando una imagen en profundidad confiable.

La PSDM a pesar de ser la solución al problema de sombra de falla, no siempre se puede realizar debido a su costo por tal razón esto es necesario analizar la relación costo-beneficio en el área donde se requiera aplicar.

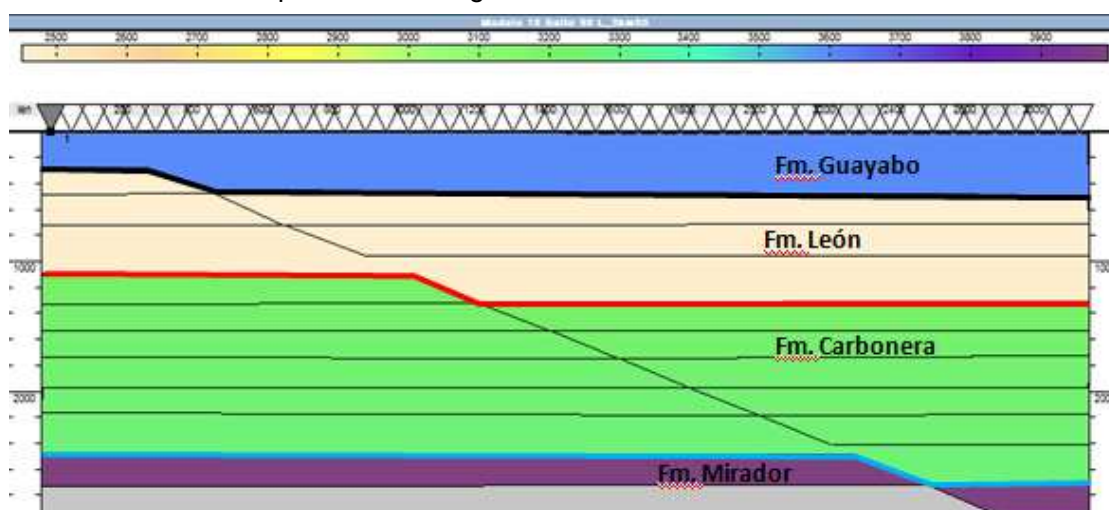
Este trabajo se plantea como una herramienta para el análisis del problema de sombra de falla con el fin de evitar que se interpreten falsas estructuras como prospectivas en el área de estudio. Es importante destacar que los resultados de la metodología dependen de la disponibilidad de los datos sísmicos y de pozo y del conocimiento geológico que se tenga del área de análisis. Además, la solución al efecto de sombra de falla será diferente para cada área.

Anexo A. Modelos Sintéticos.

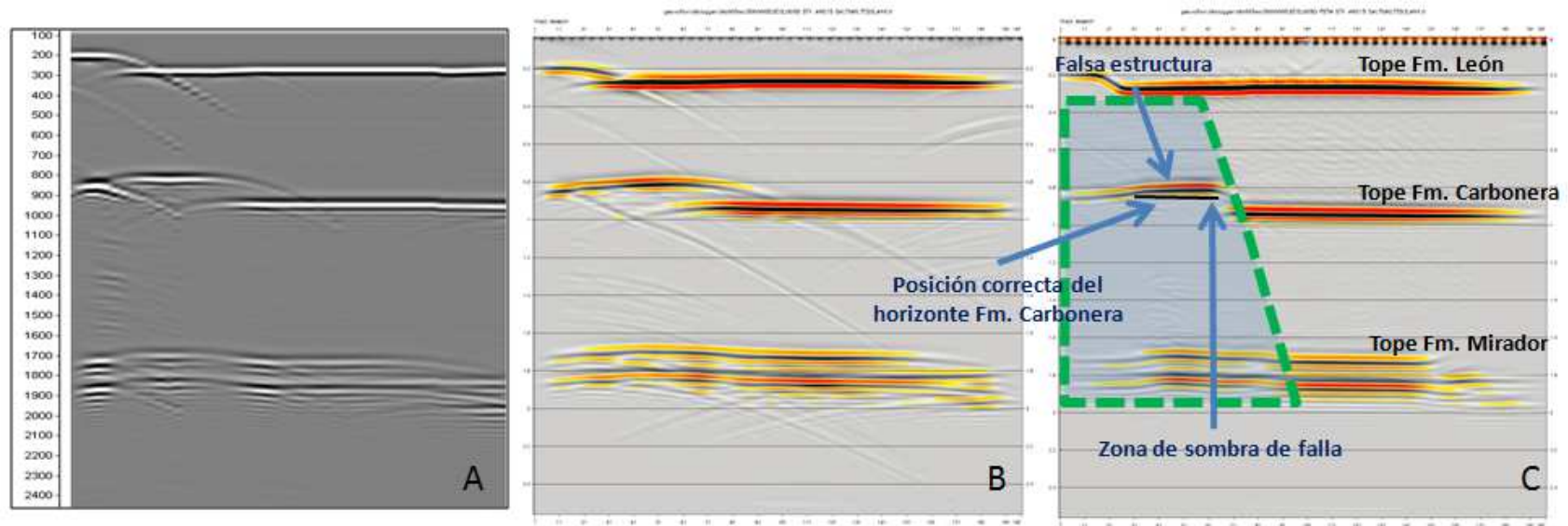
MODELO SINTETICO ANGULO 15° SALTO DE FALLA 60m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=15^\circ$ vs Salto Falla=60m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guaya bo	1	3600		2037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
	3	2464.91		
	4	2472.36		
	5	2479.81		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
	5	3251.35		
	6	3256.90		
	7	3262.46		
	8	3268.01		
	9	3273.56		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348
	2	4036.74		

Datos de velocidad interválca, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 15° salto de falla 60m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 15° y salto de falla 60m



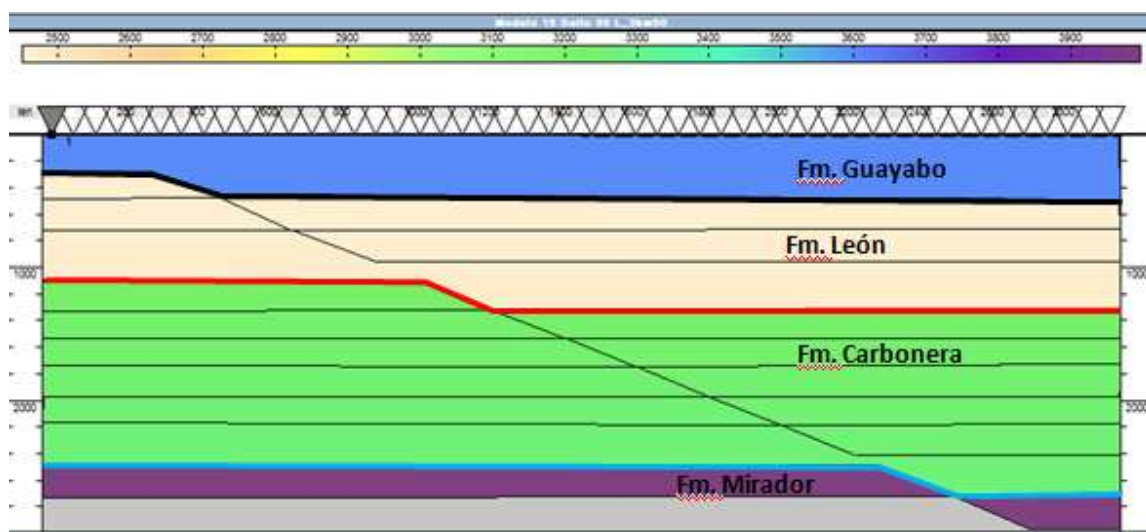
Modelo sintético para 15° y salto de falla de 60m.

- A. Sección sísmica zero offset. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla.

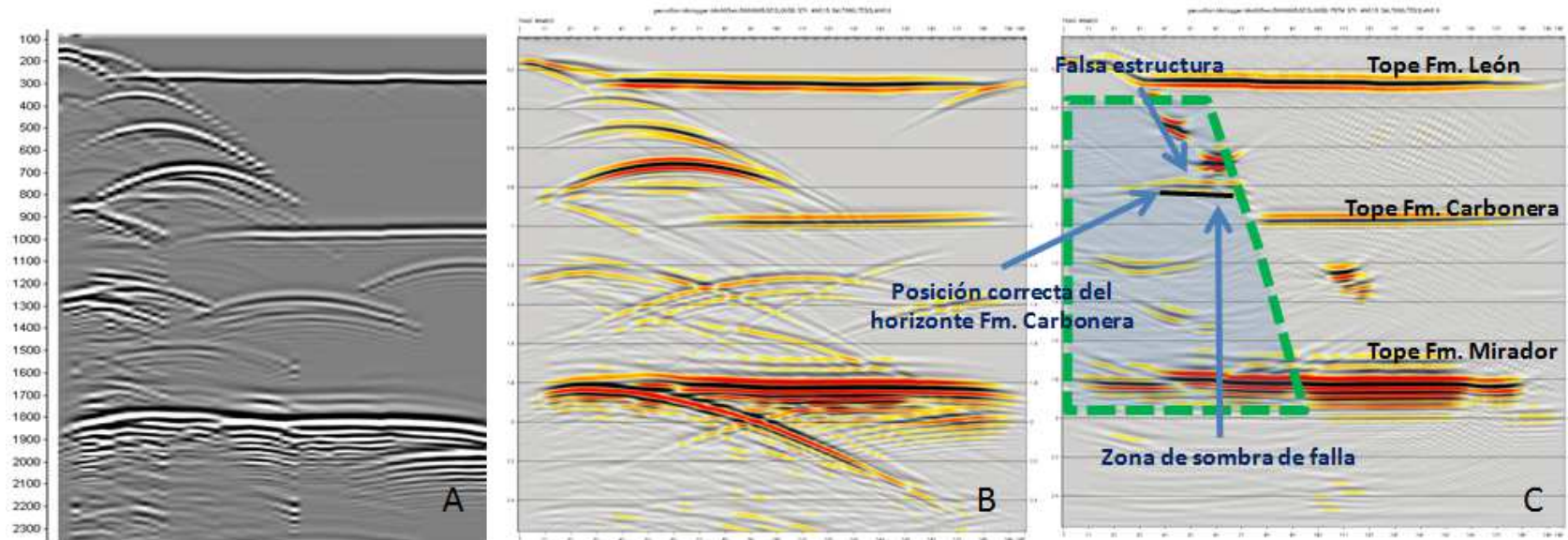
MODELO SINTETICO ANGULO 15° SALTO DE FALLA 90m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=15^\circ$ vs Salto Falla=90m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
	3	2464.91		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
	5	3251.35		
	6	3256.90		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 15° salto de falla 90m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 15° y salto de falla 90m



Modelo geológico de 15° y salto de falla 90m

A. Sección sísmica zero offset. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.

Se resalta la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

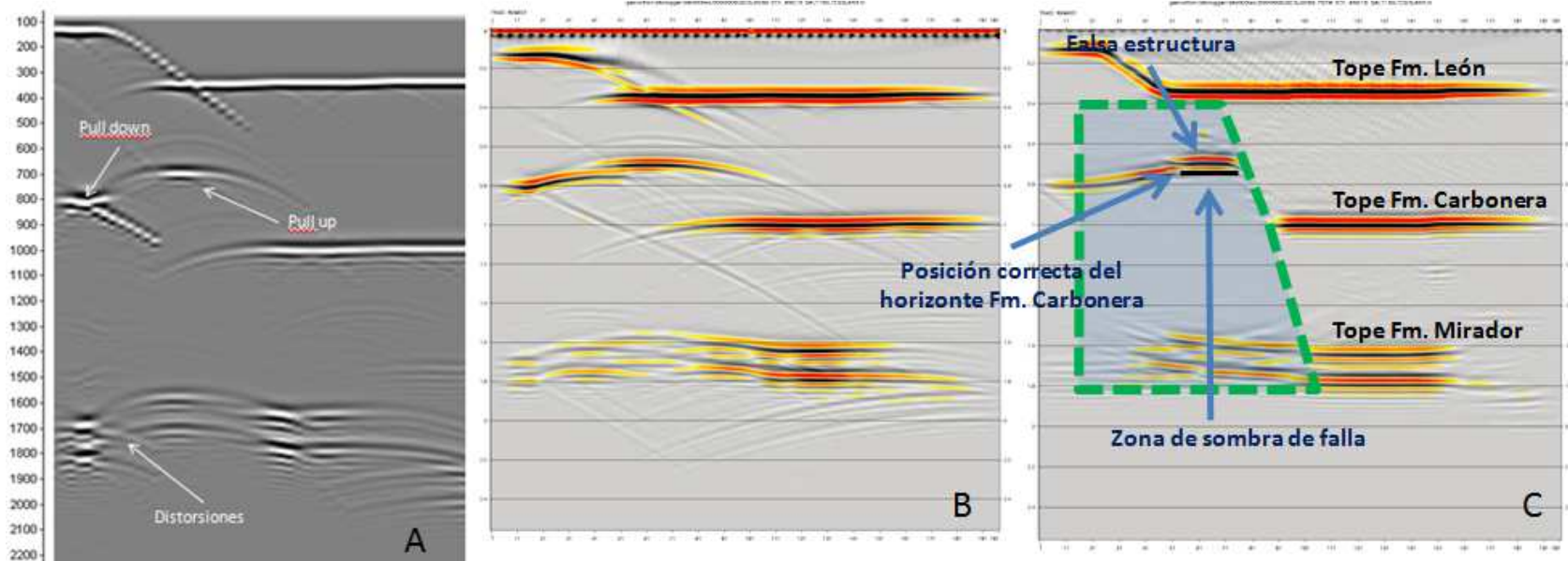
MODELO SINTETICO ANGULO 15° SALTO DE FALLA 150m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=15^\circ$ vs Salto Falla=150m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 15° salto de falla 150m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 15° y salto de falla 150m



