

**MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA**

**Una aplicación de la migración sísmica en profundidad basada en ecuaciones de sentido único para la exploración de plays Sub y Pre Salinos en modelos sintéticos**

**Germán Reina Fernández**

**Trabajo de grado como requisito para optar al título de Geólogo**

**Director**

**Jairo Alberto Torres Peña  
Físico Magister en Geofísica**

**Codirector**

**Jorge Eduardo Pinto Valderrama  
Geólogo Magister en Geología**

**Codirector**

**Yesid Paul Goyes Peñafiel  
Geólogo**

**Tutor**

**David Alfonso Serrano Ferreira  
Geólogo**

**Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Geología  
Bucaramanga  
2017**

*DEDICATORIA*

*A mi hermano Jeisson, quien partió antes de tiempo, y gracias a cuyos esfuerzos un día pude iniciar mis estudios, los mismos que actualmente me encuentro culminando.*

*A mis padres, Ana y Germán, quienes modelaron los cimientos de mi vida.*

*A mi hermano Jhordan, quien es mi mayor motivación para cada día dar lo mejor de mí.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por tantas bendiciones recibidas.

A la Universidad Industrial de Santander y a sus docentes por formarme como profesional.

Al Grupo de Investigación en Conectividad y Procesamiento de Señales (CPS) por financiar esta investigación.

A Yesid Paul Goyes, mi amigo, mentor y codirector, gracias a cuyo apoyo y enseñanzas logré desarrollar este proyecto.

A los docentes Jairo Alberto Torres, Jorge Eduardo Pinto y a mis amigos David Alfonso Serrano y Julián De Bedout por su acompañamiento durante el desarrollo del proyecto.

A mi madrina Berta Ines Cano y a sus hijos Gustavo Gómez Cano y Olga Gómez Cano, por su apoyo incondicional durante mi estadía en la ciudad de Bucaramanga.

A Maria Eugenia Mantilla, por el apoyo incondicional y desinteresado prestado en los últimos años.

A mi tío Robert Adrián Fernandez y a su esposa Lubida Arcia, por haberme acogido como un miembro más de su familia.

A mis amigos, a los que están y a los que ya partieron, por tantas alegrías brindadas durante mi proceso de formación académica.

**Tabla de contenido**

Introducción .....	13
1 Aspectos preliminares.....	15
1.1 Objetivo general .....	15
1.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Justificación.....	15
1.4 Metodología .....	16
1.4.1. Revisión bibliográfica:.....	16
1.4.2. Construcción de modelos sintéticos y adquisición de las líneas sísmicas: .....	16
1.4.3. Procesamiento de los datos sísmicos: .....	17
1.4.4. Interpretación y comparación de las secciones migradas: .....	17
2 Aspectos Geológicos .....	17
2.1 Rocas Evaporíticas .....	18
2.1.1. Evaporitas no marinas:.....	19
2.1.2. Evaporitas marinas:.....	19
2.1.3. Las evaporitas en el tiempo: .....	20
2.1.4. Propiedades físicas de las evaporitas: .....	22
2.2 Tectónica salina.....	24
2.2.1. Flujo de la sal .....	25
2.2.2. Mecanismos de activación: .....	26
2.2.3. Diapiros: geometrías y crecimiento: .....	29
2.2.5. Geometría de los diapiros: .....	30
2.3 Las evaporitas y los hidrocarburos.....	33
2.3.1. Las evaporitas como sello de los hidrocarburos: .....	34
2.4 Sistema petrolífero .....	35
2.5 Indicadores directos de hidrocarburos.....	38
3 Creación de modelos sintéticos .....	38
3.1 Consideraciones geométricas .....	40
3.2 Definición de las propiedades elásticas de los modelos.....	40
3.2.1. Definición de las propiedades elásticas de las zonas con hidrocarburos:.....	42
4 Modelado elástico de la respuesta sísmica de los plays pre y sub salinos.....	42

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

4.1	Diseño de la adquisición .....	42
4.2	Procesamiento de los datos sísmicos.....	44
4.2.1.	Adición de cabeceras y ordenamiento por CMP: .....	44
4.2.2.	Análisis de velocidad y corrección NMO:.....	46
4.2.3.	Construcción del modelo de velocidad interválica: .....	48
4.2.4.	Apilamiento: .....	50
5	Migración.....	51
5.1	Principios de la migración sísmica (Yilmaz, 2001). .....	53
5.2	Suposiciones de la migración sísmica.....	55
5.3	Concepto de reflector explosivo.....	55
5.4	Tipos de migración.....	57
5.4.1.	Migración en tiempo.....	57
5.4.2.	Migración en profundidad: .....	57
5.4.3.	Migración post-apilado: .....	59
5.4.4.	Migración pre-apilado:.....	59
5.5	Algoritmos de migración.....	60
5.6	Métodos de migración basados en la ecuación de onda de sentido único.....	61
5.6.1.	Ecuación de onda de sentido único:.....	61
5.6.2.	Migración phase-shift-plus-interpolation (PSPi):.....	62
5.6.3.	Migración split-step Fourier (SSF): .....	64
5.6.4.	Migración implicit ( $w-x$ ) finite-difference (FD): .....	65
5.6.5.	Migración Fourier finite-difference (FFD): .....	66
6	Resultados.....	67
6.1	Escenario I: variación de la precisión del modelo de velocidad .....	68
6.2	Escenario II: variación de complejidad estructural .....	77
7	Análisis de resultados .....	111
7.1	Tiempos de cómputo .....	111
7.2	Identificación de rasgos importantes.....	112
7.3	Ventajas y desventajas .....	113
8	Conclusiones.....	114
9	Recomendaciones .....	115
	Referencias Bibliográficas .....	117

**Lista de figuras**

Figura 2.1 Fluctuación de la masa de halita preservada y reciclada a lo largo del tiempo..... 20

Figura 2.2 Distribución de las cuencas con presencia de evaporitas. .... 22

Figura 2.3 Comportamiento de la densidad de los sedimentos y de la sal..... 23

Figura 2.4 Los dos principales tipos de flujo durante la deformación de la sal..... 27

Figura 2.5 Activación del movimiento de la sal. .... 27

Figura 2.6 Activación del flujo de la sal por procesos tectónicos ..... 28

Figura 2.7 Activación del movimiento de la sal ..... 28

Figura 2.8 Modos de perforación diapírica. .... 30

Figura 2.9 Las etapas en la formación de estructuras salinas. .... 32

Figura 2.10 Posición de los reservorios asociados..... 34

Figura 2.11 Sistema petrolero..... 36

Figura 3.1 Modelo de velocidad de onda P..... 39

Figura 4.1 Dos tipos de arreglos: a) split spread y b) end-on spread..... 43

Figura 4.2 a) disparo 101, b) disparo 101 sin onda directa ni las primeras refracciones..... 45

Figura 4.3 a) Disparo 101, b) disparo 101 con AGC..... 46

Figura 4.4 Gráfica del cubrimiento de los datos adquiridos. .... 46

Figura 4.5 Análisis de velocidad realizado para el CMP 10000..... 47

Figura 4.6 a) Corrección NMO..... 48

Figura 4.7 Modelo de velocidad RMS..... 49

Figura 4.8 Modelo de velocidad interválica en tiempo..... 49

Figura 4.9 Modelo de velocidad interválica en profundidad. .... 50

Figura 4.10 Sección sísmica apilada. .... 50

Figura 5.1 La migración reubica el dato original..... 52

Figura 5.2 Línea sísmica apilada exhibiendo un clásico corbatín ..... 53

Figura 5.3 Principios de la migración ..... 54

Figura 5.4 Modelo de reflector explosivo..... 56

Figura 5.5 Tipos de migración más apropiados de acuerdo a la complejidad estructural ..... 57

Figura 5.6 a) Recorte del modelo de velocidad ..... 59

Figura 6.1 Modelo de velocidad originalmente construido ..... 71

Figura 6.2 Modelo de velocidad suavizado con un  $r1=10$  y un  $r2=10$ . .... 71

Figura 6.3 Modelo de velocidad suavizado con un  $r1=50$  y un  $r2=50$ . .... 71

Figura 6.4 Modelo de velocidad suavizado con un  $r1=100$  y un  $r2=100$ . .... 72

Figura 6.5 Modelo de velocidad suavizado con un  $r1=200$  y un  $r2=200$ . .... 72

Figura 6.6 Modelo de velocidad construido mediante el análisis de velocidad de los CMPs. .... 72

Figura 6.7 Secciones sísmicas migradas usando el modelo de velocidad original..... 73

Figura 6.8 Recorte del modelo velocidad original para la zona de interés principal..... 74

Figura 6.9 Secciones migradas usando el modelo de velocidad original. .... 74

Figura 6.10 Secciones migradas usando el modelo de velocidad suavizado..... 75

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

Figura 6.11 Secciones migradas usando el modelo de velocidad suavizado.....	75
Figura 6.12 Secciones migradas usando el modelo de velocidad suavizado.....	76
Figura 6.13 Secciones migradas usando el modelo de velocidad suavizado.....	76
Figura 6.14 Modelo 1. Distribución de la velocidad de onda P para la zona de interés.....	82
Figura 6.15 Secciones migradas para el modelo 1 en la zona de interes.....	83
Figura 6.16 Secciones migradas para el modelo 1 en la zona de interes.....	83
Figura 6.17 Modelo 2. Distribución de la velocidad de onda P para la zona de interés.....	84
Figura 6.18 Secciones migradas para el modelo 2 en la zona de interes.....	84
Figura 6.19 Secciones migradas para el modelo 2 en la zona de interes.....	85
Figura 6.20 Modelo 4. Distribución de la velocidad de onda P para la zona de interés.....	85
Figura 6.21 Secciones migradas para el modelo 4 en la zona de interes.....	86
Figura 6.22 Secciones migradas para el modelo 4 en la zona de interes.....	86
Figura 6.23 Modelo 5. Distribución de la velocidad de onda P para la zona de interés.....	87
Figura 6.24 Secciones migradas para el modelo 5 en la zona de interes.....	87
Figura 6.25 Secciones migradas para el modelo 5 en la zona de interes.....	88
Figura 6.26 Modelo de velocidad 6 y sus secciones migradas.....	90
Figura 6.27 Modelo 6. Distribución de la velocidad de onda P en la zona de interés.....	91
Figura 6.28 Secciones migradas para el modelo 6 en la zona de interes.....	91
Figura 6.29 Modelo de velocidad 7 y sus secciones migradas.....	92
Figura 6.30 Modelo 7. Distribución de la velocidad de onda P en la zona de interés.....	93
Figura 6.31 Secciones migradas para el modelo 7 en la zona de interes.....	93
Figura 6.32 Modelo de velocidad 8 y sus secciones migradas.....	96
Figura 6.33 Modelo 8. Distribución de la velocidad de onda P en la zona de interés.....	97
Figura 6.34 Secciones migradas para el modelo 8 en la zona de interes.....	97
Figura 6.35 Modelo de velocidad 9 y sus secciones migradas.....	98
Figura 6.36 Modelo 9. Distribución de la velocidad de onda P en la zona de interés.....	99
Figura 6.37 Secciones migradas para el modelo 9 en la zona de interes.....	99
Figura 6.38 Modelo de velocidad 10 y sus secciones migradas.....	103
Figura 6.39 Modelo 10. Distribución de la velocidad de onda P en la zona de interés.....	104
Figura 6.40 Secciones migradas para el modelo 10 en la zona de interes.....	104
Figura 6.41 Modelo de velocidad 11 y sus secciones migradas.....	105
Figura 6.42 Modelo 11. Distribución de la velocidad de onda P en la zona de interés.....	106
Figura 6.43 Secciones migradas para el modelo 11 en la zona de interes.....	106
Figura 6.44 Modelo de velocidad 12 y sus secciones migradas.....	107
Figura 6.45 Modelo 12. Distribución de la velocidad de onda P en la zona de interés.....	108
Figura 6.46 Secciones migradas para el modelo 12 en la zona de interes.....	108
Figura 6.47 Modelo de velocidad 13 y sus secciones migradas.....	109
Figura 6.48 Modelo 13. Distribución de la velocidad de onda P en la zona de interés.....	110
Figura 6.49 Secciones migradas para el modelo 13 en la zona de interes.....	110
Figura 7.1 Comparación de los tiempos de cómputo de los métodos de migración.....	111

**Lista de Tablas**

Tabla 2.1 Propiedades físicas de los principales minerales evaporíticos.....	24
Tabla 2.2 Propiedades elásticas de algunos minerales evaporíticos .....	24
Tabla 3.1 Velocidades medias de propagación de la onda P. ....	41
Tabla 3.2 Velocidad de onda S y densidad estimadas a partir de $V_p$ (km/s).....	41
Tabla 4.1 Parámetros de adquisición .....	44
Tabla 7.1 Evaluación del rendimiento de las versiones pre-apilado de los métodos analizados.	113

## RESUMEN

**Título:** Una aplicación de la migración sísmica en profundidad basada en ecuaciones de sentido único para la exploración de plays sub y pre salinos en modelos sintéticos. <sup>1</sup>

**Autor:** Reina Fernández, Germán. <sup>2</sup>

**Palabras clave:** migración pre-apilado, play sub-salino, play pre-salino, tectónica salina.

### Descripción:

El descubrimiento de bastos yacimientos de hidrocarburos sub y pre salinos en distintas zonas del mundo, ha despertado el interés de la academia y la industria petrolera, ya que años atrás estas zonas no se consideraban de interés debido a que las técnicas de procesamiento no las iluminaban de manera apropiada. Mediante el modelado de la propagación de campos de onda elásticos sobre modelos sintéticos que recrean distintos tipos de estructuras salinas ha sido posible evaluar los métodos de migración Phase-Shift-Plus-Interpolation (PSPI), Split-Step Fourier (SSF), Implicit ( $w-x$ ) Finite-Difference (FD) Y Fourier Finite-Difference (FFD) que se basan en la ecuación de onda unidireccional, en casos donde se presentan yacimiento de hidrocarburos suprayacidos por la sal. El análisis e interpretación de las secciones sísmicas obtenidas al migrar usando estos métodos, permitió determinar bajo que circunstancias son confiables las secciones sísmicas obtenidas, siendo el método FFD el que mejor calidad de imagen ofrece cuando se presentan estructuras demasiado complejas, y el método SSF el mejor cuando se presentan estructuras poco ó medianamente complejas. También fue posible establecer los rasgos que pueden llegar a exhibir este tipo de yacimientos cuando se usan estos métodos. Los modelos sintéticos fueron construidos implementando una nueva metodología que permite ahorrar grandes cantidades de tiempo y dar un detalle mucho mayor a los modelos.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Jairo Alberto Torres Peña. Codirector: Jorge Eduardo Pinto Valderrama. Codirector: Yesid Paul Goyes Peñafiel. Tutor: David Alfonso Serrano Ferreira.

**ABSTRACT**

**Title:** An application of seismic depth-migration based on one-way equations for the exploration of sub and pre salt plays in synthetic models.

**Authors:** Reina Fernández, Germán. <sup>2</sup>

**Keywords:** pre-stack migration, sub-salt play, pre-salt play, salt tectonics.

**Description:**

The giant discoveries in the sub and pre salt hydrocarbons provinces around the world, has aroused interest in the academic sector and the oil industry, since years ago these areas were not considered to be of interest because the processing techniques did not illuminate them properly. By modeling the propagation of elastic wave fields on synthetic models that recreate different types of salt structures, it has been possible to evaluate the migration methods Phase-Shift-Plus-Interpolation (PSPI), Split-Step Fourier (SSF), Implicit ( $w-x$ ) Finite-Difference (FD) Y Fourier Finite-Difference (FFD) based on the one-way equations, in cases where there are salt layers over hydrocarbon deposits. The analysis and interpretation of seismic sections obtained by migrating using these methods, allowed to determine under which circumstances the obtained seismic sections are reliable, being the FFD method wich offers the best image quality when very complex structures are present, and the SSF the best one when there are moderately complex structures. It was also possible to establish the traits that can expose this type of deposits when using these methods. The synthetic models were constructed by implementing a new methodology that allows to save a lot of time and offers more precision to the models.

---

<sup>1</sup> Thesis

<sup>2</sup> Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Jairo Alberto Torres Peña. Codirector: Jorge Eduardo Pinto Valderrama. Codirector: Yesid Paul Goyes Peñafiel. Tutor: David Alfonso Serrano Ferreira.

## **Introducción**

En un mundo en el que la fuente de energía principal proviene de la quema de combustibles fósiles, es de vital importancia ubicar nuevas reservas de hidrocarburos, a fin de poder suplir la creciente demanda energética de los mercados internacionales, impulsada por el surgimiento de las economías emergentes.

El eslabón clave en la búsqueda de nuevos yacimientos de hidrocarburos es la sísmica de reflexión. El procesamiento de estos datos sísmicos tiene una importancia fundamental, ya que permite obtener una imagen del subsuelo. La calidad de esta imagen depende a su vez de la calidad los datos adquiridos, de los métodos usados para construir el modelo de velocidad y de los métodos de migración aplicados.

En los últimos años, los descubrimientos de gigantescos depósitos de hidrocarburos sub y pre salinos en Brasil, Estados Unido y África, han despertado un interés mundial hacia este tipo de oportunidades, las cuales representan un importante reto tecnológico tanto en la exploración como en la explotación, ya que las estructuras salinas a menudo provocan un enmascaramiento de la geometría de los estratos de roca ubicados bajo la sal.

En el presente trabajo, se evalúan los métodos de migración basados en la ecuación de onda unidireccional, que han demostrado ser muy eficaces para iluminar zonas estructuralmente complejas, y que resultan ser muy eficaces al momento de iluminar las zonas ubicadas bajo la sal. Estos métodos han sido implementados en modelos sintéticos, construidos bajo una nueva metodología, que tratan de simular los diferentes casos que pueden llegar a presentarse en la búsqueda de hidrocarburos bajo la sal.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

Se lograron identificar las ventajas y desventajas de los métodos aplicados, permitiendo plantear los escenarios apropiados en que deberían ser utilizados, también se identificaron algunos rasgos característicos que pueden exhibir los yacimientos ubicados bajo la sal para ciertas situaciones.

El presente proyecto de grado se desarrolló bajo la modalidad de Trabajo de Investigación y fue financiado por el Grupo de Investigación en Conectividad y Procesamiento de Señales (CPS) en el marco del Proyecto ‘Migración sísmica preapilado en profundidad por extrapolación de campos de onda utilizando computación de alto desempeño para datos masivos en zonas complejas’.

## 1 Aspectos preliminares

### 1.1 Objetivo general

Aplicar los métodos de migración PSPI, SSF, FD y FFD para establecer las ventajas y desventajas de cada uno, y de ser posible establecer rasgos que permitan identificar los plays que se encuentran bajo la sal.

### 1.2 Objetivos específicos

- Realizar la construcción de modelos de velocidad onda compresional, velocidad de onda de corte y de densidad representativos que permitan simular la adquisición sísmica en zonas con presencia de estructuras salinas.
- Realizar el procesamiento sísmico para obtener las secciones migradas de cada uno de los modelos sintéticos construidos.
- Comparar las técnicas de migración sísmica basadas en ecuación de onda unidireccional OWWE para los modelos sintéticos.
- Analizar e interpretar de las secciones migradas para establecer posibles rasgos que indiquen presencia de plays pre y sub salinos.

### 1.3 Justificación

La mejora de las imágenes sísmicas en las zonas donde hay presencia de estructuras salinas ha despertado el interés de la academia y de la industria de los hidrocarburos debido a las dificultades que tales estructuras generan durante el procesamiento y la interpretación. Por tal razón se hace

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

necesaria la identificación de las limitaciones y alcances de los algoritmos de migración basados en la ecuación de onda unidireccional a fin de identificar ventajas y desventajas de estos métodos, así como tratar de establecer los rasgos característicos que permitan identificar los plays que se encuentren suprayacidos por cuerpos salinos y evitar campañas exploratorias fallidas.

### 1.4 Metodología

Este trabajo de grado se desarrolló mediante el cumplimiento de 4 etapas que se explican a continuación:

**1.4.1. Revisión bibliográfica:** Esta etapa se subdivide en tres fases, que involucran los aspectos más relevantes para el desarrollo del trabajo de grado. En la primera fase se contextualizan los aspectos geológicos que controlan la génesis de las estructuras salinas, sus propiedades y las diferentes formas que pueden llegar a tomar en los ambientes tectónicos, con el fin de que los modelos sintéticos construidos tengan validez estructural. En la segunda fase se revisan los aspectos básicos de la adquisición y procesamiento de datos sísmicos. En la tercera fase se revisa el fundamento teórico de los distintos métodos de migración sísmica a fin de poder comprender y analizar los resultados obtenidos al aplicar los distintos métodos.

**1.4.2. Construcción de modelos sintéticos y adquisición de las líneas sísmicas:** Para cada uno de los modelos propuestos en la fase 1 de la etapa anterior se generó un archivo en el formato Portable Network Graphics (PNG), que sirvió como insumo para luego generar un conjunto de archivos en el formato Binary (BIN) que consideren las propiedades elásticas de los estratos rocosos y las estructuras salinas. Para realizar la adquisición sísmica en cada uno de los modelos se hizo necesario escribir un archivo de procesamiento por lotes (SH) que permitiera desarrollar la ecuación de onda en medios elásticos para varias tandas de disparos.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

**1.4.3. Procesamiento de los datos sísmicos:** A los datos obtenidos de la etapa anterior, se les aplicará una secuencia básica de procesamiento sísmico, similar a la usada por (Forel, Benz, & Pennington, 2005) que consta del ordenamiento de las trazas por CMP, análisis de velocidad, corrección NMO, apilado y finalmente se aplicaran las migraciones sísmicas basadas en la ecuación de onda unidireccional implementadas en software libre *Seismic Unix* creado por Center for Wave Phenomena (CWP) de Colorado School Of Mines (CSM).

**1.4.4. Interpretación y comparación de las secciones migradas:** Una vez se obtengan las secciones migradas, se hará una interpretación básica de los reflectores mostrados y se compararán los resultados obtenidos con los algoritmos ya mencionados para establecer ventajas y desventajas de cada uno, y de ser posible establecer rasgos que permitan identificar los plays que se encuentran bajo la sal.

## 2 Aspectos Geológicos

Para la construcción de los modelos de velocidades y densidades se hace indispensable tener conocimientos geológicos generales del desarrollo de los cuerpos salinos. Estos conocimientos a su vez son necesarios para distinguir horizontes estratigráficos, estructuras geológicas y cuerpos asociados a estructuras salinas y los posibles plays subsalinos y presalinos en las secciones sísmicas. El presente capítulo ofrece conceptos que permiten comprender la de tectónica salina y entender donde, porqué y como se forman los cuerpos salinos, así como su papel dentro de los sistemas petrolíferos.

## 2.1 Rocas Evaporíticas

(Warren J. , 2016) define las evaporitas como rocas salinas que fueron originalmente precipitadas en salmueras bajo condiciones hidrológicas dominadas por la evaporación solar. Esta simple definición abarca una amplia gama de sales químicamente precipitadas e incluye también carbonatos alcalinotérreos.

A través del tiempo, las sales evaporitas se han acumulado en los fondos de las salmueras y por eflorescencia capilar sobre las superficies áridas. Ya que requieren un clima específico y una configuración específica de la cuenca, su presencia limita en el tiempo y el espacio las condiciones paleoclimáticas y paleogeográficas. Las capas de evaporitas tienden a concentrar y a facilitar el avance de las fallas, con lo que su presencia es de particular interés para los geocientíficos. Estas tienen también una gran importancia económica como fuente de sal y fertilizantes. Según su composición mineralógica, las evaporitas pueden clasificarse: carbonatos (e.g. calcita, dolomita y magnesita), sulfatos (e.g. anhidrita y yeso), cloruros (e.g. halita, silvita y carnalita) y boratos (e.g. borax). (Warren J. , 2010).

Experimentos de laboratorio pueden monitorear con precisión la evolución de las salmueras a medida que cristalizan los minerales evaporíticos. El agua de mar normal tiene una salinidad del 3.5%, siendo los constituyentes disueltos más importantes el sodio y el cloro. Cuando el contenido de agua se reduce a un quinto del original, la precipitación comienza de manera ordenada, con los componentes más insolubles primero (e.g. yeso y anhidrita). Cuando la solución alcanza una décima parte del volumen original, se forma los minerales más solubles (e.g. Silvita y Halita). Las secuencias evaporíticas, por tanto, muestran cambios verticales en la mineralogía que corresponden de manera ordenada a la solubilidad. (Crook, et al., 2017).

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

**2.1.1. Evaporitas no marinas:** La deposición de evaporitas en ambientes no marinos se da principalmente en lagos, sin conexión a una fuente directa de agua, en regiones áridas y semiáridas. Estos lagos se forman en cuencas cerradas o en depresiones someras en el continente donde el drenaje es interno y la escorrentía no llega al mar. La entrada de agua a estos lagos cerrados proviene principalmente de precipitaciones y de escorrentía superficial, ambas en pequeña cantidad y con una ocurrencia variable en las regiones áridas. El flujo de agua subterránea puede proporcionar una entrada adicional, pero las tasas de evaporación están siempre por encima de las precipitaciones y de la escorrentía superficial. Las tormentas esporádicas o estacionales pueden dar lugar a un repentino aumento de la entrada de agua, pero la evaporación subsiguiente reducirá el volumen de agua presente a los niveles normales, siendo la fluctuación en los niveles del agua una característica de estos medios sedimentarios. Dichos cambios en los niveles del agua de estos lagos conducen a su vez a valores fluctuantes de la salinidad. Como resultado de la complejidad de estos medios, los depósitos de evaporitas no marinos contienen muchos minerales poco frecuentes en los depósitos de evaporitas marinas (e.g. bórax, epsomita, trona y mirabilita). (Crook, et al., 2017).

**2.1.2. Evaporitas marinas:** Los depósitos de evaporitas más grandes del mundo están dominados por halita y/o anhidrita junto con carbonatos evaporíticos y sales de potasio. Los volúmenes de boratos y carbonatos de sodio llegan a ser casi insignificantes en estas enormes masas de sal. Estos grandes volúmenes de evaporitas requieren una fuente de sales que solo puede ser suplida mediante una conexión con el océano. (Warren J. , 2016). Todos estos grandes depósitos de evaporitas se precipitaron a través de la entrada de vastos volúmenes de agua de mar que penetraba hasta depresiones hidrológicamente aisladas que se desarrollaron durante episodios de aridez global. Lo más importante para que se dé la precipitación de evaporitas en estos medios es la aridez, ya que estas enormes cantidades de agua deben evaporarse más rápido de lo que puede

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

ser reabastecida. También es importante que la cuenca este de alguna manera aislada o parcialmente aislada del océano de modo que las salmueras producidas puedan concentrarse a tal punto que ocurra la precipitación de los minerales evaporíticos. La ruptura periódica de esta barrera, debido a cambios globales en el cambio del nivel del mar, rellena la cuenca de vez en cuando, reabasteciendo el volumen de agua evaporado, estas secuencias de evaporitas visibles en el registro geológico. (Warren J. , 2016).

**2.1.3. Las evaporitas en el tiempo:** En el pasado hubo periodos cuando la deposición de evaporitas fue más voluminosa de lo que es actualmente. Las diversas cuencas evaporíticas fueron creadas principalmente por mecanismos de tectónica de placas, dentro de lo que fueron zonas áridas a híper áridas tectónicamente inducidas. (Hay, et al., 2006) Dado que la halita es una sal altamente soluble, estos sedimentos evaporíticos son susceptibles a reciclar sus solutos nuevamente en los océanos, a través de la erosión o la disolución, ver Figura 2.1.

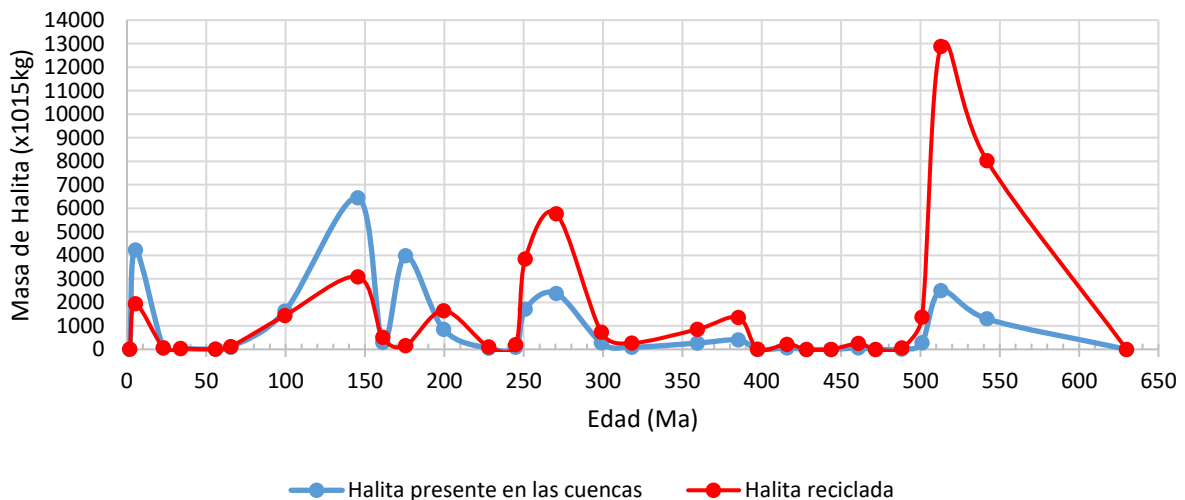


Figura 2.1 Fluctuación de la masa de halita preservada y reciclada (por erosión y disolución) a lo largo del tiempo. A partir de: (Hay, et al., 2006).

Las cuencas evaporíticas más grandes de mundo son dominadas principalmente por halita y/o anhidrita, junto con carbonatos evaporíticos y sales de potasio. Estos grandes volúmenes de

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

evaporitas en estas grandes cuencas requirieron de una salmuera fuente que solo podría haber sido suplida mediante una conexión con el mar, (Warren J. , 2010). La Figura 2.2 muestra las principales cuencas evaporíticas, donde también se observa que estas están presentes a lo largo de todos los continentes. El gran pico de sal Pangeano (Triásico Tardío - Cretácico) indica el momento en que Pangea se agrietó. Durante el Triásico Temprano, la precipitación de evaporitas se intensificó por las costras salinas intra-continenciales y de los márgenes continentales asociados con capas rojas desarrolladas en el sureste y el oeste de los Estados Unidos, el oeste de Canadá, el noroeste de África, el oeste y el sureste de Europa, el centro de Sur América, el sur y el centro de África y el este de Groenlandia. Con el paso a un clima de invernadero, se establecieron grandes plataformas de sulfatos en el norte de Arabia, Iraq, Kazajistán y el norte de China. Este incremento en los volúmenes de Sal del Triásico al Cretácico en gran parte refleja la intensificación de la actividad de rift en latitudes de entre 30° y 40° N durante la ruptura de Pangea. (Warren J. , 2010).

Así, el pico Pangeano de evaporitas vincula tres asociaciones de placas tectónicas temporalmente relacionadas. (1) Acreción Pensilvanica a Pérmica del supercontinente de Pangea, donde la colisión de cuencas alimentada por el mar acumuló gruesas capas de sal a lo largo de los márgenes de Gondwana, Laurasia y Siberia. (2) Las depresiones intra-placa mesozoicas creadas durante la ruptura de Pangea en Gondwana/Laurasia; La sal se depositó en estas cuencas tipo rift ensanchadas. (3) Asociaciones Mesozoicas de acumulaciones de sal intra-cratónicas e intra-continenciales en cuencas que típicamente se sientan en la parte superior de los brazos fallados de sucesiones de fallas asociadas a rift o que se encuentran en el transpaís o antepaís de cinturones orogénicos creados por la colisión entre placas. (Warren J. , 2010).

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

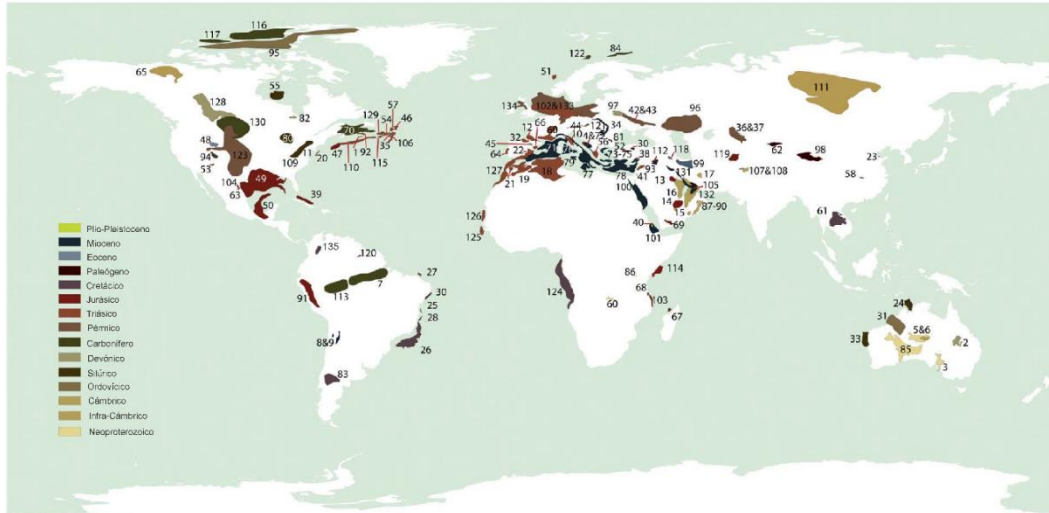


Figura 2.2 Distribución de las cuencas con presencia importante de evaporitas a lo largo del tiempo. Para que la gráfica sea legible a esta escala no se muestran la mayor parte de sistemas de sulfato de calcio dominantes en el oriente medio. Modificado de: (Warren J. , 2010).

**2.1.4. Propiedades físicas de las evaporitas:** La sal tiene propiedades físicas inusuales. Esta mantiene su densidad a un amplio rango de temperaturas y presiones, es muy fluida, y tiene una alta velocidad. Termalmente es muy conductiva, pero es virtualmente a-magnética. La sal es mecánicamente débil y puede fluir, es relativamente incompresible y menos densa que la mayoría de rocas moderadamente compactadas, estas características reológicas hacen que esta sea inherentemente inestable. (Dan, 2014).

**Densidad:** A diferencia de las demás rocas sedimentarias, la halita tiene una densidad constante de 2.15 a 2.17 gr/cm<sup>3</sup> que no varía con la profundidad, la Tabla 2.1 muestra las densidades de los principales minerales evaporíticos presentes. Por lo que en una cuenca sedimentaria con sal se tendrán dos dominios halocinéticos en función de la profundidad, ver Figura 2.3. (Dan, 2014).

- Dominio superior: a menor profundidad de enterramiento la densidad de la sal es mayor a la densidad de los sedimentos supra-yacentes, propiciando un movimiento lateral de la sal (*overhangs*).

## MIGRACIÓN OWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

- Dominio inferior: a mayor profundidad de enterramiento la densidad de los sedimentos supra-yacentes es mayor a la de la sal, lo cual genera una fuerza de flotabilidad de la sal con respecto a los sedimentos, propiciando así el movimiento vertical de la sal (diapiros).

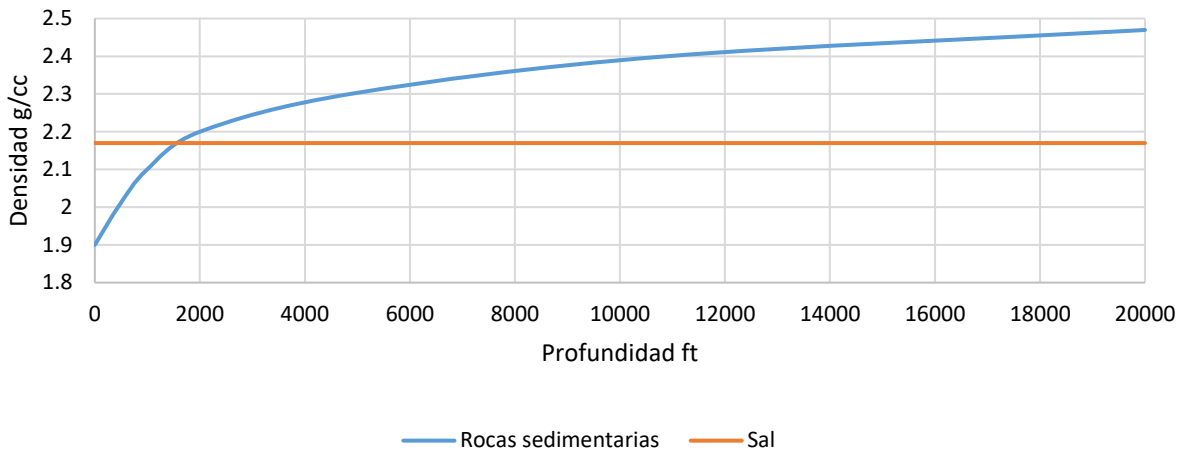


Figura 2.3 Comportamiento de la densidad de los sedimentos y de la sal contra profundidad, generando dos dominios a partir del punto de inversión. Modificado de: (Nettleton, 1934).