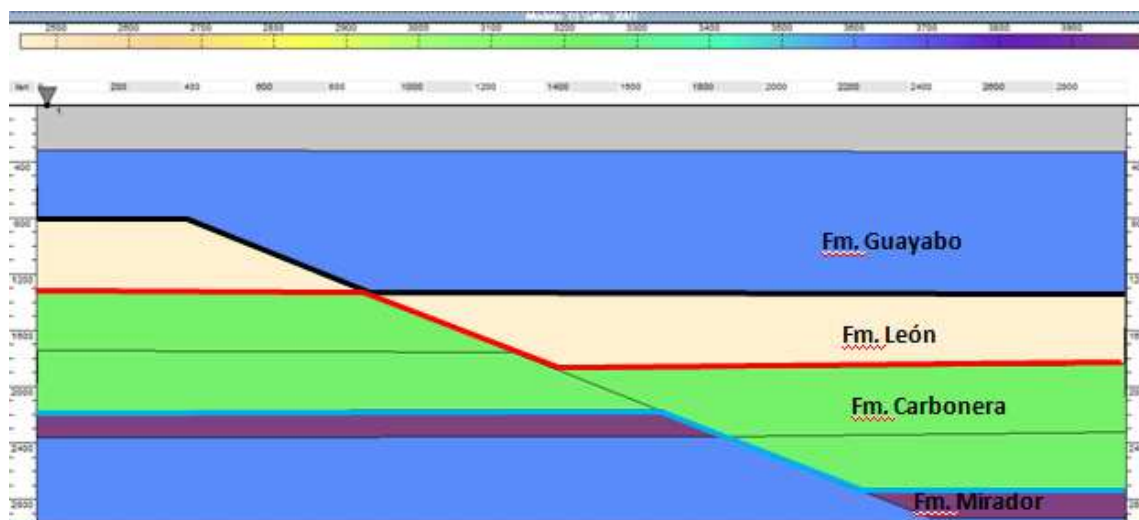
Modelo geológico de 15° y salto de falla 150m.

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

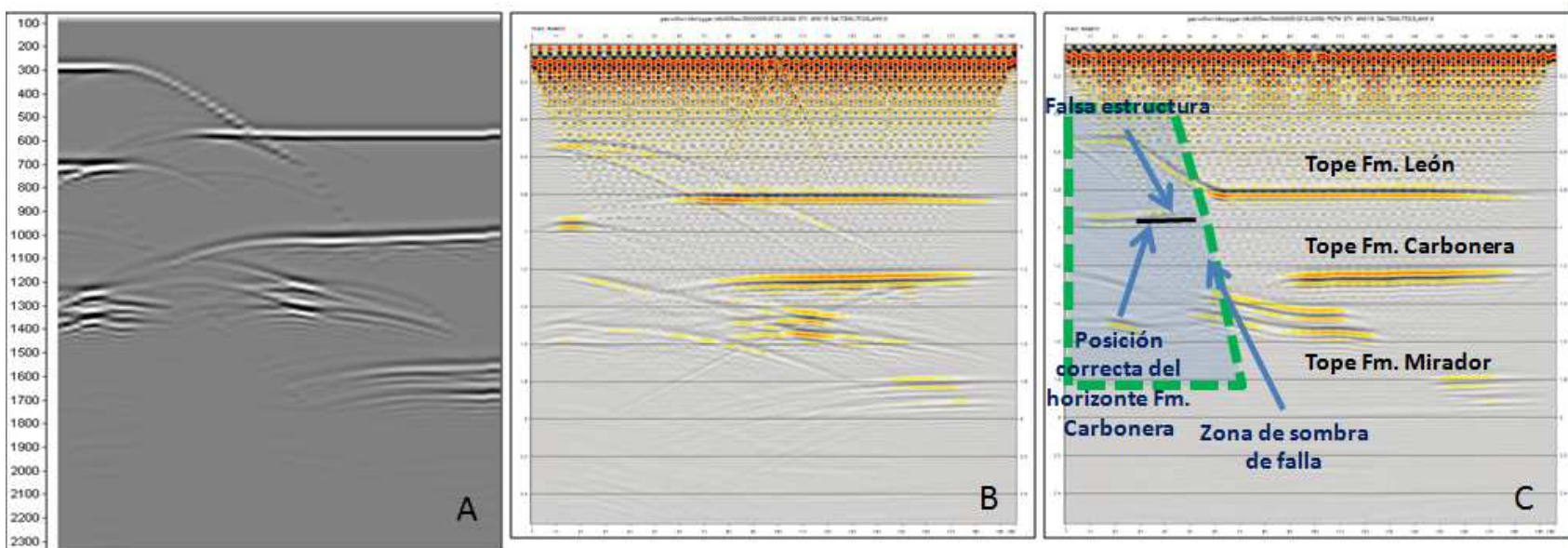
MODELO SINTETICO ANGULO 15° SALTO DE FALLA 300m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=15^\circ$ vs Salto Falla=300m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad intervállica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 15° salto de falla 300m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 15° y salto de falla 300m



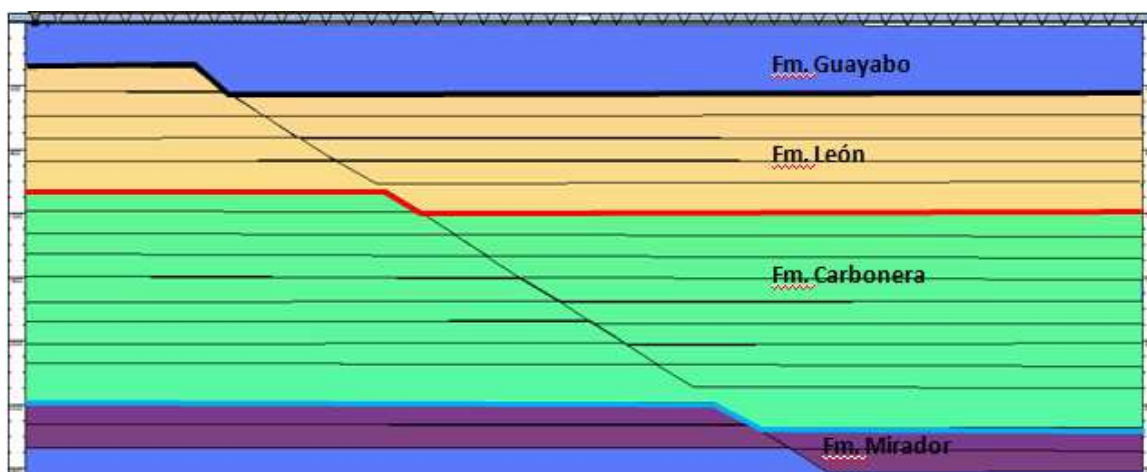
Modelo geológico de 15° y salto de falla 300m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

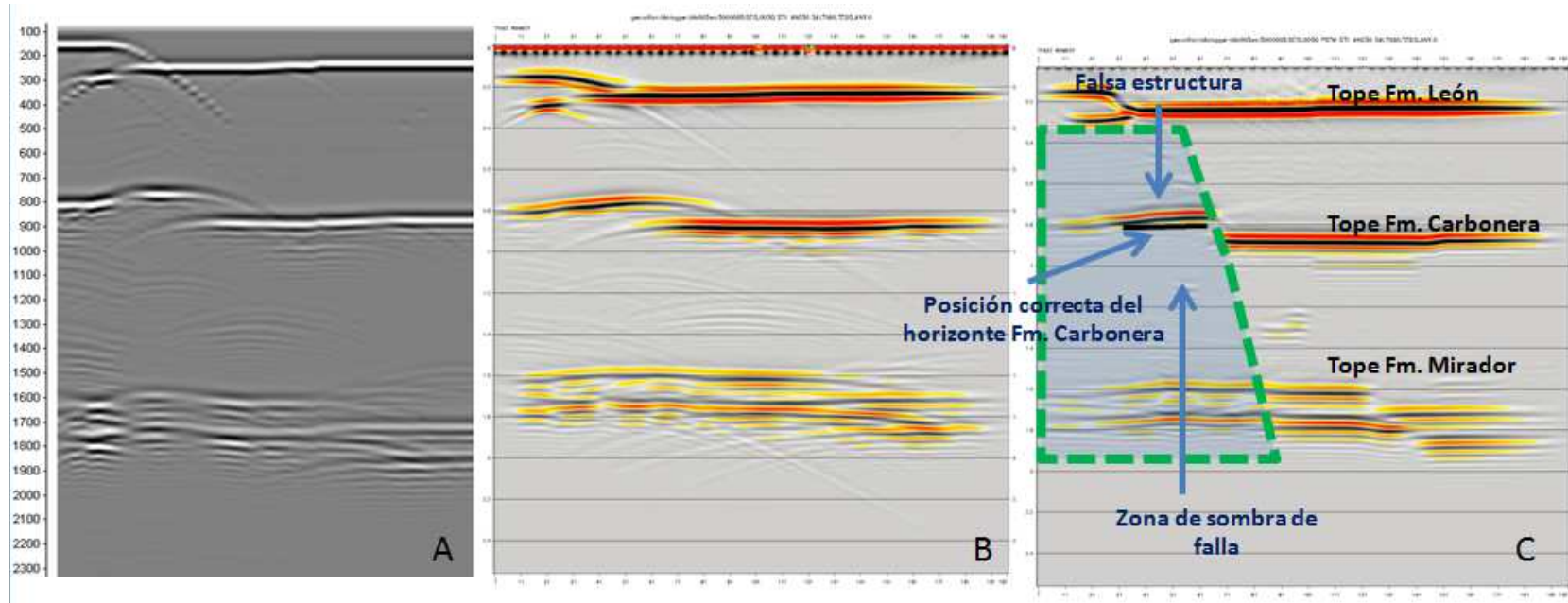
MODELO SINTETICO ANGULO 30° SALTO DE FALLA 60m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=30$ vs Salto Falla=60m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
	3	2464.91		
	4	2472.36		
	5	2479.81		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
	5	3251.35		
	6	3256.90		
	7	3262.46		
	8	3268.01		
	9	3273.56		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348
	2	4036.74		

Datos de velocidad intervállica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 30° salto de falla 60m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 30° y salto de falla 60m



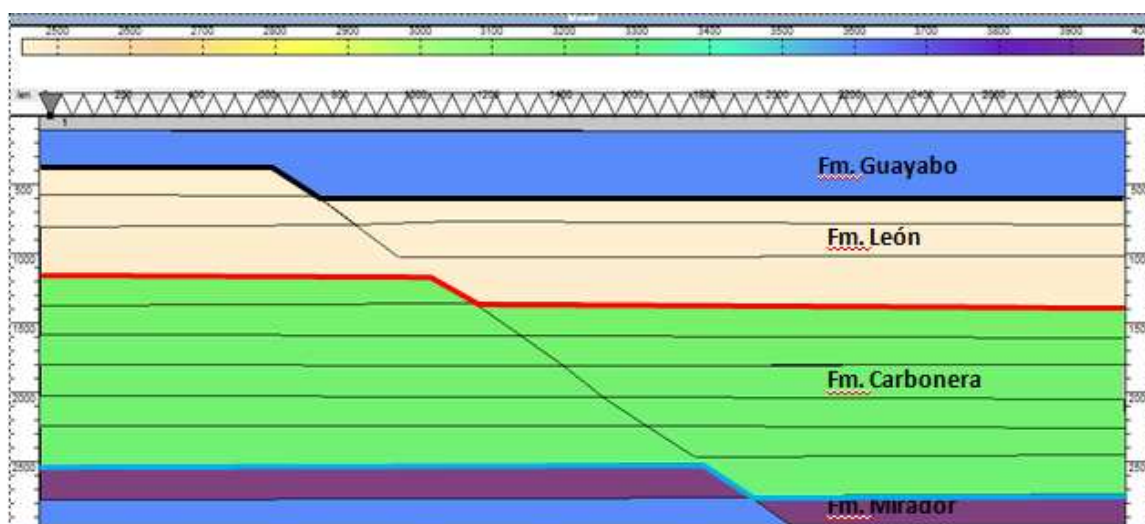
Modelo geológico de 30° y salto de falla 60m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

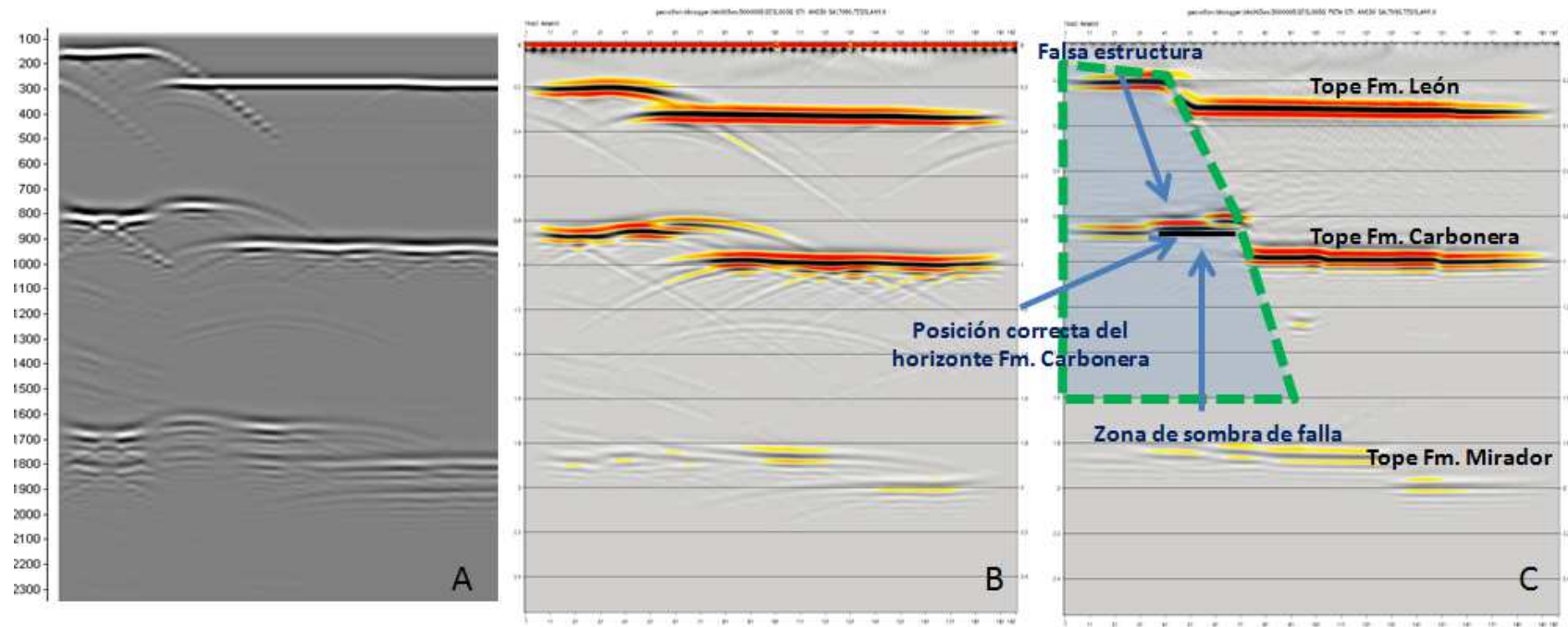
MODELO SINTETICO ANGULO 30° SALTO DE FALLA 90m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=30$ vs Salto Falla=90m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
	3	2464.91		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
	5	3251.35		
	6	3256.90		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 30° salto de falla 90m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 30° y salto de falla 90m



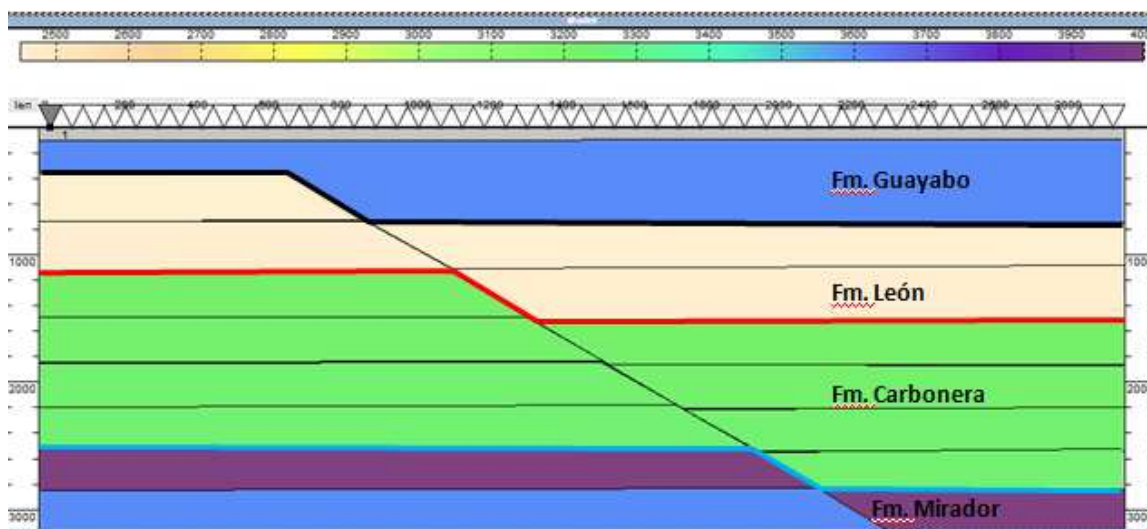
Modelo geológico de 30° y salto de falla 90m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

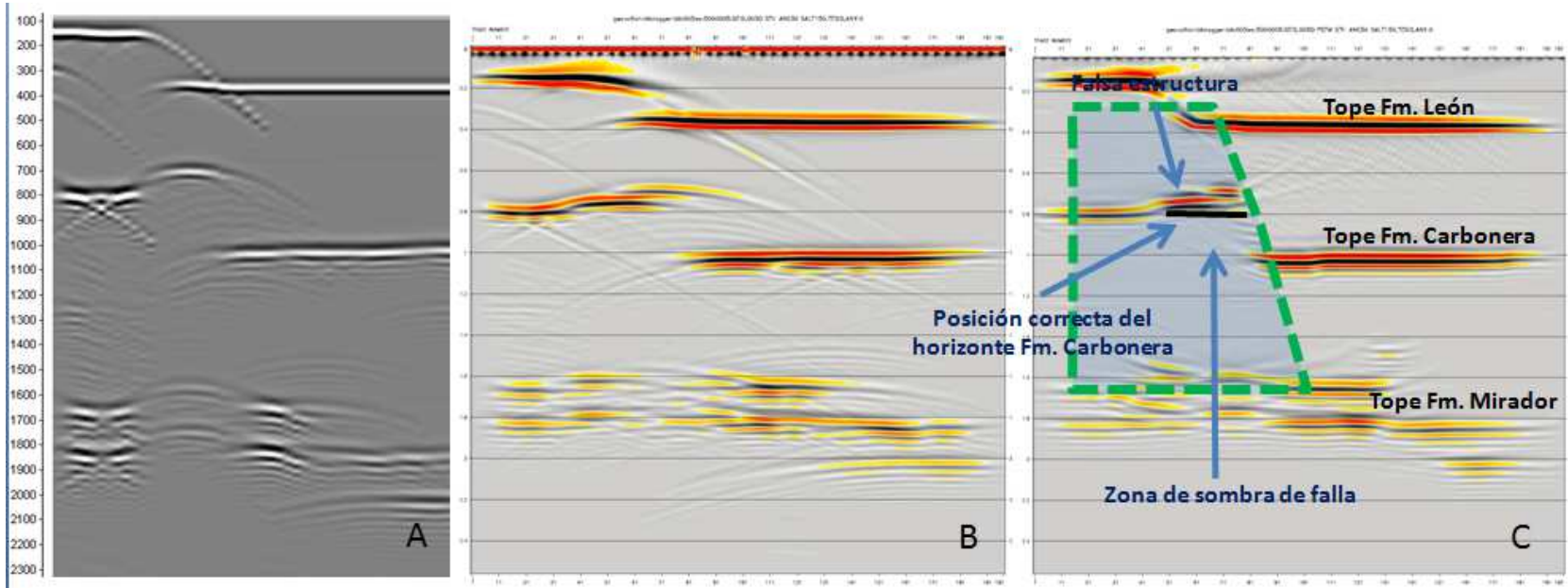
MODELO SINTETICO ANGULO 30° SALTO DE FALLA 150m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=30^\circ$ vs Salto Falla=150m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 30° salto de falla 150m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 30° y salto de falla 150m



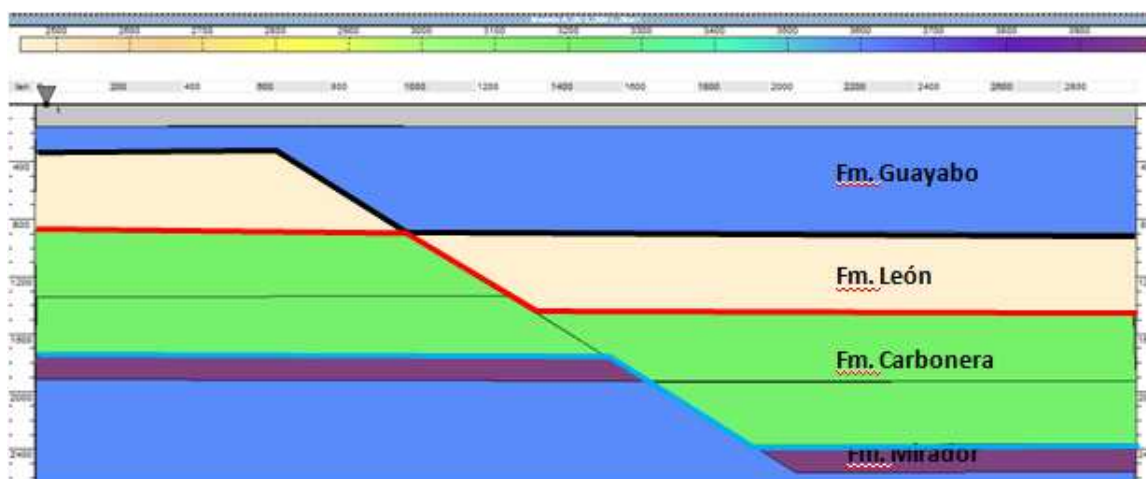
Modelo geológico de 30° y salto de falla 150m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

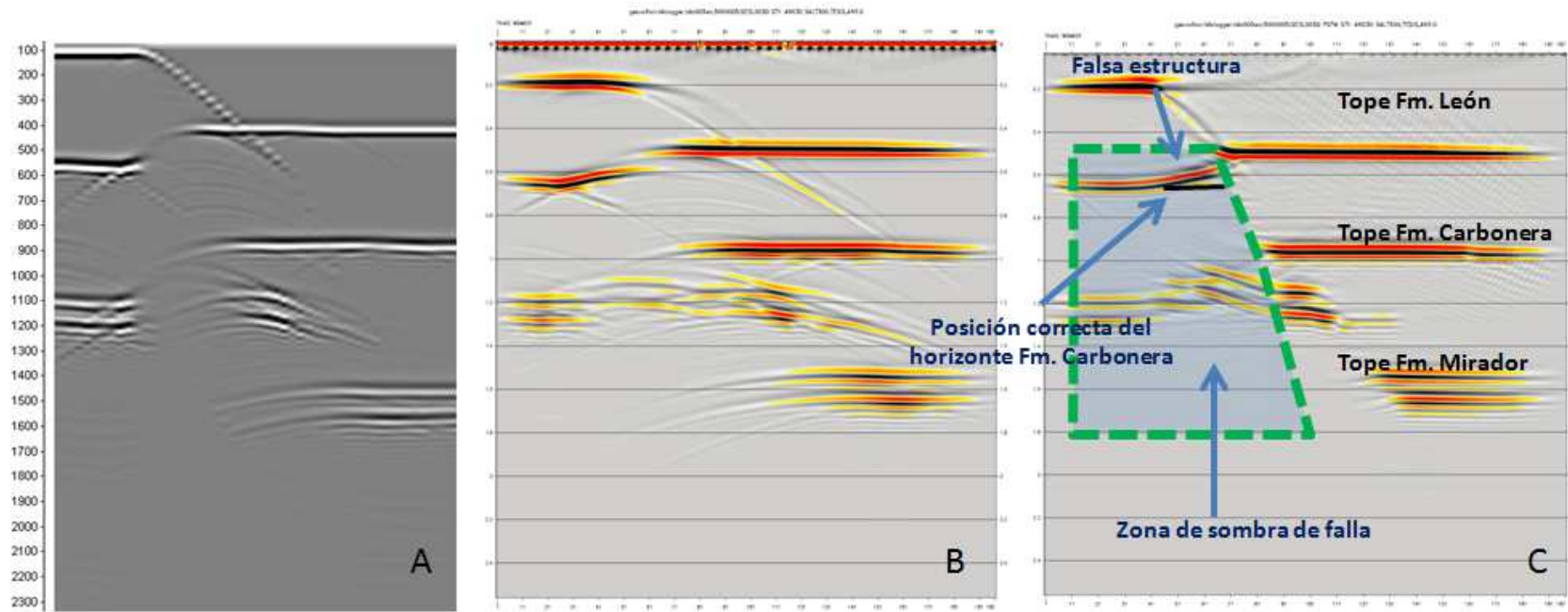
MODELO SINTETICO ANGULO 30° SALTO DE FALLA 300m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=30$ vs Salto Falla=300m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 30° salto de falla 300m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 30° y salto de falla 300m