En el tiempo geológico, las propiedades de la sal y fuerzas no balanceadas (cargas diferenciales) propiciaron el movimiento vertical y lateral de la sal, que a su vez altera las rocas supra-yacentes. (Dan, 2014)

**Velocidad:** Durante la construcción de los modelos de velocidad a menudo se asume que los cuerpos de evaporitas están compuestos 100% de halita, la cual tiene una velocidad de onda compresional de aproximadamente 4500m/s. Pero esto no siempre es correcto, ya que la mayoría de los cuerpos salinos contienen cantidades variables de yeso ( $V_p=5700\text{m/s}$ ) o anhidrita ( $V_p=6500\text{m/s}$ ). Ver Tabla 2.1 y Tabla 2.2. Algunos cuerpos pueden llegar a tener cantidades significativas de sales ricas en K-Mg con velocidades más bajas de hasta 3500m/s. Otros factores como el agua de formación también afectan la velocidad de los cuerpos salinos. Un espeso cap rock (recubrimiento que se forma sobre el cuerpo salino) de anhidrita puede llegar a formarse en

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

la cresta o los flancos de los cuerpos salinos debido a la disolución de la sal, lo cual deja residuos de anhidrita. En los cuerpos deformados también puede llegar a tenerse intercalaciones de distintas composiciones, las cuales tienden a estar elongadas en la dirección de flujo. Estas son sub-verticales en los diapiros y sub-paralelas a los estratos en las capas de sal autóctonas. (Jones & Davison, 2014).

Tabla 2.1 Propiedades físicas de los principales minerales evaporíticos. Tomado de: (Jones & Davison, 2014).

Mineral	Composición	Dureza (escala de Mohs)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Vp (m/s)
<b>Halita</b>	NaCl	2.5	2150-2170	4500
<b>Yeso</b>	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1.5-2	2300	5700
<b>Anhidrita</b>	CaSO <sub>4</sub>	3.5	2900	6500
<b>Taquidrita</b>	CaMg <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub> · 12H <sub>2</sub> O	2	1660	3500
<b>Silvita</b>	KCl	1.5-2	1990	4110
<b>Carnalita</b>	KMgCl <sub>3</sub> · 6(H <sub>2</sub> O)	2.5	1600	3900
<b>Kieserita</b>	MgSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	3.5	2550	?
<b>Langbeinite</b>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	3.5-4	2820	5860
<b>Polihalita</b>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · MgSO <sub>4</sub> · 2CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	2.5-3.5	2790	5300
<b>Dolomita</b>	CaCO <sub>3</sub> · MgCO <sub>3</sub>	3.5-4	2870	6300

Tabla 2.2 Propiedades elásticas de algunos minerales evaporíticos. Tomado de: (Mavko & Mukerji, 2009)

Mineral	Módulo de Bulk (GPa)	Módulo de cizalla (GPa)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Relación de Poisson
<b>Anhidrita</b>	56,1	29,1	2,98	5,64	3,13	0,28
<b>Halita</b>	24,8	14,9	2,16	4,55	2,63	0,25
<b>Silvita</b>	17,4	9,4	1,99	3,88	2,18	0,27

## 2.2 Tectónica salina

La industria de los hidrocarburos es la principal interesada en el estudio de la tectónica salina, dado que muchas de las grandes provincias de hidrocarburos se encuentran en cuencas salinas (e.g. el

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

Golfo de México, Mar del Norte y Cuenca Campos). La presencia de sal en una cuenca afecta todos los aspectos del sistema petrolífero, ya que su flujo influye en la formación de la trampa, en la distribución del yacimiento, la maduración termal de la roca fuente al calentar las rocas que la suprayacen y enfriando las rocas que se encuentran debajo o adyacentes al cuerpo salino, en la migración de los fluidos y puede actuar como sello. Por lo cual el entendimiento de la tectónica salina resulta imprescindible para que la exploración de petróleo y gas sea exitosa en muchas partes del mundo. Además de la importancia económica del entendimiento de este tema, los avances en la tectónica salina han arrojado luz sobre una gran cantidad de problemas científicos, como por ejemplo en el entendimiento de la tectónica de shale. (Hudec & Jackson, 2007).

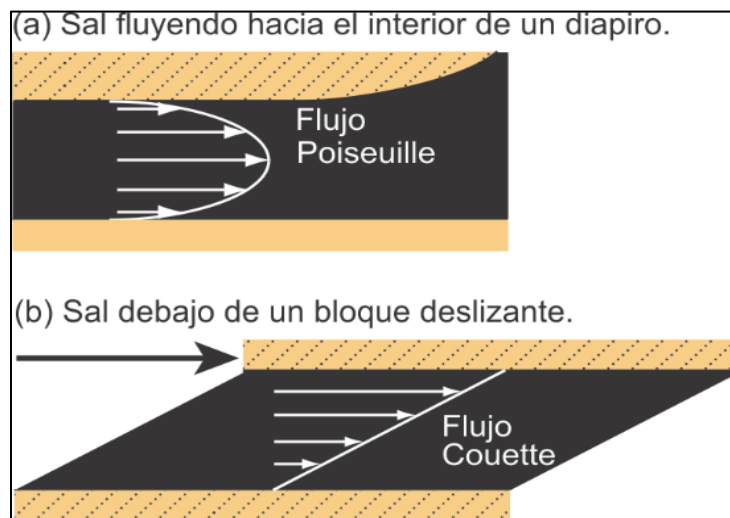
La principal fuerza impulsora o mecanismo de activación de la tectónica salina es la carga diferencial, la cual puede ser inducida por fuerzas gravitacionales al forzar el desplazamiento de uno de los lados del cuerpo salino, e incluso por el gradiente geotérmico. La inversión de densidades, ver Figura 2.3, es considerada la segunda fuerza impulsora más importante de la tectónica salina. Respecto a los factores de que impiden el flujo de la sal, se puede decir que el principal es la resistencia de la cobertera a ser deformada. Dada la debilidad de la sal, su tectonismo estará atado a la deformación regional. En ambientes de extensión o de transtensión, el ascenso de la sal se da a lo largo de los ejes del graben, ocupando el lugar creado por el adelgazamiento y la separación de las capas de roca y dando así inicio del ascenso de los diapiros. En ambiente de compresión y transpresión, el ascenso y el movimiento lateral de la sal será propiciado por el acortamiento horizontal regional, dado que la naturaleza fluida de la sal la llevará a fluir hacia los lugares de menos presión. (Hudec & Jackson, 2007).

**2.2.1. Flujo de la sal:** Cuando se habla del flujo de la sal, existen dos tipos principales de flujo, el flujo Poiseuille y el flujo de Couette. En el primero el flujo está restringido por las fuerzas

## MIGRACIÓN OWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

cizallantes actuando en los bordes de la capa sal, lo cual causa que el flujo de sal sea más rápido en la parte central de la capa que a lo largo del tope o la base, ver Figura 2.4 (a). Por lo cual, las capas delgadas fluirán más lentamente que las de gran espesor, implicando que el flujo en una capa de sal espesa (decenas de metros o más) se ira ralentizando a medida que el espesor va disminuyendo. El segundo tipo de flujo involucra fuerzas cizallantes en la capa de sal a medida que la roca suprayacente e traslada en relación al sustrato, ver Figura 2.4 (b), lo cual implica que la capa de sal actuara como superficie de despegue, (Fossen, 2010).

**2.2.2. Mecanismos de activación:** Es necesario de algún mecanismo para que se pueda generar el movimiento de la sal antes de que la carga de sedimentos y las fuerzas de flotación puedan perpetuar el crecimiento diapírico. La Figura 2.5 muestra la activación causada por la carga diferencial, ya sea por volumen o por diferencia de densidad. La parte superior de la figura muestra como una secuencia progradante puede causar carga diferencial mediante la adición de volumen encima de las capas de sal. La parte inferior de la figura muestra como las facies cambian de densas a menos densas, en los sedimentos suprayacentes, lo cual podría accionar el movimiento de la sal. (Woodbury & Murray, 1980).



## MIGRACIÓN OWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

Figura 2.4 Los dos principales tipos de flujo que ocurren durante la deformación de la sal. Las flechas indican la velocidad, el perfil de velocidad es parabólico en (a) y lineal en (b). Modificado de: (Fossen, 2010).

La Figura 2.6 muestra otros posibles mecanismos de activación. La parte superior de la figura muestra los pliegues creados por arrastre cuando una secuencia de sedimentos salinos se desliza por una superficie de deslizamiento impuesta por el basculamiento. La parte inferior de la figura muestra los mecanismos que ponen una parte de la sal en un régimen de presión más bajo como resultado de una deformación estructural sencilla, en este caso pliegues o fallas.

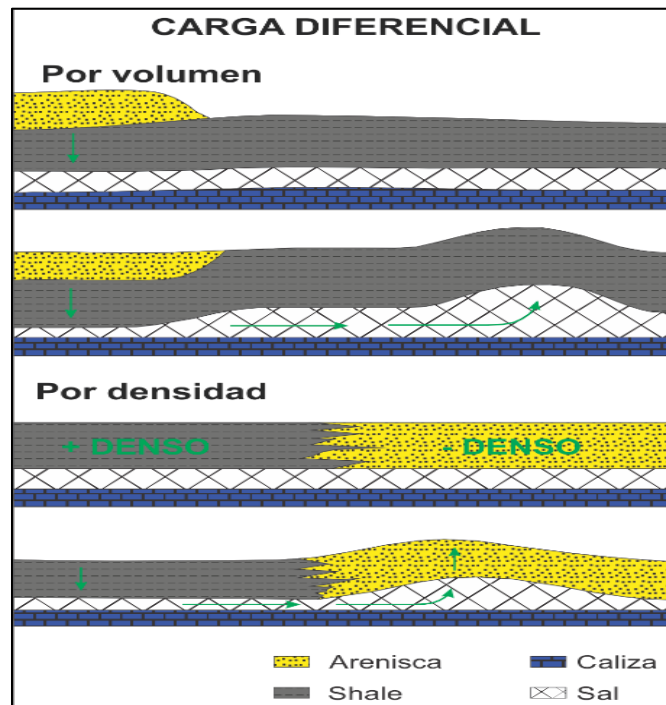


Figura 2.5 Activación del movimiento de la sal por carga diferencial, ya sea por adición de volumen o diferencia de densidad en los sedimentos que recubren la sal. Modificado de: (Woodbury & Murray, 1980).

El movimiento de la sal puede ser activado por esfuerzos de tensión, esfuerzos de compresión, o mediante enterramiento de la sal a una temperatura crítica en la que se vuelve plástica. La Figura 2.7 muestra ejemplos de estos fenómenos. La parte superior de la figura muestra como la componente horizontal del movimiento de una falla normal produce un potencial vacío en el lado

## MIGRACIÓN OWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

del bloque colgante hacia el que la sal puede moverse. La parte del centro de la figura muestra domos iniciados por esfuerzos compresivos que se transmiten lateralmente a través de la sal desde los sedimentos entre los diapiros más alejados buzamiento arriba. La parte inferior de la figura muestra un diapirismo siendo iniciado en la porción que se encuentra debajo de la zona de la temperatura crítica en la que se vuelve plástica.

Las estructuras resultantes de tectónica salina y de shale pueden ser agrupadas en dos clases: 1) aquellas que están compuestas por material dúctil (diapiros) y 2) las formadas por los sedimentos adyacentes o periféricos al sustrato móvil (fallas, pliegues entre otras). Estas estructuras son consecuencia de las propiedades físicas de las evaporitas y de los shales sobrepesurizados. Las características reológicas de los shales sobrepesurizados son más complejas y menos entendidas que las de la sal. (Acosta, 2007).

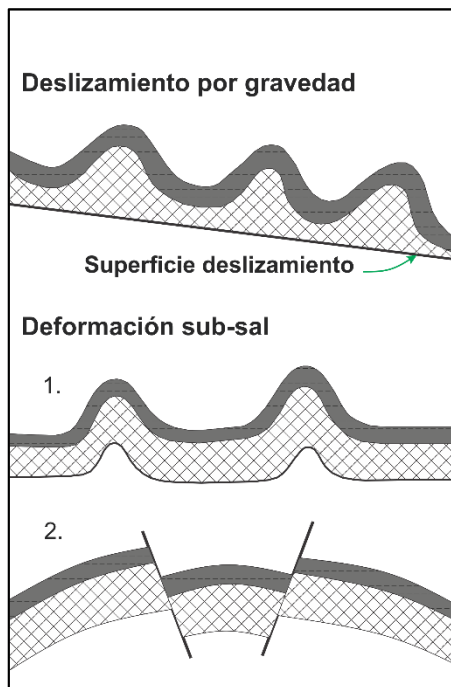


Figura 2.6 Activación del flujo de la sal por procesos tectónicos (deslizamiento,

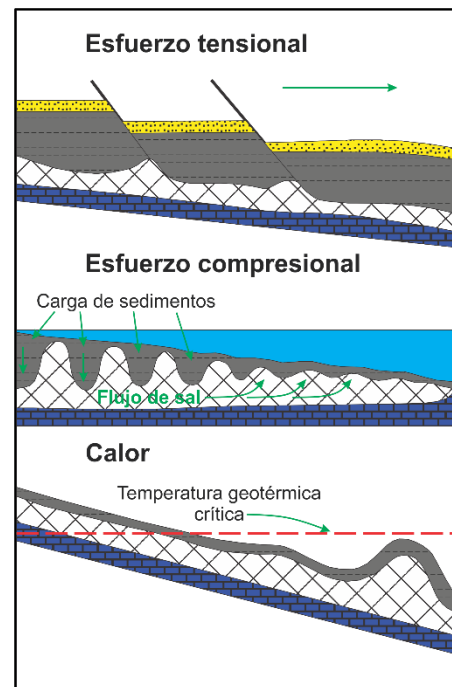


Figura 2.7 Activación del movimiento de la sal por: A. movimiento hacia un potencial espacio vacío. B. flujo debido a la carga sedimentaria. C. enterramiento hasta una

*plegamiento o fallamiento). Modificado de: profundidad y temperatura critica. (Woodbury & Murray, 1980)*  
*Modificado de: (Woodbury & Murray, 1980)*

**2.2.3. Diapiros: geometrías y crecimiento:** La palabra deriva del vocablo griego diaperein, que significa perforar. El término diapiro fue definido por (Mrazec, 1907), quien los describió como pliegues en los que al núcleo del anticlinal se levanta atravesando los estratos que constituyen el techo. (Hudec & Jackson, 2007) definen los diapiros como masas de sal que han fluido dúctilmente y han traspasado o invadido discordantemente la cobertera.

**2.2.4. Proceso de crecimiento de los diapiros:** Para que la sal sea emplazada entre la cobertera en forma de diapiro, la roca que previamente ocupaba ese espacio debe ser removida y/o desplazada. Esto puede ocurrir de 4 maneras si las rocas suprayacentes tienen un comportamiento frágil, ver Figura 2.8 (A-D). En la primera, las rocas suprayacentes sufren extensión, haciendo espacio para que un diapiro reactivo se eleve entre los bloques de falla. En la segunda, las rocas suprayacentes son levantadas, rotadas y separadas mientras el diapiro se eleva debido al diapirismo activo. En la tercera, las rocas en el techo de la sal pueden ser removidas por la erosión. En la cuarta, la sal puede desplazarse en el bloque colgante de una falla inversa. Estos cuatro procesos pueden ocurrir varias veces durante el crecimiento de las estructuras salinas. (Hudec & Jackson, 2007).

Si la cobertera tiene un comportamiento dúctil, el crecimiento del diapiro puede darse mediante un quinto mecanismo, el adelgazamiento dúctil de las rocas ubicadas en el techo del diapiro, ver Figura 2.8 (E). Sin embargo, es raro que esto suceda. Usualmente sucede cuando la cobertera está compuesta de rocas clásticas de grano fino y que tienen contenido de halita o yeso. Estrictamente hablando estos cuerpos de sal no son diapiros, ya que no tienen un contacto discordante con los sedimentos que le rodean. (Hudec & Jackson, 2012).

## MIGRACIÓN OWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

Si el diapiro perfora completamente la cobertera y queda expuesto en la superficie, se tendría un sexto estilo de perforación, ver Figura 2.8 (F). En este estilo, conocido como diapirismo pasivo, el diapiro se eleva de manera continua con respecto a los estratos de roca que le rodean y permanece expuesto en superficie a medida que los sedimento se acumulan a su alrededor. En el techo del diapiro pueden depositarse delgadas capas de sedimentos, pero usualmente son erodados. (Hudec & Jackson, 2007).

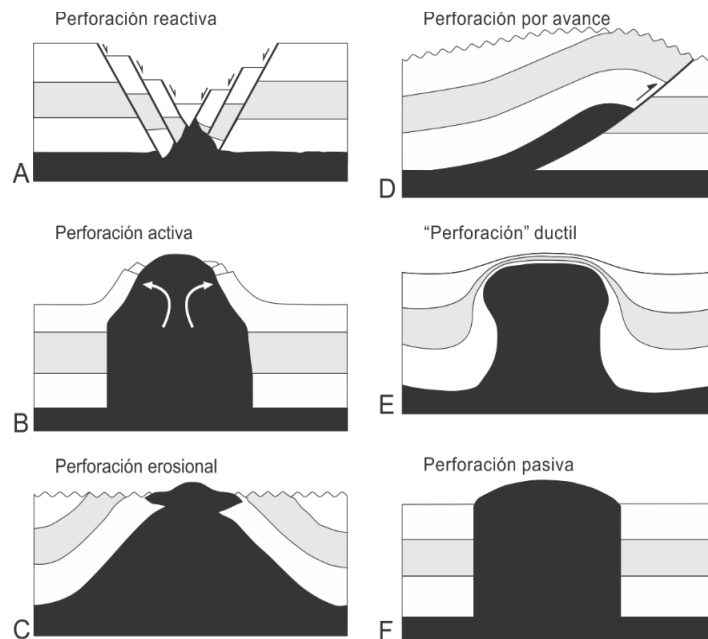


Figura 2.8 Modos de perforación diapírica, la cobertera siempre es frágil, excepto en (E). Modificado de: (Hudec & Jackson, 2012). Modificado de: (Vendeville & Jackson, 1992).

**2.2.5. Geometría de los diapiros:** Las distintas formas que pueden tener los diapiros dependen de la ductilidad de las rocas encajantes y de las anisotropías existentes en ellas, pero también dependen de la evolución del diapiro, de tal manera que las distintas formas representan los diferentes estados de la evolución del diapiro. La mayoría de los diapiros son perforantes, pero algunos no llegan a cortar las capas encajantes, limitándose solo a deformarlas. La cantidad de formas que puede adoptar un diapiro es grande, y está dada por el espesor de la capa de material salino y por la magnitud de la carga sedimentaria que suprayace dicha capa. En la Figura 2.9 se

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

observa el tipo de estructuras salinas que podemos llegar a tener dependiendo de la etapa o del tipo de fuente.

Los geocientíficos que trabajan con estructuras salinas han asignado un rico vocabulario para estas estructuras en función de su geometría; a continuación, se encuentran las descritas por (Van der Pluijm & Marshak, 2004) que son mostradas en la Figura 2.9. El nombre asignado a una estructura específica depende de su forma actual, ya que en el contexto del tiempo geológico esta forma puede tomar varias de las distintas formas que a continuación se describen.

- Bulbo desprendido (Detached bulb): Los tallos que conectan los troncos de sal a la capa de origen pueden pincharse, por lo que la sal que originalmente fue separada por el tallo queda yuxtapuesta. El flujo de la sal en los bulbos resulta en pliegues y deformaciones alrededor de ellas mismas y por lo tanto con perfiles circulares.
- Dosel o sabana desprendida (Detached canopy): Las paredes que conectan las sabanas de sal a la capa de origen pueden pincharse, por lo que la sal que originalmente fue separada por la pared queda yuxtapuesta.
- Anticlinal de sal (Salt anticline): Es una protuberancia de sal alargada en vista de planta, la sal en origen constituye una fuente lineal. Los estratos suprayacentes a estas estructuras se deforman concordantemente alrededor de la estructura.
- Dosel o sabana de sal (Salt canopy): En regiones donde la capa fuente era bastante gruesa como para formar muchos diapiros, las paredes de sal, troncos de sal y láminas de sal pueden extenderse y fusionarse en un nivel estratigráfico superior. Pueden o no estar conectados a la capa madre de sal por medio de los tallos.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

- Diapiro de sal (Salt diapir): Estructura de sal que ha perforado los estratos suprayacentes. Adquiere forma de cilindro, seta o gota y suelen ser de gran tamaño (desde varios cientos de metros hasta 3 km de diámetro).
- Domo de sal (Salt dome): Protuberancia de sal ascendente con respecto a la capa de origen y que se observa simétrica en vista de planta. Los estratos suprayacentes de estas estructuras se deforman concordantemente alrededor de la estructura.
- Glaciar de sal (Salt glacier): La sal que fluye sobre la tierra cuando el diapiro salino perfora hasta la superficie.
- Almohada de sal (Salt pillow): Es una protuberancia de sal casi simétrica en vista de planta, la sal en origen constituye una fuente puntual. Los estratos suprayacentes a esta estructura se deforman concordantemente alrededor de la estructura.

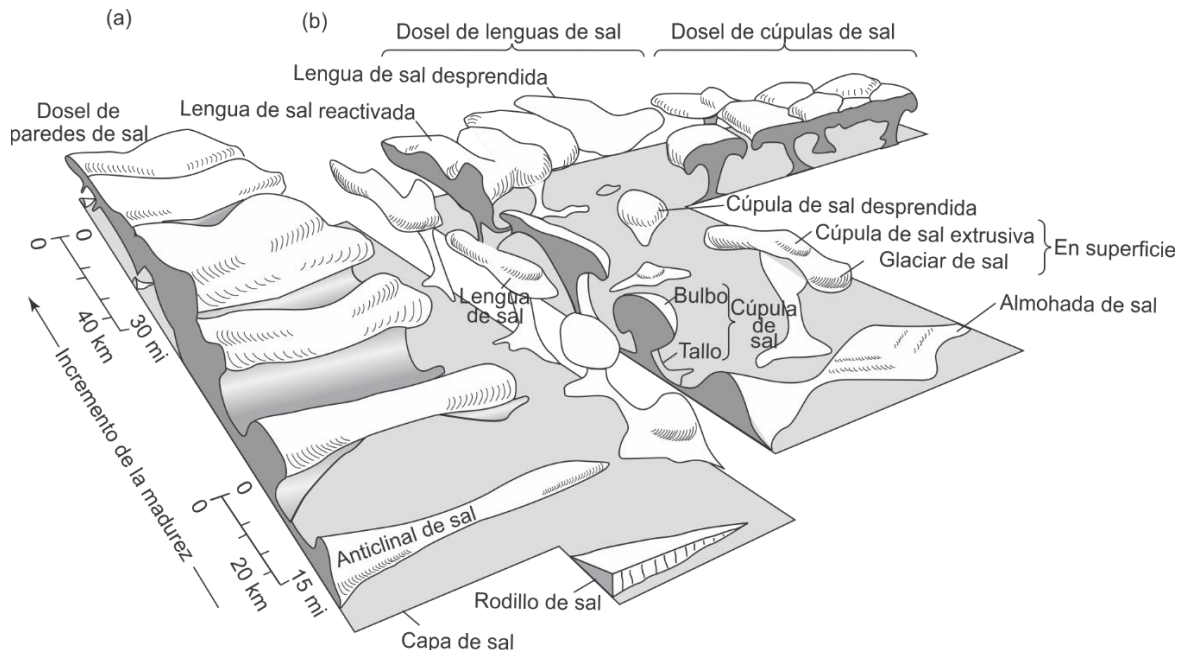


Figura 2.9 Diagrama esquemático mostrando las etapas en la formación de estructuras salinas y la terminología usada. La madurez estructural y el tamaño incrementan en la dirección indicada. La secuencia en (a) muestra el aumento de estructuras originadas de fuentes lineales, mientras que en (b) las originadas de fuentes puntuales. Modificado de: (Van der Pluijm & Marshak, 2004).

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

- Rodillos de sal (Salt roller): Es un domo de sal asimétrico que se asemeja a una ola de mar.
- Cúpula o tronco de sal (Salt stocks): Diapiro de sal equidimensional en vista de planta. Los diapiros de sal maduros son generalmente más estrechos en profundidad y más amplios en la parte superior; la parte inferior se llama tallo (stem) y la parte superior se llama bulbo (bulb).
- Pared de sal (Salt wall): Estructura en forma elongada con un tamaño mayor que los domos.
- Escamas o láminas de sal (Salt sheets): Estas abarcan cualquier estructura salina alóctona cuya longitud es al menos 5 veces mayor que su máximo espesor, por lo que incluye lengüetas (salt tongues). (Dan, 2014).

A profundidades menores a 1 km los sedimentos recién depositados son tan porosos que su densidad es menor que la de la sal, por lo cual si son lo suficientemente blandos la sal frena su ascenso y comienza a extenderse lateralmente entre ellos, formando sabanas y láminas de sal.

### **2.3 Las evaporitas y los hidrocarburos**

(Downey, 1984) indica que todos los campos gigantes de gas en cinturones plegados tienen sellos evaporíticos, dada su habilidad de mantener su capacidad de sello mientras se deforma, cuando otro tipo de rocas se fracturarían o fallarían y dejarían escapar el gas. Aunque las evaporitas constituyen menos del 2% de las rocas sedimentarias, la mitad de los campos de petróleo más grandes del mundo están sellados por evaporitas, la otra mitad está siendo sellada por shales. Las evaporitas suprayacen o sellan carbonatos que contiene un estimado del 50% del petróleo conocido en el mundo. De los 25 campos de gas más grandes del mundo, 9 tienen como roca sello a las

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

evaporitas y los otros 16 a shales o a hidratos. Dieciséis están atrapados por sellos Mesozoicos, 7 por sellos Paleozoicos, y solos dos por sellos Cenozoicos (Warren J. , 2006).

(Warren J. , 2016) ofrece una clasificación para las evaporitas de acuerdo a su posición del reservorio con respecto a las mismas, el rol que han tenido en la formación del reservorio y su papel en el sellado y la formación del reservorio (ver Figura 2.10). Estas tres posiciones del potencial reservorio son llamadas: sub-sal, intra-sal y supra-sal.

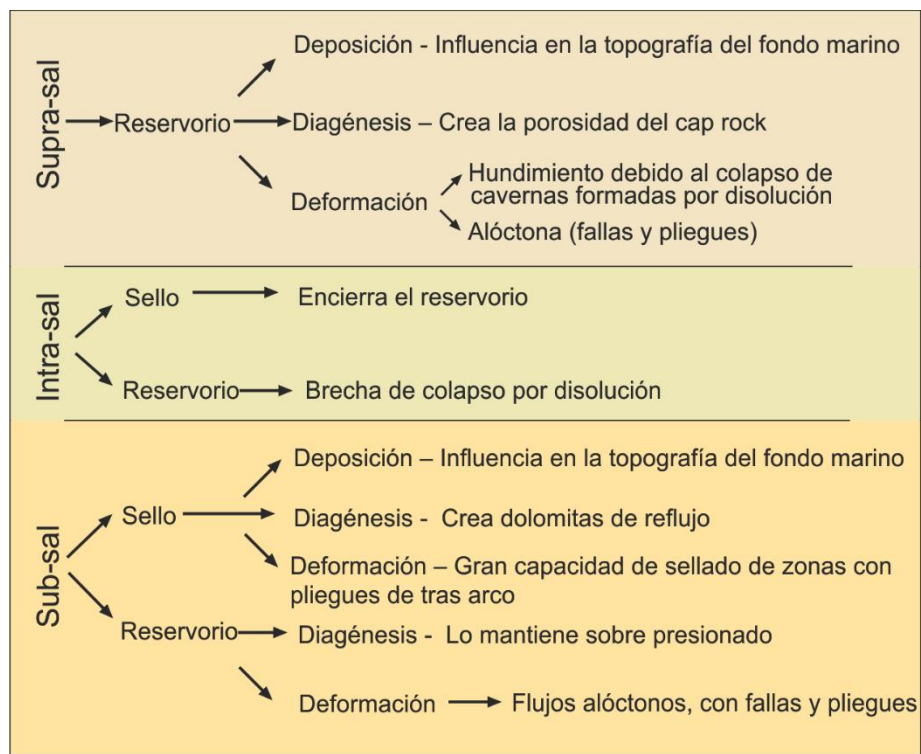


Figura 2.10 Clasificación de los sellos evaporíticos y la posición de los reservorios asociados. Modificado de: (Warren J. , 2016).

**2.3.1. Las evaporitas como sello de los hidrocarburos:** Aunque la presencia de evaporitas en la cuenca tiene gran influencia en el proceso de formación de la trampa, en la maduración y migración de los hidrocarburos, es quizás su eficiencia para retener grandes columnas de hidrocarburos durante largos periodos de tiempo la que causa más interés en los geocientíficos. (Macgregor, 1996), basándose en una base de datos de 350 campos de petróleo gigantes mostró

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

que las acumulaciones de hidrocarburos son fenómenos de corta duración, con una vida media de 35 Ma debido a que son afectados por procesos destructivos post-entrapamiento (erosión, fallas y biodegradación), encontrando que los principales controles en la preservación de estas acumulaciones es el tectonismo post-entrapamiento y el tipo de sello. Él concluyó que el potencial de preservación de estas gigantescas acumulaciones es más grande en cuencas tectónicamente inactivas con sellos evaporíticos, siendo el Oriente Medio el área que mejor lo ejemplifica.

Según (Downey, 1984) en términos de capacidad de sellar y resistencia al fracturamiento, el sello sedimentario más efectivo son los hidratos de gas, seguidos de las evaporitas y después los shales. Para sellar una acumulación económica de hidrocarburos un sello necesita ser lateralmente continuo y extenso, mantener sus propiedades litológicas en grandes áreas y ser relativamente dúctil. Otro requerimiento fundamental para que un sello sea efectivo es que la presión de desplazamiento de la superficie de sellado sea mayor que la presión de flotabilidad de la columna de hidrocarburos. De acuerdo a (Beauheim & Roberts, 2002) sello de shale típico tiene permeabilidades del orden de  $10^{-1}$  a  $10^{-5}$  md mientras que la halita tiene permeabilidades que van de  $10^{-7}$  a  $10^{-9}$  md, lo cual, sumado con su extrema ductilidad las hace un sello excelente.

### **2.4 Sistema petrolífero**

Según (Magoon & Dow, 1994) un sistema petrolífero es un concepto unificado que abarca todos los elementos y procesos que son necesarios para la acumulación convencional de hidrocarburos en la corteza terrestre, incluyendo: los elementos (roca fuente, roca almacén, roca sello y roca sobrecarga) y los procesos (formación de la trampa, generación-migración-acumulación).

## MIGRACIÓN OWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

Para (Dribus & Jackson, 2008) un sistema petrolífero es un sistema natural que comprende elementos y procesos geológicos necesarios para que un yacimiento de petróleo y/o gas exista (ver Figura 2.11), estos elementos y procesos clave son los siguientes:

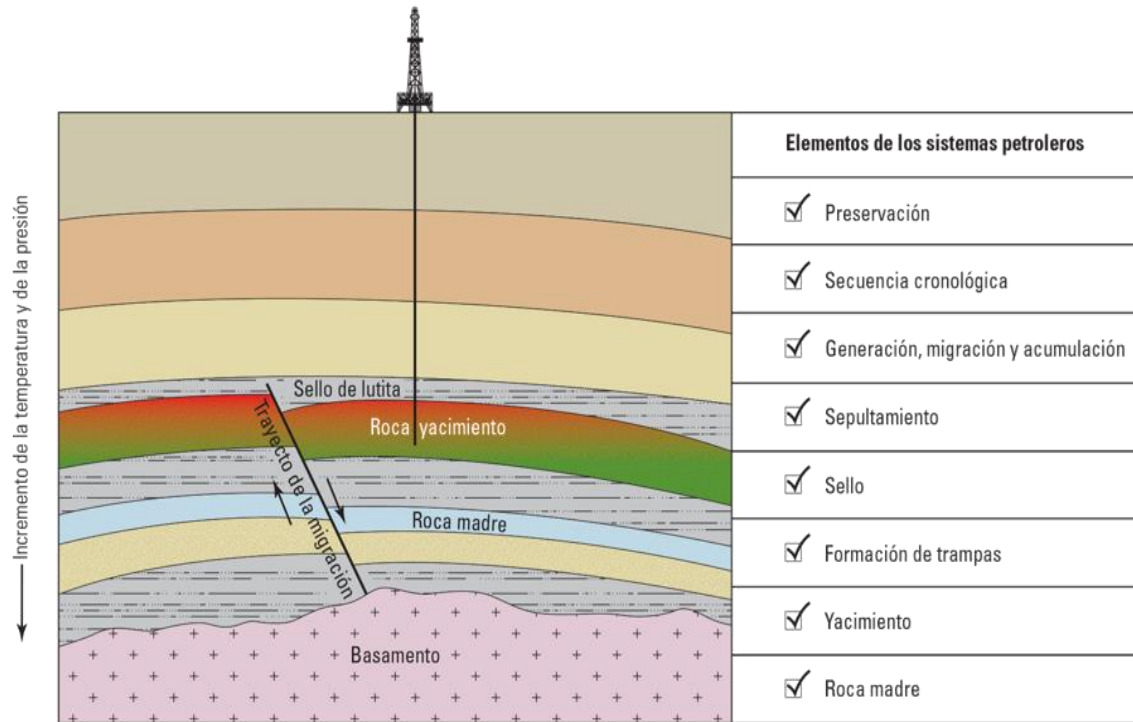


Figura 2.11 Sistema petrolero. Para evaluar la viabilidad de un sistema petrolero, se debe determinar la existencia de todos sus elementos críticos, estos elementos deben ser considerados en función de la secuencia cronológica de los procesos claves. Tomado de: (Dribus & Jackson, 2008).

- La roca generadora que contiene la materia orgánica con suficiente calidad y cantidad para generar hidrocarburos.
- Temperatura y presión (logradas con el enterramiento) suficiente para convertir la materia orgánica en hidrocarburos.
- Proceso y ruta de migración del hidrocarburo.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

- Roca reservorio con suficiente porosidad para acumular y almacenar el hidrocarburo y suficiente permeabilidad para eventualmente producir hidrocarburos.
- Trampa y sello para detener el proceso de migración y brindar contención al reservorio.
- Sincronismo (timing) que asegure que la generación de hidrocarburos ocurra cuando la trampa y el sello estén presentes para retener los hidrocarburos mientras se da la migración.
- Preservación para evitar la destrucción cuando se den procesos tectónicos, de temperatura o de erosión en la superficie.

Históricamente se han explorado los cuerpos salinos dado que presentan una probabilidad elevada de estar relacionados con acumulaciones de hidrocarburos dado que la baja permeabilidad de la sal la convierte en un excelente sello. Dichas campañas exploratorias tenían como objetivo las zonas que rodean las estructuras salinas por el hecho de que allí era donde se encontraban los yacimientos de hidrocarburos, pero ante la creciente demanda de los mismos el objetivo ahora consiste en identificar los plays presalinos y subsalinos.

**Play:** Habitualmente, la exploración se enfoca en una región determinada para desarrollar una extensión productiva (play), que es un conjunto de áreas prospectivas petroleras potenciales controladas por las mismas condiciones geológicas (sistema petrolero). (Stewart, 2011).

Para la definición de play subsalino y presalino debemos tener en cuenta las diferentes zonas que se pueden tener de acuerdo con su ubicación respecto a la sal.

**Zona pre-sal:** sedimentos más antiguos que la sal y que subyacen la sal autóctona.

**Zona sub-sal:** sedimentos más jóvenes que la sal y que subyacen la sal alóctona.

**Zona supra-sal:** sedimentos que suprayacen los cuerpos de sal, alóctonos y autóctonos.

### 2.5 Indicadores directos de hidrocarburos

Para (Schlumberger, 2017) los indicadores directos de hidrocarburos (DHI por sus siglas en ingles), son valores anómalos de la amplitud sísmica, eventos sísmicos, o rasgos de los datos sísmicos que se pueden dar debido a la presencia de un yacimiento de hidrocarburos. A continuación, se mencionan los principales DHIs:

- Variaciones de la amplitud con el offset.
- Puntos brillantes o puntos oscuros en la amplitud, resultado de variaciones de la litología o de los fluidos intersticiales.
- Cambios o inversiones en los valores de la amplitud.
- Concordancia de las estructuras locales.
- Flat spots u horizontes planos, que representan el contacto entre fluidos.
- Chimeneas de gas, sobre los yacimientos.
- Blanqueamiento de amplitudes que se presentan debajo de las acumulaciones.