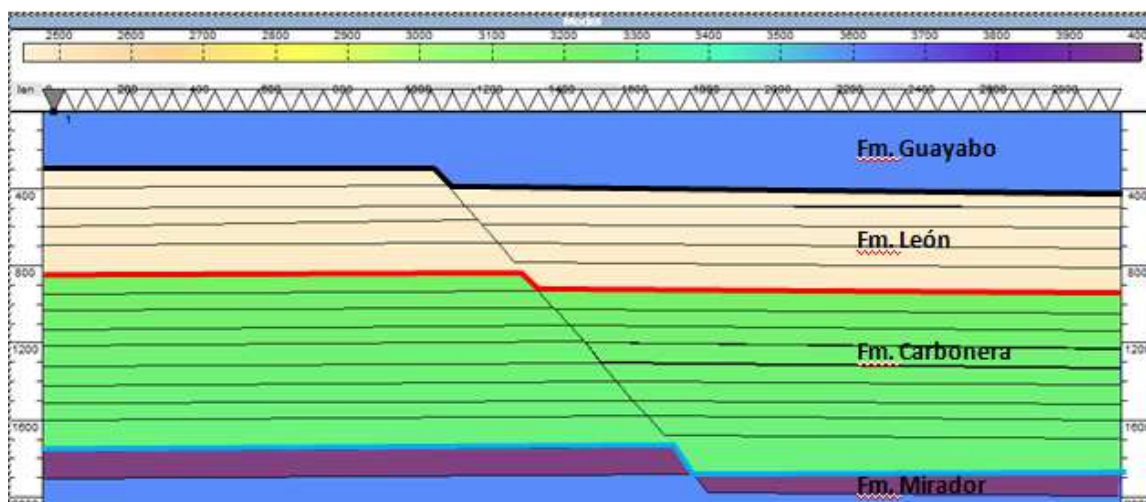
Modelo geológico de 30° y salto de falla 300m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

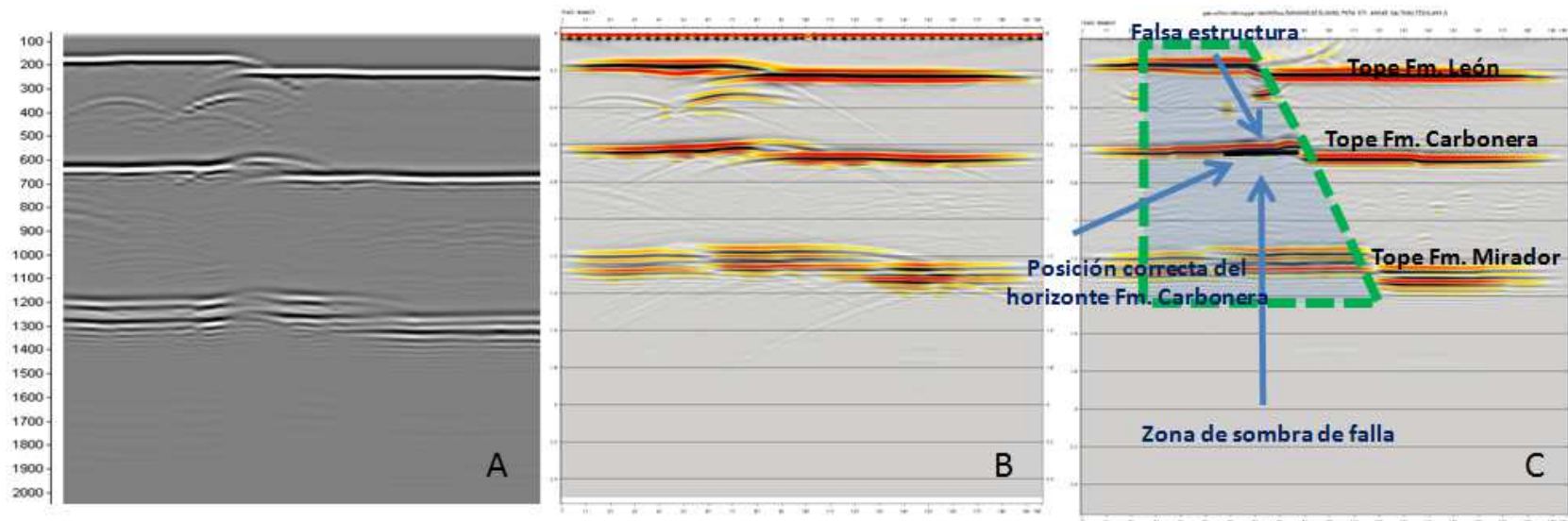
MODELO SINTETICO ANGULO 45° SALTO DE FALLA 60m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=45^\circ$ vs Salto Falla=60m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ((m/s)/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
	3	2464.91		
	4	2472.36		
	5	2479.81		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
	5	3251.35		
	6	3256.90		
	7	3262.46		
	8	3268.01		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348
	2	4036.74		

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 45° salto de falla 60m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 45° y salto de falla 60m



Modelo geológico de 45° y salto de falla 60m

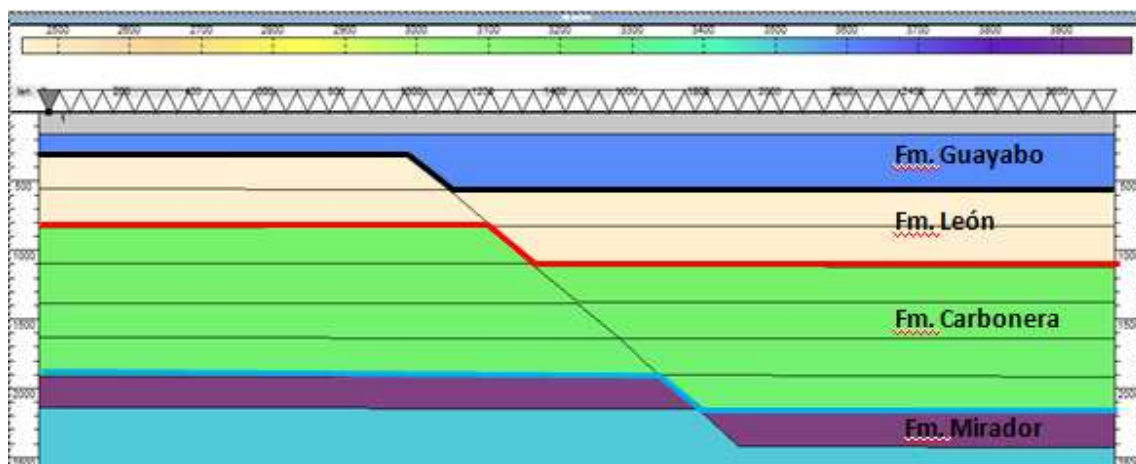
A. Sección sísmica zero offset. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.

Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

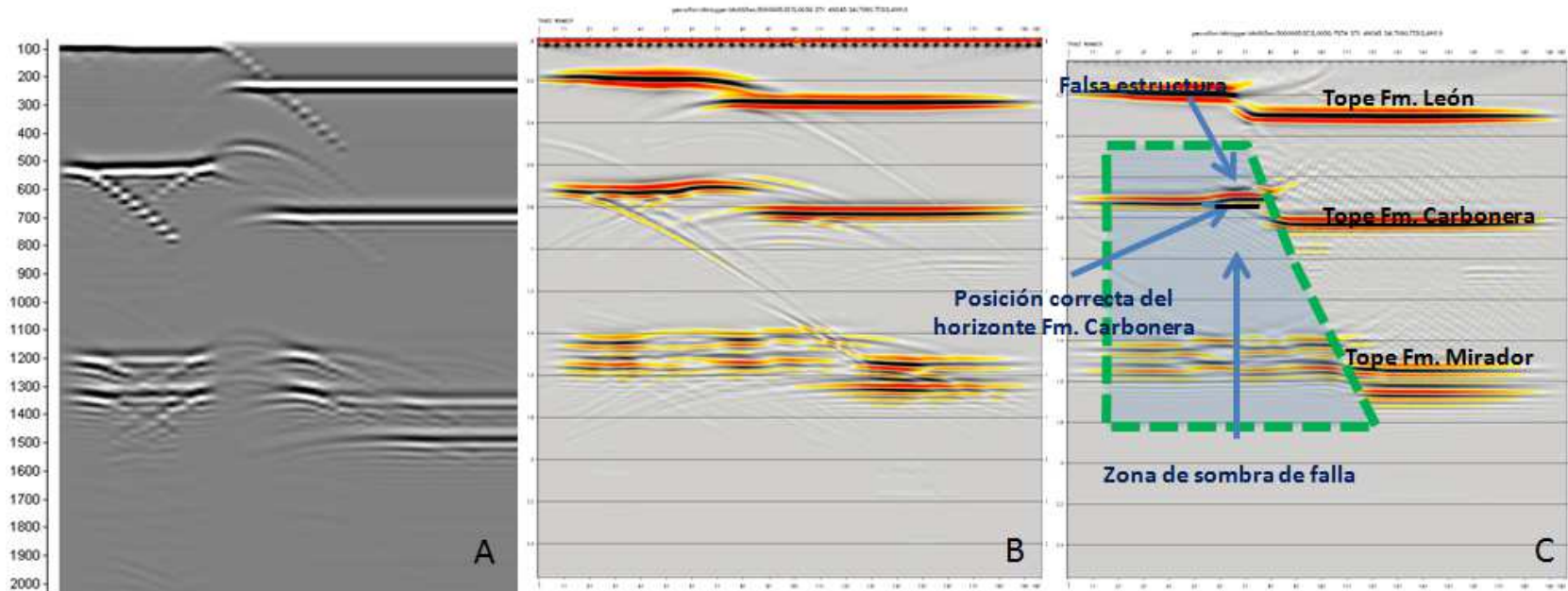
MODELO SINTETICO ANGULO 45° SALTO DE FALLA 90m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=45^\circ$ vs Salto Falla=90m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
	3	2464.91		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
	5	3251.35		
	6	3256.90		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 45° salto de falla 90m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 45° y salto de falla 90m



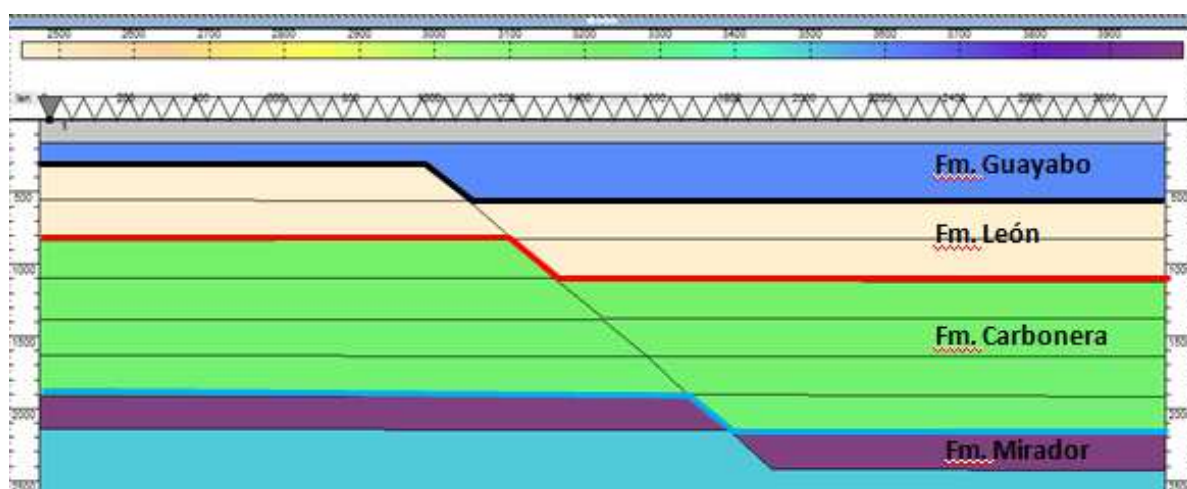
Modelo geológico de 45° y salto de falla 90m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

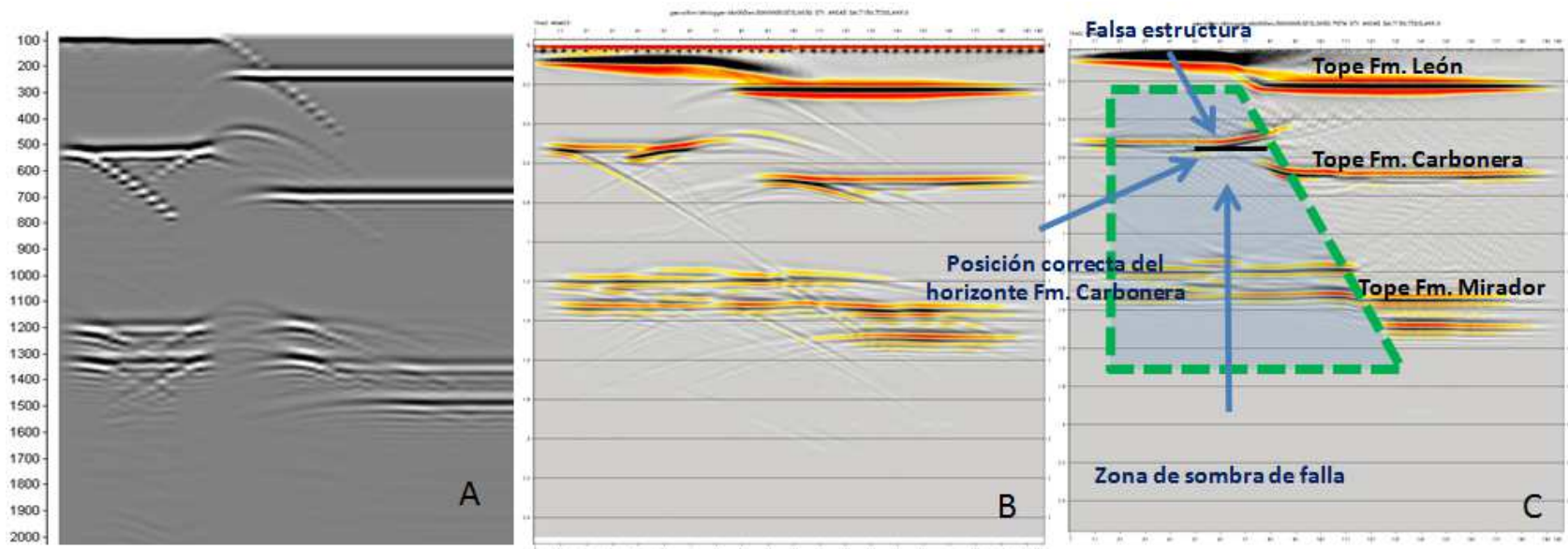
MODELO SINTETICO ANGULO 45° SALTO DE FALLA 150m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=45^\circ$ vs Salto Falla=150m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ((m/s)/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 45° salto de falla 150m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 45° y salto de falla 150m



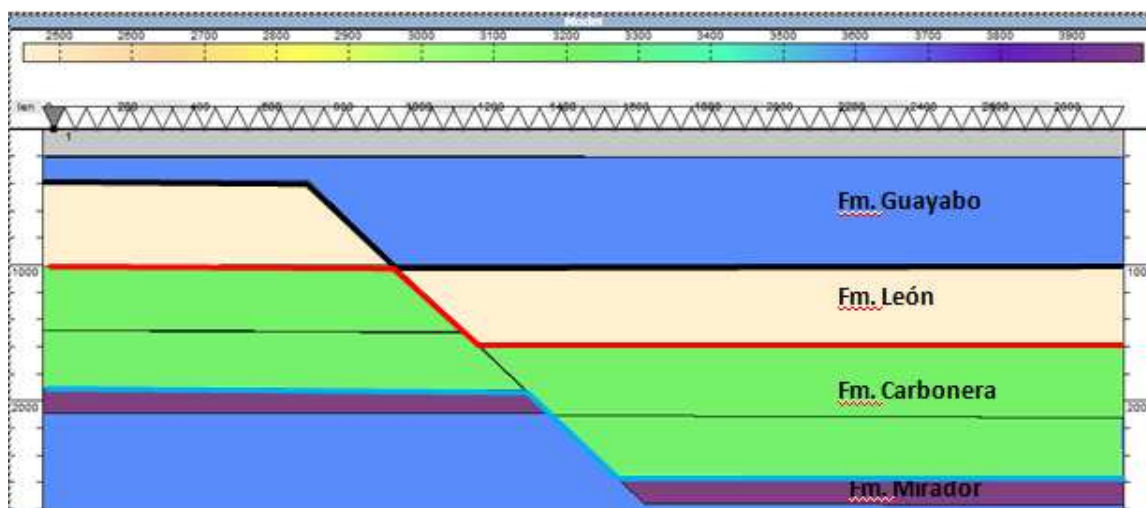
Modelo geológico de 45° y salto de falla 150m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

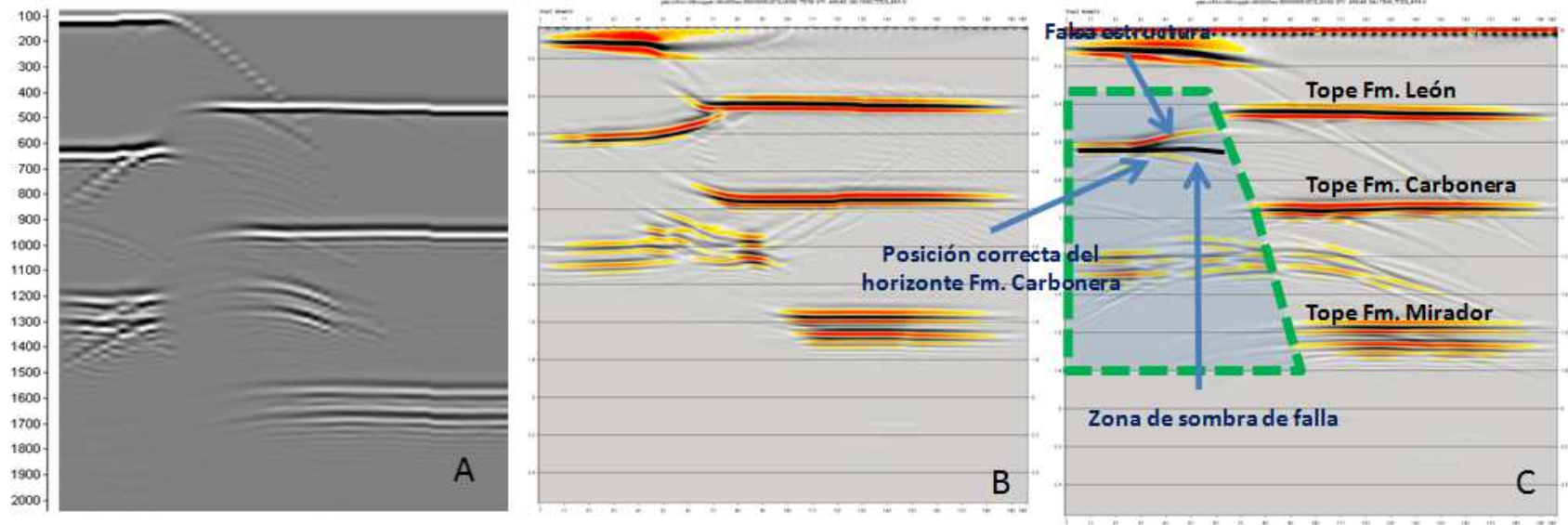
MODELO SINTETICO ANGULO 45° SALTO DE FALLA 300m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=45^\circ$ vs Salto Falla=300m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ((m/s)/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 45° salto de falla 300m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 45° y salto de falla 300m



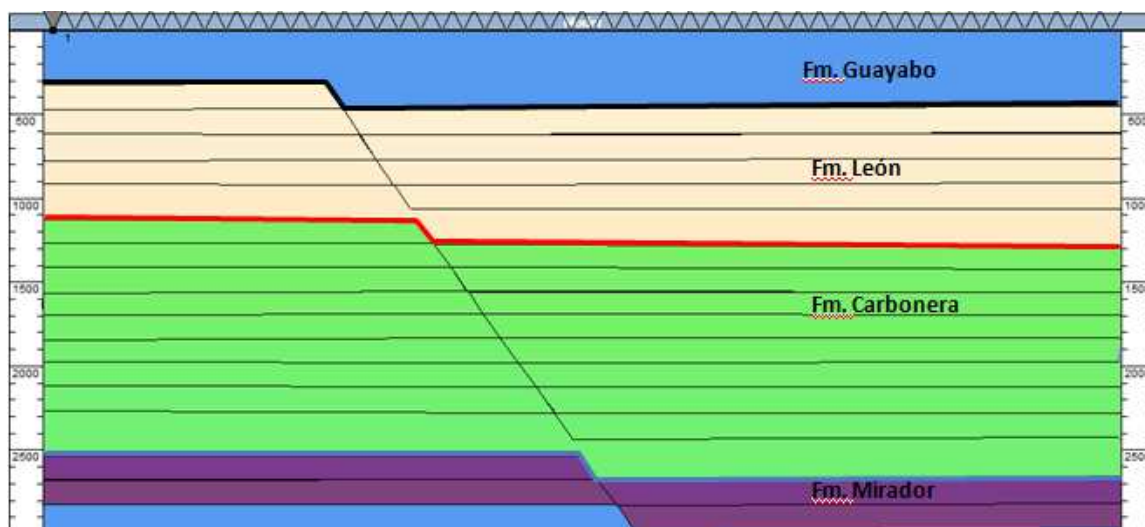
Modelo geológico de 45° y salto de falla 300m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

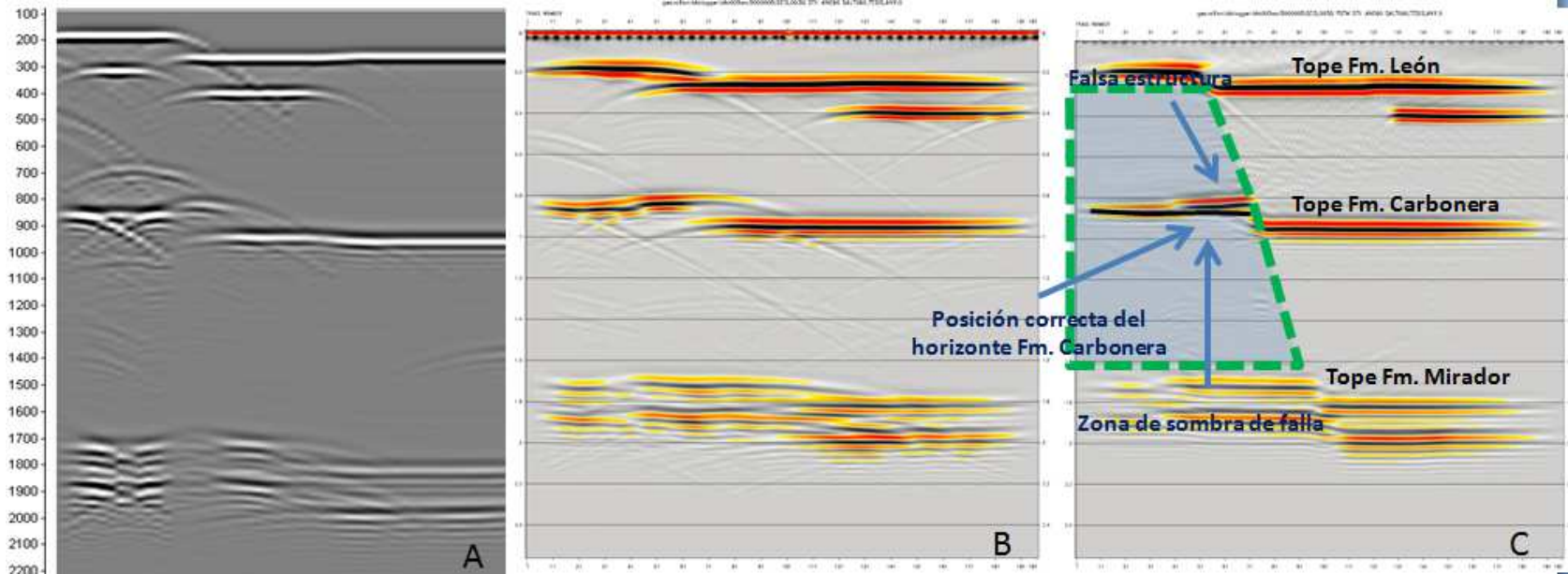
MODELO SINTETICO ANGULO 60° SALTO DE FALLA 60m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=60^\circ$ vs Salto Falla=60m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
	3	2464.91		
	4	2472.36		
	5	2479.81		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
	5	3251.35		
	6	3256.90		
	7	3262.46		
	8	3268.01		
	9	3273.56		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348
	2	4036.74		

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 60° salto de falla 60m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 60° y salto de falla 60m



Modelo geológico de 60° y salto de falla 60m

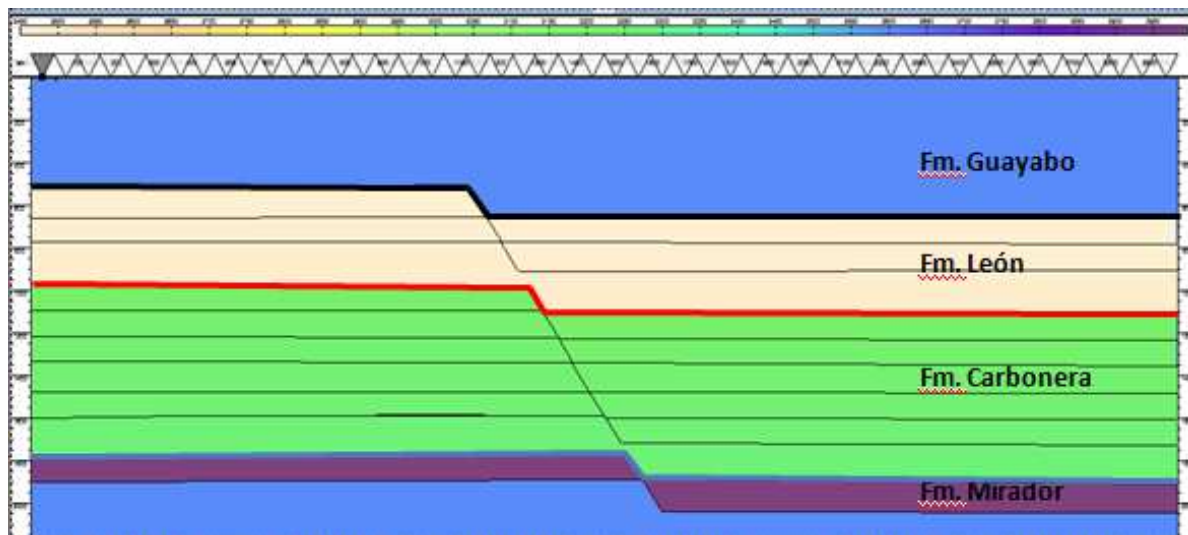
A. Sección sísmica zero offset. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.

Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

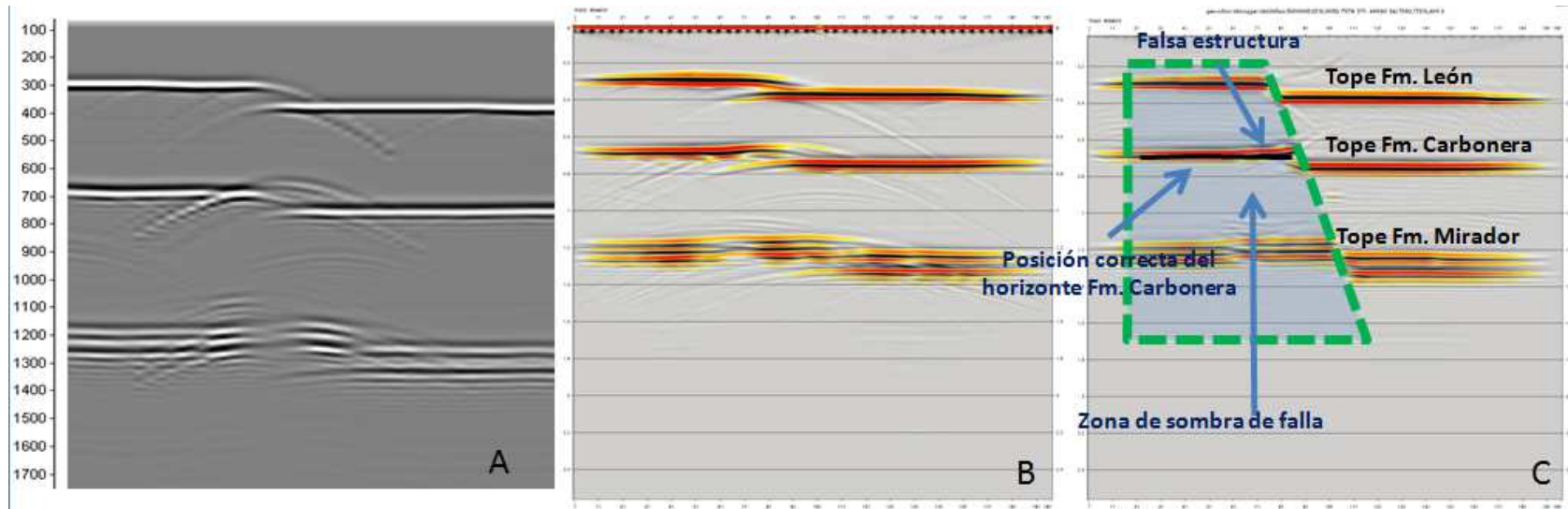
MODELO SINTETICO ANGULO 60° SALTO DE FALLA 90m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=60^\circ$ vs Salto Falla=90m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guaya bo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
	3	2464.91		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
	5	3251.35		
	6	3256.90		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad intervállica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 60° salto de falla 90m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 60° y salto de falla 90m



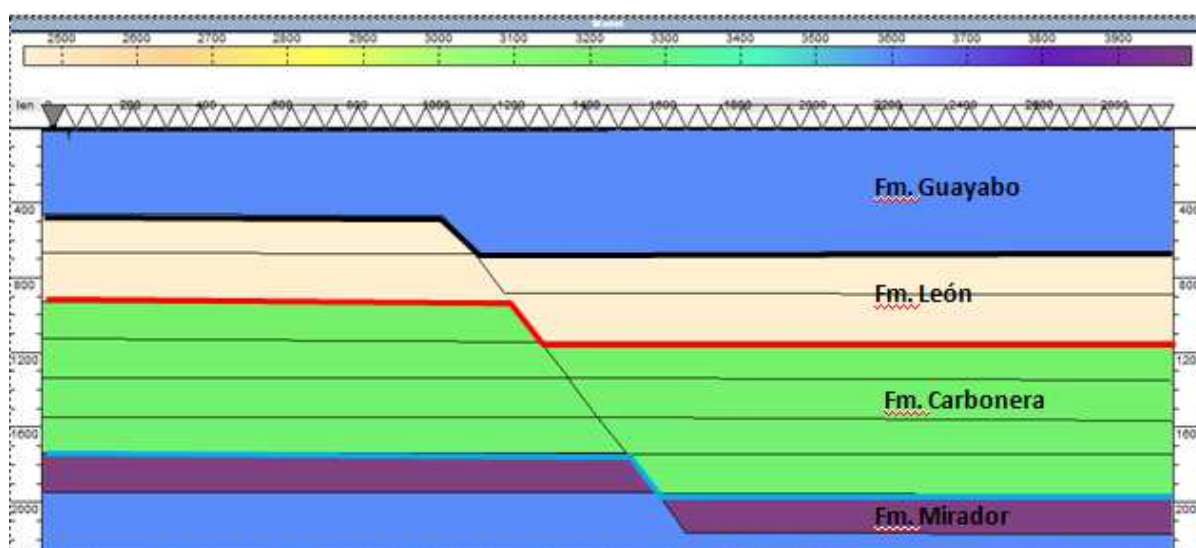
Modelo geológico de 60° y salto de falla 90m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

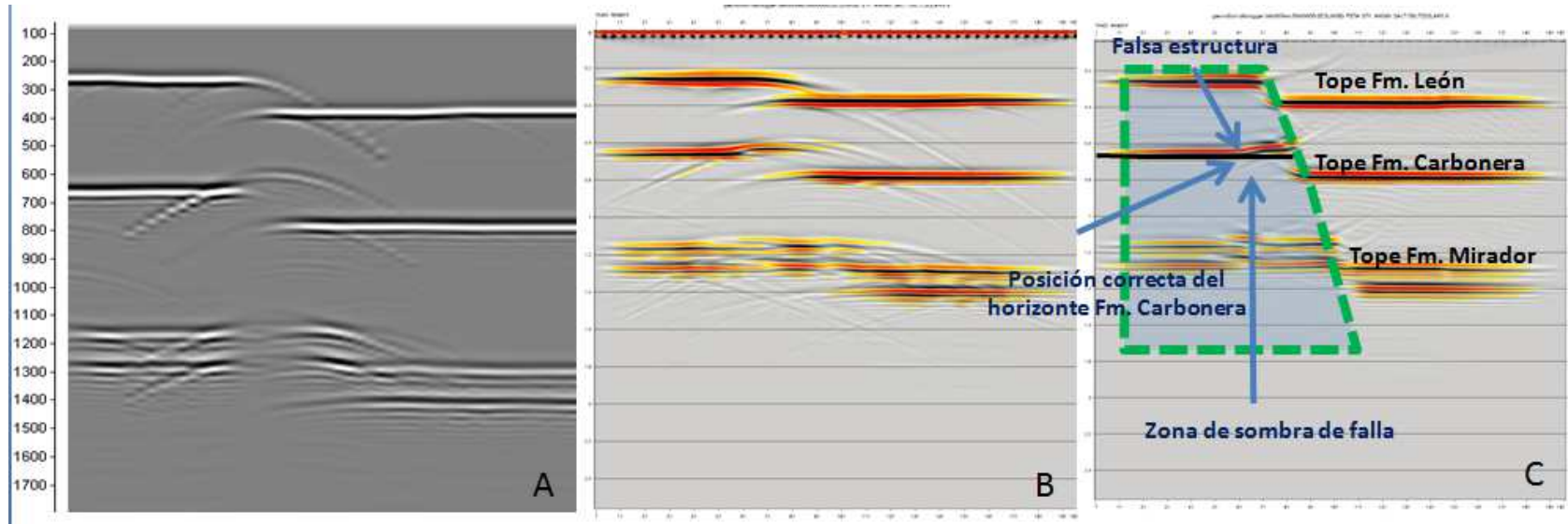
MODELO SINTETICO ANGULO 60° SALTO DE FALLA 150m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=60^\circ$ vs Salto Falla=150m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 60° salto de falla 150m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 60° y salto de falla 150m



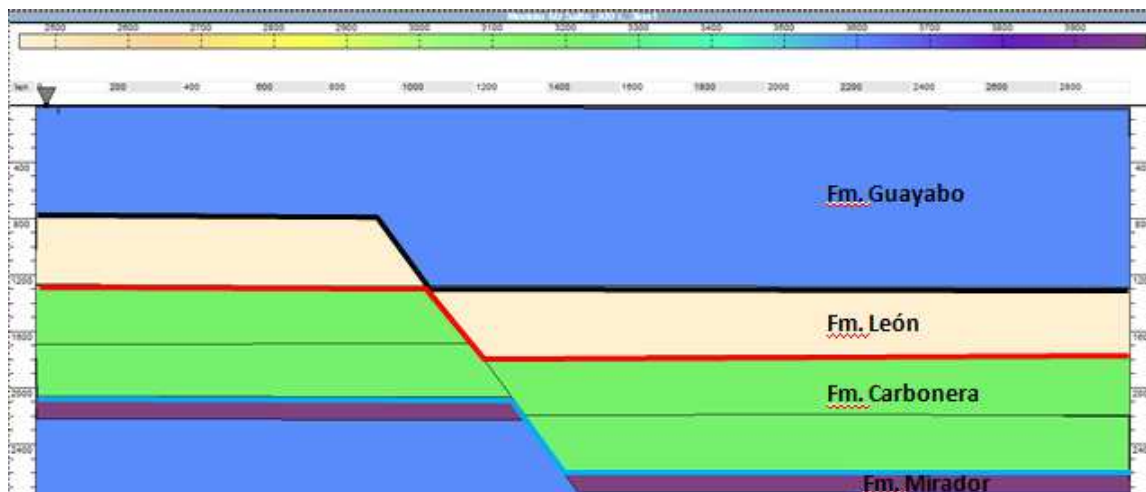
Modelo geológico de 60° y salto de falla 150m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

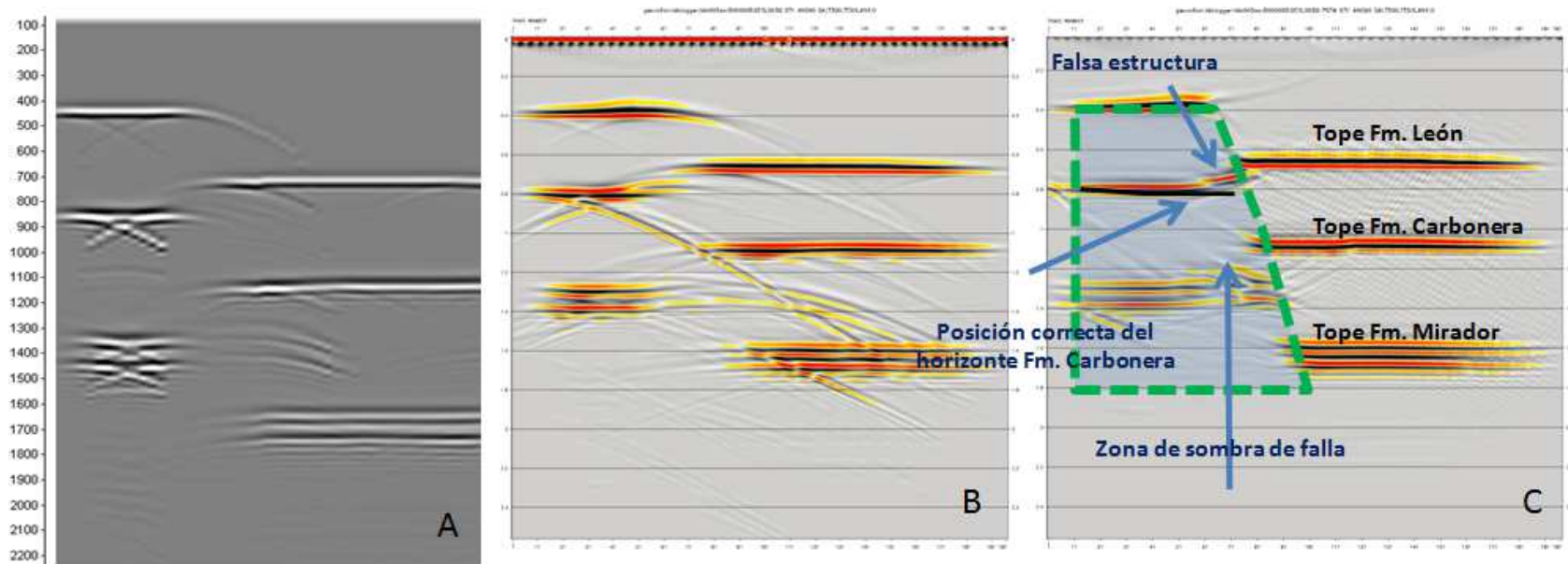
MODELO SINTETICO ANGULO 60° SALTO DE FALLA 300m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=60$ vs Salto Falla=300m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad intervállica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 60° salto de falla 300m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 60° y salto de falla 300m