### 3 Creación de modelos sintéticos

Los modelos sintéticos 2D que se usaron para simular las distintas situaciones en que se pueden encontrar los plays sub-salinos fueron construidos teniendo en cuenta los conceptos mencionados en el **capítulo 2** o teniendo en cuenta interpretaciones hechas por algunos autores en zonas con presencia de sal. Se tomaron en cuenta los siguientes aspectos a evaluar en los métodos de migración al momento de la construcción de los modelos sintéticos:

- Variación de la precisión del modelo de velocidad.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

- Variación de la complejidad estructural del modelo.

Los modelos sintéticos que se utilizaron para el modelamiento (velocidad de onda P, velocidad de onda S y densidad) inicialmente fueron construido en el software CorelDRAW y guardados en el formato Portable Network Graphics (PNG) en la escala de azules. Posteriormente estos fueron convertidos a modelos uniformemente muestreados por medio de la función *ImportModel\_Seismic* del software MATLAB usando el archivo de procesamiento por lotes de (Goyes & Reina, 2015) ver Figura 3.1. Dicha función tiene como únicos parámetros de ingreso el nombre del archivo de imagen y los valores de la propiedad que se desean asignar a cada una de las capas, generándonos un archivo binario.

Se utilizó esta metodología en lugar de la convencional que se basa en el uso del módulo *Triangulated Sloth Model (trimodel)* de Seismic Unix (Cohen & Stockwell, 2017). Este módulo permite crear interfaces con geometría variable mediante la interpolación de los puntos definidos por el usuario, lo cual conlleva un consumo excesivo de tiempo.

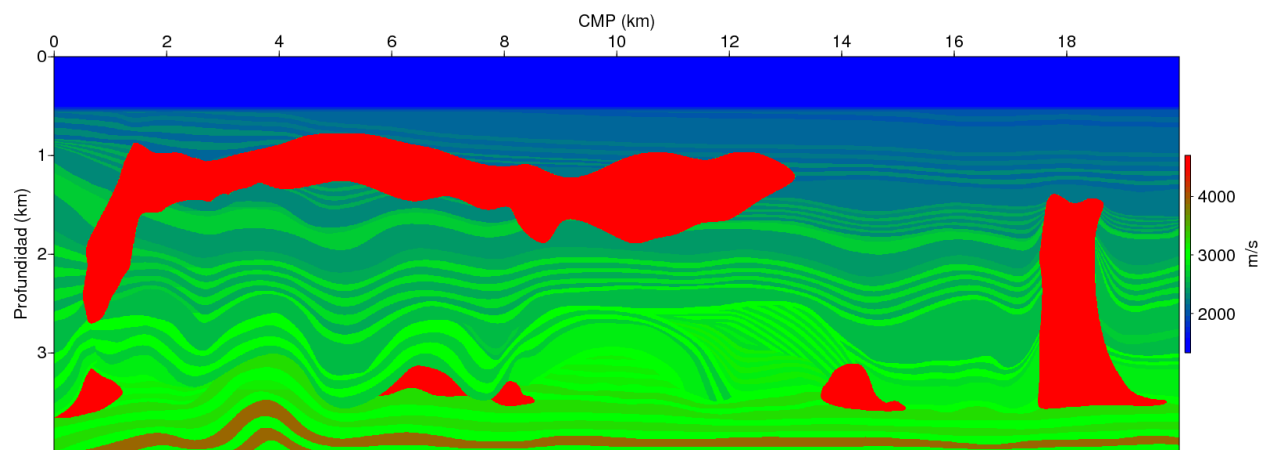


Figura 3.1 Modelo de velocidad de onda P construido mediante la función *ImportModel\_Seismic*. En tonalidades rojas se observan los cuerpos de mayor velocidad, que en este caso corresponden a la sal.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

### 3.1 Consideraciones geométricas

Para asegurar que los parámetros de adquisición fueran los mismos, y no influyeran en los resultados, se decidió establecer las siguientes condiciones a la hora de construir los modelos sintéticos:

- Los modelos usados tienen una longitud de 20 km y una profundidad de 4 km.
- Los modelos tienen un  $n_1=800$ , un  $n_2=4000$ , un  $d_1=5$  y un  $d_2=5$ .
- Para hacer los modelos más apropiados para la adquisición, tendrán una capa de agua de 550 m y el fondo marino será completamente plano.
- Con el fin de reducir una respuesta sísmica fuerte del fondo marino, se ha incluido una capa de transición de 50m de espesor sobre el fondo marino, con lo que el nuevo fondo marino se ubicara a 500 m.

### 3.2 Definición de las propiedades elásticas de los modelos

El primer paso para la definición de las propiedades ( $V_p$ ,  $V_s$  y  $\rho$ ) es la asignación de la litología a cada capa, las cuales han sido asignadas siguiendo las siguientes reglas:

- Las propiedades de la halita y la anhidrita no variarán con la profundidad.
- La primera capa de roca estará compuesta de shales.
- El valor de las propiedades de la capa de transición, variaran desde el menor valor (capa de agua) hasta el valor de la primera capa.
- Las litologías de las capas presentes en los modelos podrán ser: areniscas, shales, calizas, dolomías, halita o anhidrita.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

- Una vez asignada la litología de las capas se procedió a asignar la velocidad de onda P de las mismas, para lo cual, en la mayoría de los casos se tuvo como base la Tabla 3.1 y de la Tabla 2.2.

Tabla 3.1 Velocidades medias de propagación de la onda P.

Litología	Rango de Vp	Saturación	Fuente
<b>Arenisca</b>	3.13-5.52	Agua	(Han D. H., 1986).
<b>Arenas con alta porosidad</b>	3.46-4.79	Agua	(Strandenes, 1991).
<b>Arenas apretadas con gas</b>	3.81-5.57	Gas	(Jizba, 1991).
<b>Arenas poco consolidadas</b>	2.43-3.14	Agua	(Blangy, 1992)
<b>Caliza</b>	3.39-5.79	Agua	(Lucet, 1989); (Cadoret, 1993); (Yale & Jamieson, 1994).
<b>Dolomía</b>	3.41-7.02	Agua	(Geertsma, 1961); (Yale & Jamieson, 1994).
<b>Shales</b>	1.50-2.50	Agua	(Bourbie & Coussy, 1987).

Una vez establecida la velocidad de onda P para cada una de las capas, se procedió a usar las relaciones empíricas establecidas por (Greenberg & Castagna, 1992) para estimar Vs a partir de Vp, y la relación de (Castagna & Batzle, 1993) para estimar la densidad a partir de Vp.

Tabla 3.2 Velocidad de onda S y densidad estimadas a partir de Vp (km/s).

Litología	Vs (km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Arena</b>	$V_s = 0.80416V_p - 0.85588$	$\rho = -0.0115V_p^2 + 0.261V_p + 1.515$
<b>Caliza</b>	$V_s = -0.05508V_p^2 + 1.01677V_p - 1.03049$	$\rho = -0.0296V_p^2 + 0.461V_p + 0.963$
<b>Dolomita</b>	$V_s = 0.58321V_p - 0.07775$	$\rho = -0.0235V_p^2 + 0.390V_p + 1.242$
<b>Shale</b>	$V_s = 0.76969V_p - 0.86735$	$\rho = -0.0261V_p^2 + 0.373V_p + 1.458$

**3.2.1. Definición de las propiedades elásticas de las zonas con hidrocarburos:** Para la asignación de propiedades elásticas de las zonas con presencia de hidrocarburos, se recurrió al software Gassmann's Fluid Substitution v1.0 (Al-Khateb, 2015), el cual aplica la técnica de sustitución de fluidos, basándose en las ecuaciones de Gassman. Esto con el fin de asegurar que en las secciones migradas los valores de reflectividad de las zonas con hidrocarburos fueran lo más reales posibles. Para el correcto entendimiento de esta técnica se recomienda la lectura de los trabajos de (Smith & Sondergeld, 2003) y (Kumar, 2006), quienes muestran el fundamento físico y la aplicabilidad de esta técnica de una manera clara.

#### **4 Modelado elástico de la respuesta sísmica de los plays pre y sub salinos.**

El modelado de la respuesta sísmica en un medio elástico, tiene en cuenta la propagación de ondas compresionales y transversales. Dichos medios pueden describirse a través de la velocidad de onda P, velocidad de onda S y densidad de las partículas en las cuales se propaga el campo de onda.

##### **4.1 Diseño de la adquisición**

A pesar de que se está en un ambiente marino, se decidió escoger un arreglo de receptores tipo split spread en lugar de un arreglo end-on spread (ver Figura 4.1), dado que se está trabajando con modelos sintéticos y no se cuenta con los inconvenientes de localización de la fuente que se tendría al realizar una adquisición sísmica offshore, esto con el fin de tener una mejor cobertura de datos en los modelos que presentan estructuras con buzamientos casi verticales. La longitud del tendido fue establecida para poder iluminar las zonas donde se ubicaban los plays en la sísmica. Los parámetros de adquisición se muestran en la Tabla 4.1.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

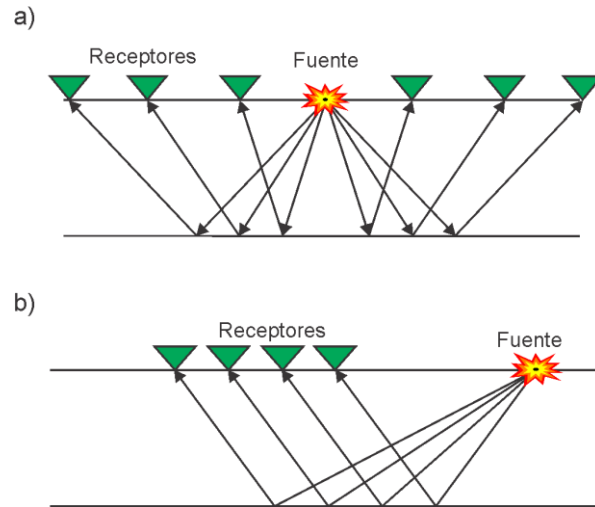


Figura 4.1 Dos tipos de arreglos: a) split spread y b) end-on spread. Modificado de (Martillo, 2010).

La adquisición sísmica fue llevada a cabo usando el módulo *suea2df* (SU version of (an)elastic anisotropic 2D finite difference forward modeling) de Seismic Unix (Cohen & Stockwell, 2017). Este módulo nos permite modelar la propagación de ondas P y S en medios anisótropos mediante diferencias finitas usando una aproximación de cuarto orden de la ecuación de onda elástica. El intervalo de muestreo  $\Delta t$  se calculó de según la aproximación hallada por (Levander, 1988):

$$\Delta t = 0.606 \frac{h}{\alpha} \quad 4.1.1$$

Donde  $h$  corresponde con el intervalo de muestreo en la dirección de  $z$  y  $\alpha$  con la velocidad de onda P máxima del modelo. Así, el intervalo de muestreo fue de 0.00046 segundos para los modelos que presentaban impurezas de anhídrita en la halita y de 0.00067 segundos para los que presentaban halita, pero no anhídrita. La frecuencia media seleccionada para las fuentes fue de 25 Hz, la cual minimizaba los efectos de dispersión de la malla y mejoraba la definición de los reflectores.

Tabla 4.1 Parámetros de adquisición

Parámetro	Valor
Número de receptores	500
Número de disparos	199
Distancia entre disparos	100 m
Distancia entre receptores	20 m
Posición del primer disparo	100 m
Posición del ultimo disparo	19900 m
Posición del primer receptor	0 m
Posición del ultimo receptor	19980 m
Profundidad de las fuentes	10 m
Profundidad de los receptores	10 m

## 4.2 Procesamiento de los datos sísmicos

Una vez realizada la adquisición, se procedió a eliminar la onda directa y las primeras refracciones de todos los disparos, ver Figura 4.2, mediante el módulo *sumute* (SU Surgically Muting Data). Con el fin de disminuir los requerimientos de almacenamiento de los disparos, se hizo un remuestreo del intervalo de muestreo a una tasa  $dt=0.002$  s (este remuestreo no produjo pérdida de detalle en los reflectores) usando el módulo *suresamp* (SU Resample Data in Time).

Para corregir los valores de amplitud de los datos, ocasionada por el decaimiento de la energía con la distancia (divergencia esférica) se aplicó un control de ganancia automática (*Automatic Gain Control*, AGC), ver Figura 4.3, mediante el módulo *sugain* (Gaining to SU data). Posteriormente todos los disparos fueron concatenados mediante el uso de la rutina *cat* de Linux a fin de generar un único archivo sísmico para el procesamiento.

**4.2.1. Adición de cabeceras y ordenamiento por CMP:** La asignación de la cabecera CDP (punto común en profundidad) fue calculada, a partir de los valores de la posición de la fuente  $sx$  y la posición del geófono  $gx$ , como el punto medio común CMP. Todo esto usando el módulo *suchw* (SU Change Header Word using one or two header word fields). Una vez hecho esto, las

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

trazas se ordenaron según el valor de la cabecera CDP, y dentro de cada CDP fueron organizadas según el valor del offset de cada traza, usando el módulo *susort* (SU Sort on any segy header keywords), ambos ordenamientos en de forma ascendente. Todo esto con el fin de poder extraer las trazas con un mismo punto medio común para llevar a cabo el análisis de velocidad.

Mediante el módulo *sukeycount* (SU Writes a count of a selected key) se extrajo el número de trazas pertenecientes a cada uno de los CMPs y se graficaron dichos valores para observar el cubrimiento de nuestros datos, ver Figura 4.4, con el fin de escoger los CMPs con el mayor número de trazas (de 2500 m a 17490 m con un numero 50 trazas cada uno).

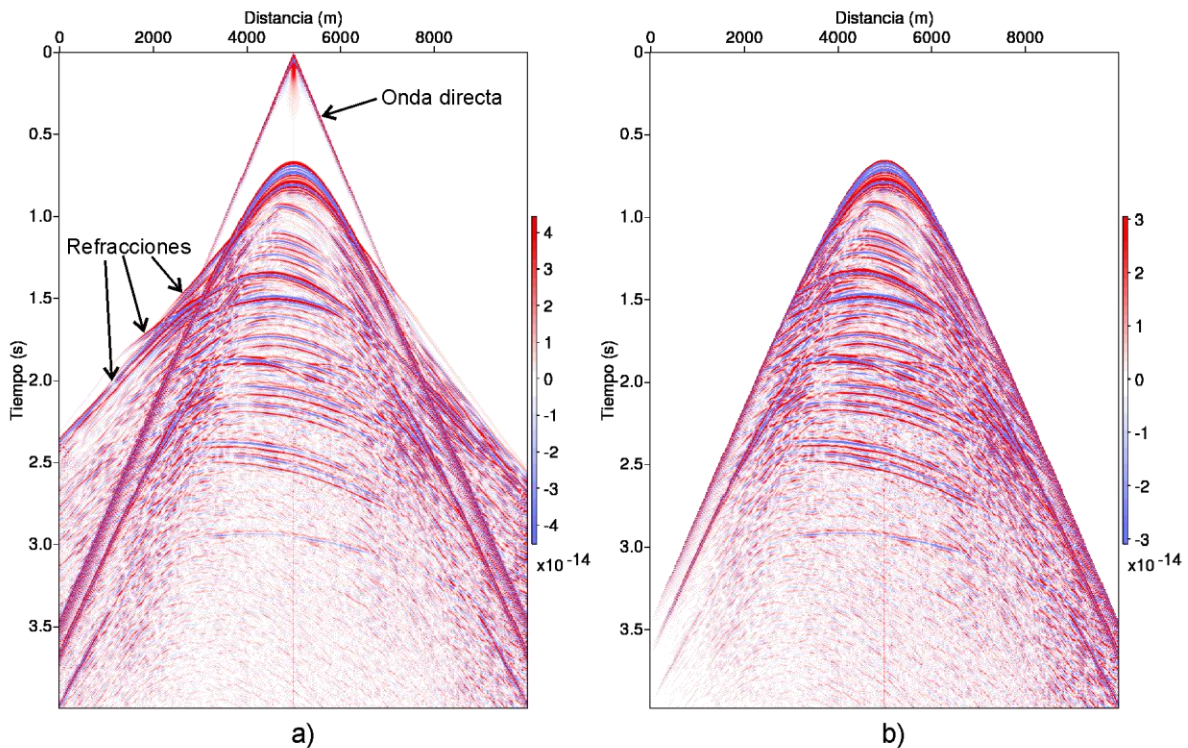


Figura 4.2 a) disparo 101 original, b) disparo 101 una vez eliminadas la onda directa y las primeras refracciones.

## MIGRACIÓN OWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

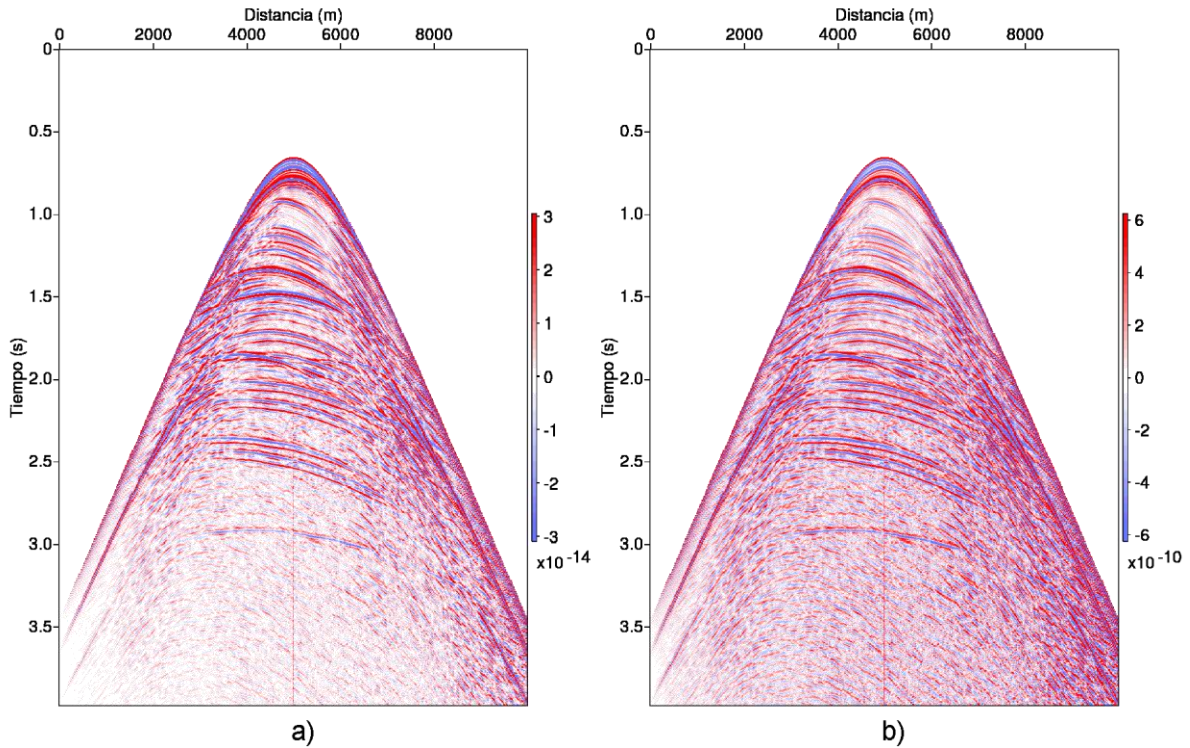


Figura 4.3 a) Disparo 101 una vez eliminada la onda directa y las primeras refracciones, b) disparo 101 con control de ganancia automática AGC.

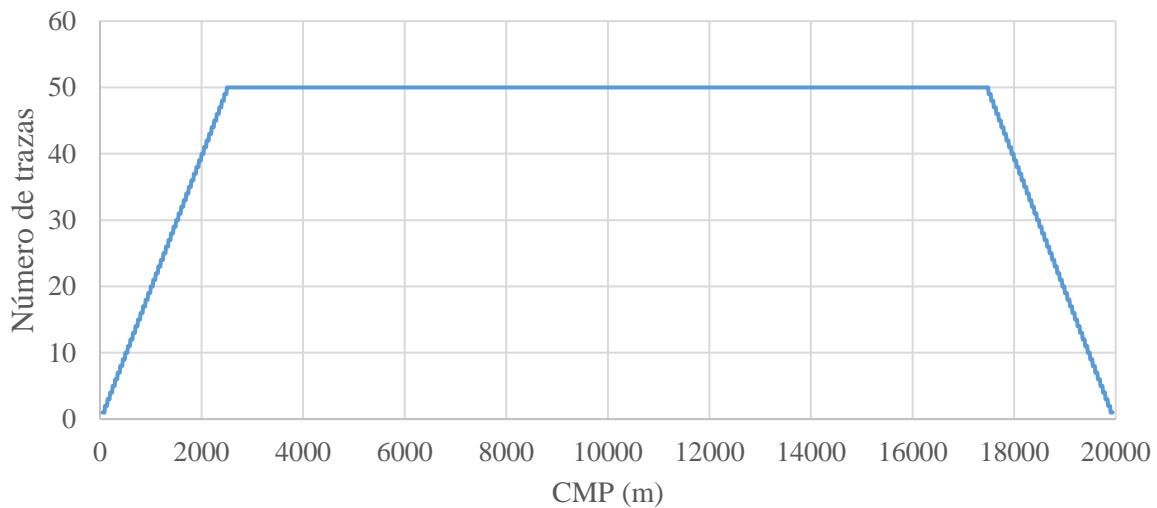


Figura 4.4 Gráfica del cubrimiento de los datos adquiridos.

**4.2.2. Análisis de velocidad y corrección NMO:** El análisis de velocidad se llevó a cabo utilizando una modificación de los scripts presentados por (Stockwell, 2015), los cuales requieren

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

como datos de entrada el archivo sísmico ordenado por *cdp* y *offset* y la posición de los CMPs a los cuales se les está realizando el análisis de velocidad.

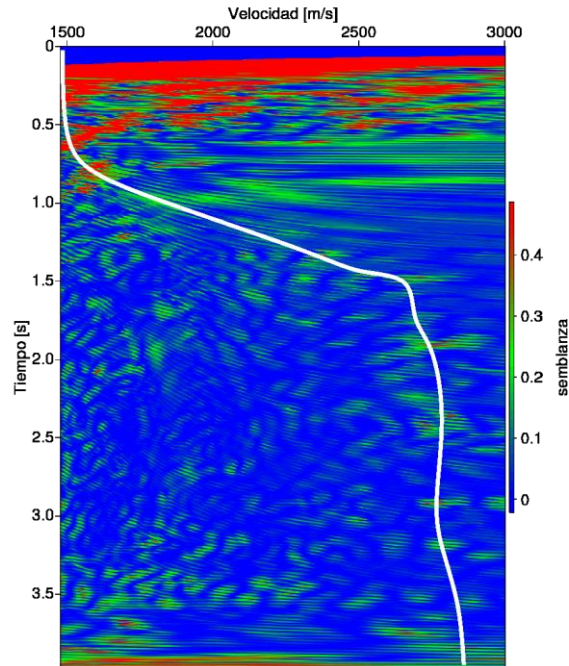


Figura 4.5 Análisis de velocidad realizado para el CMP 10000, las zonas de color rojo son las de mayor semblanza.

La modificación de los scripts de (Stockwell, 2015) permiten realizar el análisis de velocidad mediante la técnica de análisis de semblanza, implementada en el módulo *suvelan* (SU Velocity analysis), el cual nos presenta el espectro de velocidades para poder picar las zonas de mayor semblanza, ver Figura 4.5, que corresponden a las velocidades RMS o de apilamiento más adecuadas para horizontal izar cada uno de los eventos presentes en el CMP analizado, ver Figura 4.6. A partir del CMP ubicado a 500 m se analizaron CMPs cada 50 m hasta llegar 19490 m. Los valores de tiempo y velocidad RMS registrados para las zonas de mayor semblanza en los CMPs se almacenaron en archivos de texto para posteriormente aplicar la corrección NMO mediante el módulo *sunmo* (SU Normal Move Out). El NMO (sobretiempo normal por distancia) que es el efecto la distancia entre el receptor y la fuente sobre el tiempo de arribo de la energía reflejada en

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

una capa plana, dado que a medida que aumenta esta distancia se induce un retraso en el tiempo de arriba.

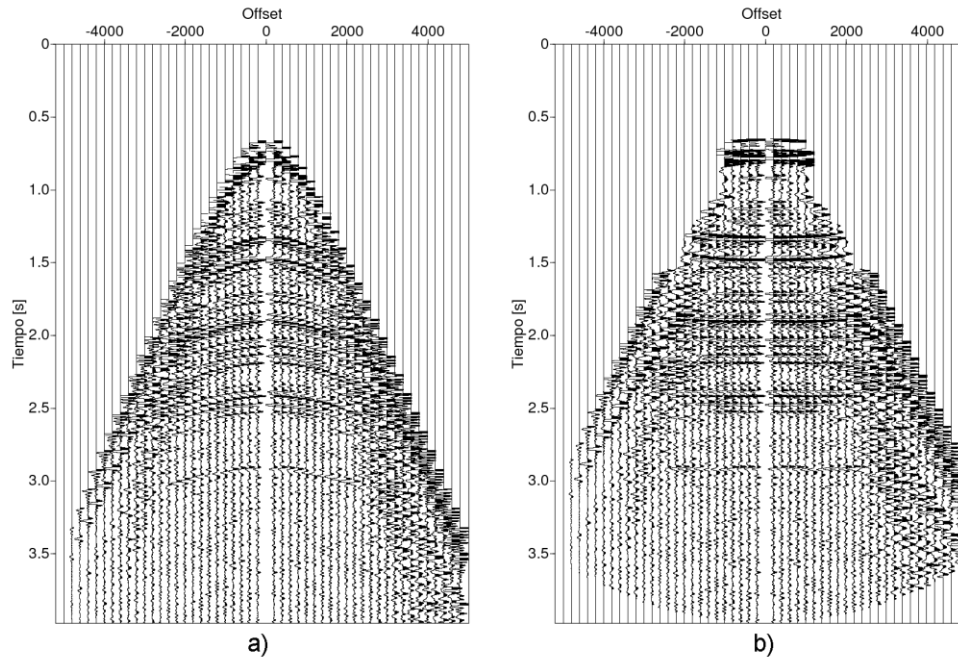


Figura 4.6 a) Trazas pertenecientes CMP 10000 ordenadas por offset, b) trazas del CMP 10000 con la corrección NMO.

**4.2.3. Construcción del modelo de velocidad interválica:** Una vez realizado el análisis de velocidad, se procedió a construir los perfiles de velocidad para cada uno de los CMPs analizados mediante el módulo *unisam* (SU Uniformly 48onver a function  $y(x)$  specified as  $x,y$  pairs), en el cual los valores de tiempo y velocidad RMS son introducidos en los archivos de texto generados durante el análisis de velocidad para cada CMP. Una vez generados estos archivos, se procedió a concatenarlos mediante el uso de la rutina *cat* de Linux a fin de generar un modelo de velocidad RMS 2D, ver Figura 4.7.

Una vez obtenido el modelo de velocidad RMS en tiempo, se utilizó el módulo *velconv* (SU Velocity 48conversión) para convertir nuestra sección de velocidad RMS en tiempo a velocidad interválica en tiempo, y luego convertir de velocidad interválica en tiempo a velocidad interválica

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

en profundidad, ver Figura 4.8 y Figura 4.9. Dicho modulo, implementa las ecuaciones de (Dix, 1955) para convertir de velocidad RMS a interválica y viceversa, ver ecuación 4.2.1

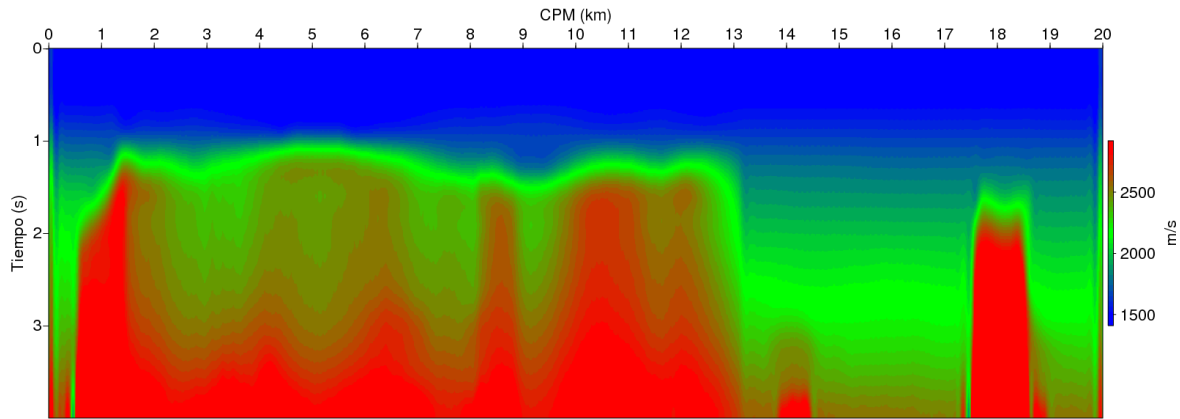


Figura 4.7 Modelo de velocidad RMS construido a partir del análisis de velocidad.

$$V_{int}^2(n) = \left[ \frac{V_{rms}^2(n)T_n - V_{rms}^2(n-1)T_{n-1}}{T_n - T_{n-1}} \right] \quad 4.2.1$$

Donde  $V_{int}$  es la velocidad interválica,  $V_{rms}$  es la velocidad RMS y  $T$  es el tiempo.

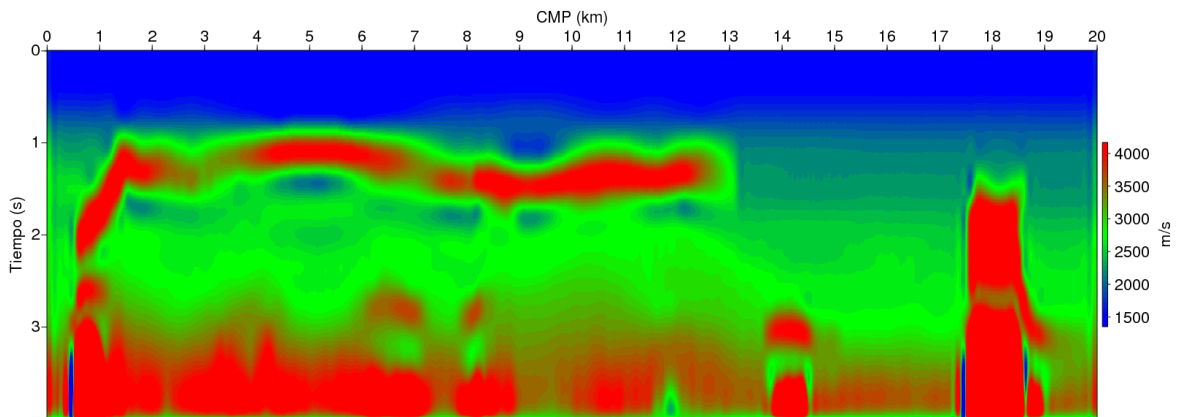


Figura 4.8 Modelo de velocidad interválica en tiempo.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

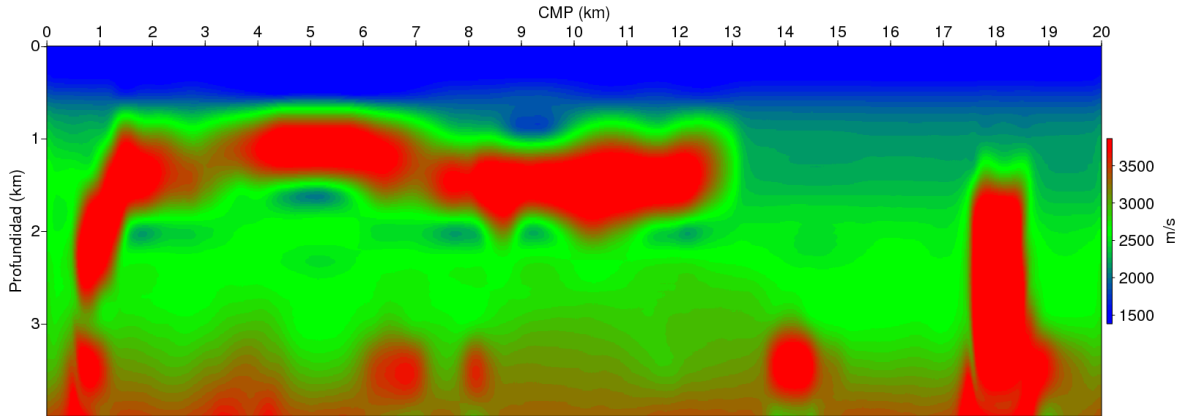


Figura 4.9 Modelo de velocidad intervállica en profundidad.

**4.2.4. Apilamiento:** Posteriormente a la corrección NMO se procedió a apilar los datos mediante el módulo *sustack* (SU Stack adjacent traces), el cual suma todas las trazas de cada CMP para formar una sola traza y reducir el ruido, así, la sección apilada estará formada por cada una de las trazas resultantes de apilar los CMPs, mostrándonos los reflectores que son el producto de los contrastes de impedancia en el subsuelo, en nuestro caso, los contrastes de impedancia en nuestros modelos sintéticos, ver Figura 4.10.

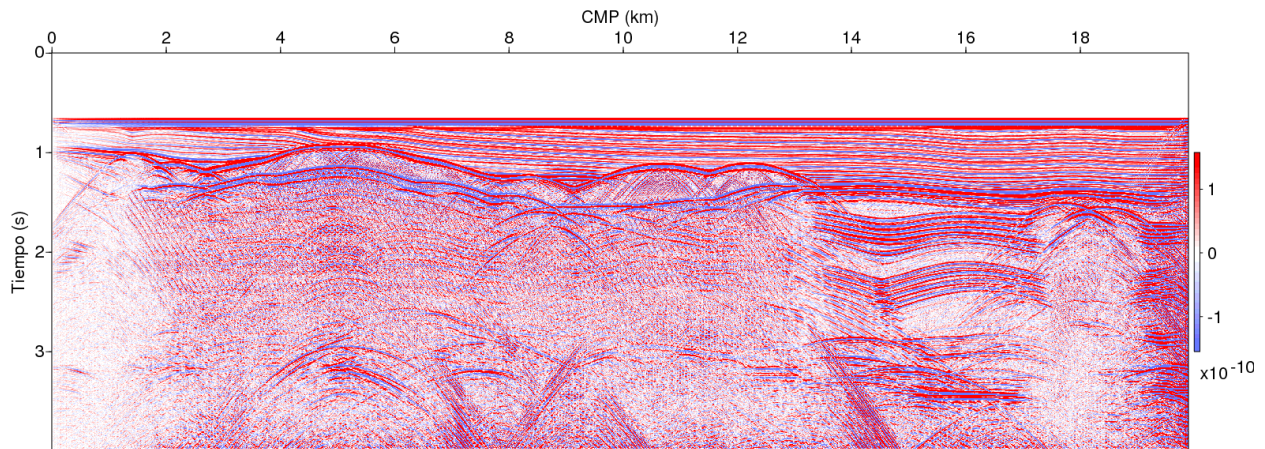


Figura 4.10 Sección sísmica apilada.

## 5 Migración.

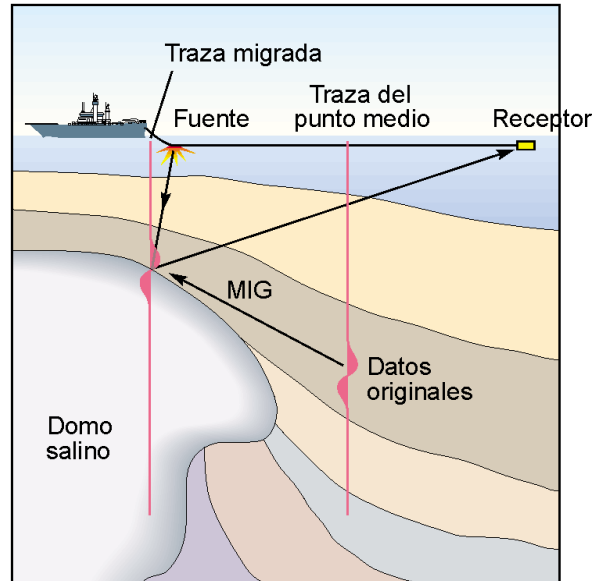
La señal sísmica contenida por cada una de las trazas en los CMPs corregidos por NMO usualmente se asocia con la energía proveniente de eventos ocurridos directamente debajo de los CMPs, dicha suposición normalmente no es correcta, dado que solo funciona en capas totalmente horizontales, y en la naturaleza estas por lo general se encuentran inclinadas o deformadas. Con el fin de corregir los errores generados por esta suposición se debe aplicar una migración a los datos sísmicos.

Para (Yilmaz, 2001) la migración mueve los reflectores buzantes a su verdadera posición en el subsuelo y colapsa las difracciones, de igual manera incrementa la resolución espacial y produce una imagen sísmica, mostrando así rasgos complejos del subsuelo como planos de falla e indicando la presencia de estructuras salinas usualmente flanqueadas por estratos con buzamientos fuertes.

Para (Black, et al., 2008), la migración es un proceso que construye una imagen a partir de los datos registrados, reposicionando los datos en su posición real en el subsuelo. Existen dos enfoques principales para realizar la migración: migración en tiempo y migración en profundidad, ambos pueden ser realizados antes o después del apilado.

Para (Albertin, et al., 2002) la migración es un proceso que redistribuye la energía sísmica reflejada utilizando un modelo de velocidad, llevándola desde la posición supuesta en el CMP a su verdadera posición, ver Figura 5.1. Es posible escoger distintos métodos de migración de acuerdo a la complejidad estructural de la zona. Se puede obtener secciones migradas de estructuras simples y con variaciones leves de velocidad usando métodos de migración simples, pero es posible que dichos métodos no funcionen en zonas con estructuras complejas donde la velocidad puede variar rápidamente.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA



*Figura 5.1 La migración reubica el dato original, pasando de la posición registrada en el CMP a su verdadera posición (MIG). Tomada de (Albertin, et al., 2002).*

En la Figura 5.2 se puede observar como la migración colapsa la energía de las difracciones del centro de la sección apilada y ubica los eventos en su verdadera posición, mostrando un sinclinal relativamente simple.

Para (Yilmaz, 2001), el objetivo de la migración es hacer que la sección sísmica sea lo más similar posible a la sección geológica, que se encuentra en profundidad. A pesar de esto, las secciones migradas usualmente se muestran en el dominio del tiempo. Una de las razones es que la construcción de los modelos de velocidad usando los datos sísmicos tiene una precisión limitada, y, por lo tanto, puede que la conversión a profundidad no sea del todo precisa. Por esto, a veces resulta preferible tener la sección migrada en tiempo.

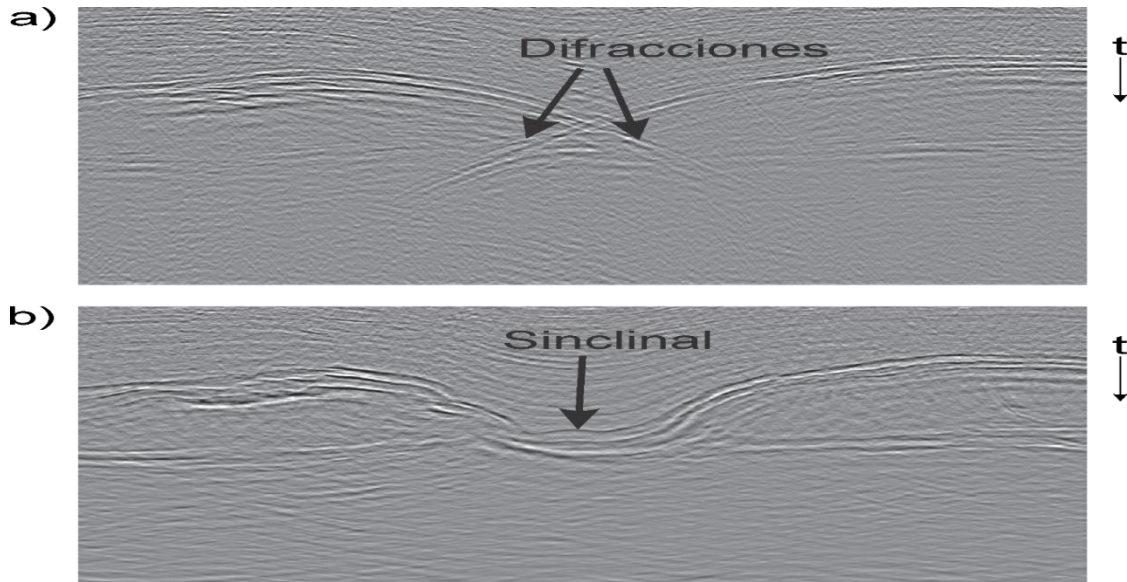


Figura 5.2 a) Línea sísmica apilada exhibiendo un clásico corbatín. b) Migración pre-apilado en tiempo (PSTM) de la línea sísmica. Modificada de (Herron, 2011).

### 5.1 Principios de la migración sísmica (Yilmaz, 2001).

Consideremos el reflector inclinado CD de una sección geológica en la Figura 5.3a. Queremos obtener una sección a cero offset a lo largo del perfil  $O_x$ . A medida que se mueve la pareja fuente-receptor ( $s, g$ ) a lo largo de  $O_x$ , el primer arribo de incidencia normal del reflector inclinado es registrado en la estación A. En esta discusión, asumimos una velocidad media constante normalizada  $v = 1$  para que las coordenadas de tiempo y velocidad sean intercambiables. El arribo de la reflexión en la estación A es indicado por el punto  $C'$  en la sección a cero offset en tiempo en la Figura 5.3b. A medida que movemos la localización de la estación A hacia la derecha, se registran los arribos de incidencia normal provenientes del reflector CD. El ultimo arribo es registrado en la estación B, el cual es indicado por el punto  $D'$  en la Figura 5.3b. En este experimento, las difracciones de los bordes del reflector CD son excluidas para simplificar la discusión.

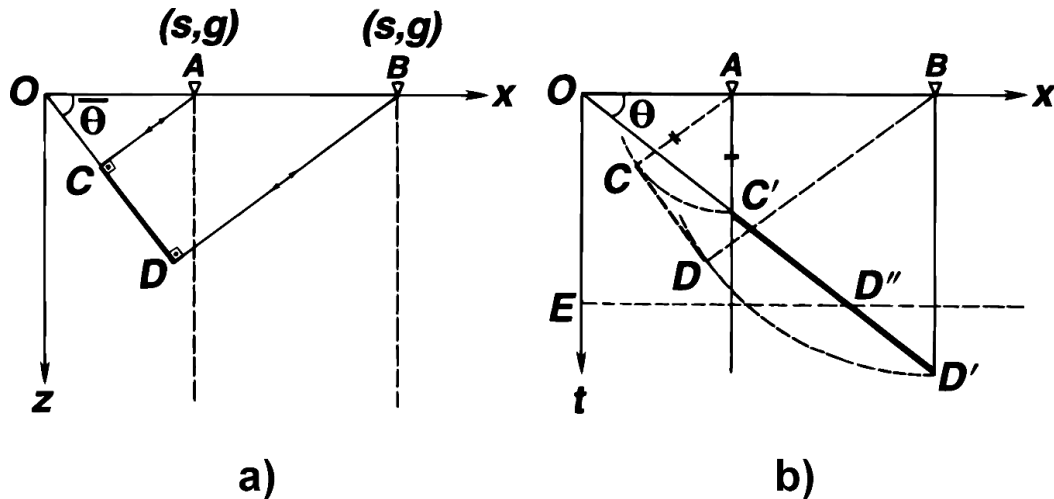


Figura 5.3 Principios de la migración: El segmento  $C'D'$  reflejado en la sección en tiempo, como se muestra en (b), una vez es migrado es movido buzamiento arriba, se hace más inclinada, se acorta, y es localizado en su verdadera posición  $CD$  como se muestra en (a). Tomado de (Yilmaz, 2001).

Ahora comparemos la sección geológica en la Figura 5.3a, la cual está en profundidad, con la sección sísmica a cero offset en la Figura 5.3b, la cual está en tiempo. La verdadera posición del reflector  $CD$  es superpuesta en la sección en tiempo para realizar la comparación. Es evidente que la posición del reflector  $CD$  no es la misma que la posición del evento  $C'D'$ .

A partir de esta simple construcción geométrica, es claro que la sección en tiempo el evento  $C'D'$  debe ser migrado a su verdadera posición  $CD$  en la sección en profundidad. A partir de la descripción geométrica de la migración en la Figura 5.3 se pueden hacer las siguientes observaciones:

- El ángulo de buzamiento del reflector en la sección geológica es más grande que el de la sección en tiempo; así, la migración aumenta el buzamiento de los reflectores.
- La longitud del reflector, como se ve en la sección geológica, es más pequeña que en la sección en tiempo; así, la migración acorta los reflectores.
- La migración mueve los reflectores en la dirección ascendente del buzamiento.

### **5.2 Suposiciones de la migración sísmica**

Hay tres suposiciones generales al momento de llevar a cabo la migración sísmica. La primera, que todas las velocidades, tanto en el sentido vertical como en el lateral, son conocidas; esto es requerido tanto para los métodos de migración en tiempo como para los métodos de migración en profundidad. La segunda, que todas las señales de entrada son reflexiones primarias o difracciones, de modo que no haya múltiples, ondas de corte u ondas convertidas. Esta suposición puede ser eliminada para algunos métodos que son capaces de usar ondas de corte, ondas convertidas, e incluso múltiples, tal como (Youn & Zhou, 2001). La tercera y última, todos los eventos en la migración 2D ocurren dentro del plano vertical directamente debajo de la línea sísmica de modo que no hay energía de un sideswipe (reflexión proveniente de una superficie reflectante localizada fuera del plano vertical de la línea sísmica). Esta tercera suposición explica la diferencia entre los métodos de migración 2D y 3D. La migración 3D elimina esta suposición y requiere que los datos sean colectados en todas las direcciones con trazas igualmente espaciadas en la dirección de  $x$  y de  $y$ . (Zhou, 2014).

### **5.3 Concepto de reflector explosivo**

Cuando el modelo de velocidad puede ser aproximado por un modelo de capas simple, el proceso de apilamiento tiene la ventaja de reducir la relación señal-ruido y reducir el volumen de datos. La correspondiente migración post-apilado es mucho más eficiente que la migración pre-apilado. Pero es en ese caso en particular que la migración post-apilado tiene un buen desempeño, dado que es poco sensitiva en zonas complejas estructuralmente, donde resulta más apropiada la migración pre-apilado. Dato que la migración post-apilado, proviene de una sección a cero offset, esta puede ser vista como un equivalente de datos a cero offset. (Zhou, 2014).

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

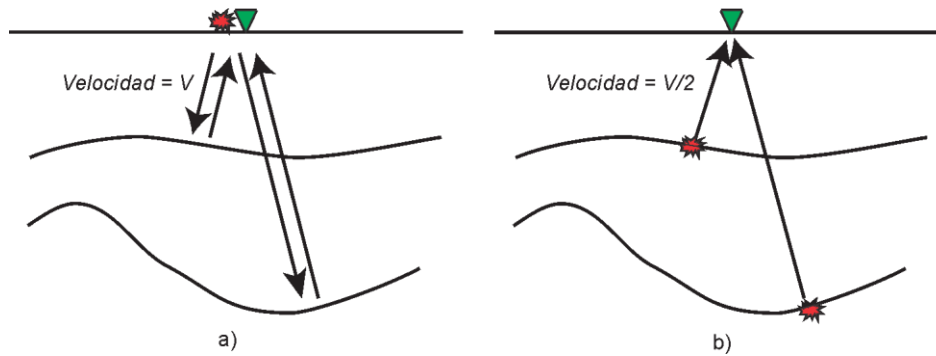


Figura 5.4 a) Prueba a cero-offset. B) Modelo de reflector explosivo. Modificada de (Zhou, 2014).

Para datos a cero offset, un modelo de reflector explosivo puede ser usado para incrementar la eficiencia computacional de la migración post apilado. Como se muestra en la Figura 5.4 este modelo descompone los reflectores en una serie de fuentes puntuales. En el caso de una velocidad constante  $v$ , la reflexión sísmica y las difracciones tiene en el mismo tiempo de arribo tanto en el experimento cero-offset, ver Figura 5.4a, como en el modelo de reflector explosivo con la mitad de la velocidad, ver Figura 5.4b. Exceptuando la diferencia en los valores de velocidad, ambos esquemas son cinemáticamente equivalentes para las reflexiones sísmicas y las difracciones.

En términos de la calidad de la migración, sin embargo, la migración post-apilada tiene varios problemas. El primero es que el apilado produce manchas de puntos profundos debido a la dispersión de los puntos de reflexión y por la poca resolución horizontal, aun en reflectores planos. El segundo es por el estiramiento en las trazas que se produce al aplicar la corrección NMO, que es más severo a offsets lejanos y a bajas profundidades, lo cual resulta en pérdidas de resolución y en la alteración de la onda. El tercero es que la corrección NMO no puede manejar correctamente las capas inclinadas y las difracciones. Y, por último, la migración post-apilado no es sensitiva a los cambios laterales de velocidad. En contraste, el objetivo de la migración pre-apilado es resolver los problemas ya mencionados, siendo su mayor inconveniente el enorme consumo de recursos computacionales. (Zhou, 2014).

## 5.4 Tipos de migración

El proceso de migración puede realizarse en el dominio del tiempo o de la profundidad, y antes o después del apilado. A pesar de que con la migración en el dominio del tiempo podemos resolver ciertos problemas, los más complejos exigen la migración en el dominio de la profundidad. (Albertin, et al., 2002).

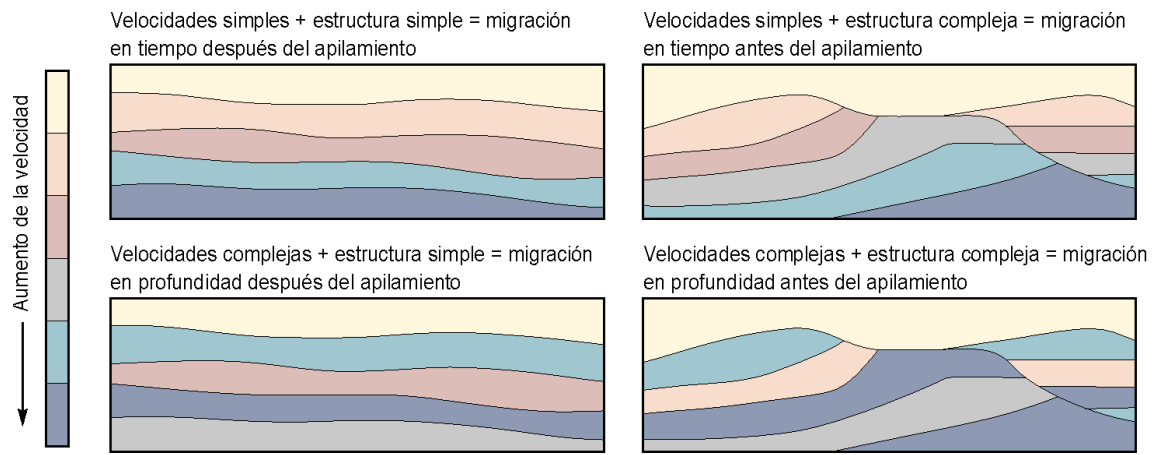


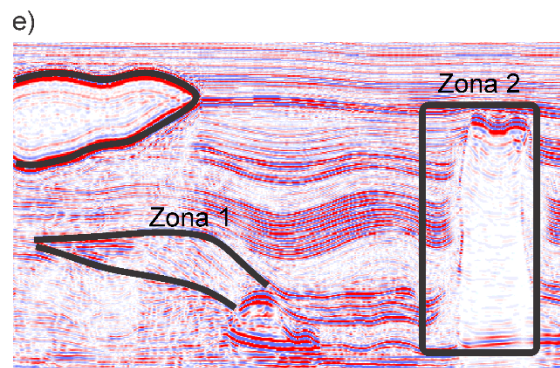
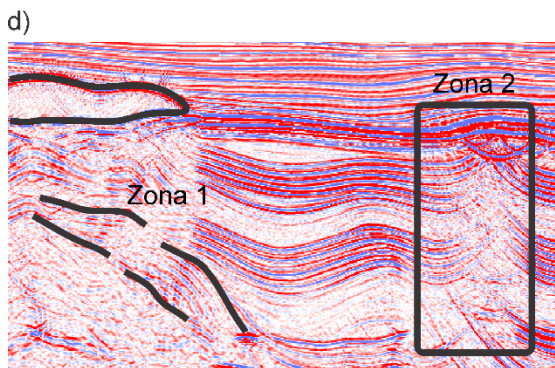
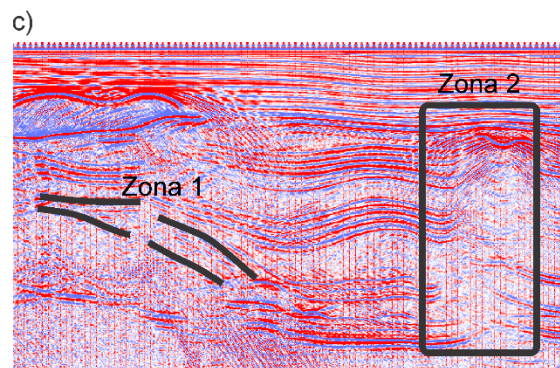
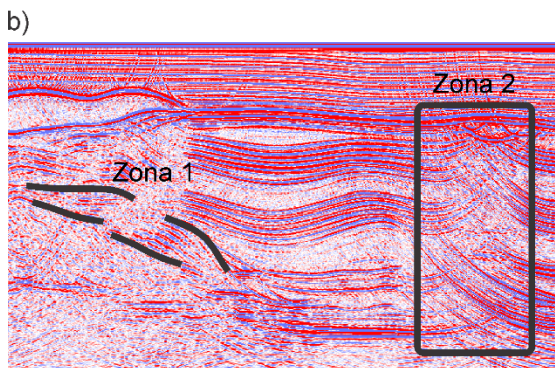
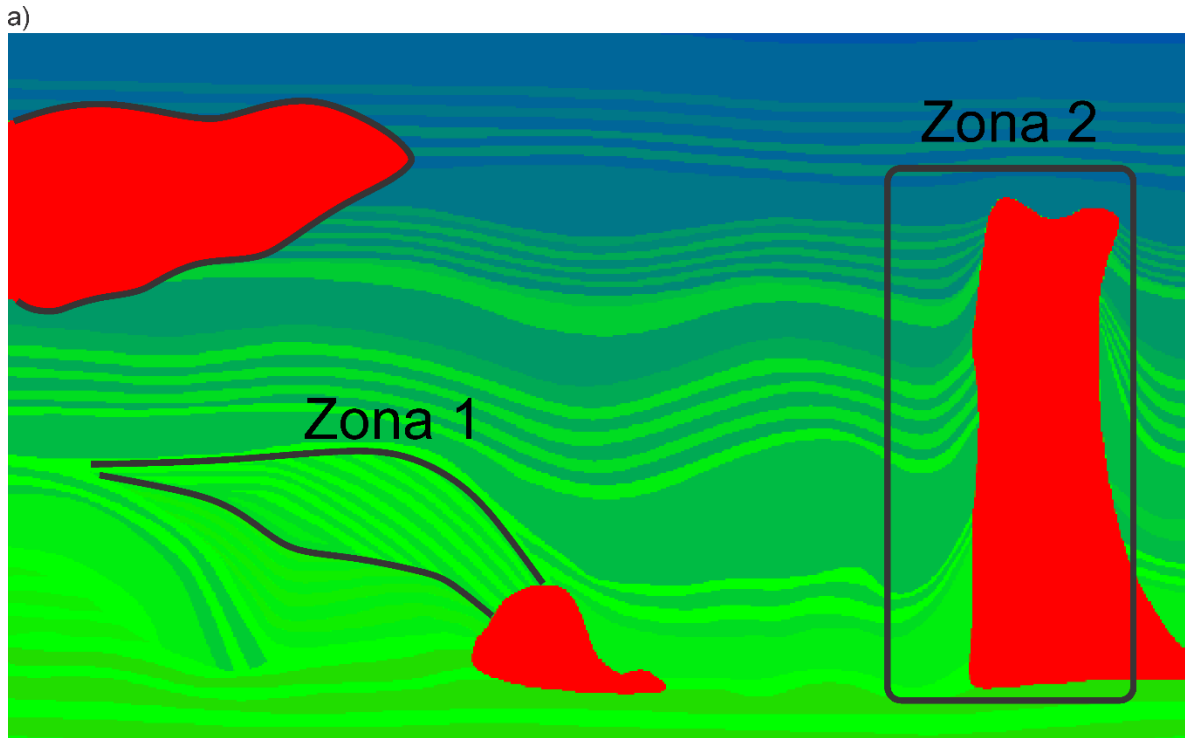
Figura 5.5 Tipos de migración más apropiados de acuerdo a la complejidad estructural y del campo de velocidades. Tomado de (Albertin, et al., 2002).

**5.4.1. Migración en tiempo:** esta es ideal cuando el campo de velocidad varía levemente, aumentando a medida que aumenta el tiempo de tránsito y las variaciones horizontales de velocidad son graduales. Dado que este escenario se presenta en muchas de las cuencas sedimentarias, la migración en tiempo suele ser la más aplicada a nivel mundial, ver Figura 5.5 arriba.

**5.4.2. Migración en profundidad:** esta es ideal cuando el campo de velocidad tiene fuertes contrastes en sentido horizontal o vertical. Por esto suele elegirse este tipo de migración cuando en la zona de estudio hay presencia de pliegues, intrusiones o fallas de gran inclinación que se yuxtaponen sobre capas con propiedades elásticas muy diferentes. Este tipo de migración demanda

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

mucho tiempo y recursos computacionales, y necesita de un modelo de velocidad preciso, ver Figura 5.5 abajo.



## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

*Figura 5.6 a) Recorte del modelo de velocidad en profundidad presentado en la Figura 3.1, evaluando los siguientes tipos de migración: b) migración post-apilado en tiempo, c) migración pre-apilado en tiempo, d) migración post-apilado en profundidad, y e) migración pre-apilado en profundidad.*

**5.4.3. Migración post-apilado:** esta consume una cantidad de recursos y tiempo mucho menor que la migración pre-apilado, dado durante el apilamiento se reduce en un orden o más de magnitud la cantidad de trazas que se deben procesar. Para que este tipo de migración resulte exitosa, las suposiciones que se hacen a la hora de realizar el apilamiento deben estar bien fundamentadas: la amplitud de la traza apilada debe representar la traza de incidencia normal y los arribos reflejados deben ser aproximadamente hiperbólicas. Estos supuestos solo son válidos cuando las variaciones litológicas y el contenido de fluidos pueden ser nulas, y cuando no se tiene estructuras complejas.

**5.4.4. Migración pre-apilado:** este tipo de migración es ideal cuando se presentan estructuras y campos de velocidad complejos. Hasta hace algún tiempo, sus principales restricciones eran la capacidad computacional y la habilidad para construir y confeccionar el modelo de velocidad. El modelo de velocidad inicial puede ser construido utilizando toda la información disponible, incluyendo las velocidades de apilamiento, datos de pozo y los horizontes interpretados en el dominio del tiempo.

En la Figura 5.6 se observa el resultado de aplicar distintos tipos de migración, las diferencias se hacen más evidentes si nos concentramos en la zona 1 y la zona 2. Se puede observar que las clinofomas de la zona 1 mostradas claramente en a), resultan siendo discontinuas y no están bien iluminadas en b), c) y d), por lo que sería muy fácil asociar esto con la presencia de una falla geológica, mientras que en e) se encuentran bien iluminadas y con su forma real; esto se debe a que las migraciones post-apilado en tiempo, post-apilado en profundidad y pre-apilado en tiempo

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

no están en capacidad de manejar los cambios laterales abruptos de velocidad, mientras que la migración pre-apilado en profundidad le da un mejor manejo a estos cambios abruptos; si observamos la parte superior izquierda de a) notamos que hay presencia de una lengua de sal que a media que nos movemos hacia la derecha desaparece, esto genera un cambio abrupto en la velocidad que afectará las capas de roca que se encuentran debajo de la terminación del cuerpo salino. En la zona 2, es evidente que los flancos del cuerpo salino no están bien iluminados para los casos b), c) y d), donde es claro que los tipos de migración usados no colapsan debidamente las difracciones y agregan ruido sísmico, mientras que en e) es posible identificar y delinear la zona donde se encuentra la sal.

### **5.5 Algoritmos de migración**

Existen dos clases principales de métodos de migración: los métodos basados en trazado de rayos y los métodos basados en la ecuación de onda. A su vez, cada uno de los grupos puede subdividirse en varias clases: entre basados en el trazado de rayos tenemos la migración de Kirchhoff y la migración Beam. Entre los basados en la ecuación de onda tenemos los métodos basados en la ecuación onda unidireccional OWWE y los basados en la ecuación de onda acústica completa RTM (Liu & Zhang, 2011). De hecho, aun los métodos de migración basados en trazado de rayos están basados en la ecuación de onda, pero por convención se refiere a los métodos basados en la ecuación de onda como a los métodos que no están basados en el trazado de rayos. Por lo cual, la ecuación de onda es la base de los algoritmos de migración más comunes.

Estos algoritmos no modelan explícitamente las reflexiones asociadas a múltiples, las ondas convertidas, las ondas superficiales o el ruido. Cualquier señal presente en los datos de entrada es tratada como una reflexión primaria.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

Según (Yilmaz, 2001), cualquiera que sea el algoritmo, este debería:

- Manejar los buzamientos abruptos con precisión suficiente.
- Manejar las variaciones laterales y verticales de velocidad.
- Ser implementado eficientemente.

En el presente trabajo, se evaluarán y compararán varios de los métodos de migración basados en la ecuación de onda unidireccional OWWE.

### 5.6 Métodos de migración basados en la ecuación de onda de sentido único

**5.6.1. Ecuación de onda de sentido único:** Aquí se revisan las ecuaciones que describen la propagación de ondas para un medio acústico y homogéneo en el dominio frecuencia-número de onda.

$$k_x^2 P - \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{\omega^2}{v^2} P \quad 5.6.1$$

Donde P es el campo de presión, z es la profundidad,  $\omega$  es la frecuencia y  $v$  es la velocidad.  $k_x$  es el número de onda en la dirección lateral. Tomando la transformada de Fourier espacial en la dirección z, dada la relación de dispersión.

$$k_x^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{v^2} \quad 5.6.2$$

O

$$K_z = \pm \sqrt{\frac{\omega^2}{v^2} - k_x^2} \quad 5.6.3$$

Y lo que corresponde con la ecuación de onda de sentido único,

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \pm iK_z P \quad 5.6.4$$

Aquí el signo  $\pm$  se usa para el campo de onda descendente y ascendente respectivamente. La solución analítica de esta ecuación de onda unidireccional es

$$P(z + dz, k_x, \omega) = P(z, k_x, \omega) \exp^{\pm i k_z dz} \quad 5.6.5$$

En consecuencia, la extrapolación del campo de onda implica sólo un sencillo cambio de fase en el dominio frecuencia-número de onda. Para obtener la imagen final, se evalúa el campo de onda cuando  $t=0$ . Esto es solo un resumen de todos los componentes de la frecuencia para una posición  $(k_x, z)$ . Entonces la imagen es la transformada de Fourier inversa para el dominio del número de onda en el dominio del espacio.

$$Imagen(x, z) = (FFT)^{-1}[\sum_{\omega i} P(x, k_x, \omega i)] \quad 5.6.6$$

Esta fórmula es la esencia del método de migración de cambio de fase a menudo llamado migración (Gazdag J. , 1978), sin embargo, requiere un medio lateralmente homogéneo, haciendo de este esencialmente un método de migración en tiempo. Las ventajas de este método es que es estable sin requerimientos especiales del espaciado de la grilla, siendo preciso, capaz de migrar reflectores con un buzamiento de más de  $90^\circ$ . Dadas estas ventajas, la gente ha tratado de extender este método a la migración en profundidad, es decir, para hacerle frente a los cambios laterales de velocidad en un medio  $v(x, z)$ .

**5.6.2. Migración phase-shift-plus-interpolation (PSPI):** (Han B. , 1998) muestra que cuando el campo de velocidad tiene variaciones laterales, la migración phase-shift falla debido a que esto requiere computación en el dominio espacial del número de onda, (Gazdag & Sguazzero, 1984) proporciona un método para tratar las variaciones laterales de velocidad que usan las principales características del método phase-shift. En lugar de solo una velocidad en cada paso en profundidad,

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

introducen varias velocidades de referencia para tener en cuenta las variaciones laterales de velocidad. En cada paso en profundidad, el campo de onda es propagado en el dominio  $(\omega, k_x)$  con cada una de esas velocidades, obteniendo múltiples campos de onda de referencia. Por lo tanto una transformada de Fourier inversa traería esos campos de onda de referencia de nuevo al dominio  $(\omega, x)$ . El verdadero campo de onda es obtenido por interpolación lineal del campo de onda de referencia basado en la relación de la velocidad local con las velocidades de referencia.

Para mantener una alta precisión en buzamiento pequeños, (Gazdag & Sguazzero, 1984) introducen el time-shift en el dominio  $(\omega, x)$  como un preprocesador de los datos de entrada. Específicamente, definió un campo modificado.

$$P^*(z) = P(z)\exp[\pm i \frac{\omega}{v_r(x)} dz] \quad 5.6.7$$

Y

$$P(z + dz) = \hat{P}^*(z)\exp[\pm i(k_z \mp \frac{\omega}{v_r})dz] \quad 5.6.8$$

Donde  $v_r$  es la velocidad de referencia y  $\hat{P}^*$  es la transformada de Fourier de  $P^*$  de  $(\omega, x)$  hasta  $(\omega, k_x)$ . Así es como el termino time-shift se hace importante en el método PSPI. En el sub capítulo 2.4, cuando observemos el, método Split-Step Fourier (SSF), reconoceremos que el método SSF tiene el mismo término y es solo un caso especial del PSPI, donde se utilizaría solo una velocidad de referencia en PSPI.

En cuanto a la interpolación lineal, puesto que trabaja en el campo de onda complejo, se tiene dos formas de proceder. Una es interpolar la amplitud y la fase individualmente, y la otra es interpolar las partes real e imaginaria individualmente. (Han B. , 1998) implementa la última dado que introduce menos ruido en la interpolación para obtener una imagen más clara.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

La precisión del método PSPI está directamente relacionada al número de velocidades de referencia usadas para cada paso en profundidad, ese número depende de la variación lateral de la velocidad en ese paso. (Bagaini , Bonomi , & Pieroni, 1995) propone una opción alterna para determinar las velocidades de referencia mediante la distribución estadística de las velocidades en cada paso de profundidad. Con este método, obtenemos las velocidades de referencia más importantes cuya distribución estadística es comparable a la del campo de velocidad original; consecuentemente, el costo computacional en el método PSPI es controlado.

**5.6.3. Migración split-step Fourier (SSF):** El método Split-step Fourier, usado desde 1970, ha sido aplicado en campos tales como la acústica submarina y la propagación de la luz en fibras ópticas (Lee et al., 1991). (Stoffa & Fokkema, 1990) reintrodujo este método en el imaging sísmico. Este método ha sido implementado en migración prestack 2D (Roberts & Huang, 1997).

Como el método PSPI, el SSF también involucra una extrapolación del campo de onda en el dominio frecuencia – número de onda ( $\omega, k_x$ ), y un phase shift en el dominio frecuencia – espacio ( $\omega, x$ ), siendo esta secuencia de operaciones es inversa a la del método PSPI. De acuerdo a (Han B. , 1998) para el PSPI, primero se hace un phase shift antes de la extrapolación del campo de onda. En lugar de usar múltiples velocidades de referencia para propagar el campo de onda, el SSF usa solo una velocidad de referencia, la cual puede ser una velocidad promedio, la mínima velocidad, la velocidad media cuadrática o una inversa de la lentitud media promedio en cada paso en profundidad. La elección de la velocidad de referencia entre las alternativas no es crítica para los resultados de la migración.

El método SSF se basa en la teoría de la perturbación, de acuerdo con la cual podemos dividir la variación lateral del campo de velocidades en un término constante y un pequeño término de perturbación.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

$$v(x, z) = v_0(z) + \delta v(x, z) \quad 5.6.9$$

Primero usamos  $v_0(z)$  para propagar el campo de onda en el dominio  $(\omega, k_x)$ ,

$$P^* = P(z, k_x, \omega) \exp[\pm i \sqrt{(\frac{\omega}{v_0(z)})^2 - k_x^2} dz] \quad 5.6.10$$

Donde  $P^*$  es la transformada de regreso al dominio  $(\omega, x)$  y para tener en cuenta la variación lateral de la velocidad se aplica un corrección a la fase,

$$P(z + \delta z, x, \omega) = \hat{P}^* \exp[\pm i (\frac{\omega}{v(x, z)} - \frac{\omega}{v_0(z)}) dz] \quad 5.6.11$$

(Lee & Mason, 1991) mostro además que la precisión del método SSF puede ser mejorado al hacer que el propagador sea simétrico, es decir, por la división del termino phase-shift en dos partes idénticas y aplicando estas antes y después de la propagación de la onda en el dominio  $(\omega, k_x)$ .

$$\pm i \left( \frac{\omega}{v(x, z)} - \frac{\omega}{v_0(z)} \right) dz = \pm i \left( 2 \times \frac{1}{2} \right) \left( \frac{\omega}{v(x, z)} - \frac{\omega}{v_0(z)} \right) dz \quad 5.6.12$$

Para variaciones laterales fuertes del campo de velocidad, sin embargo, la teoría de la perturbación falla, y más de una velocidad de referencia debe ser usada en el método SSF. La lógica para el uso de múltiples velocidades de referencia MRVL (multi-reference velocities) fue introducida al método SSF por (Kessinger, 1992), habiendo sido necesaria una interpolación para la región de superposición entre dos velocidades de referencia (Wu & Jin, 1997). Con múltiples velocidades de referencia, sin embargo, el costo computacional del método SSF incrementa hasta el del método PSPI. (Han B. , 1998) no se usa MRVL en el método SSF dado que sería repetir el método PSPI.

**5.6.4. Migración implicit  $(\omega-x)$  finite-difference (FD):** Ya que (Claerbout , 1985) desarrollo el método FD a comienzos de los 70s, este ha sido usado extensamente en el imaging. A diferencia

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

del método phase-shift, el método FD trabaja en el dominio espacio-frecuencia  $(\omega, x)$ , por lo que es adecuado para manejar las variaciones laterales de velocidad. En la obtención del método FD, se empieza igualmente con la ecuación acústica unidireccional *Ecuación 3* en el dominio frecuencia - número de onda  $(\omega, k_x)$ , después se sustituye  $-i\partial x$  por  $k_x$ , y se aproxima la raíz cuadrada que aparece en  $k_z$  mediante fracciones continuas. La aproximación de segundo orden de la ecuación unidireccional es resuelta mediante el método de diferencias finitas. Aquí (Han B. , 1998) usa un esquema de diferencias finitas implícitas (a diferencia del esquema explícito que es menos costoso computacionalmente) dada la condición de no estabilidad del esquema explícito.

El método FD original es preciso solo hasta los 45° de buzamiento. Poniendo en cascada los términos de difracción, la precisión del método FD puede ser extendida hasta los 90°. La precisión también puede ser mejorada optimizando los coeficientes  $a$  y  $b$  en el término de difracción del algoritmo FD (Lee & Suh, 1985)

**5.6.5. Migración Fourier finite-difference (FFD):** (Ristow & Rühl, 1994) introdujo el método Fourier finite-difference como una extensión del método SSF. En adición al operador SSF, un operador FD adaptativo es introducido en el propagador de ondas. Abajo, sin derivación, está la expresión para el propagador de ondas en el método FFD.

$$\sqrt{\frac{\omega^2}{v(x,z)^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}} = \text{I} + \text{II} + \text{III}$$

$$\text{I} = \sqrt{\frac{\omega^2}{v_r^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}} \quad 5.6.13$$

$$\text{II} = \frac{\omega}{v(x,z)} - \frac{\omega}{v_r}$$

$$\text{III} = \frac{w}{v(x, z)} \left(1 - \frac{v_r}{v(x, z)}\right) \frac{S_x^2}{a + bS_x^2}$$

Aquí, como antes,  $S_x^2 = \frac{v(x, z)^2}{w^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ , y  $v_r$  es una velocidad de referencia. Para lograr la estabilidad,  $v_r$  debería ser escogida para ser la mínima velocidad a lo largo de la capa  $(z, z + dz)$ . Siguiendo a Ristow y Rühl,  $a$  y  $b$  son coeficientes ajustables, con  $a$  ajustado a 2 y  $b = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{v_r}{v} \right)^2 + \frac{v_r}{v} + 1 \right]$ . La combinación I + II es solo el operador SSF sobre el que se discutió arriba. Según (Han B. , 1998) la extrapolación del campo de onda puede ser determinado analíticamente en los dominios frecuencia-número de onda y frecuencia-espacio. El termino III es un operador FD (la principal diferencia entre este operador y el más tradicional coeficiente  $b$  el cual es adaptado a la variación de velocidad).

Para un medio  $v(z)$ , el método FFD es igual al método phase-shift. Cuando la variación lateral de velocidad es fuerte, el método FFD tiene un accionar entre los métodos SSF y el FD. De hecho, si escogemos  $v_r \ll v(x, z)$ , el método FFD vuelve al método FD puro. En general, el FFD es un híbrido entre SSF y FD.