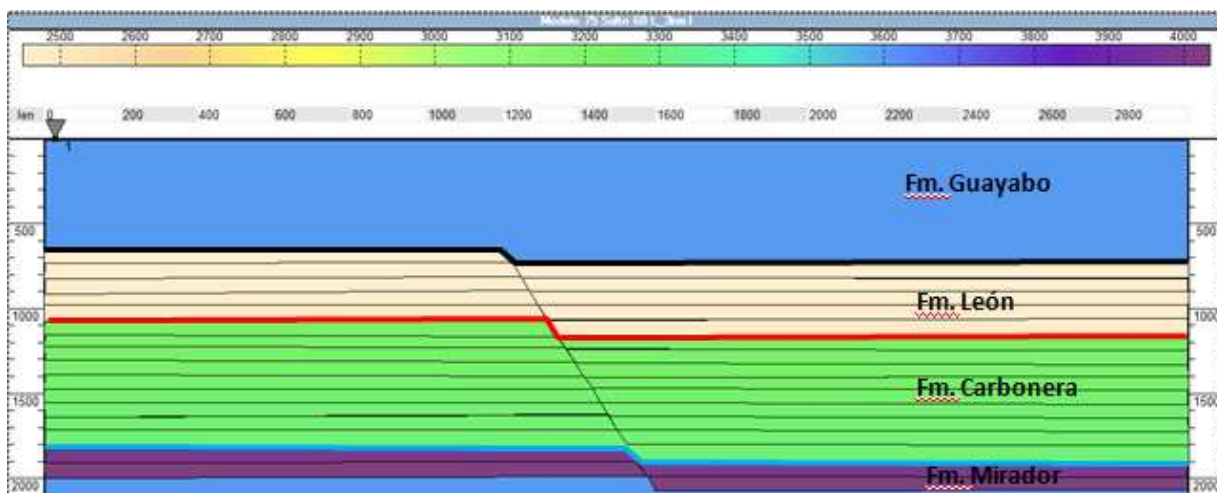
Modelo geológico de 60° y salto de falla 300m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

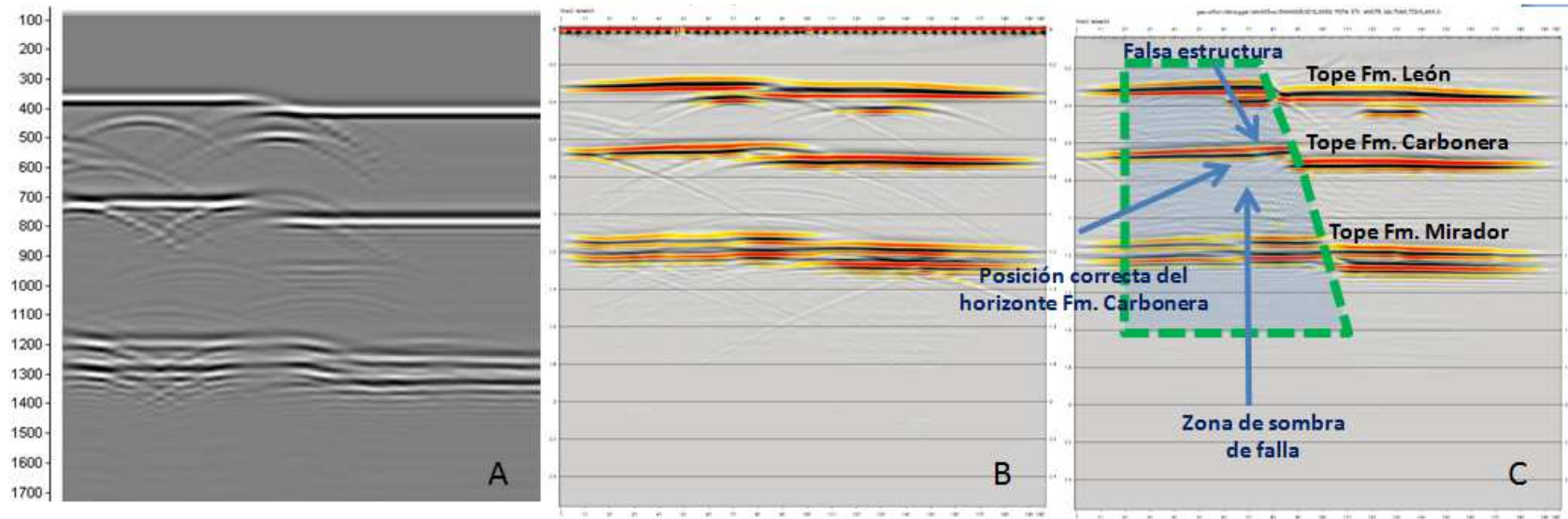
MODELO SINTETICO ANGULO 75° SALTO DE FALLA 60m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=75^\circ$ vs Salto Falla=60m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
	3	2464.91		
	4	2472.36		
	5	2479.81		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
	5	3251.35		
	6	3256.90		
	7	3262.46		
	8	3268.01		
	9	3273.56		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348
	2	4036.74		

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 75° salto de falla 60m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 75° y salto de falla 60m



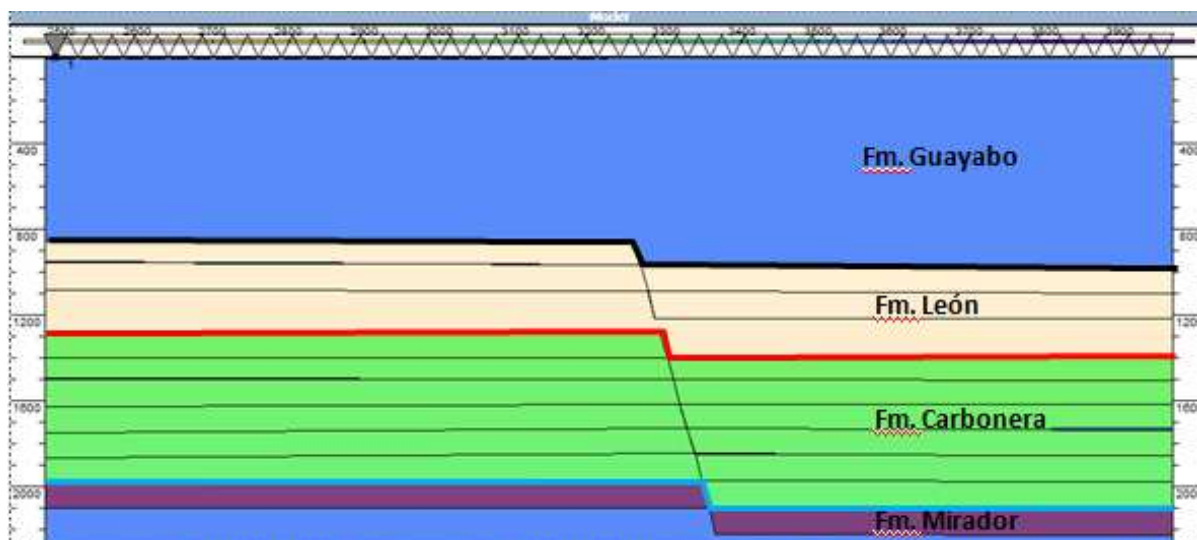
Modelo geológico de 75° y salto de falla 60m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

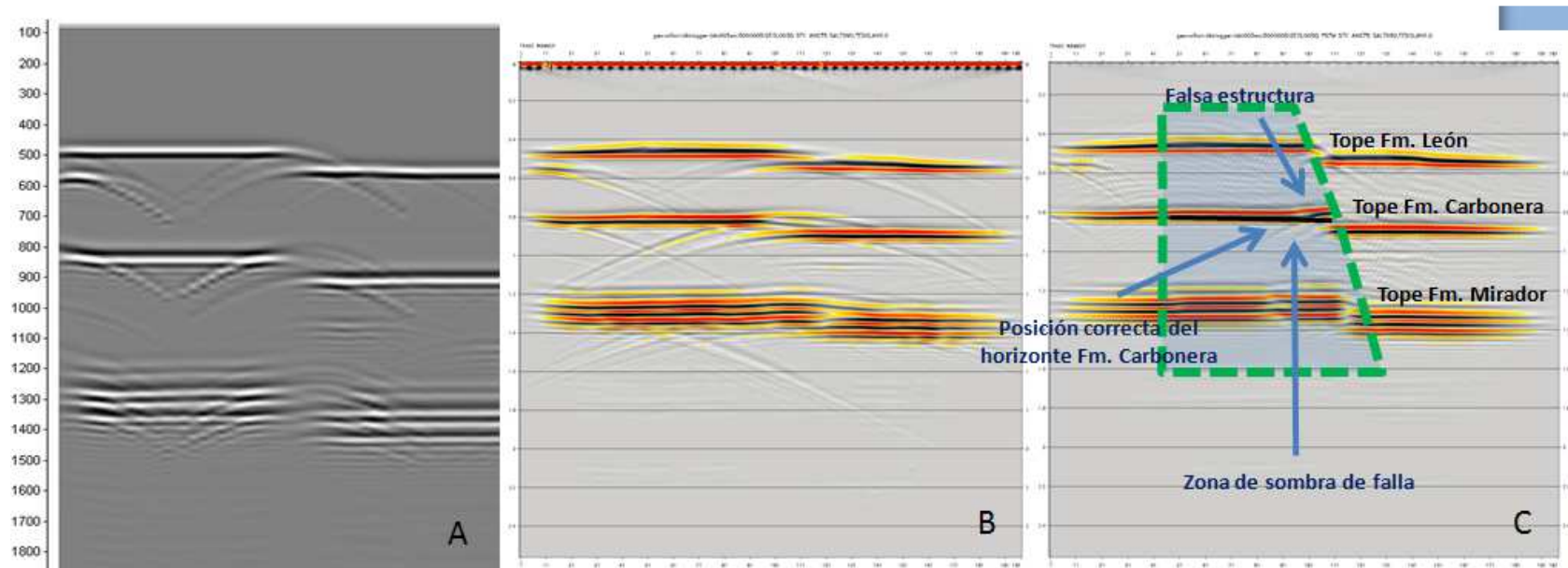
MODELO SINTETICO ANGULO 75° SALTO DE FALLA 90m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=75^\circ$ vs Salto Falla=90m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ((m/s)/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
	3	2464.91		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
	5	3251.35		
	6	3256.90		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 75° salto de falla 90m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 75° y salto de falla 90m



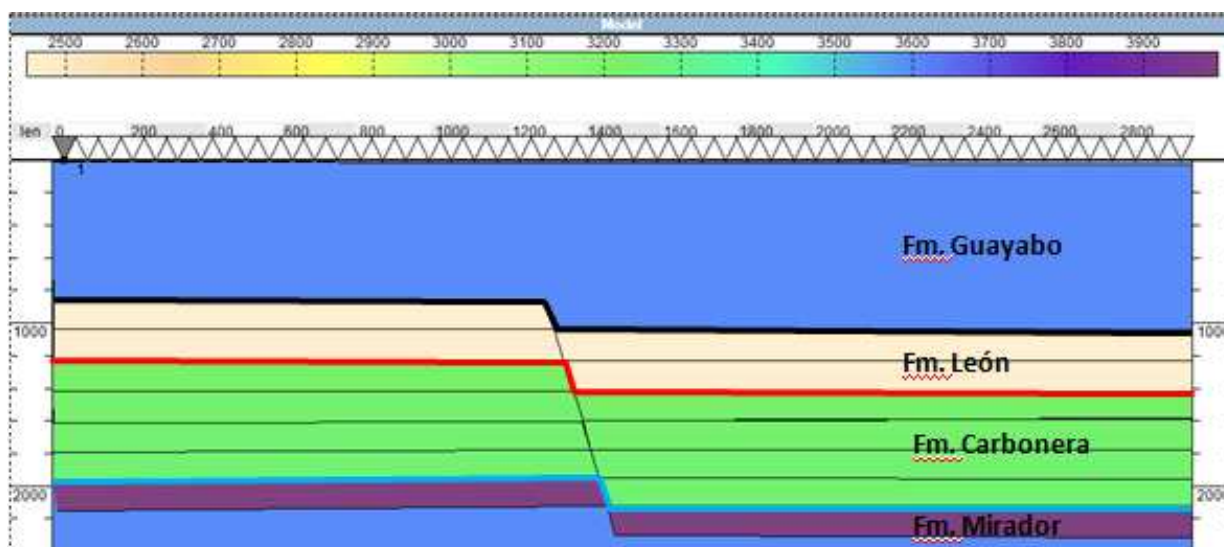
Modelo geológico de 75° y salto de falla 90m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
 Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