## 6 Resultados

Como ya se mencionó en el capítulo 3, se plantearon diferentes escenarios para evaluar el rendimiento de dichos tipos de migración, en total se construyeron un total de 12 modelos sintéticos que simulaban la presencia de distintos tipos de estructuras salinas.

### 6.1 Escenario I: variación de la precisión del modelo de velocidad

En el primer escenario se evaluaron los resultados de los métodos de migración al variar la precisión del modelo de velocidad utilizado para migrar los datos, esto con el fin de observar a partir de qué nivel de precisión dejan de ser efectivos estos métodos

La precisión del modelo de velocidad fue variada usando el módulo Smooth2 (SU uniformly sampled 2d array of data) el cual permite hacer un suavizado del campo de velocidades en las direcciones de  $z$  y de  $x$ , dentro de una ventana definida por el usuario, a través de la técnica de mínimos cuadrados. El módulo requiere de los parámetros  $r1$  correspondiente al suavizado en la dirección de  $z$ , y  $r2$  correspondiente al suavizado en la dirección de  $x$ . En todos los casos el valor del suavizado fue el mismo en la dirección vertical y horizontal. Las velocidades correspondientes a la capa de agua no fueron variadas para evitar posibles cambios del lecho marino en las secciones migradas, ver Figura 6.1 a Figura 6.5.

El modelo de velocidad que se utilizó está basado parcialmente en las interpretaciones de (Yu, et al., 2014) para el cinturón plegado de Kelasu, allí, se han encontrado bastos yacimientos de gas y petróleo entrampados en cabalgamientos donde usualmente la sal actúa como roca sello. Dicha sal, corresponde a una estructura tipo almohadilla deformada por los esfuerzos compresivos.

El modelo de velocidad construido durante el análisis de velocidad de cada CMP, ver Figura 6.6, es equiparable, al modelo de velocidad mostrado en la Figura 6.3 que fue suavizado con un  $r1=50$  y  $r2=50$ .

Dado que las variaciones del campo de velocidad en esta zona son abruptas tanto en sentido horizontal como en sentido vertical, se evaluaron únicamente las versiones pre-apilado de los algoritmos mencionados. La Figura 6.7 muestra las secciones sísmicas obtenidas de migrar los

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

datos utilizando el modelo de velocidad original, es decir, el que no ha sido suavizado, siendo claro que a pesar de que todos los algoritmos se basan en la ecuación onda unidireccional para resolver el campo de onda, pueden llegar a haber diferencias importantes en cuanto a la calidad de la imagen.

Desde la Figura 6.9 hasta la Figura 6.13 se observan los resultados de las migraciones usando modelos de velocidad con distinto grado de suavizado para la zona de interés mostrada en la Figura 6.8, donde la parte coloreada de negro corresponde a un yacimiento de petróleo. Es claro en todos los casos, que a medida que disminuye la precisión del modelo, disminuye la precisión con que son ubicados los reflectores, como es el caso de la línea verde que representa la parte superior del pliegue cabalgado, que a medida que disminuye la precisión del modelo de velocidad deja de coincidir con el reflector asociado.

Es evidente en todos los casos, que el método FD  $90^\circ$  agrega gran cantidad de ruido de baja frecuencia a lo largo de toda la sección, incluso en la zona correspondiente a la tabla de agua, dicho ruido provoca una pérdida importante en la continuidad de los reflectores. Esto conlleva a que aun si los eventos se encuentren bien ubicados cuando se usa un modelo de velocidad preciso, solo sean interpretables los que presentan amplitudes altas. El ángulo usado para migrar en este método puede ser variado, pero el que mejor ilumina las estructuras es  $90^\circ$ , por lo cual se decidió usar  $90^\circ$  para migrar en todos los casos.

Usando el método SSF se obtuvieron imágenes aceptables, y a pesar de que los reflectores tienen una buena continuidad, las zonas encerradas por la línea negra son muy ambiguas, posiblemente como resultado de las reverberaciones al interior de la capa de sal. Este problema es más evidente cuando se usa un modelo de velocidad preciso, ver Figura 6.9, llegando a desaparecer cuando se migra con un modelo de velocidad muy suavizado, ver Figura 6.13.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

Los métodos PSPI y FFD son claramente los que ofrecen un mejor resultado cuando el modelo de velocidad es más preciso, pero pierden su ventaja frente al método SSF a medida que disminuye la precisión del modelo de velocidad. En la Figura 6.9, cuando se usa el modelo de velocidad original para migrar, se observa como los métodos PSPI y FFD iluminan muy bien las estructuras presentes, mientras que el método SSF presenta algunos problemas en las zonas donde se encuentra la sal. En la Figura 6.13, cuando se usa un modelo de velocidad suavizado con  $r1=200$  y  $r2=200$ , es claro que los métodos PSPI, FFD y SSF presentan los mismos problemas, mostrando el pliegue cabalgado con una geometría incorrecta, al ubicar la parte izquierda del mismo como la más alta estructuralmente y haciéndola la más atractiva para perforar un pozo exploratorio. Si observamos la Figura 6.8, es claro que los hidrocarburos se encuentran ubicados en la parte central del pliegue cabalgado y no a la izquierda como podría llegar a plantearse después de interpretar una sección migrada con un modelo de velocidad poco preciso. Es de resaltar, que ambos métodos son incapaces de resolver las reverberaciones provocadas por la sal en la zona señalada por el círculo, al igual que con el método SSF, este problema disminuye cuando disminuye la precisión del modelo de velocidad usado para migrar.

En lo que respecta a la Figura 6.11, donde se migro con un modelo equiparable al obtenido durante el análisis de velocidad, se puede decir que los métodos PSPI y FFD siguen teniendo una ventaja clara frente al método SSF en lo que respecta a iluminación de las estructuras y a continuidad de reflectores, presentando cambios geométricos no muy fuertes respecto a la estructura original mostrada en la Figura 6.8.

# MIGRACIÓN OWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

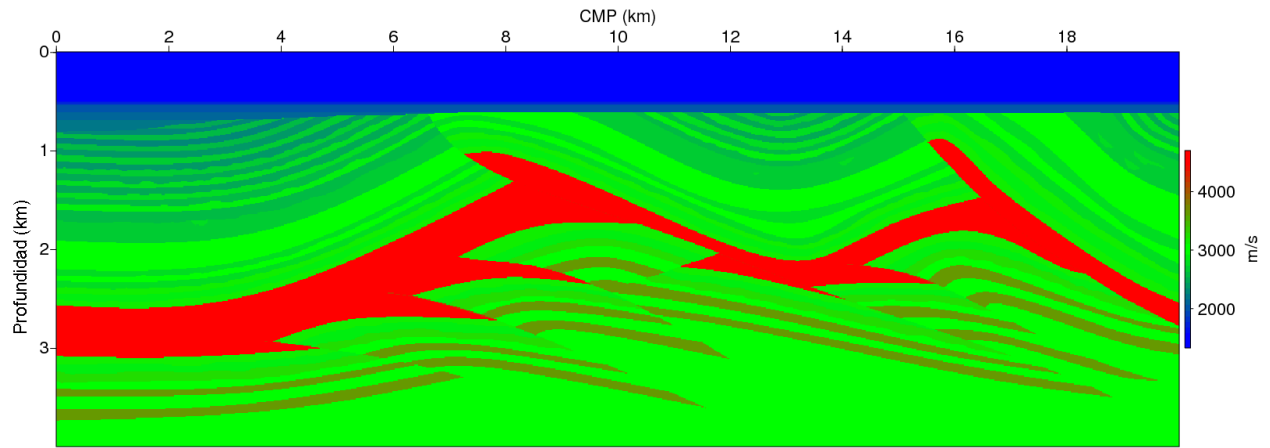


Figura 6.1 Modelo de velocidad originalmente construido, basado en (Yu, et al., 2014).

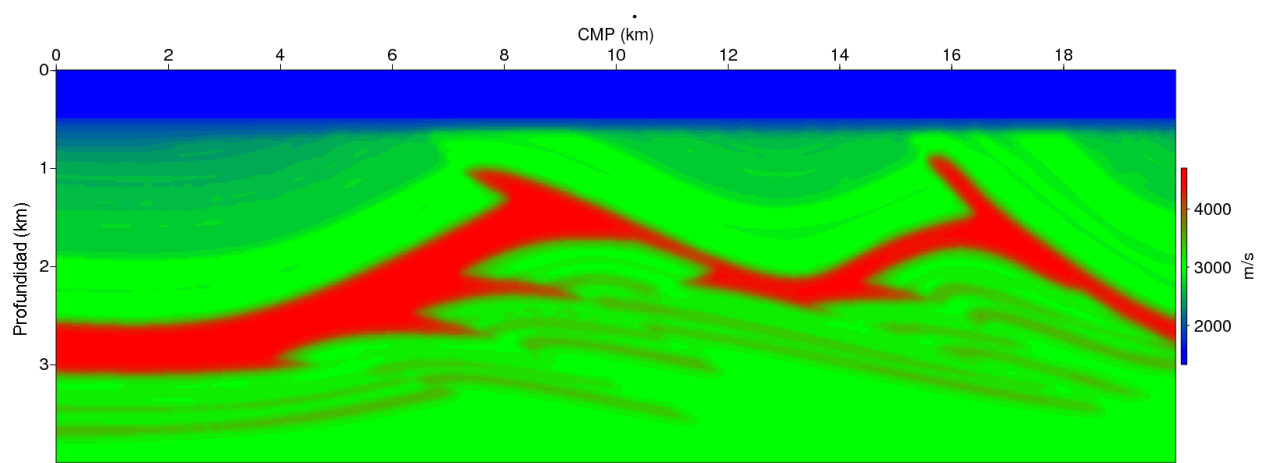


Figura 6.2 Modelo de velocidad suavizado con un  $r1=10$  y un  $r2=10$ .

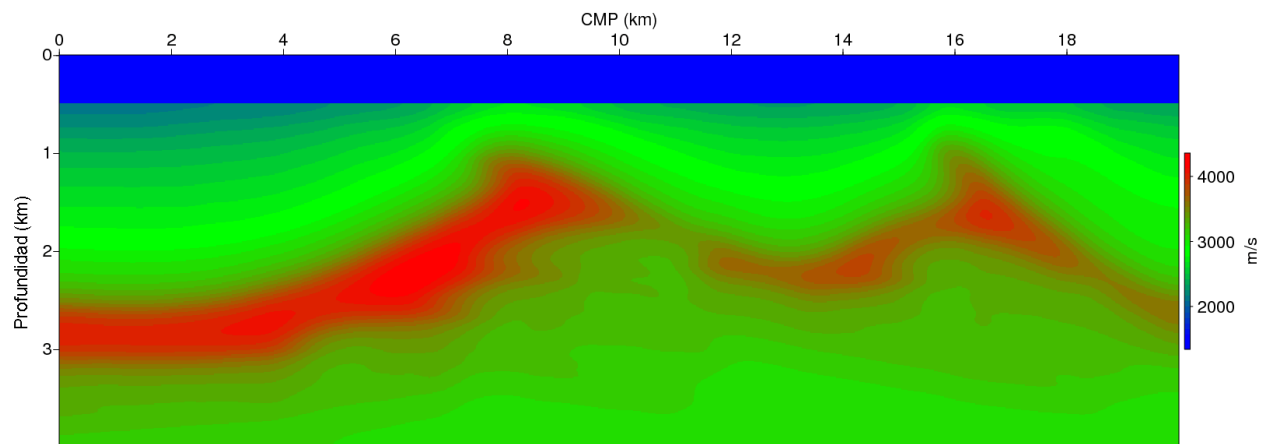


Figura 6.3 Modelo de velocidad suavizado con un  $r1=50$  y un  $r2=50$ .

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

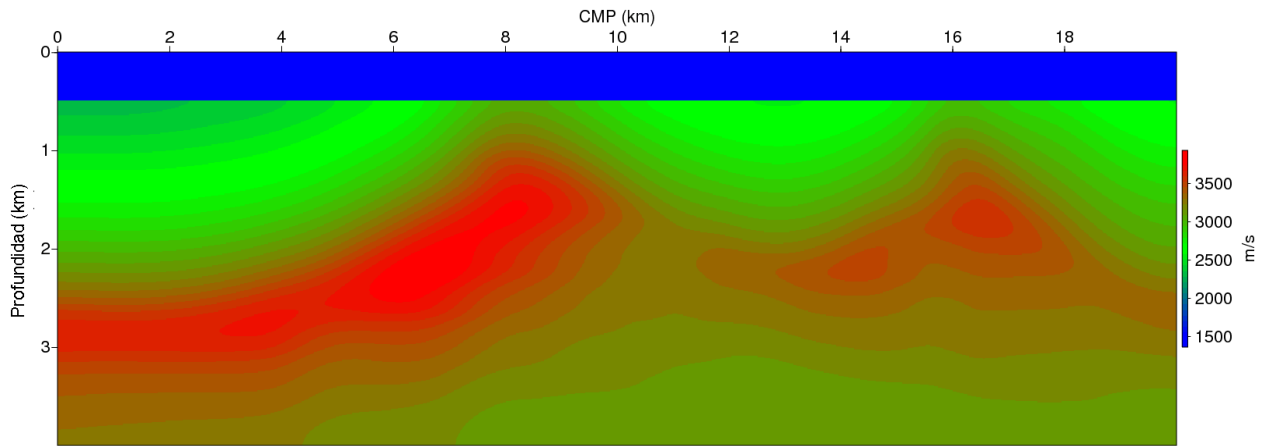


Figura 6.4 Modelo de velocidad suavizado con un  $r1=100$  y un  $r2=100$ .

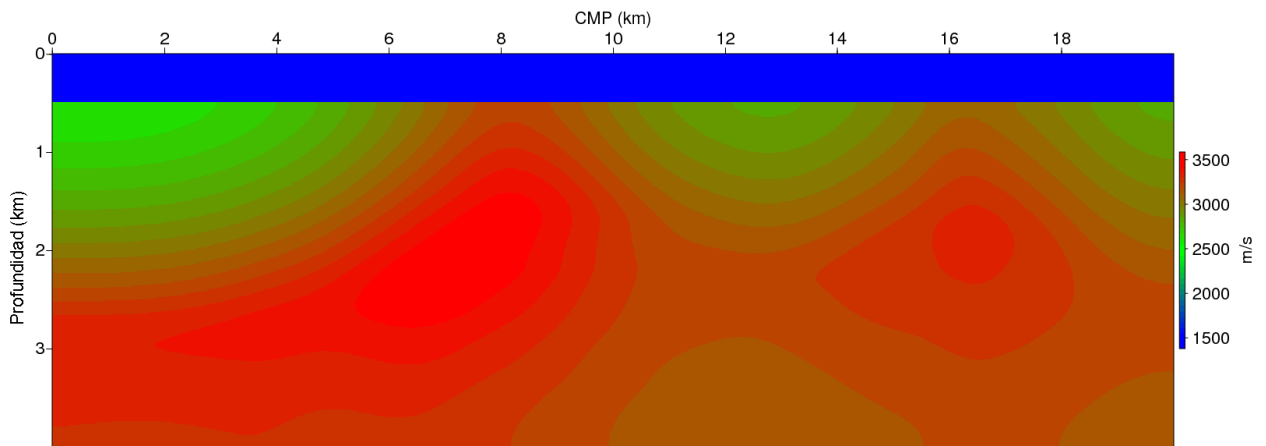


Figura 6.5 Modelo de velocidad suavizado con un  $r1=200$  y un  $r2=200$ .

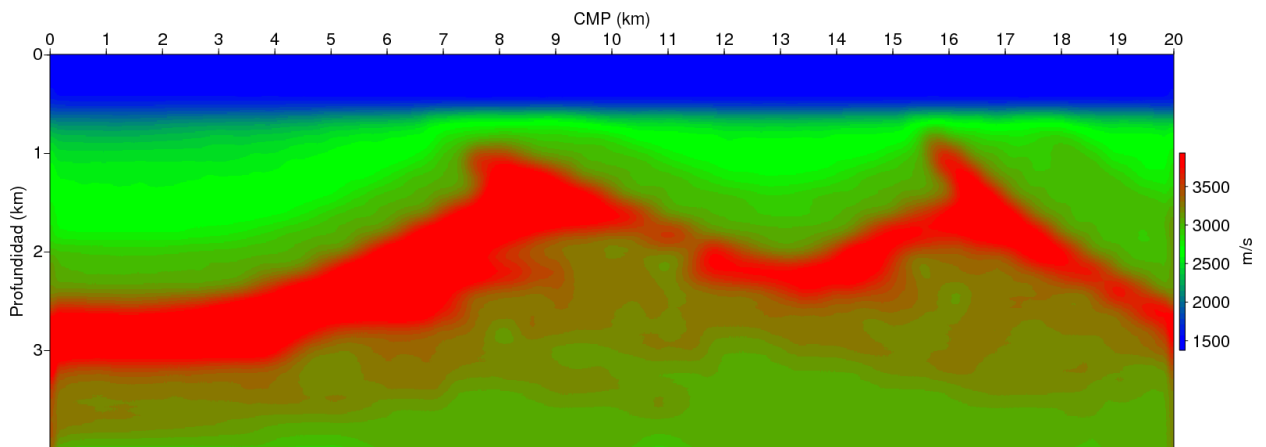


Figura 6.6 Modelo de velocidad construido mediante el análisis de velocidad de los CMPs.

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

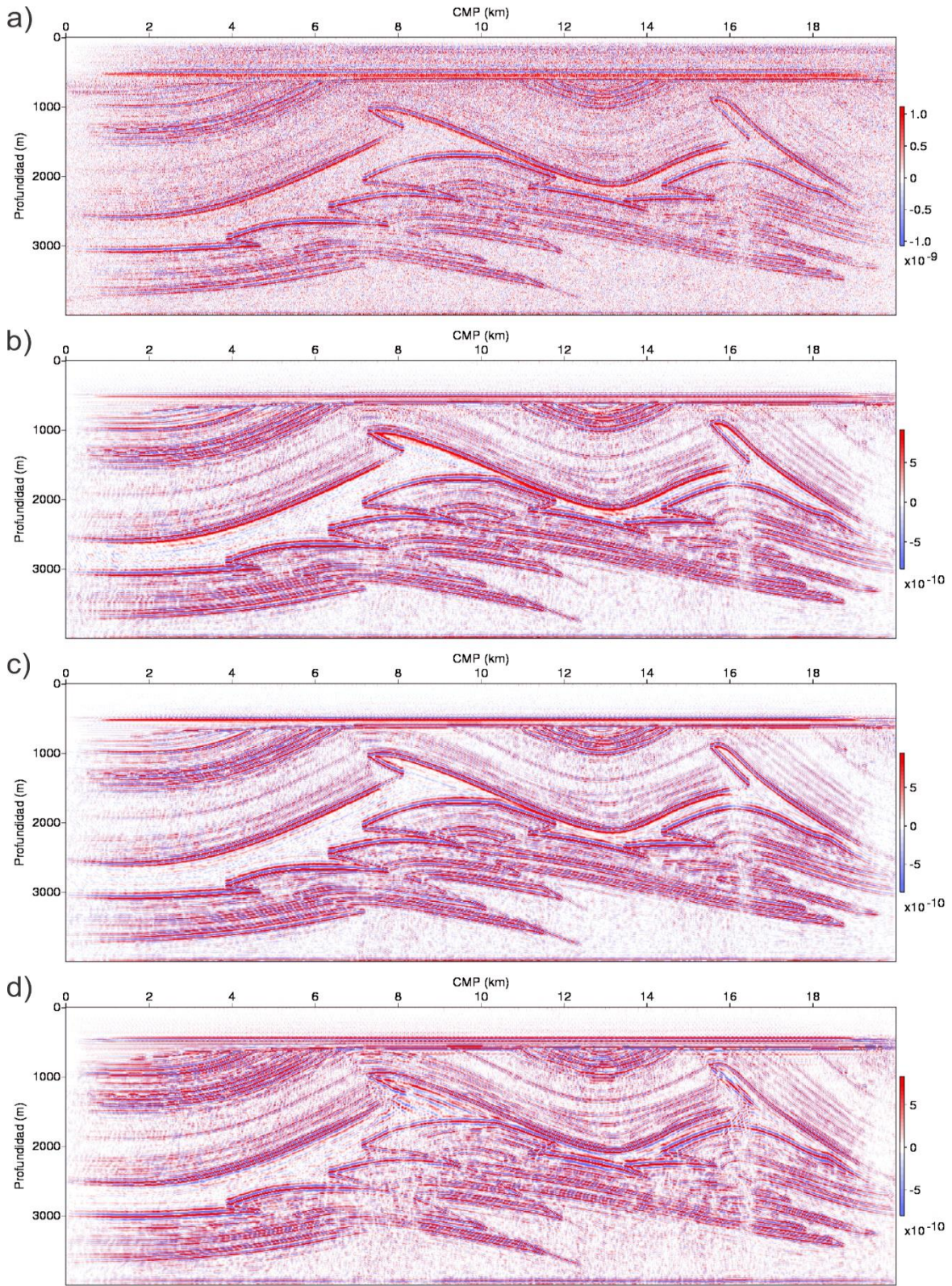


Figura 6.7 Secciones sísmicas migradas usando el modelo de velocidad original, para los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

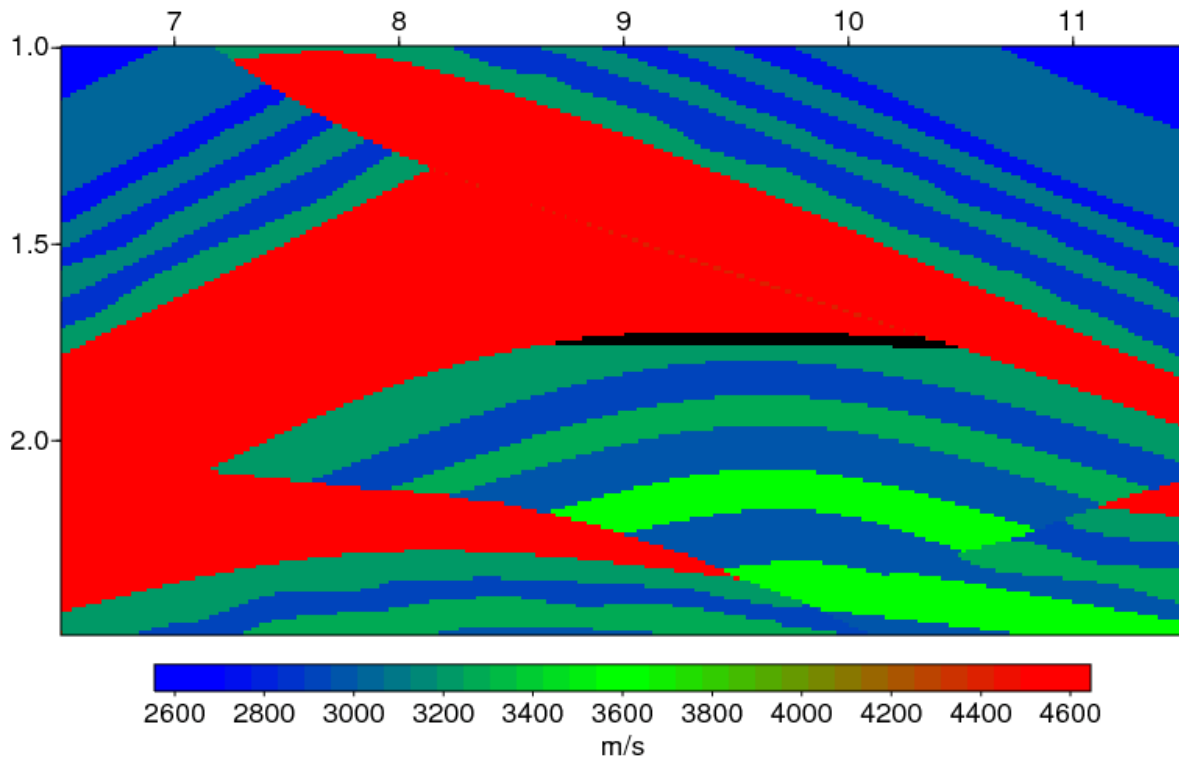


Figura 6.8 Recorte del modelo velocidad original para la zona de interes principal.

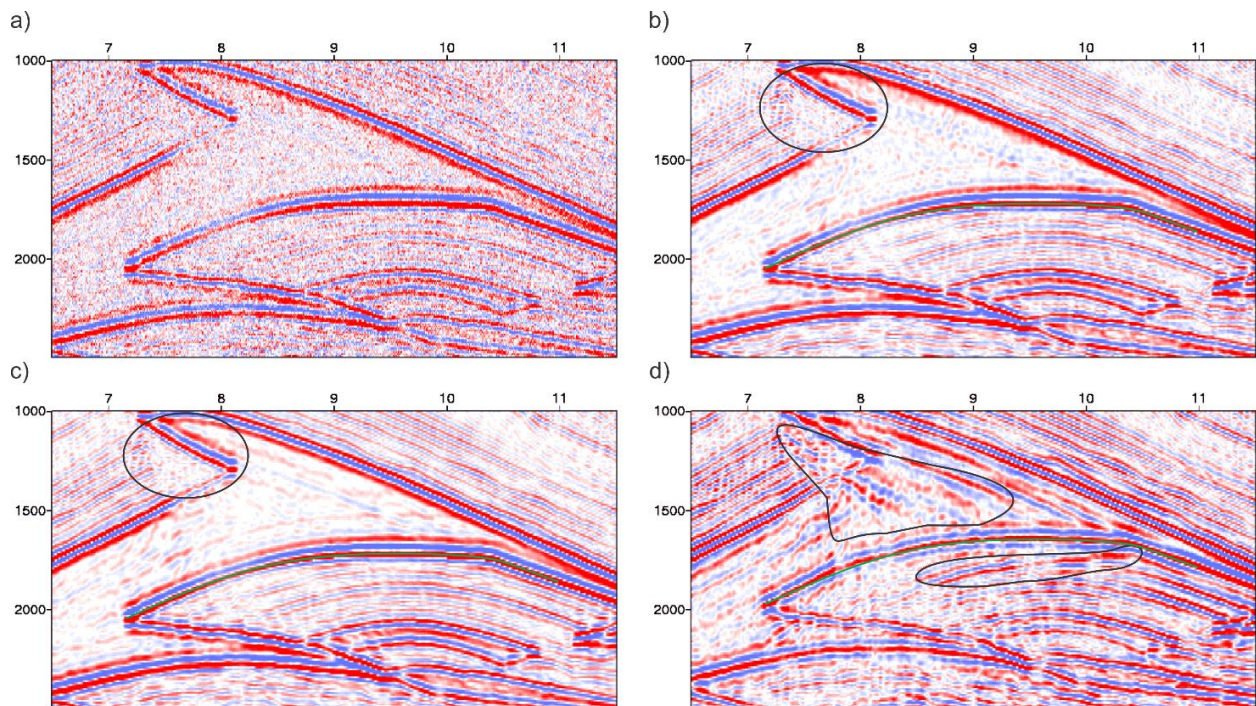


Figura 6.9 Secciones migradas usando el modelo de velocidad original para la zona de interes mostrada en la Figura 6.8, usando los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

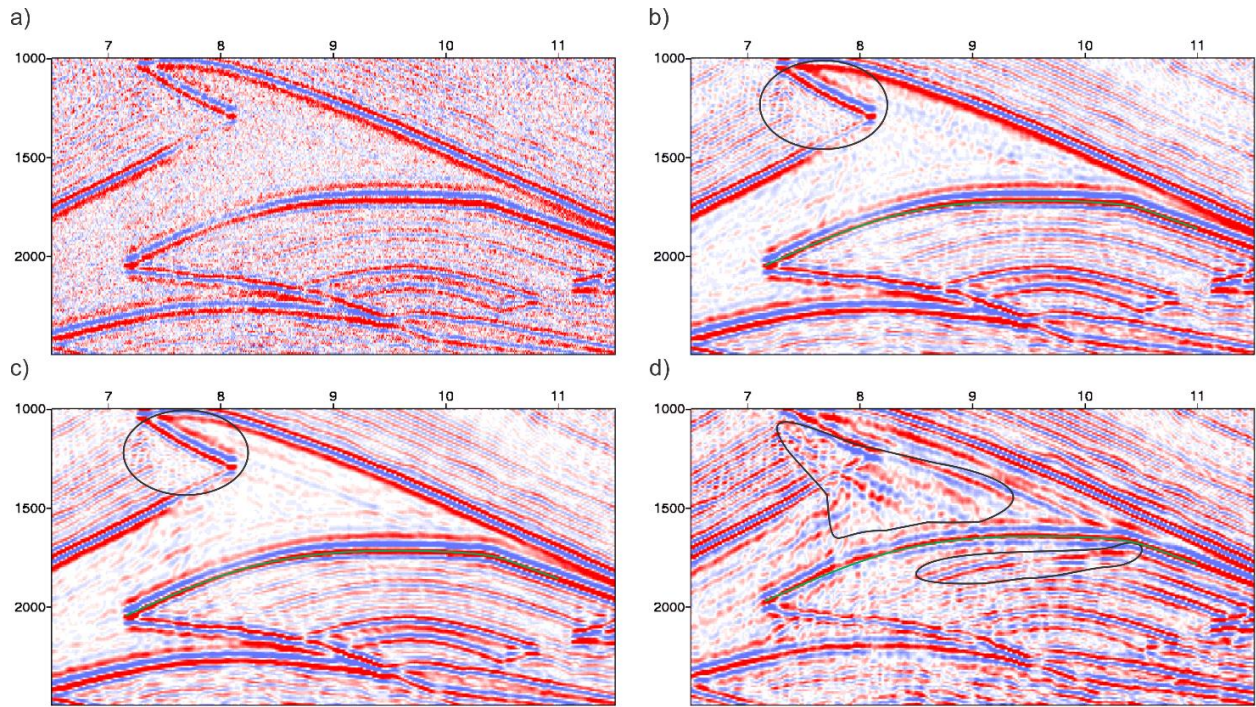


Figura 6.10 Secciones migradas usando el modelo de velocidad suavizado con un  $r1=10$  y un  $r2=10$ , para la zona de interes mostrada en la Figura 6.8, usando los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

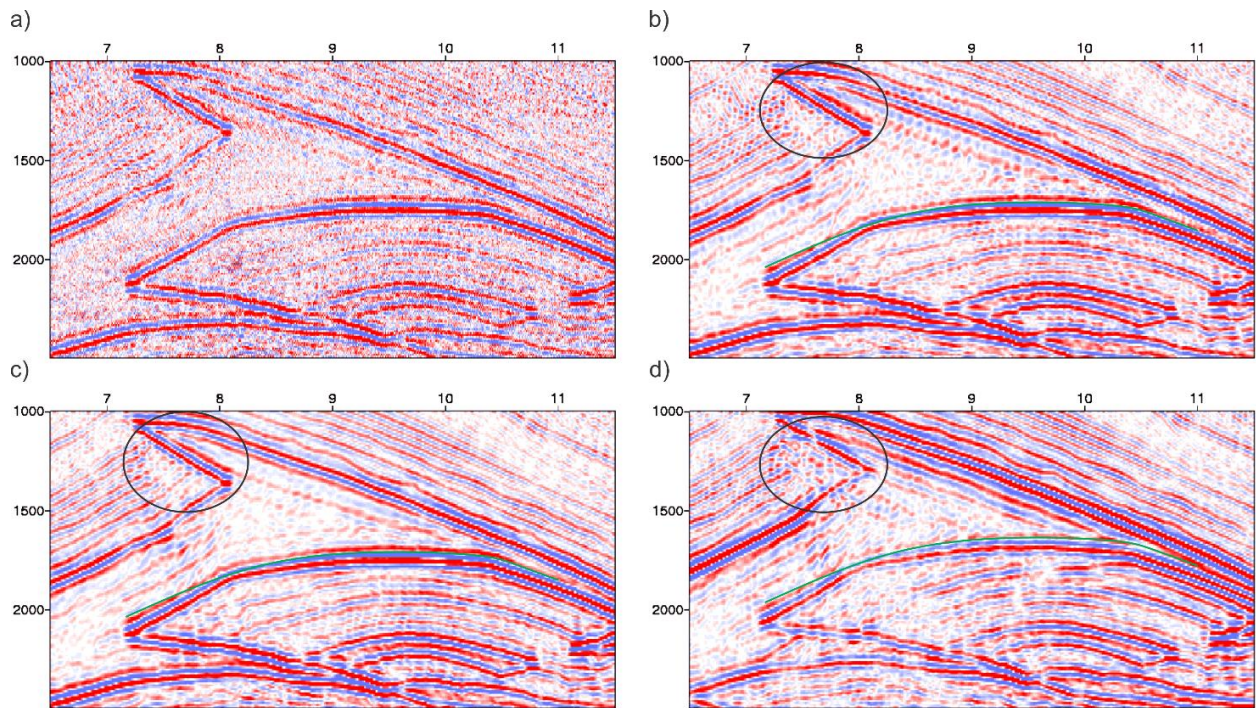


Figura 6.11 Secciones migradas usando el modelo de velocidad suavizado con un  $r1=50$  y un  $r2=50$ , para la zona de interes mostrada en la Figura 6.8, usando los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

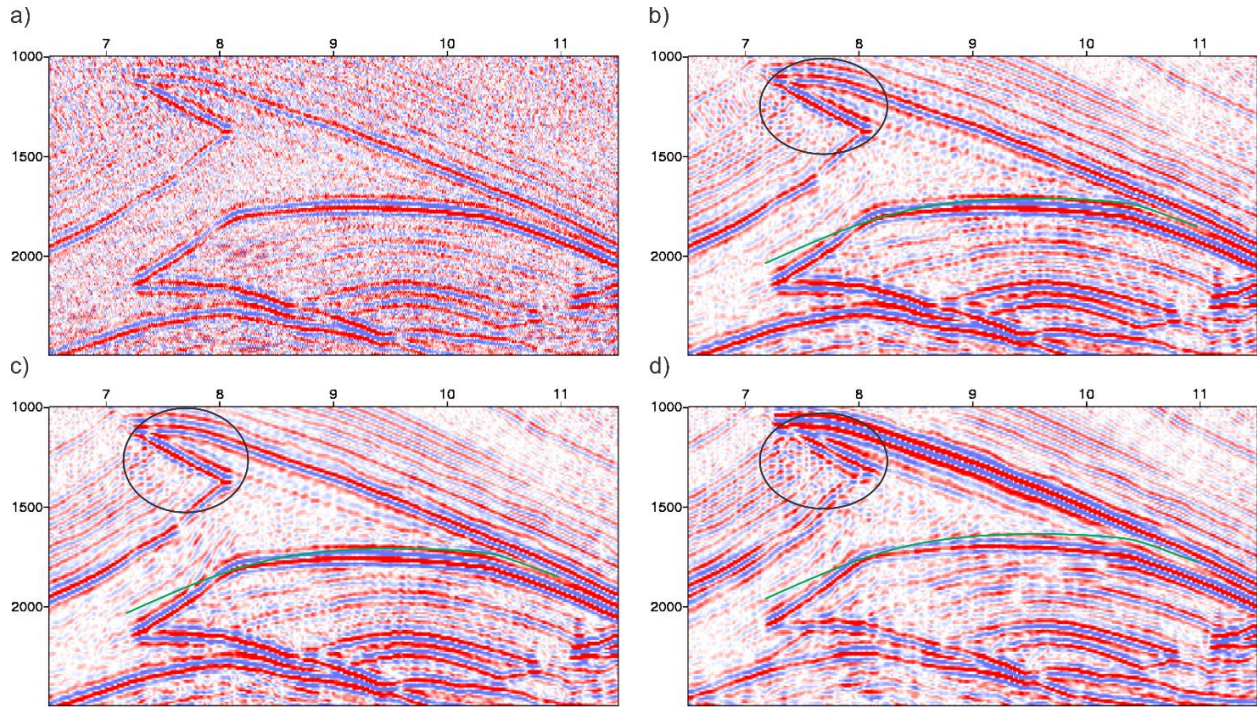


Figura 6.12 Secciones migradas usando el modelo de velocidad suavizado con un  $r1=100$  y un  $r2=100$ , para la zona de interes mostrada en la Figura 6.8, usando los algoritmos: a) FD  $90^\circ$ , b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

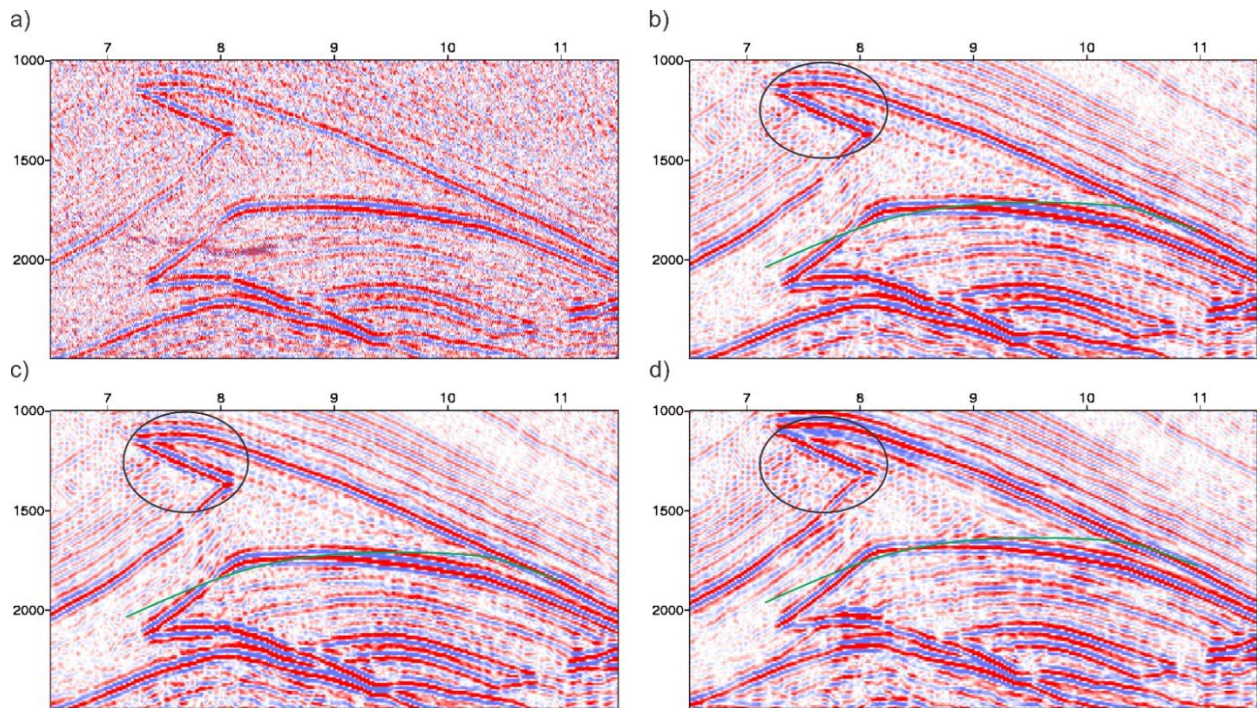


Figura 6.13 Secciones migradas usando el modelo de velocidad suavizado con un  $r1=200$  y un  $r2=200$ , para la zona de interes mostrada en la Figura 6.8, usando los algoritmos: a) FD  $90^\circ$ , b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## 6.2 Escenario II: variación de complejidad estructural

En este escenario se evaluaron los métodos al variar la complejidad estructural de la zona en donde se tomaron los datos, esto con el fin de observar cual o cuales métodos permiten visualizar mejor las estructuras y ofrecen mejor continuidad en los reflectores ubicados bajo la sal. A continuación, se realiza una breve descripción de los modelos construidos.

**Modelo 1:** Capas paralelas con un buzamiento de  $2^\circ$ . Se incluye una capa de sal igualmente inclinada con casi 0.4 km de espesor, las zonas de interés son las coloreadas de color negro, correspondientes a arenas cargadas con hidrocarburos, ver Figura 6.14.

**Modelo 2:** Capas completamente horizontales, la sal tiene aproximadamente 0.3 km de espesor. La zona de interés es un cuerpo irregular compuesto por areniscas, ver Figura 6.17.

**Modelo 4:** Capas paralelas con un buzamiento de  $2^\circ$ , la sal tiene casi 0.3 km de espesor y se encuentra limitada lateralmente por una formación compuesta de areniscas, ver Figura 6.20.

**Modelo 5:** Capas paralelas con un buzamiento de  $2^\circ$ , la sal tiene casi 0.3 km de espesor y se limita lateralmente por una formación compuesta por areniscas, para este caso la sal presenta ondulaciones en su tope y su base, ver Figura 6.23.

**Modelo 6:** Parcialmente basado en las interpretaciones de (Bowman, 2011) para el ridge de Latakia, en la zona hay presencia de una lengua de sal que suprayace una de las zonas de interés, ver Figura 6.26 a.

**Modelo 7:** Parcialmente basado en las interpretaciones de (Uphoff, Allen, Stearns, & Monteleone, 1997) para el rift de cuenca Lusitana, donde la capa de sal llega a tener casi 1 km de espesor, ver Figura 6.29 a.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

**Modelo 8:** Parcialmente basado en el modelo planteado por (Warren J. , 2016) para una lengua de sal en el Golfo de México, ver Figura 6.32 a.

**Modelo 9:** Basado en el modelo planteado por (John Perez Graphics & Design, 2017) para la exploración subsal en presencia diapiros salinos, ver Figura 6.35 a.

**Modelo 10:** Basado parcialmente en las interpretaciones hechas por (GEOExpro, 2017) para una zona con presencia de lenguas y diapiros de sal, ver Figura 6.38 a.

**Modelo 11:** Basado en las interpretaciones de (Davison, y otros, 2000) para el diapiro de Banff en el graben central del Mar del Norte, ver Figura 6.41 a.

**Modelo 12:** Basado parcialmente en las interpretaciones de (Yu, et al., 2014) para el cinturón plegado de Kelasu, allí, la sal corresponde a una estructura tipo almohadilla deformada por los esfuerzos compresivos, ver Figura 6.44 a.

**Modelo 13:** Basado en las interpretaciones de (Rowan & Krzywiec, 2004) para el diapiro de Szamotuly en la cuenca Central Europea, ver Figura 6.47 a.

Para los modelos 1,2,4 y 5 (ver Figura 6.14, Figura 6.17, Figura 6.20 y Figura 6.23) se aplicaron las versiones post y pre apilado de los algoritmos evaluados, ya que teóricamente ambas versiones están en capacidad de resolver el campo de velocidad para zonas con baja complejidad estructural.

Para el **modelo 1**, donde las capas son paralelas y están levemente inclinadas, es posible ver que en las secciones migradas post y pre apilado se iluminan claramente todas las capas y es posible apreciar el contacto agua-aceite, encerrado por los rectángulos de color negro, ver Figura 6.15. También es posible apreciar que, aunque todas las capas son iluminadas con la inclinación correcta, en los casos post-apilado el espesor de la sal no es el correcto, mostrando un espesor de

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

aproximadamente 0.25 km, cuando el espesor real es de 0.4 km. Este problema se presenta porque la migración post-apilado tiene como dato de entrada la sección apilada en tiempo, y el apilamiento en sí, genera pérdida de información valiosa y está controlado por los valores de tiempo y velocidad que se obtengan durante el análisis de velocidad. Aunque este análisis de velocidad se lleve a cabo de manera detallada, los resultados no siempre serán los más apropiados dado que se está trabajando con un valor estadístico para las trazas analizadas, como se ve al comparar la Figura 6.1 y la Figura 6.6, esto predetermina la calidad de la sección apilada y por ende de las secciones migradas post-apilamiento. En las secciones migradas pre-apilado, ver Figura 6.16, la sal y las demás capas son iluminadas con la inclinación y espesor correcto, y el contacto agua-aceite es igualmente apreciable.

Para este modelo de poca complejidad estructural, al igual que en los modelos 2, 4 y 5, no se puede apreciar diferencias importantes entre las versiones post-apilados de los algoritmos. En el caso de las versiones pre-apilado, el método FD es el único que presenta diferencias importantes respecto a los demás, dada la gran cantidad de ruido de baja frecuencia presente en la sección, veremos cómo dicho algoritmo presenta el mismo problema en todos los modelos generados.

Para el **modelo 2**, donde se cuenta con capas horizontales, y la zona de interés es un cuerpo compuesto de areniscas, ya se hace un poco más evidente las diferencias entre las versiones pre y post apilado de los algoritmos. Para el caso post-apilado, ver Figura 6.18, es posible observar y definir parcialmente la geometría de la zona de interés, donde los límites laterales del cuerpo, cuya inclinación es mayor, son las únicas zonas que no son iluminadas por ninguno de los algoritmos usados. A pesar de estos problemas, es posible definir la presencia de dicho cuerpo en las secciones sísmica. El problema mayor de las versiones post-apilado se presenta en las zonas ubicadas debajo de la zona de interés, donde podemos ver que los reflectores que deberían ser horizontales dan la

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

impresión de que hay un alto estructural, cuando no es así, dichos reflectores deberían seguir la forma de la línea pintada de color negro. Una interpretación basada en estas secciones, podría ocasionar que se definan zonas de interés incorrectas. Al igual que en las secciones obtenidas para el modelo anterior, la sal presenta un espesor que no es el correcto.

En las secciones migradas pre-apilado, ver Figura 6.19, vemos como la geometría de la zona de interés es solo parcialmente definida, al no iluminar las zonas más inclinadas del cuerpo de las areniscas. Mas adelante veremos cómo los métodos pre-apilado están en capacidad de iluminar estas zonas inclinadas, siempre y cuando haya superficies irregulares alrededor de la superficie inclinada que ayuden a reflejar dicha superficie inclinada, como es el caso del modelo 9 en la Figura 6.35 b y c, donde apreciamos como las paredes de los diapiros son bien iluminadas al usar los algoritmos PSPI y FFD. En este particular caso, dado que las capas son completamente horizontales, la reflexión de las ondas en dichas capas regresara a superficie siguiendo la misma trayectoria con la que descendió, sin aportar a la iluminación de la zona de interés. Se observa como las zonas ubicadas debajo de las superficies inclinadas, presentan cambios de amplitud, que durante la interpretación podrían ser fácilmente asociados a como cambios en las propiedades de la roca. También es apreciable, que los reflectores que en las secciones post-apilado se encontraban iluminados con la forma incorrecta, ahora están completamente horizontales, ubicándose a la profundidad incorrecta, pero con la forma correcta solo para el caso SSF como se observa al comparar la línea negra con su reflector asociado. Un problema generalizado para los algoritmos pre-apilado evaluados, es la no supresión de algunos múltiples originados en el interior del cuerpo de las areniscas y que se observan en las zonas indicadas por la flecha en la Figura 6.19.

Para el **modelo 4**, donde tenemos capas paralelas levemente inclinadas y la estructura salina se encuentra limitada lateralmente, se tornan mucho más evidentes las diferencias entre las versiones

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

pre y post apilado de los algoritmos. Para el caso post-apilado, se observa que, aunque las zonas de interés señaladas por los rectángulos de color negro, ubicadas bajo la sal se encuentra bien iluminadas, las zonas ubicadas bajo la transición lateral de sal a areniscas se encuentran desplazadas verticalmente, dando la impresión de que hay presencia de una falla geológica, lo cual no es correcto, ver Figura 6.21. Una interpretación basada en estas secciones, podría llevar al planteamiento de una posible trampa estructural. Este problema se acrecienta cuando el espesor de la sal aumenta o cuando aumenta el contraste lateral de velocidad entre la sal y las formaciones adyacentes. Al igual que en las secciones obtenidas para los modelos anteriores, la sal presenta un espesor que no es el correcto.

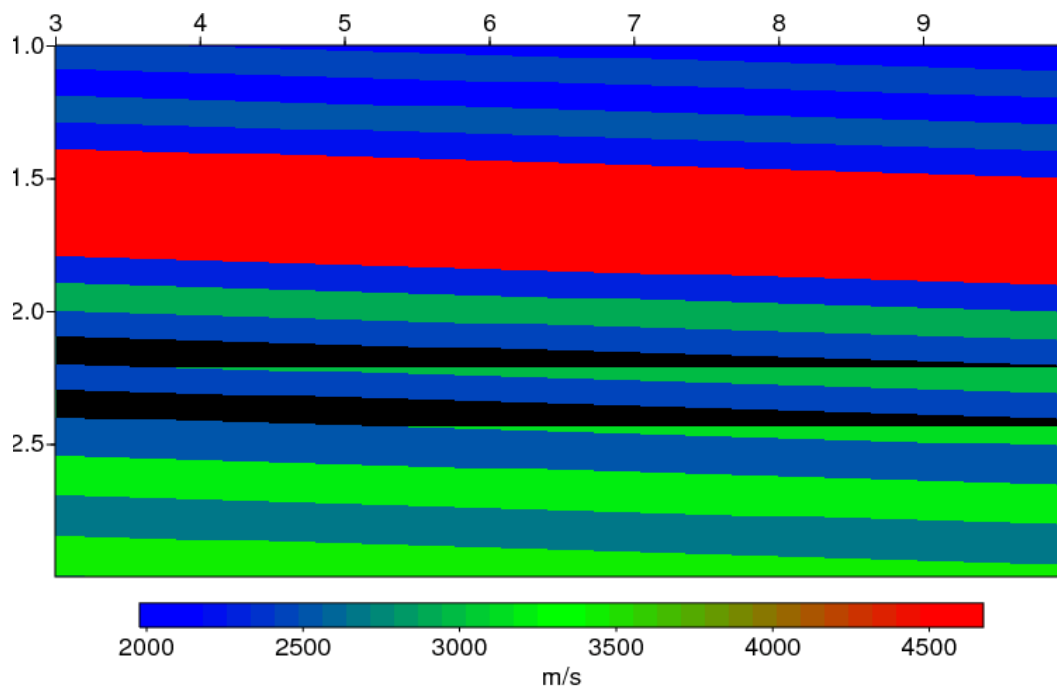
En el caso pre-apilado, ver Figura 6.22, la sal y las zonas de interés se encuentra iluminadas con la forma y el espesor correcto, pero las zonas ubicadas bajo el límite lateral de entre la sal y las areniscas presentan cambios de amplitud. Además de esto, es posible observar un pequeño desplazamiento vertical de los reflectores más cercanos a esta transición lateral, como se observa en las zonas señaladas por los círculos. En particular este problema es menos evidente para el caso de la migración FD, muy posiblemente debido a la gran cantidad de ruido que evita percibir estos pequeños cambios.

Para el **modelo 5**, donde tenemos un caso similar al anterior, pero, en este caso la capa de sal presenta algunas ondulaciones en tope y base. Nuevamente, las diferencias entre las versiones pre y post apilado se hacen más evidentes. Para el caso post-apilado, ver Figura 6.24, a diferencia de los resultados obtenidos con los modelos anteriores, las zonas de interés señaladas por los rectángulos se encuentran iluminadas con la geometría incorrecta, dando un aspecto que los estratos de roca ubicados bajo la sal presentan ondulaciones. Por lo cual, aunque el contacto agua-aceite tiene un reflector asociado en las secciones sísmicas, a simple vista dicho reflector no se

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

asocia con un posible contacto entre fluidos dada la geometría que se podría llegar a pensar que tienen los estratos de roca. Al igual que en el caso anterior, las zonas ubicadas bajo la transición lateral entre la sal y las areniscas, se encuentran desplazadas verticalmente, dando la impresión de que hay presencia de una falla geológica. Nuevamente, la sal presenta un espesor que no es el correcto.

En el caso pre-apilado, ver Figura 6.25, los resultados son los mismos que en el modelo anterior. vemos que las zonas de interés están iluminadas con la forma y el espesor correcto, y que las zonas ubicadas bajo la transición lateral de la sal y las areniscas tienen cambios de amplitud y muy pequeños cambios en su posición vertical.



*Figura 6.14 Distribución del valor de la velocidad de onda P para la zona de interés del modelo 1.*

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

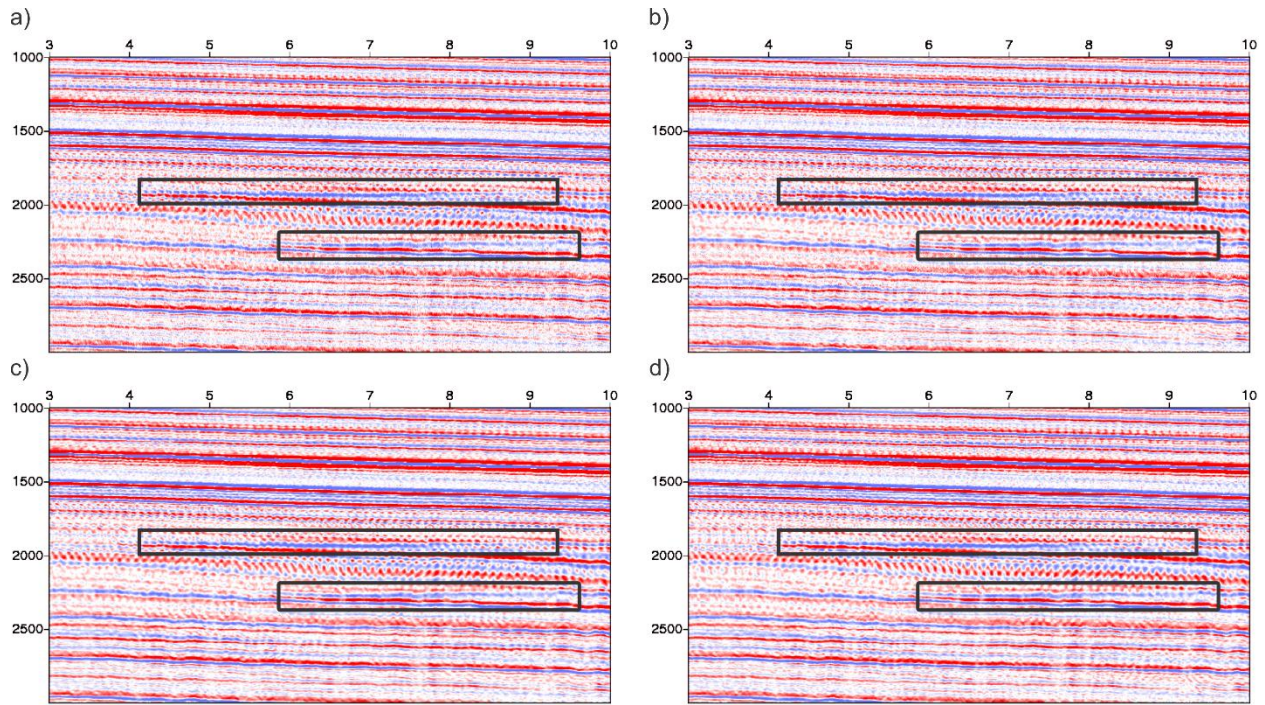


Figura 6.15 Secciones migradas para el modelo 1 en la zona de interes mostrada en la Figura 6.14, usando las versiones post-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

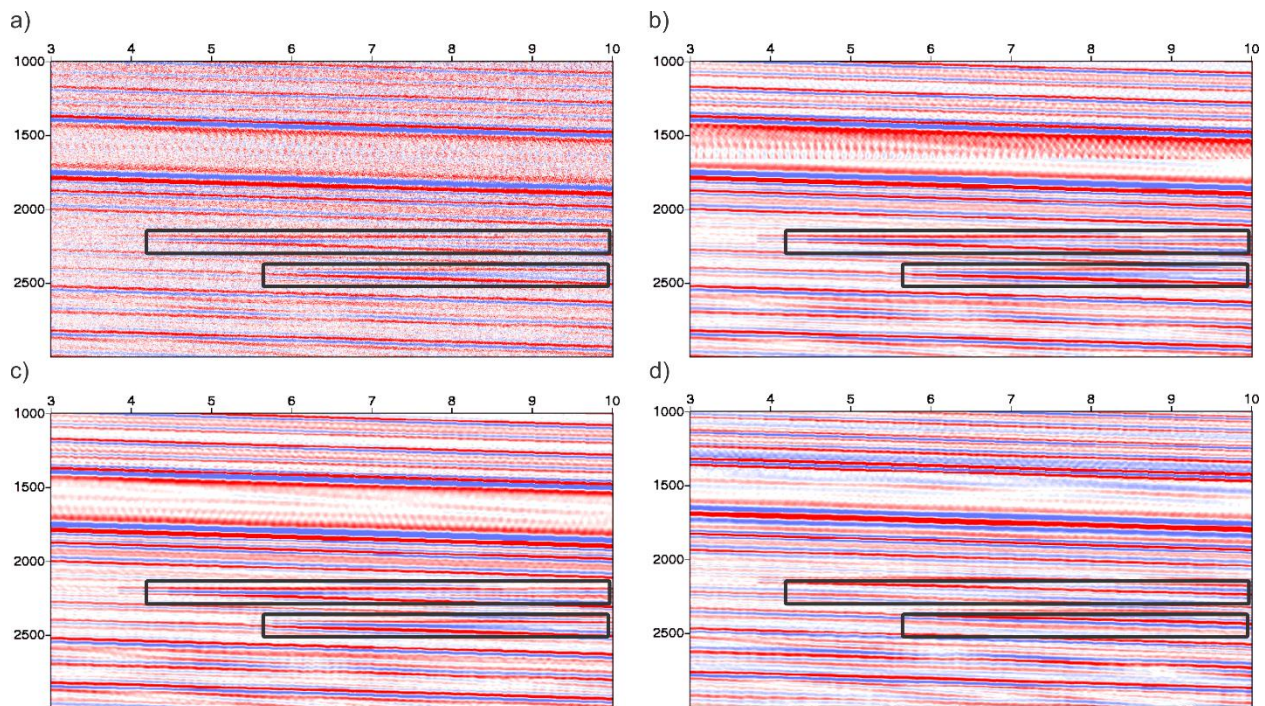


Figura 6.16 Secciones migradas para el modelo 1 en la zona de interes mostrada en la Figura 6.14, usando las versiones pre-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

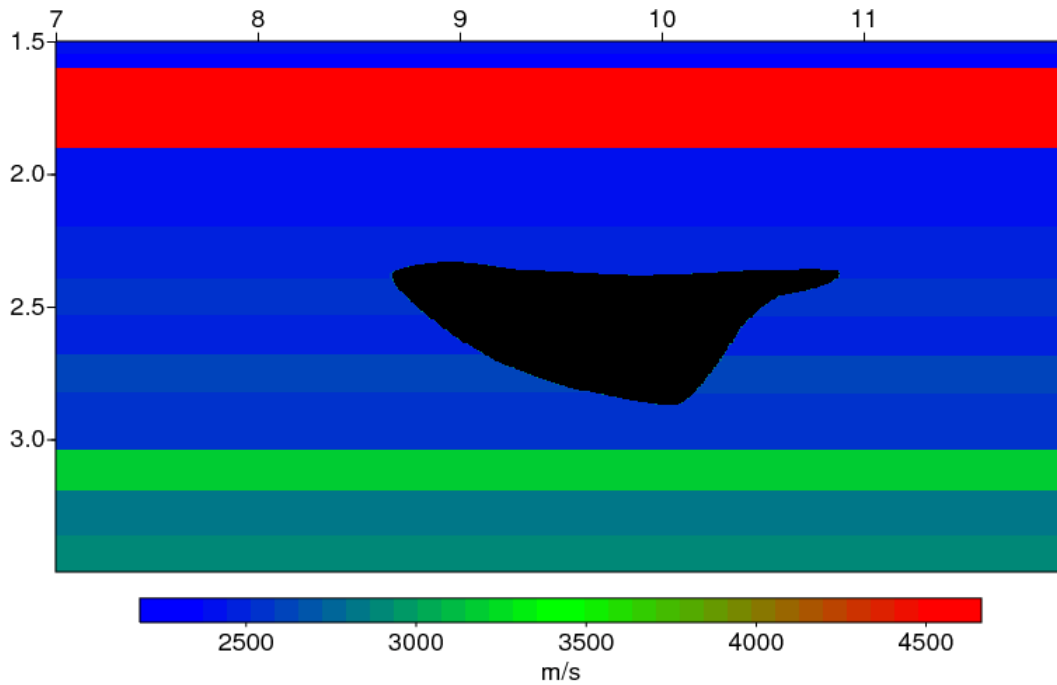


Figura 6.17 Distribución del valor de la velocidad de onda P para la zona de interés del modelo 2.

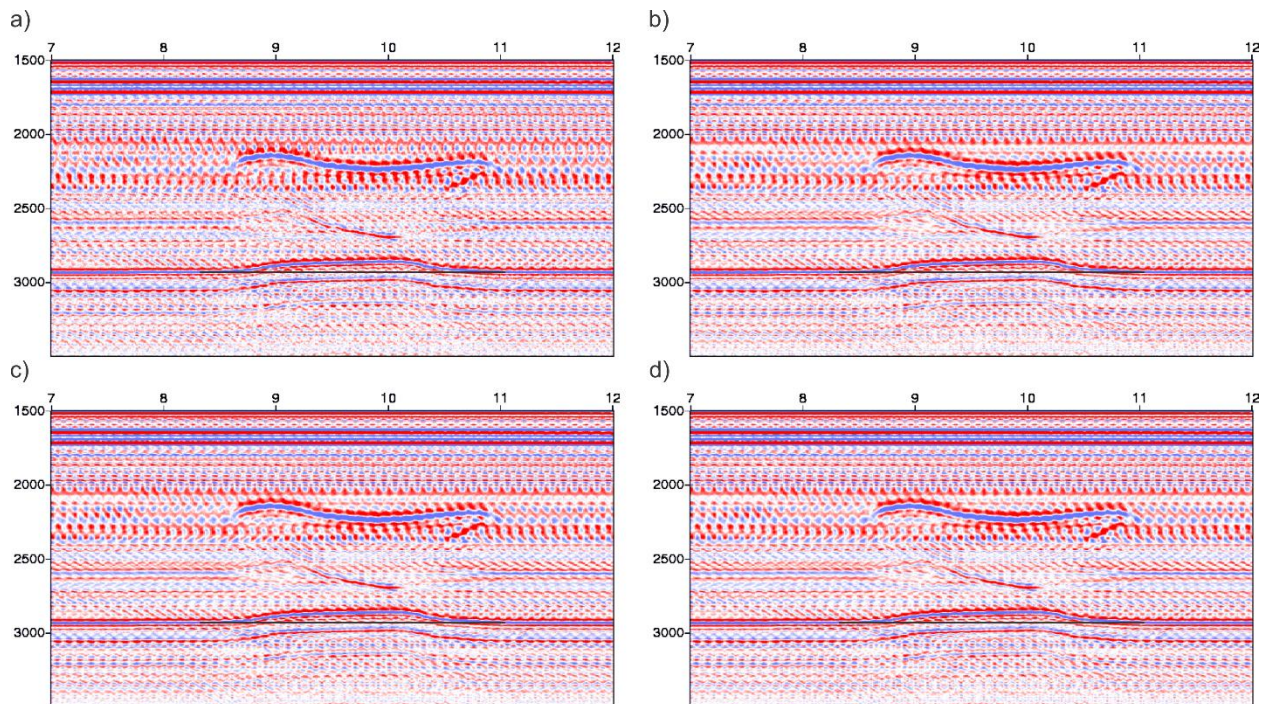


Figura 6.18 Secciones migradas para el modelo 2 en la zona de interés mostrada en la Figura 6.17, usando las versiones post-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

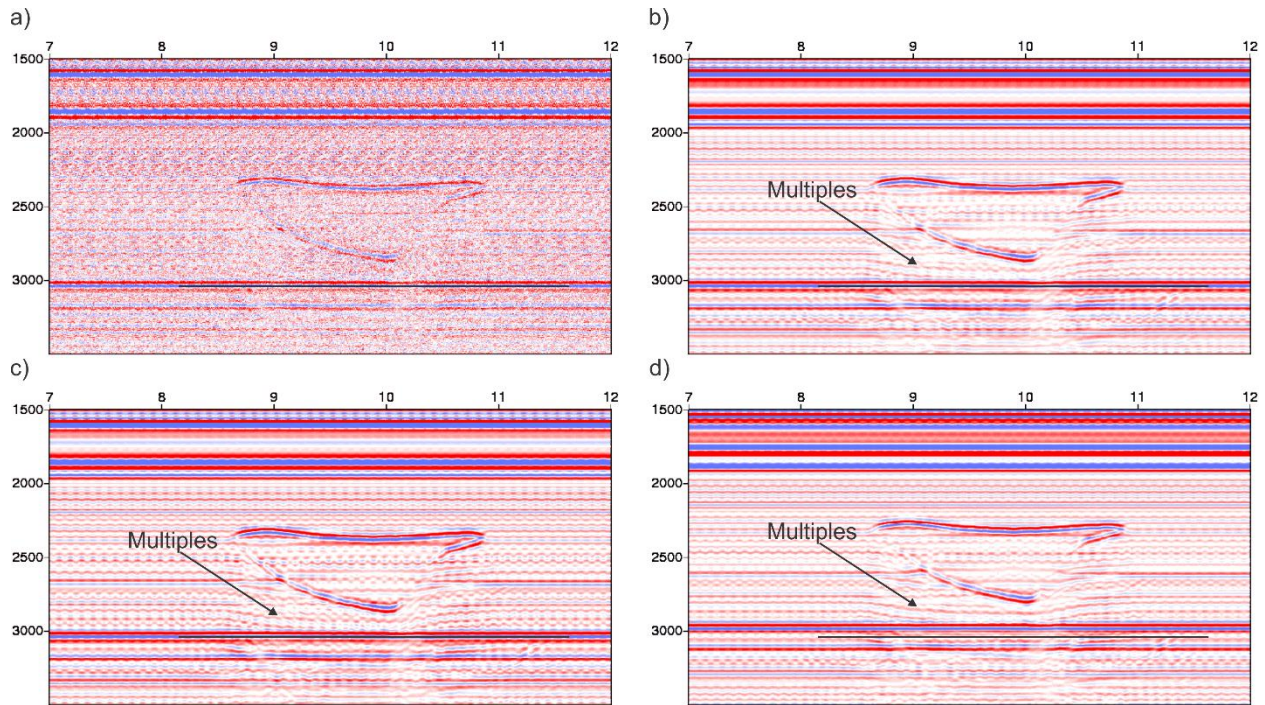


Figura 6.19 Secciones migradas para el modelo 2 en la zona de interés mostrada en la Figura 6.17, usando las versiones pre-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

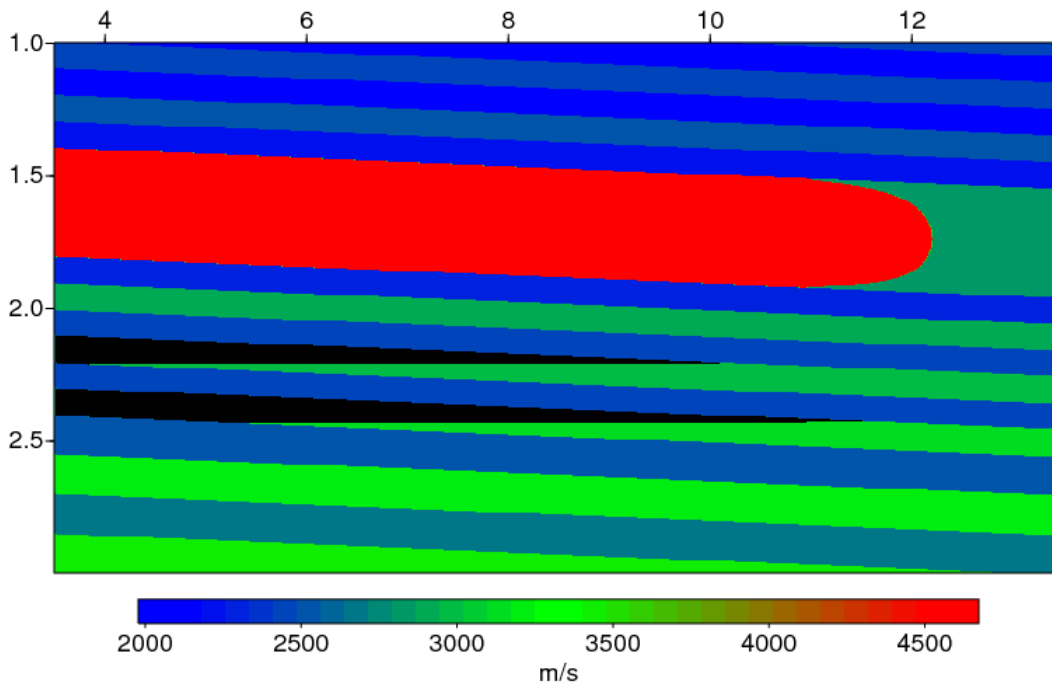


Figura 6.20 Distribución del valor de la velocidad de onda P para la zona de interés del modelo 4.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

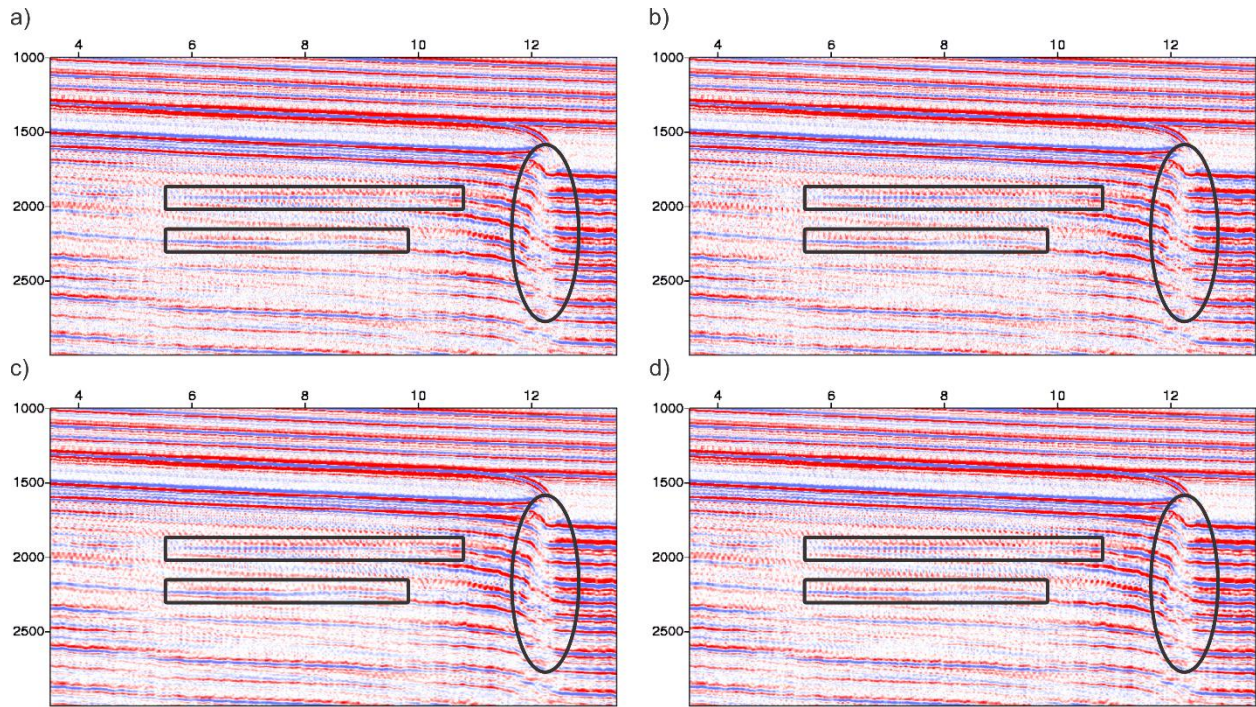


Figura 6.21 Secciones migradas para el modelo 4 en la zona de interes mostrada en la Figura 6.20, usando las versiones post-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

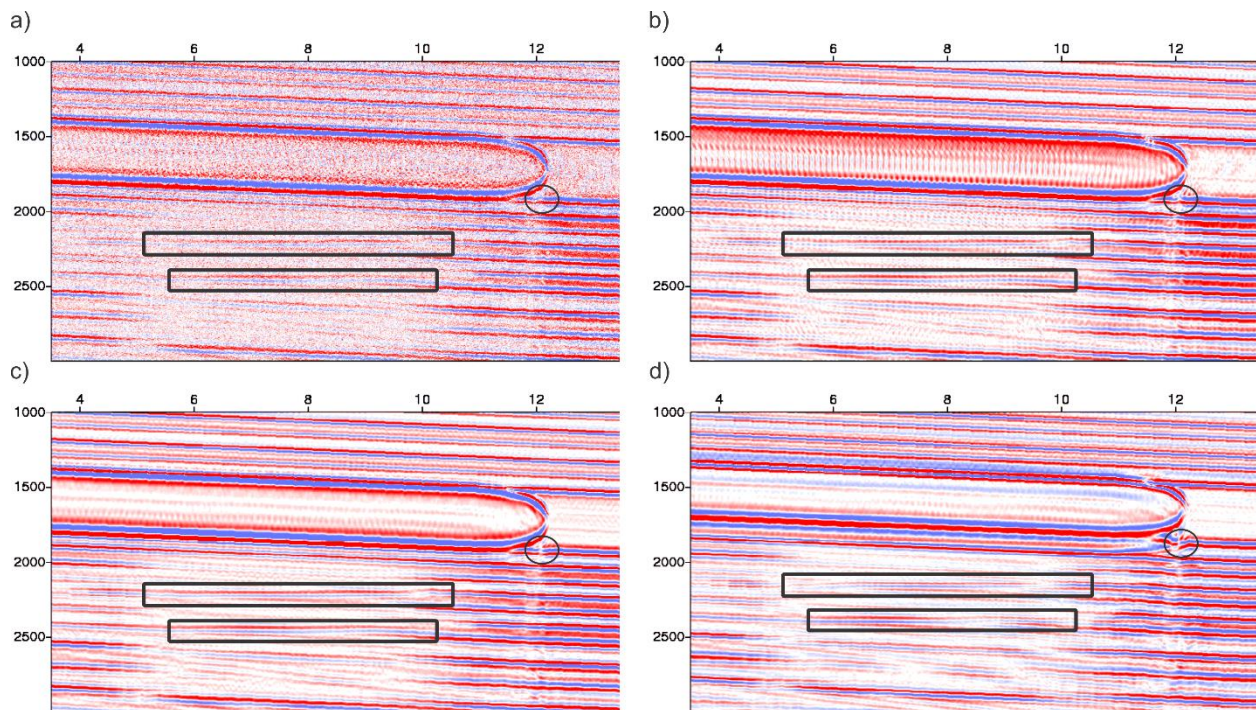


Figura 6.22 Secciones migradas para el modelo 4 en la zona de interes mostrada en la Figura 6.20, usando las versiones pre-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

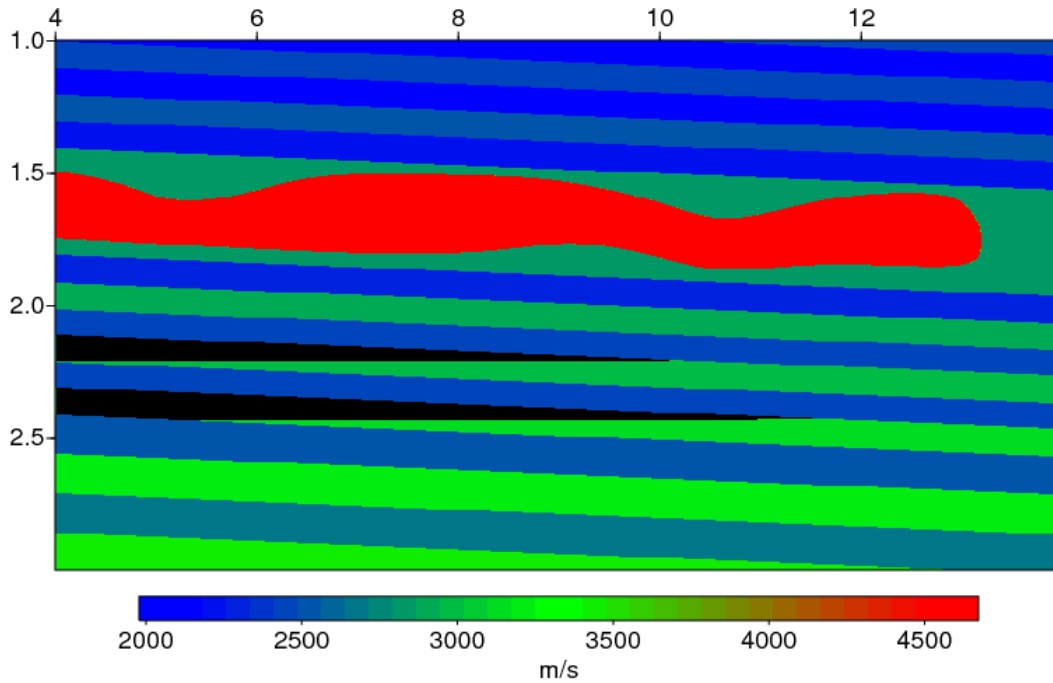


Figura 6.23 Distribución del valor de la velocidad de onda P para la zona de interés del modelo 5.