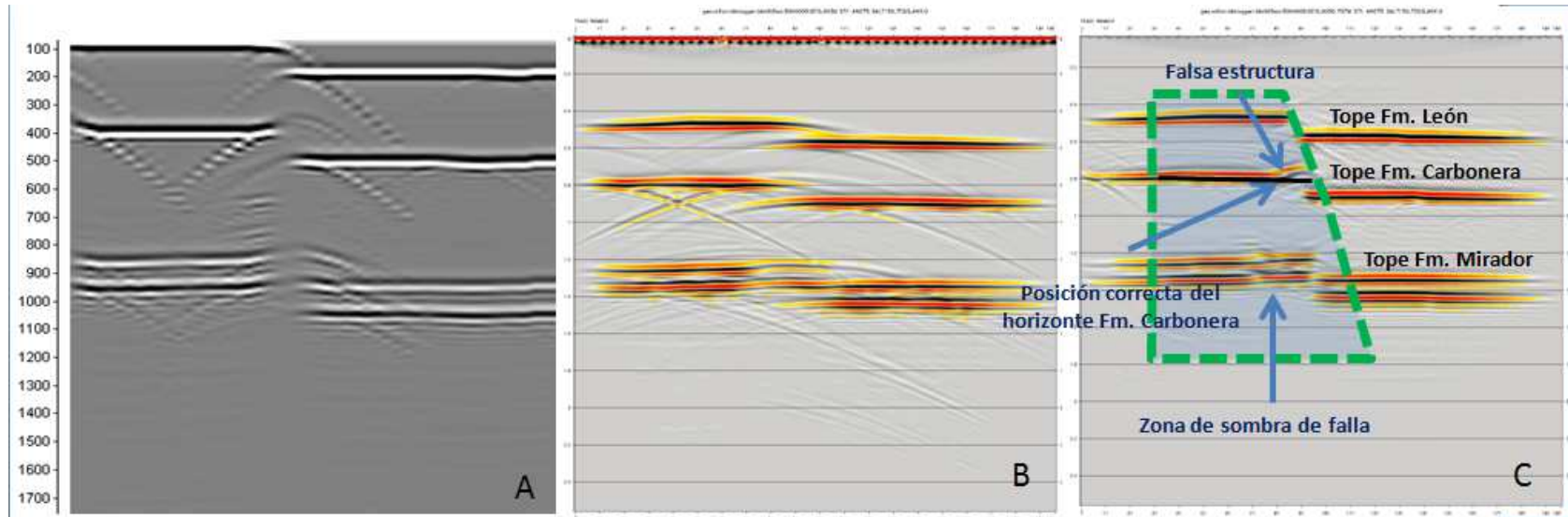
MODELO SINTETICO ANGULO 75° SALTO DE FALLA 150m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=75^\circ$ vs Salto Falla=150m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
	2	2457.45		
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
	3	3240.25		
	4	3245.80		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad interválica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 75° salto de falla 150m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 75° y salto de falla 150m



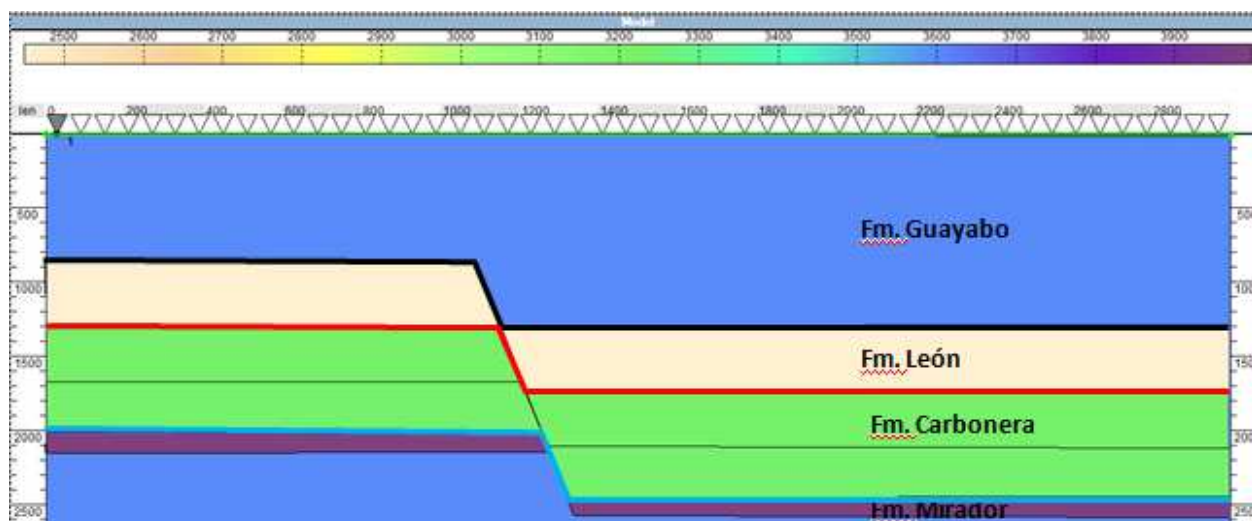
Modelo geológico de 75° y salto de falla 150m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

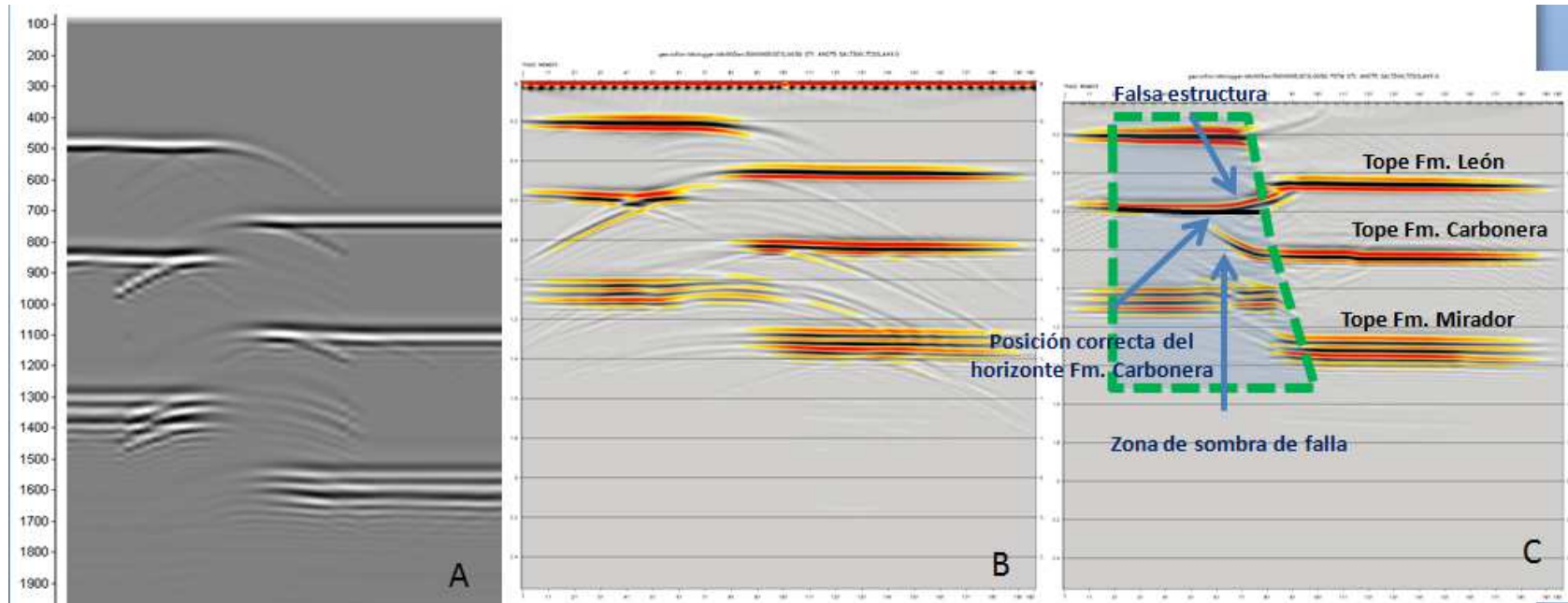
MODELO SINTETICO ANGULO 75° SALTO DE FALLA 300m OFFSET 3000m

ANGULO DE FALLA $\theta=75^\circ$ vs Salto Falla=300m				
Formacion	# Capas	Velocidad (m/s)	Gradiente ([m/s]/m)	Densidad (gr/cc)
Fm Guayabo	1	3600		2.037
Fm. Leon	1	2450.00	7.45	2.306
Fm. Carbonera	1	3229.14	5.55	2.364
	2	3234.69		
Fm. Mirador	1	3998.60	38.14	2.348

Datos de velocidad intervállica, gradiente y densidad para el modelo sintético en profundidad ángulo de 75° salto de falla 300m



Modelo geológico en profundidad para el ángulo de 75° y salto de falla 300m



Modelo geológico de 75° y salto de falla 300m

- A. Sección sísmica zero. B. Sección apilada en tiempo. C. Sección migrada en tiempo.
Nótese la presencia de pull up y distorsiones en el bloque yacente de la falla

Bibliografía

Acosta N., Chelotti L., Foster M., 2009. Procesamiento Sismico de Reflexion.

Atlas Sanbas Llanos, 2014, Beicip Inc.

Agencia Nacional De Hidrocarburos (ANH), 2007, Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and Petroleum Geology, a new proposal. 75p.

Bain R., 2015, "Pitfalls in the seismic interpretation of fault shadow events – Vicksburg formation of south Texas". SEG.

Basak R., Rawat S., 2010, Prestack Depth Migration – An ultimate aspiration for subsurface imaging in geologically complex area.

Birdus S., 2010, Removing Fault Shadow Distortions by Fault Constrained Tomography, CGG Veritas. ASEG.

Birdus, S. Artyomov, A. 2010, Fault Shadow distortions on 3D seismic data and their removal by depth processing. ASEG.

Bishop. Et.al. 1985, Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media, Geophysics, 50,903-923.

Carvajal L., 1992. Problemas de velocidades asociados a la sombra de las fallas normales en la Cuenca de los llanos. Consideraciones regionales. Ecopetrol S.A

Cordsen, G. M. and Pierce, J. (2000). Planning Land 3-D Seismic Survey. Geophysical Developments series No.9. Society of Exploration Geophysicists.

Chermak A., Veloza G., Depth Conversion in the Llanos Basin: Workflow to reduce fault shadow effect.

Fagin S., 1997, Model-Based Depth Imaging, Course Notes Series, No 10, Society of Exploration Geophysicists.

Fagin S., 1996, The fault shadow problem: Its nature and elimination. The leading edge, 1005-1013.

Giochioco L., Novianti L., Pascual R., 2002, Resolving fault shadow problems in Irian Jaya (Indonesia) using prestack depth migration, The Leading Edge, 21,911-920.

Hardwick A., Rajesh L., 2013, A 3D illumination study to investigate fault shadow effects over the hoop Fault Complex. SEG.

Landa E., et.al. 1998, How far is the seismic image correct? The Leading Edge, 919-922

Magrave G., 2001. Numerical methods of exploration seismology. Department of Geology and Geophysics, University Calgary.

Martínez N., Agudelo W., 2009, Efecto de las velocidades en las estructuras subyacentes a fallas sombras de falla. Universidad Industrial de Santander.

Pérez J., 2010. Modelado sísmico aplicando trazado de rayos y ecuación de onda acústica por diferencias finitas en zonas de geología compleja; norte de Monagas: Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Ramin N., Schnitzler J., Delbushaye P., 2006, Fault Shadow Correction Estimation in Sisi-Nubi Field using an Integrated Surface and Well. Seismic Inversion Approach.

Sanchez J., Koremlit M., Psdm Structural Model Constraints: Case Studies. CGG Veritas Argentina.

Sheriff R., Seismic Resolution a Key Element, 1997, AAPG DECEMBER EXPLORER.

Tesseral Technologies Ic., 2014, Tesseral Geomodeling Suite. User Manual.

Trincherro E., 2000, The fault shadow problem as an interpretation pitfall, The Leading Edge, 132-135.

Quigley D., Lau, A., Stewart K., 2012, Benefits of constraints for velocity modeling a fault shadow: A case study. SEG.

Yilmaz O, 1987, Seismic Data Analysis, Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data, Volume I-II, Society of Exploration Geophysicists.