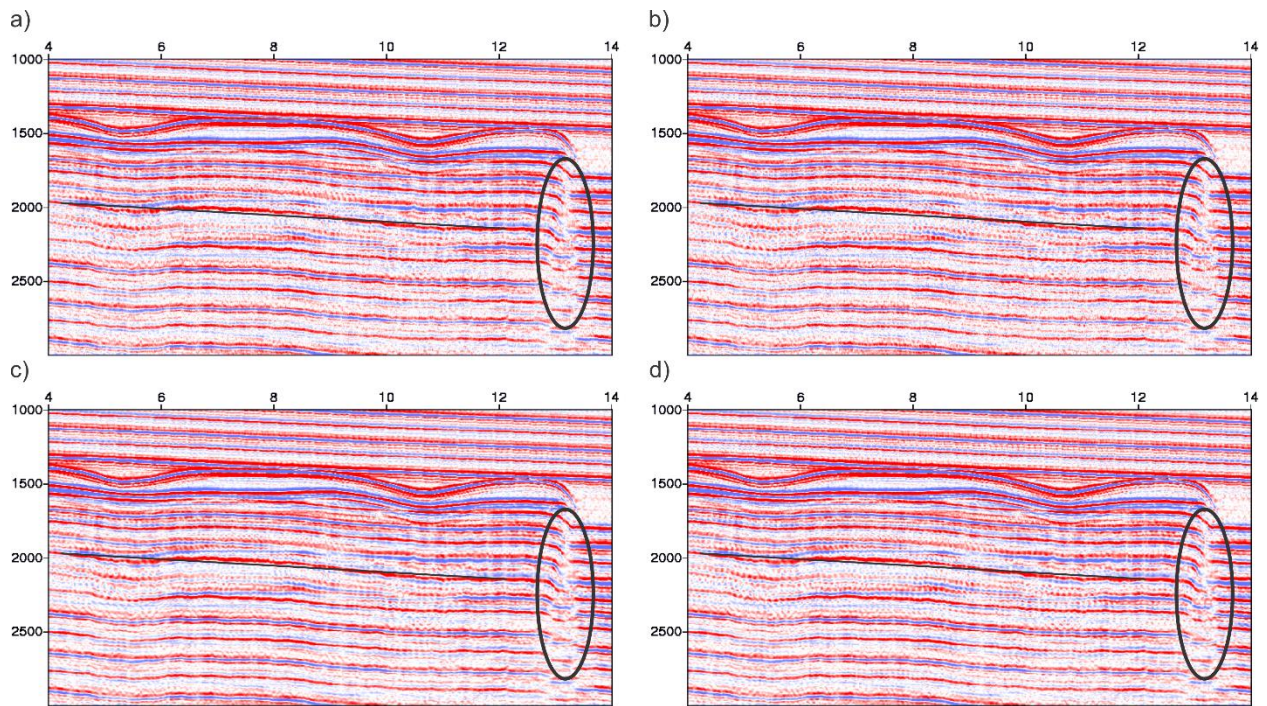


Figura 6.24 Secciones migradas para el modelo 5 en la zona de interés mostrada en la Figura 6.23, usando las versiones post-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

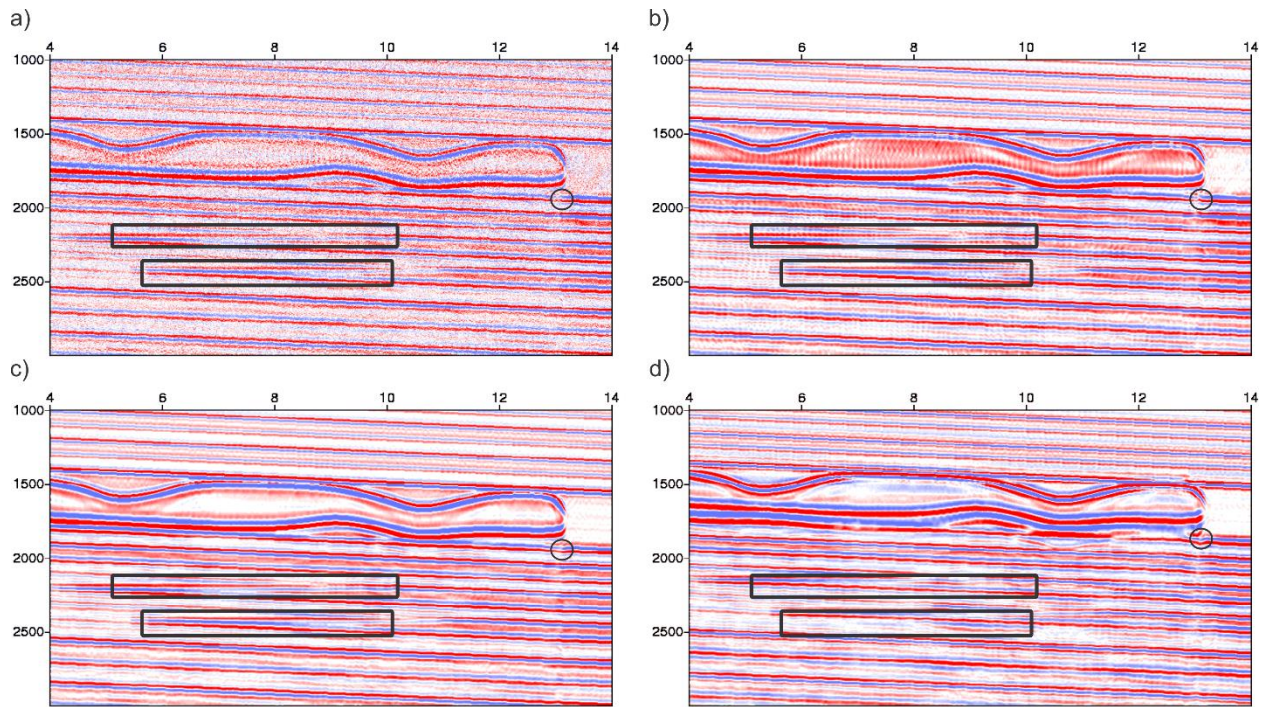


Figura 6.25 Secciones migradas para el modelo 5 en la zona de interés mostrada en la Figura 6.23, usando las versiones pre-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

Como se ha podido apreciar, las versiones post-apilado de los algoritmos no manejan apropiadamente los cambios de velocidad provocados por la presencia de la sal, incluso cuando la complejidad estructural es poca, por esta razón, en los próximos modelos no se evaluarán las versiones post-apilado ya que los modelos que se verán a continuación tienen un grado de complejidad estructural mucho mayor que el de los modelos que hemos analizado hasta ahora.

Para el **modelo 6**, donde tenemos una representación parcial del rige de Latakia, contamos con presencia de una lengua de sal, dicha estructura está compuesta de halita, pero en su interior se encuentra un lente compuesto de anhidrita. cómo podemos ver en la Figura 6.26 **a**, hay presencia de trampas de tipo estructural y estratigráfico, al igual que varias fallas inversas. La Figura 6.27 corresponde a un recorte del modelo original mostrando algunas de las zonas de interés ubicadas

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

bajo la sal. En la Figura 6.28 podemos observar las secciones migradas pre-apilado usando los distintos algoritmos. Encerradas en rectángulos podemos apreciar que las zonas de interés son identificables en las 4 secciones sísmicas, ya por la presencia de *flat spots* o por cambios de amplitud en los reflectores. En lo que respecta a iluminación de las estructuras y continuidad de los reflectores, los 4 algoritmos tiene un buen desempeño, siendo el metodo FD el unico que no ilumina apropiadamente los reflectores de baja amplitud debido al ruido de baja frecuencia, ver Figura 6.26 **b**, **c** y **d**, y Figura 6.28.

Para el **modelo 7**, tenemos una representación parcial del rift de la cuenca Lusitana, donde hay presencia de una almohadilla de sal que llega a tener casi 1 km de espesor, ver Figura 6.29 **a**. La Figura 6.30 es un recorte del modelo de velocidad original, donde podemos ver que en la zona hay presencia de trampas estructurales y estratigráficas, al igual que fallas normales ubicadas bajo la capa de sal. En la Figura 6.31 podemos ver las secciones migradas pre-apilado para los algoritmos evaluados. Al igual que en el modelo anterior, es posible identificar las zonas de interés, ya sea por la presencia de *flat spots* o por la identificación de los paleocanales. En lo que respecta a iluminación de las estructuras presentes, los métodos PSPI y FFD son los que tienen el mejor desempeño, el método SSF tiene problemas al momento de iluminar las superficies inclinadas y la zona ubicada bajo la cuña de estratos arrastrada por la sal ubicada en el círculo de color negro. En cuanto a continuidad de reflectores, nuevamente los métodos PSPI y FFD son los que tienen mejor desempeño, en la sección migrada usando el método SSF los reflectores presentan ciertas discontinuidades, muy posiblemente debido a la gran cantidad de puntos de dispersión presentes en las zonas de falla, ver Figura 6.29 **b**, **c** y **d**. El método FD nuevamente es el que tiene peor desempeño, debido a la gran cantidad de ruido en la sección sísmica, al punto que no resulta fácil identificar a simple vista el flat spot ni el paleocanal.

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

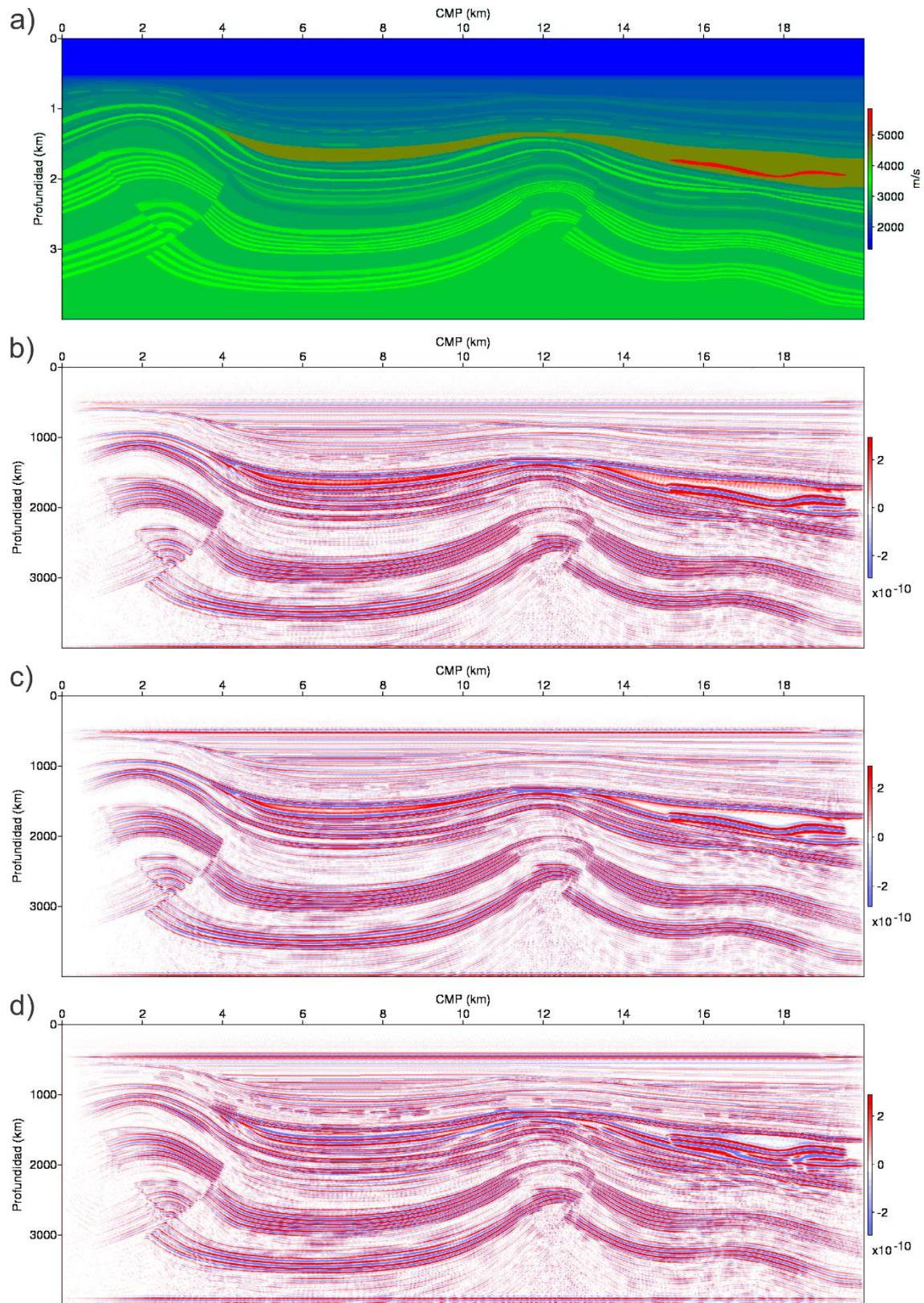


Figura 6.26 a) distribución del campo de velocidad de onda P para el modelo 6. Secciones migradas en profundidad usando los algoritmos: b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

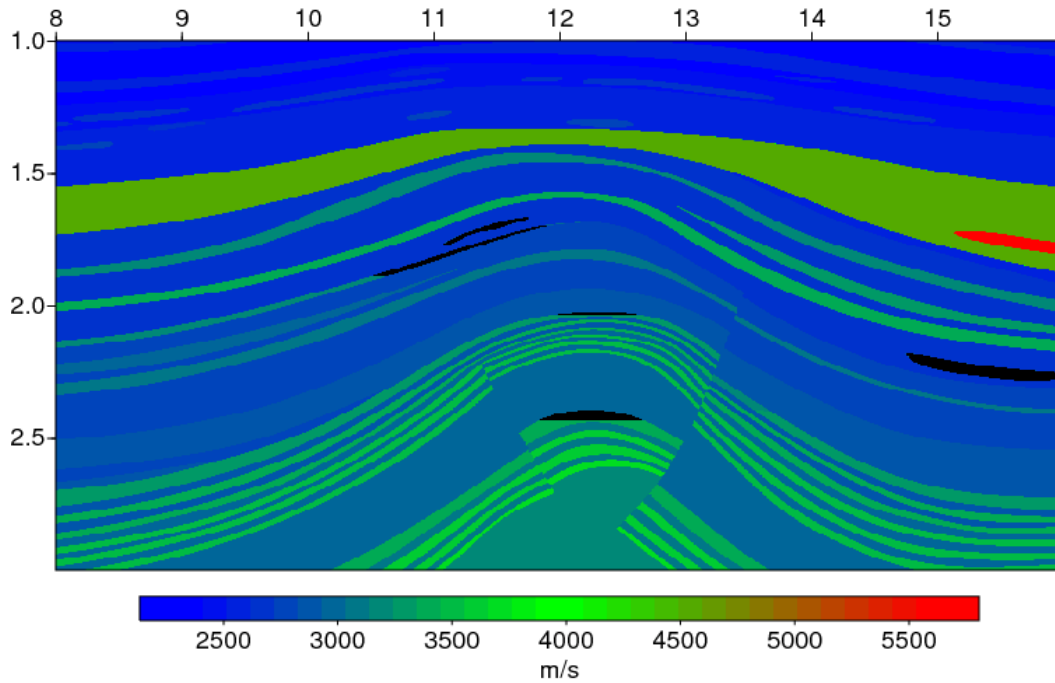


Figura 6.27 Distribución del valor de la velocidad de onda P para una de las zonas de interés del modelo 6.

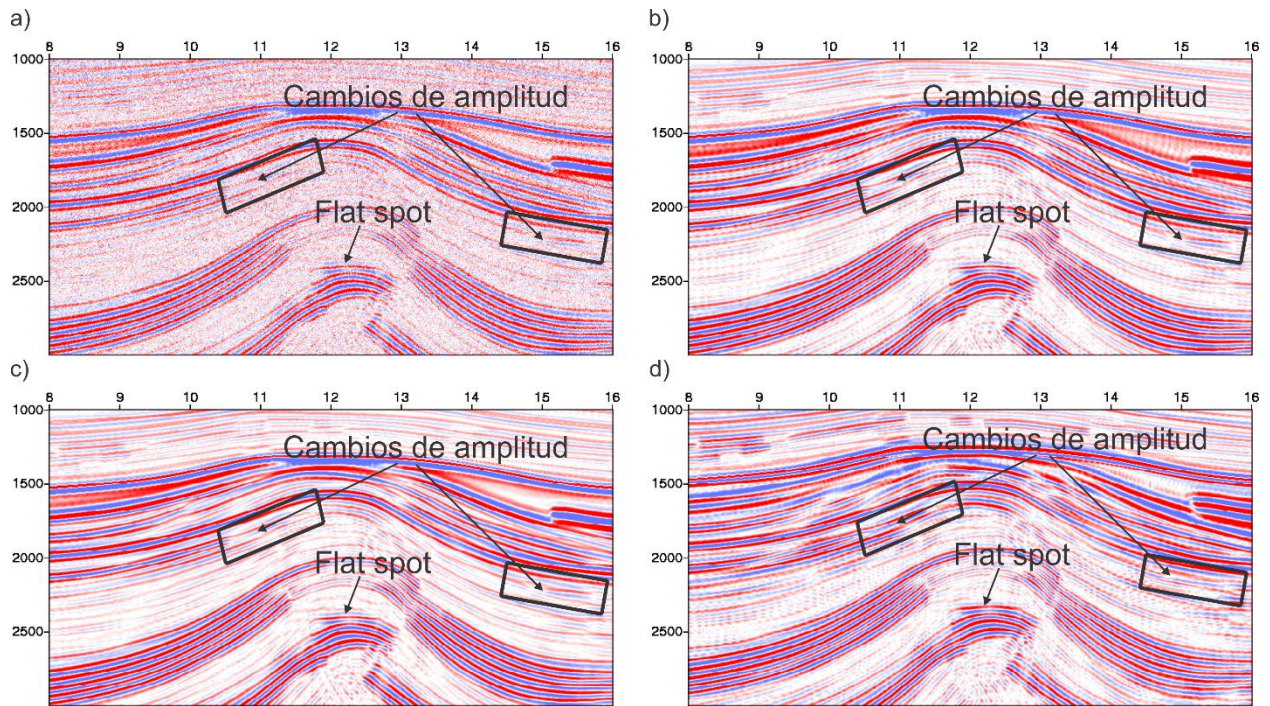


Figura 6.28 Secciones migradas para el modelo 6 en la zona de interés mostrada en la Figura 6.27, usando las versiones pre-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

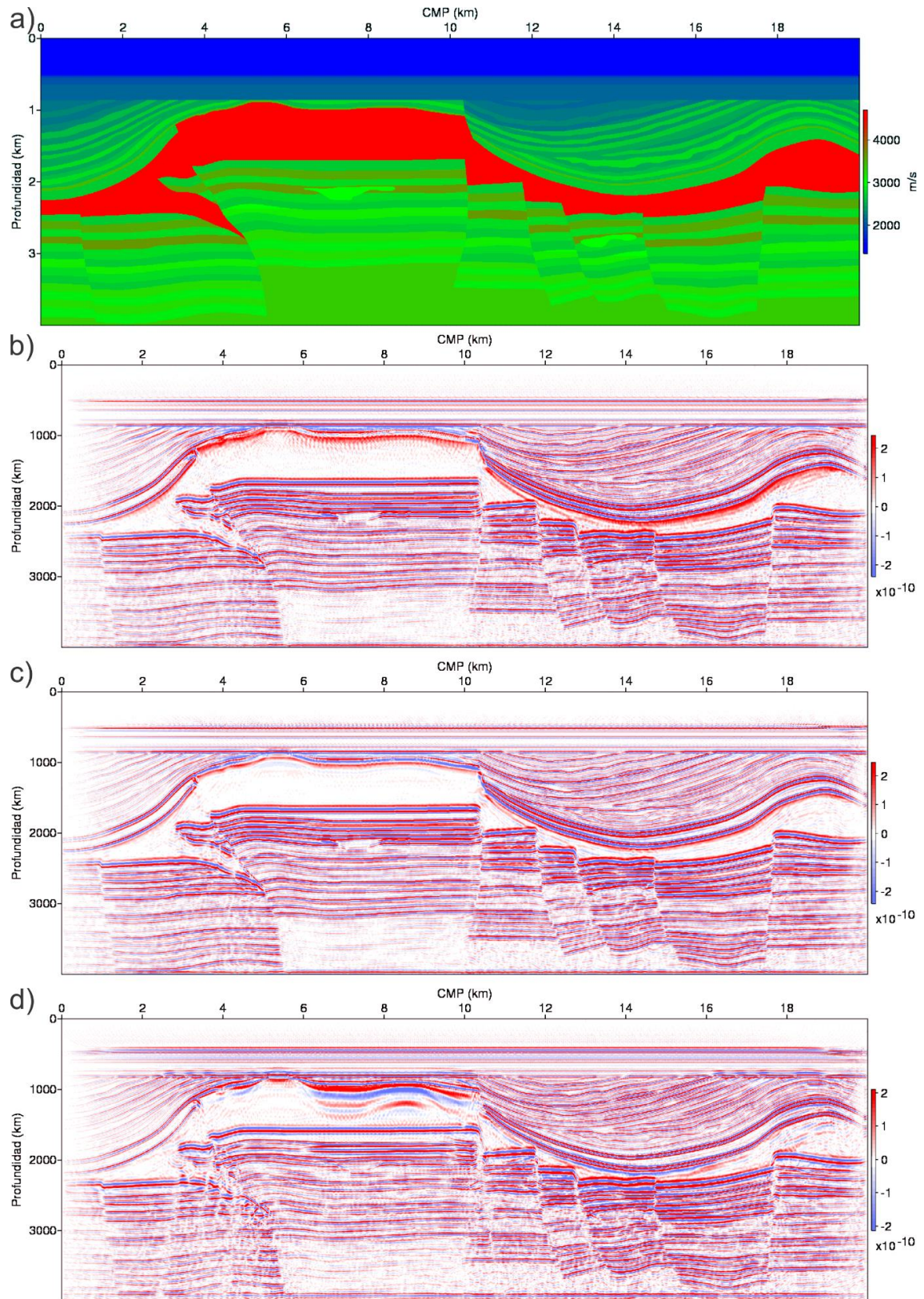


Figura 6.29 a) distribución del campo de velocidad de onda P para el modelo 7. Secciones migradas en profundidad usando los algoritmos: b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

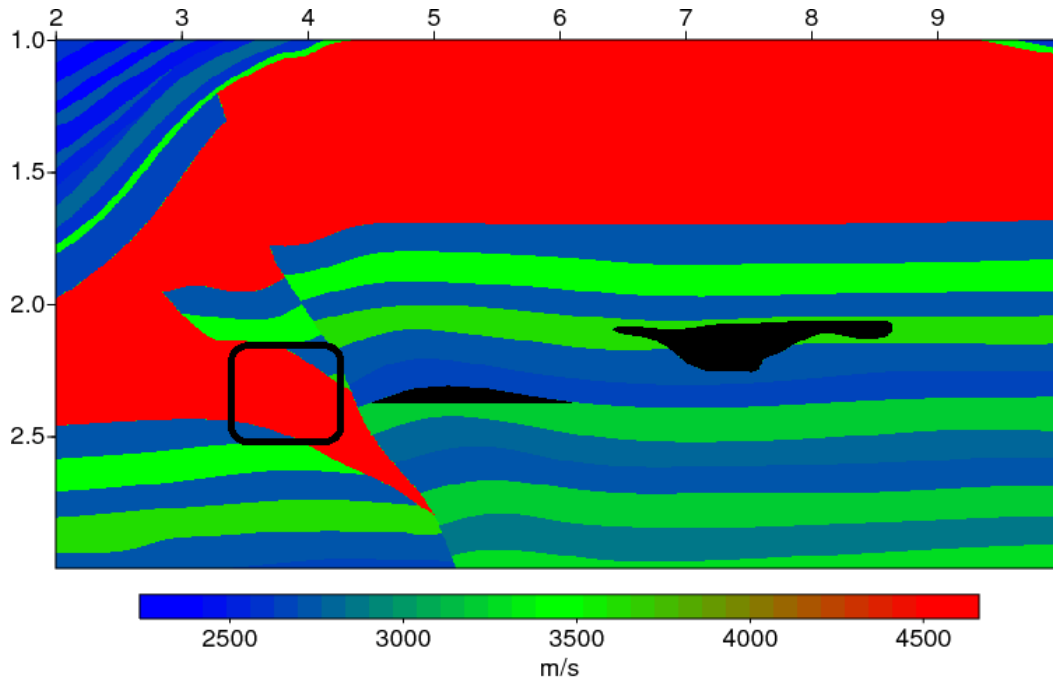


Figura 6.30 Distribución del valor de la velocidad de onda P para una de las zonas de interés del modelo 7.

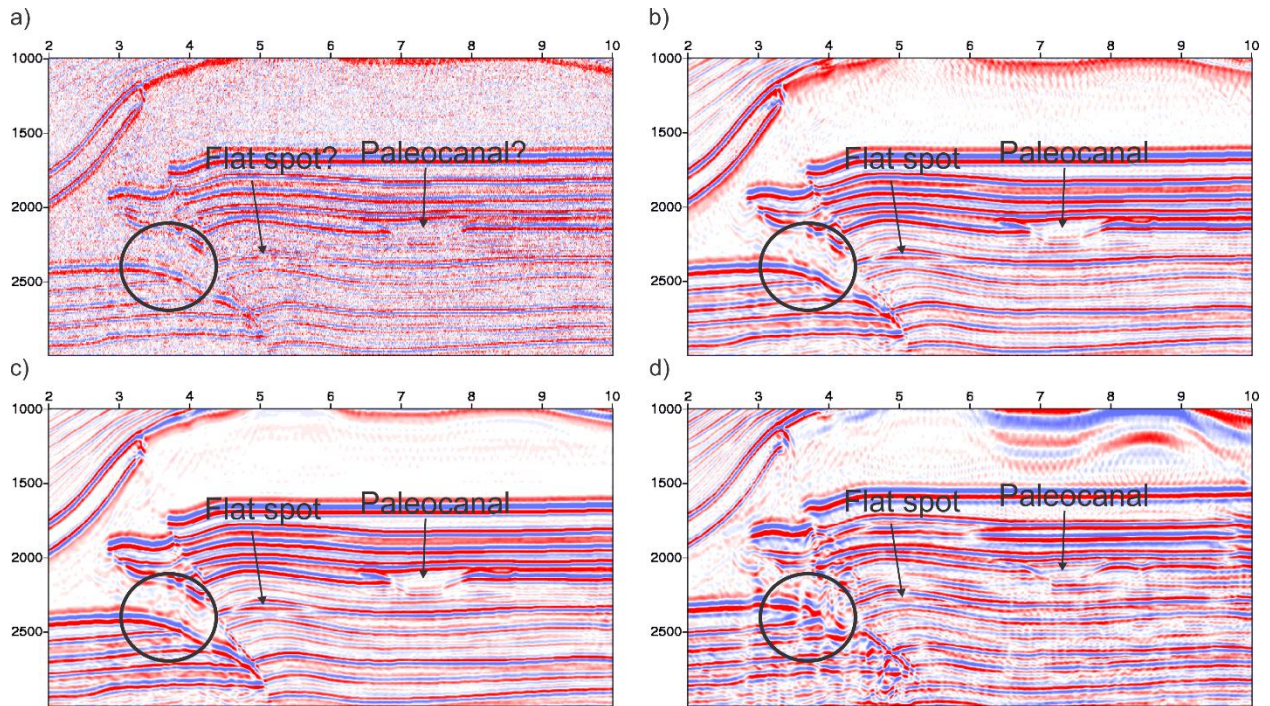


Figura 6.31 Secciones migradas para el modelo 7 en la zona de interés mostrada en la Figura 6.30, usando las versiones pre-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

Para el **modelo 8**, tenemos una representación parcial de una de las lenguas de sal presentes en el Golfo de México, la cual llega a tener casi 2 km de espesor, ver Figura 6.32 **a**. La Figura 6.33 es un recorte de modelo original, donde es posible apreciar la presencia de trampas estratigráficas y estructurales, así como fallas inversas generadas por el movimiento de la sal. La Figura 6.34 muestra las secciones sísmicas migradas usando los cuatro algoritmos mencionados. En las secciones migradas usando los algoritmos FFD, PSPI y SSF, es posible identificar fácilmente la geometría de los paleocanales presentes en una de las formaciones rocosas. La trampa estructural es identificable por concordancia con las estructuras locales y por una leve variación de la amplitud en el sitio donde se encuentra el contacto agua-aceite. En cuanto a iluminación de las estructuras, los métodos PSPI y FFD siguen siendo los que tiene mejor desempeño, y aunque el método SSF lo también tiene un buen desempeño, presenta ambigüedades a la hora de definir el tope y la base de la sal, debido a que no suprime apropiadamente los múltiples que se generan por las fuentes contrastes de impedancia. En cuanto a continuidad de reflectores, en este caso los métodos PSPI, FFD y SSF tiene un desempeño similar, ver Figura 6.32 **b**, **c** y **d**. El método FD continúa siendo el que peor desempeño tiene debido a la presencia de ruido, siendo muy difícil identificar los paleocanales y aún más la trampa estructural.

Para el **modelo 9**, tenemos una representación de una capa de sal, de la cual se desprenden tres domos y una almohadilla de sal. La capa de sal tiene un espesor promedio de 0.15 km mientras que la altura del diapiro salino es de aproximadamente 1.5 km, ver Figura 6.35 **a**. La Figura 6.36 es un recorte del modelo original para la zona ubicada bajo los diapiros salinos, donde hay presencia de trampas estructurales y estratigráficas, así como algunas fallas normales. La Figura 6.39 muestra las secciones sísmicas migradas usando los métodos mencionados. En la Figura 6.35

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

**b, c y d** y la Figura 6.37 se observa como las secciones migradas usando los métodos FFD y PSPI iluminan de manera apropiada las paredes de los diapiros salinos, siendo el método FFD el que mejor las delinea. En el caso del método SSF es posible apreciar la geometría de los domos, pero nuevamente se presentan ambigüedades que no permiten delimitar apropiadamente las paredes de los domos, esto debido a la no supresión de los múltiples generados al interior de estas estructuras. En la Figura 6.37, se observa como la verticalidad de los diapiros junto a los múltiples generados por reverberaciones dentro de la sal, genera cierta distorsión debajo de la sal en las secciones migradas cuando se usan los métodos FFD, PSPI y SSF, siendo los métodos SSF y PSPI el más y el menos afectado por dicho ruido, encerrado en las zonas circulares. para estos tres métodos, es posible identificar los canales por su geometría y por su amplitud, aunque en el método SSF algunos canales son afectados por la distorsión generada por los domos y no es tan evidente su presencia. Las trampas estructurales para los tres métodos pueden ser inferidas por concordancia de las estructuras locales, aunque en algunas son identificadas fácilmente por la presencia del *flat spot*. En cuanto a continuidad de reflectores y a iluminación de las demás estructuras, los tres métodos tienen un buen desempeño, siendo los métodos PSPI y el SSF los que tienen el desempeño más y menos sobresaliente respectivamente. Con el método FD, solo uno de los canales es iluminado, y las trampas estructurales pueden llegar a ser inferidas por concordancia de las estructuras locales.

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

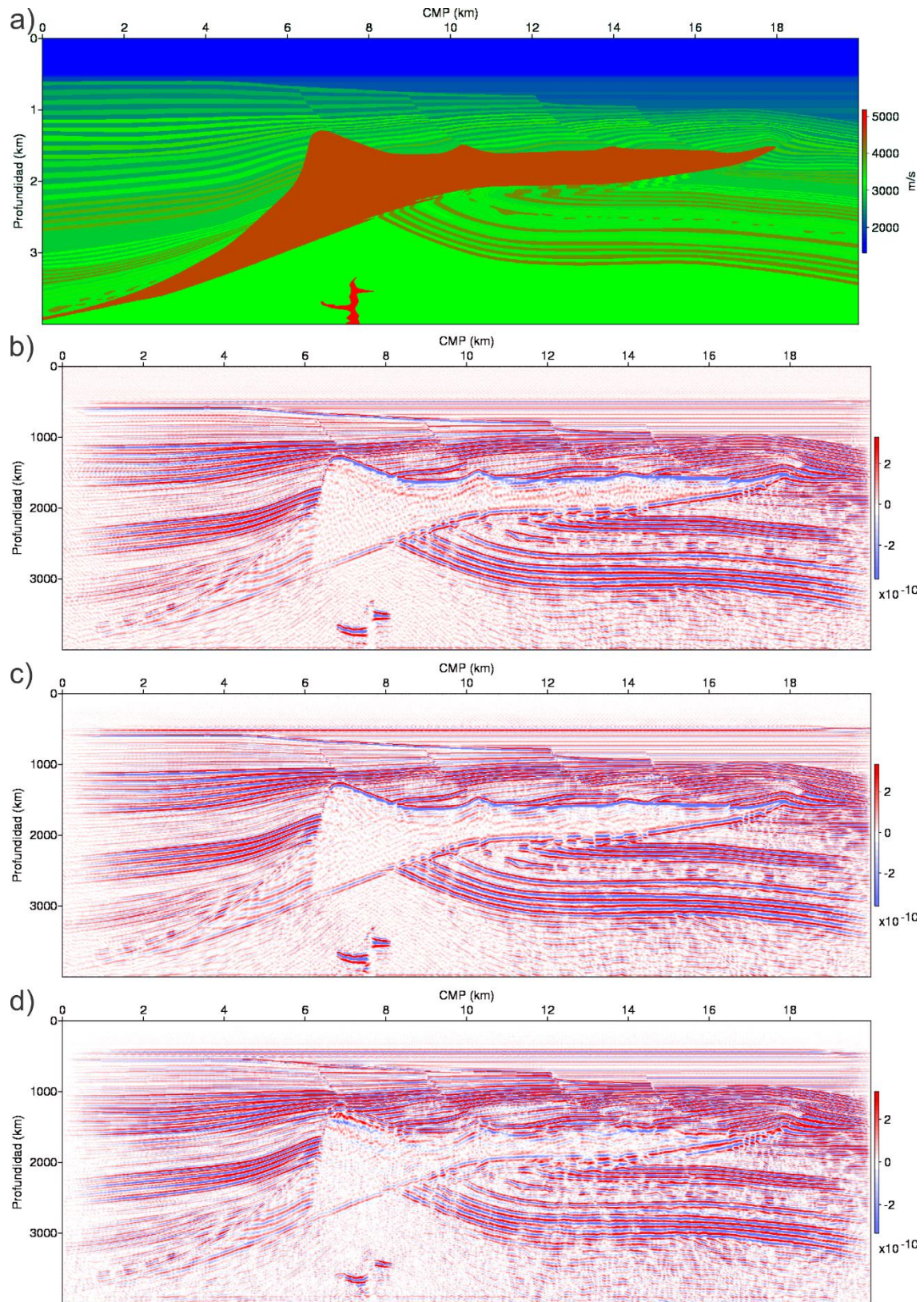


Figura 6.32 a) distribución del campo de velocidad de onda P para el modelo 8. Secciones migradas en profundidad usando los algoritmos: b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

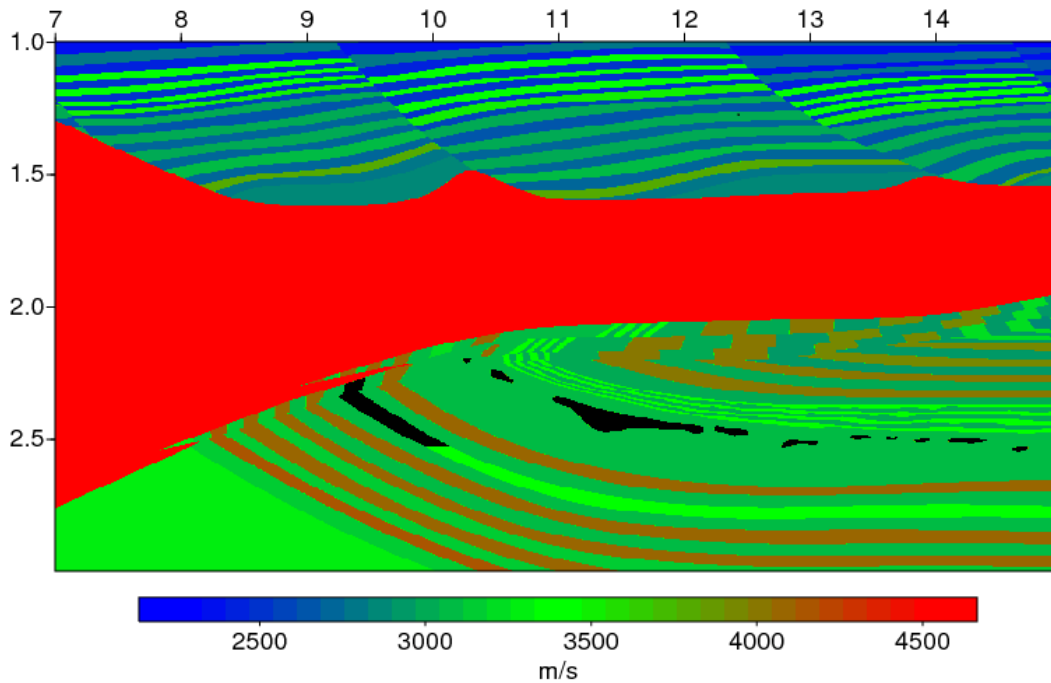


Figura 6.33 Distribución del valor de la velocidad de onda P para la zona de interés del modelo 8.

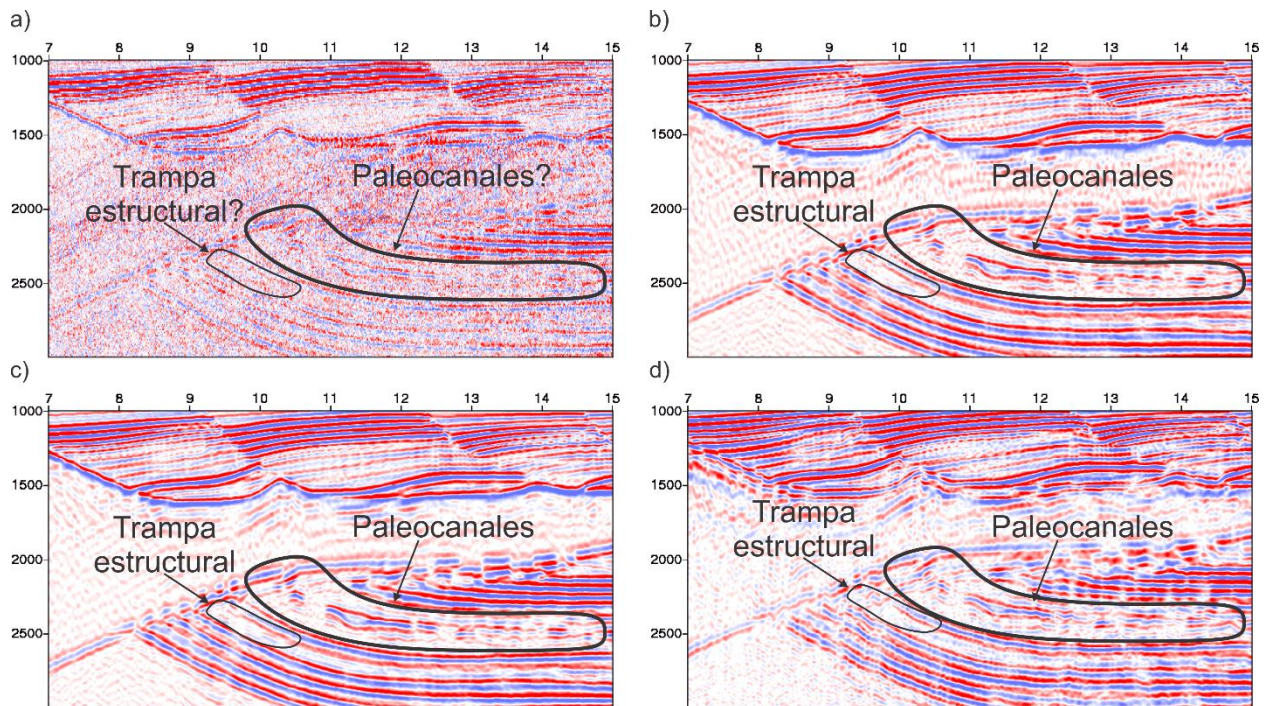


Figura 6.34 Secciones migradas para el modelo 8 en la zona de interés mostrada en la Figura 6.33, usando las versiones pre-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

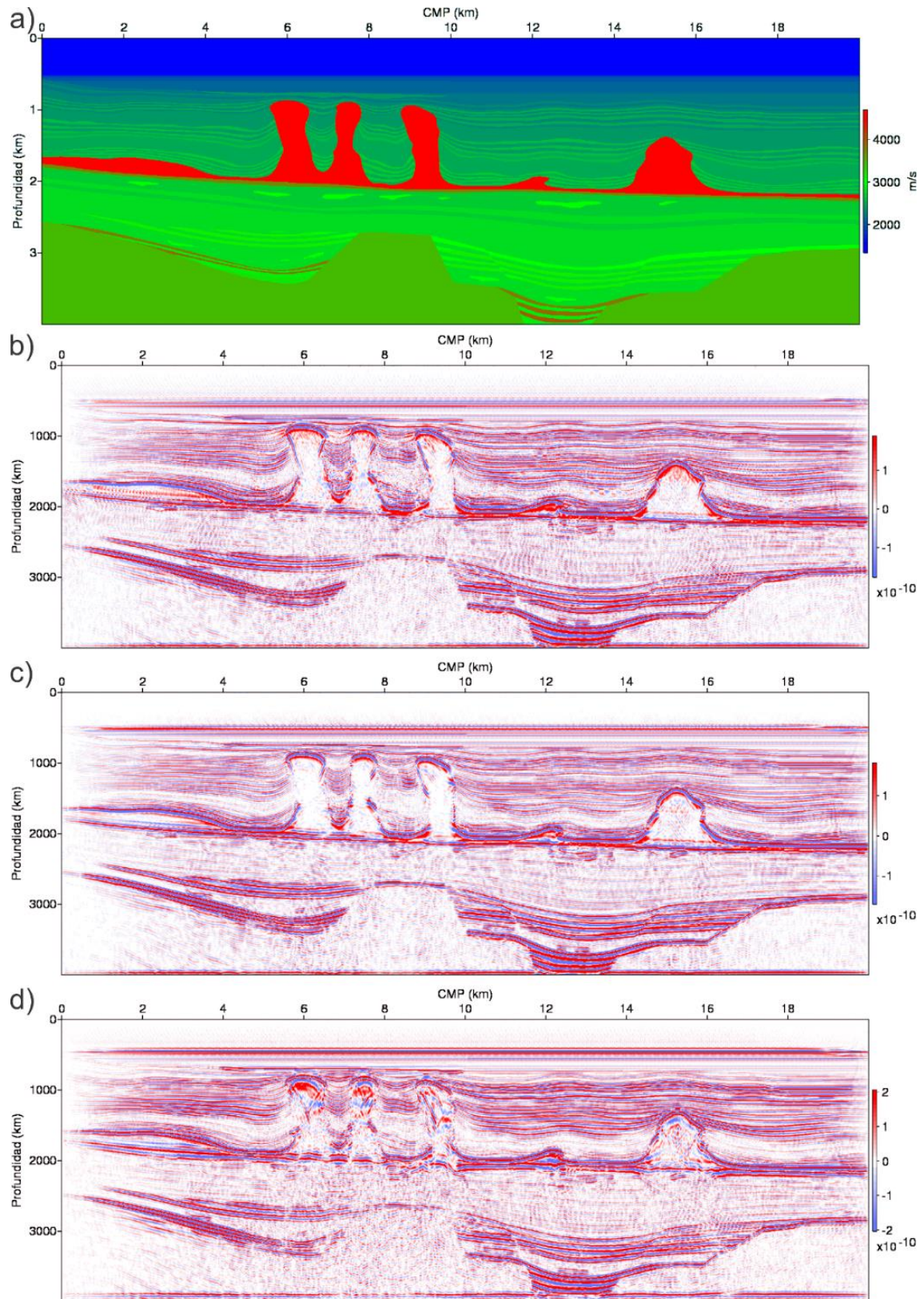


Figura 6.35 a) distribución del campo de velocidad de onda P para el modelo 9. Secciones migradas en profundidad usando los algoritmos: b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

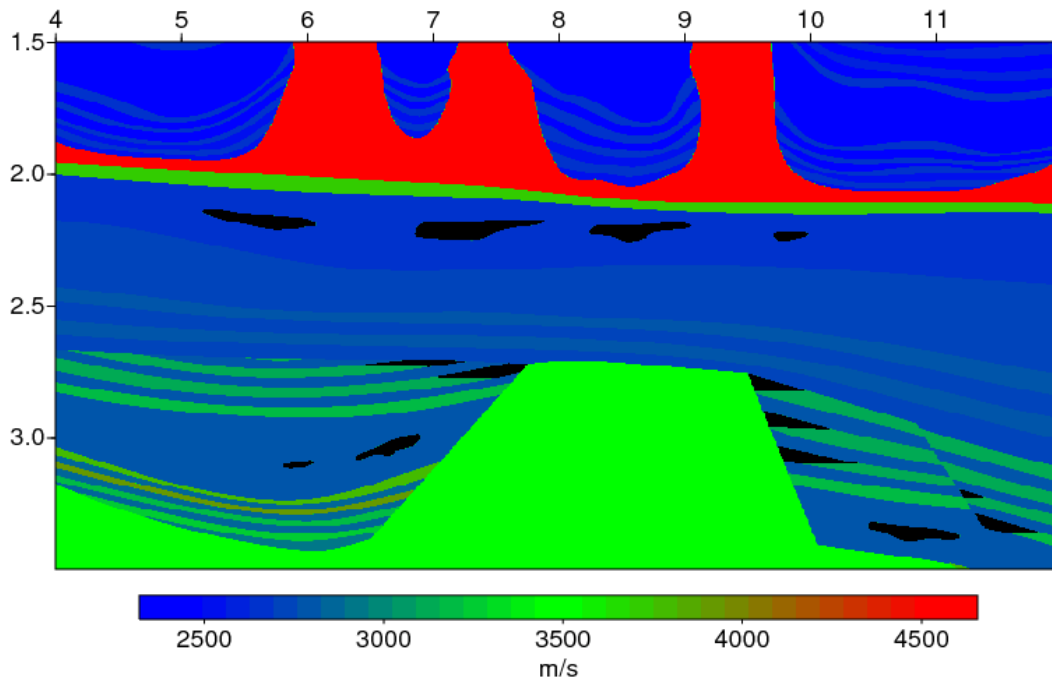


Figura 6.36 Distribución del valor de la velocidad de onda P para una de las zonas de interés del modelo 9.

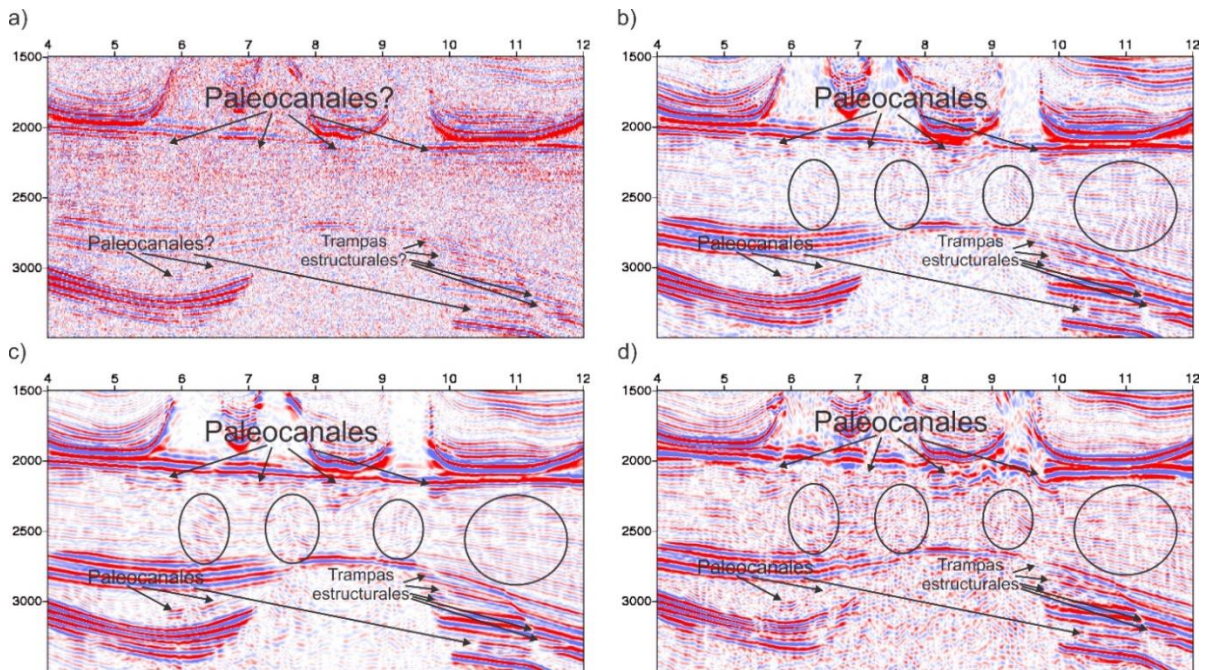


Figura 6.37 Secciones migradas para el modelo 9 en la zona de interés mostrada en la Figura 6.36, usando las versiones pre-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

Para el **modelo 10**, tenemos una representación de una zona con presencia de una lengua y un diapiro de sal. La lengua de sal llega a tener un espesor de casi 1km y el diapiro tiene una altura de un poco más de 2 km. Además de estas estructuras, aún quedan los remanentes de la capa fuente de sal en forma de almohadillas a una profundidad de 3.2 km, ver Figura 6.38 **a**. La Figura 6.39 es un recorte del modelo original para algunas zonas de interés ubicadas bajo la lengua de sal, donde es posible apreciar varias trampas de tipo estructural. La Figura 6.40 muestra las secciones migradas usando los algoritmos mencionados. Para los métodos FFD, PSPI y SSF es posible identificar la mayoría de las trampas por concordancia de las estructuras y por la presencia *flat spots*. Solo en una de las trampas no pudo ser identificada en ninguna de las secciones, esta trampa estructural se encuentra ubicada justo debajo de la lengua sal. El problema se presenta debido a que ninguno de los métodos es capaz de suprimir los múltiples asociados a la estructura salina y por ende se sobreponen a las reflexiones asociadas a dicha trampa e impiden que sea iluminada. Para estos tres métodos se observa que debajo de las zonas donde aumenta el espesor de la lengua de sal, se presentan distorsiones e incluso blanqueo de amplitudes, tal como sucede en la zona encerrada por el rectángulo. En lo que respecta a continuidad de los reflectores, vemos que los tres métodos se ven afectados por los cambios de espesor de la lengua de sal y por ende presentan distorsiones que ocasionan que los reflectores se vean de manera discontinua. Para este caso, con el método FD no es posible identificar las trampas estructurales, ni por su geometría ni por la presencia de *flat spots*, dada la gran cantidad de ruido presente en la sección.

Para el **modelo 11**, tenemos una representación de un diapiro salino, que llega a tener casi 2.5 km de altura, ver Figura 6.41 **a**. La Figura 6.42 es un recorte del modelo original, donde es posible apreciar dos trampas estructurales asociadas a los flancos del diapiro. La Figura 6.43 muestra las secciones migradas usando los algoritmos mencionados. Para este modelo, vemos como las dos

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

trampas pueden ser identificadas por concordancia de las estructuras y por la presencia de *flat spots* en todas las secciones migradas en la zona señalada por los círculos negros. En lo que respecta a iluminación de las estructuras, el método SSF es el único que no soluciona el campo de velocidad apropiadamente y ubica los flancos del diapiro en la posición incorrecta, como se puede observar al comparar la línea negra con su reflector asociado. En lo que respecta a continuidad de los reflectores, los métodos FFD, PSPI y SSF muestran un buen desempeño, siendo el método FD el único que presenta problemas debido a la gran cantidad de ruido que se sobrepone a los reflectores de baja amplitud.

El **modelo 12**, que es una representación del cinturón plegado de Kelasu, ya había sido presentado previamente en el escenario anterior, ver Figura 6.44 **a**. La Figura 6.45 es un recorte para una de las zonas de interés, donde hay presencia de una trampa estructural en la parte superior del cabalgamiento mostrado. La Figura 6.46 muestra las secciones sísmicas obtenidas al aplicar los algoritmos mencionados, siendo posible en todas las secciones inferir la presencia de la trampa de hidrocarburos por concordancia de las estructuras locales, que en este caso es un cabalgamiento. Es claro que el método SSF es el que más se ve afectado por las reverberaciones que ocurren al interior de la sal y que se manifiestan como múltiples en la sección sísmica. Los métodos FD, FFD y PSPI suprimen de una mejor manera estos múltiples, presentándose solo bajo la cuña de sal que sobresale y se encuentra encerrada por el círculo negro. En lo que respecta a continuidad de los reflectores, los métodos FFD y PSPI son los que mejor desempeño tienen, en este aspecto el método SSF se ve afectado por la presencia de los múltiples y el método FD es afectado por la presencia de ruido sísmico.

En el **modelo 13**, tenemos una representación del diapiro de Szamotuly, que tiene una altura de un poco más de 2 km, ver Figura 6.47 **a**. La Figura 6.48 es un recorte del modelo original, donde

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

se encuentran las zonas de interés, que corresponde a trampas estructurales y una estratigráfica. La Figura 6.49 muestra las secciones migradas obtenidas al aplicar los algoritmos mencionados. Es claro, que todos los métodos presentan problemas al momento de iluminar el flanco derecho del diapiro y las zonas que están debajo de este como se observa en las zonas encerradas por los rectángulos negros, debido a las reverberaciones que se producen dentro del diapiro y generan distorsiones en estas zonas. El método SSF es el más afectado por esta situación, llegando a presentarse varios múltiples asociados al flanco del diapiro. Debido a este problema, el paleocanal ubicado debajo del diapiro, no es identificable en ninguna de las secciones migradas. Las trampas estructurales pueden ser identificadas por la concordancia de las estructuras presentes en la zona, y en el caso de solo una de estas trampas podemos ver que hay un cambio de amplitud fuerte en los reflectores. En lo concerniente a continuidad de los reflectores, para todas las secciones sísmicas los reflectores ubicados bajo la sal se presentan con poca continuidad, siendo el método FD el que ofrece los peores resultados debido a la presencia del ruido sísmico.

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

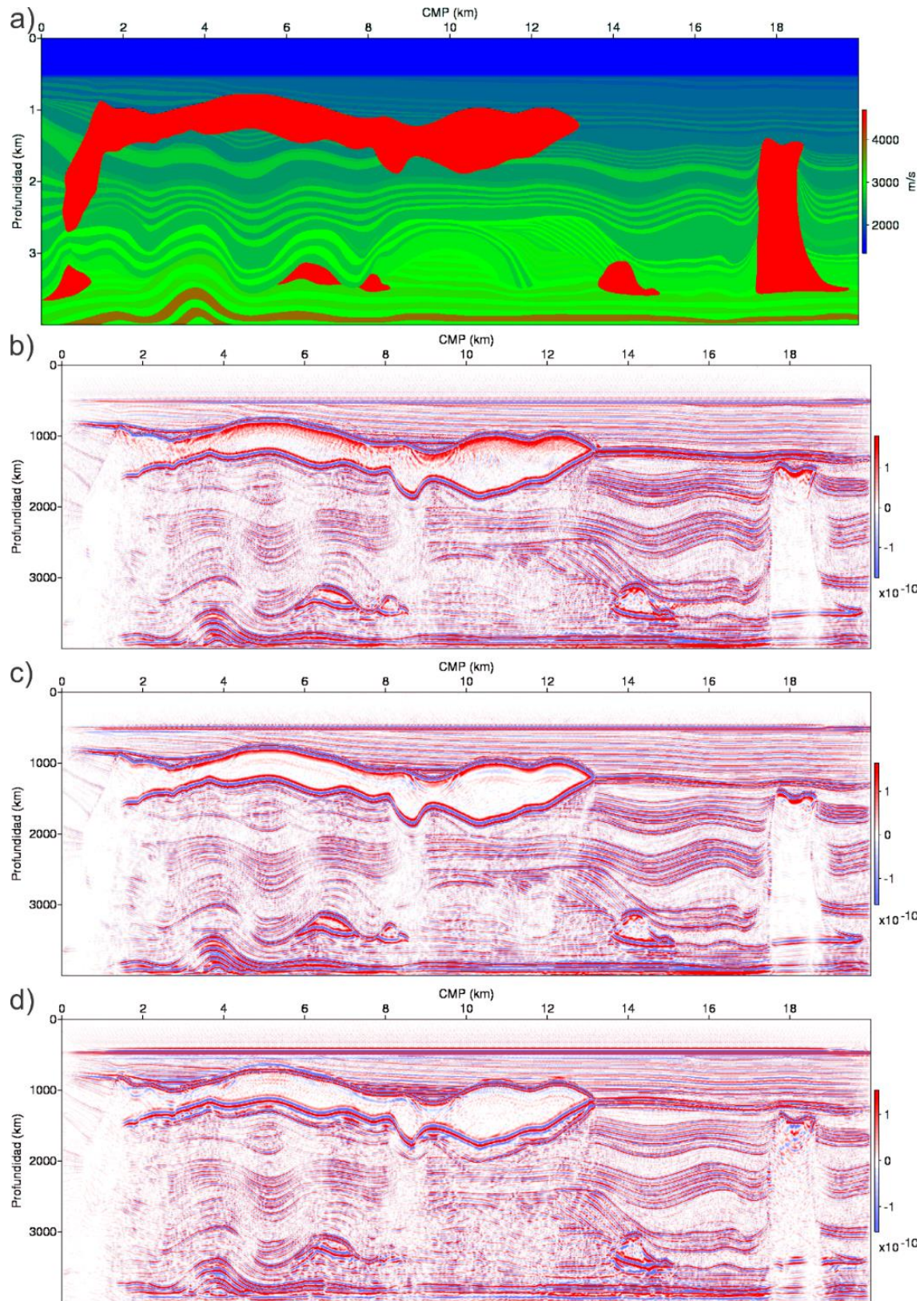


Figura 6.38 a) distribución del campo de velocidad de onda P para el modelo 10. Secciones migradas en profundidad usando los algoritmos: b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

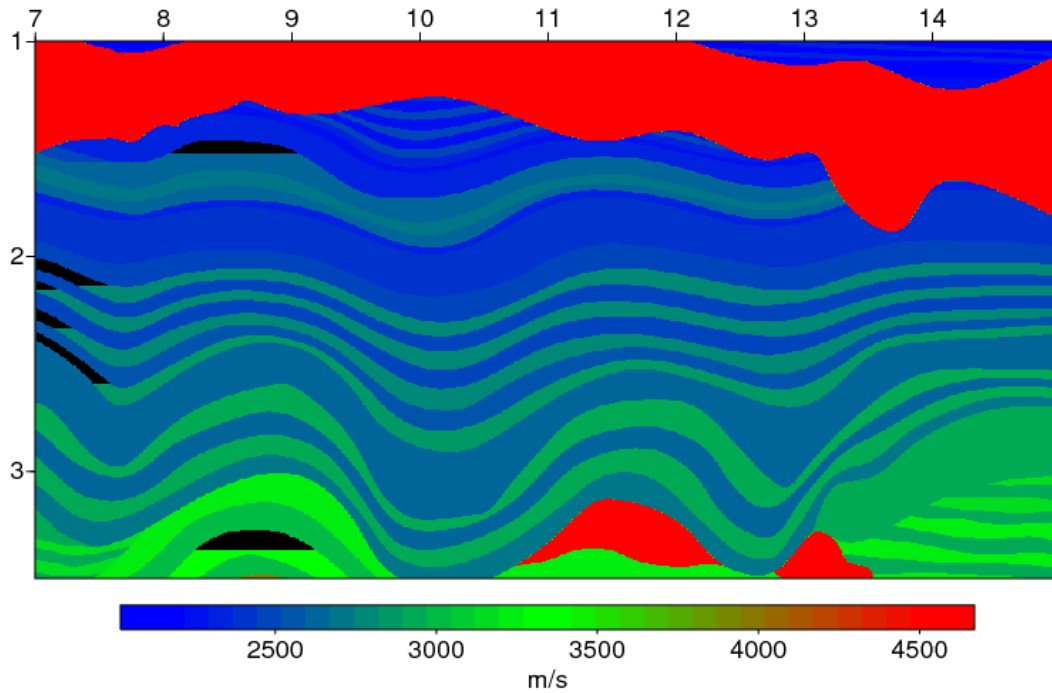


Figura 6.39 Distribución del valor de la velocidad de onda P para una de las zonas de interés del modelo 10.

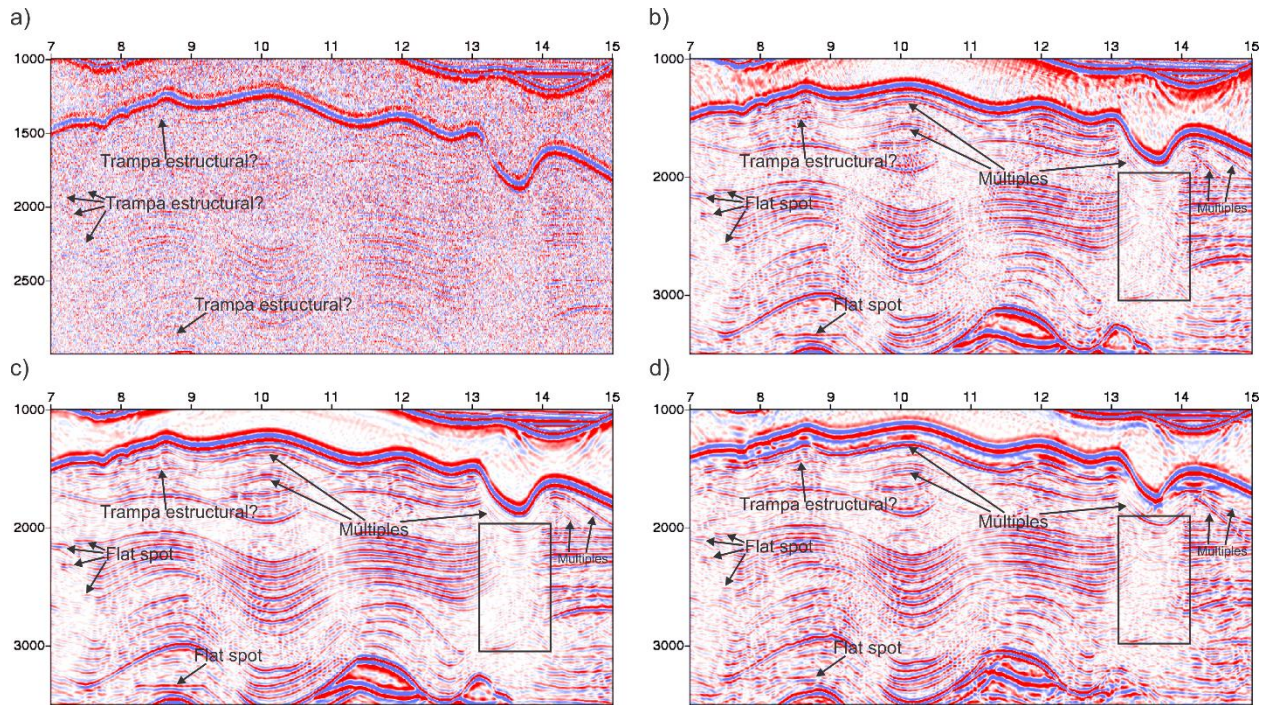


Figura 6.40 Secciones migradas para el modelo 10 en la zona de interés mostrada en la Figura 6.39, usando las versiones pre-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

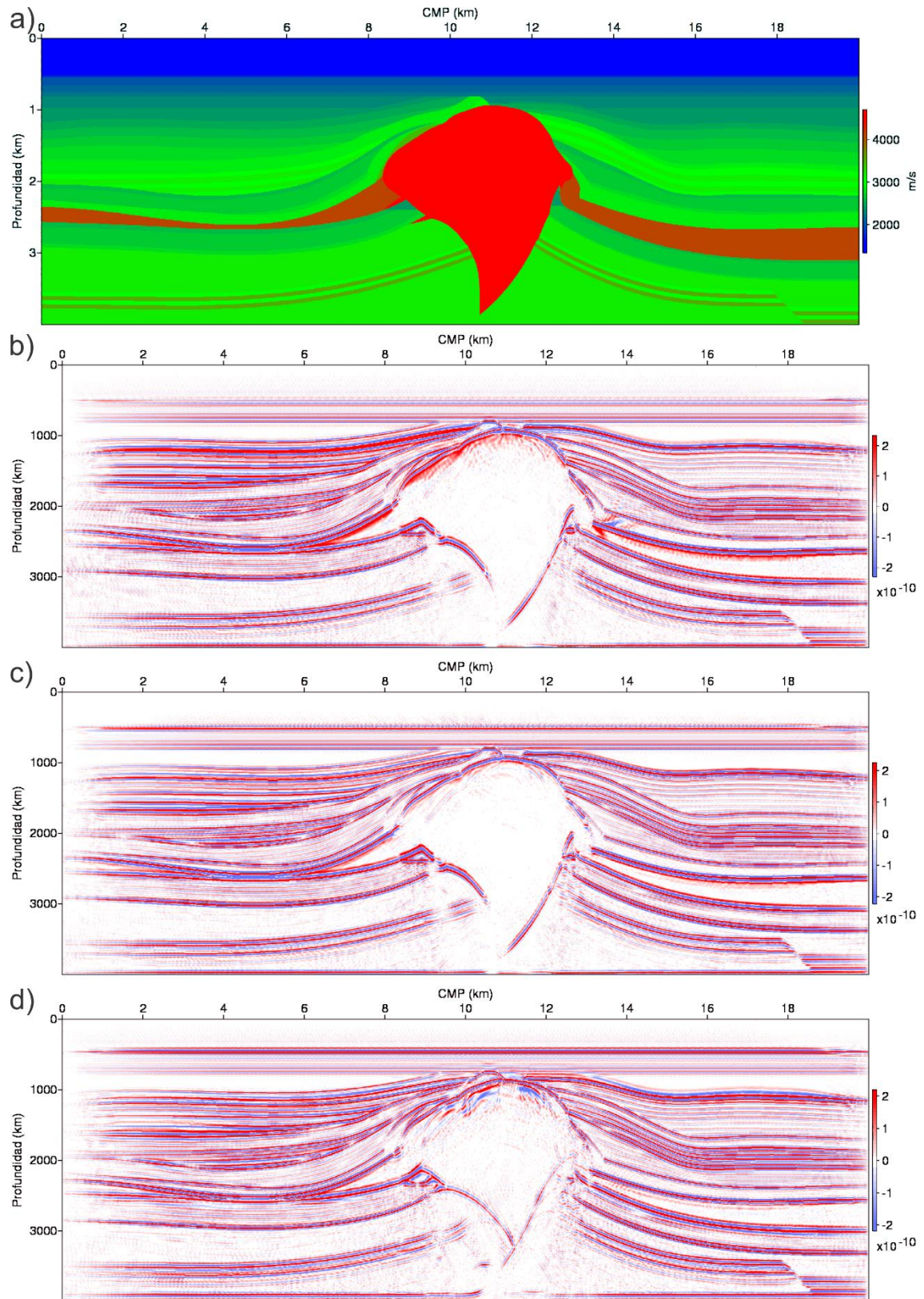


Figura 6.41 a) distribución del campo de velocidad de onda P para el modelo 11. Secciones migradas en profundidad usando los algoritmos: b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

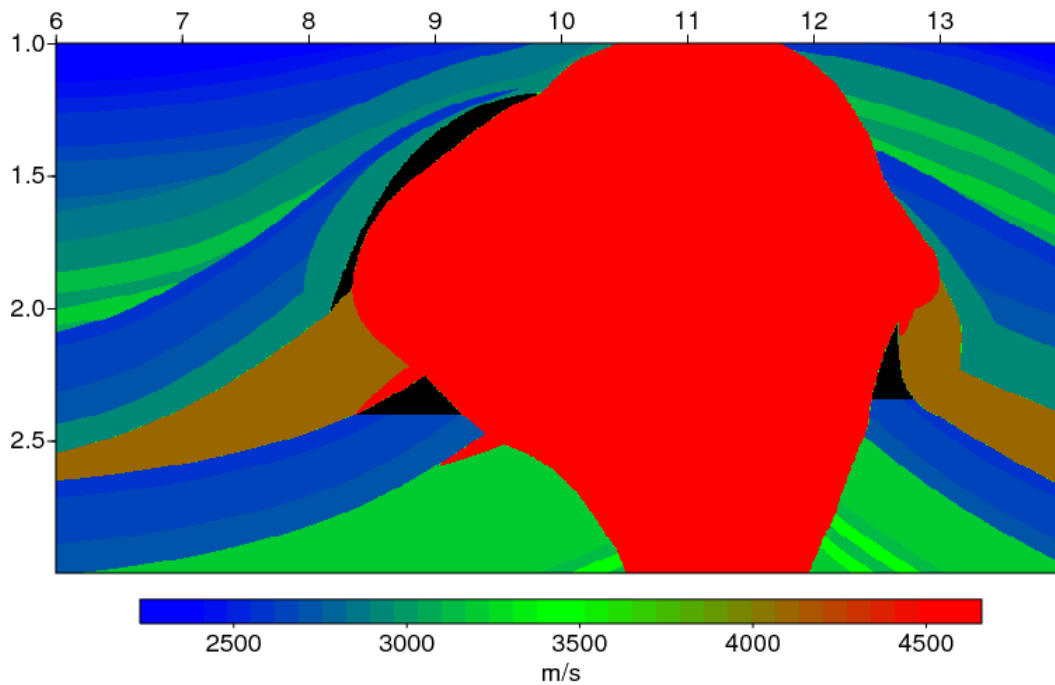


Figura 6.42 Distribución del valor de la velocidad de onda P para la zona de interés del modelo 11.

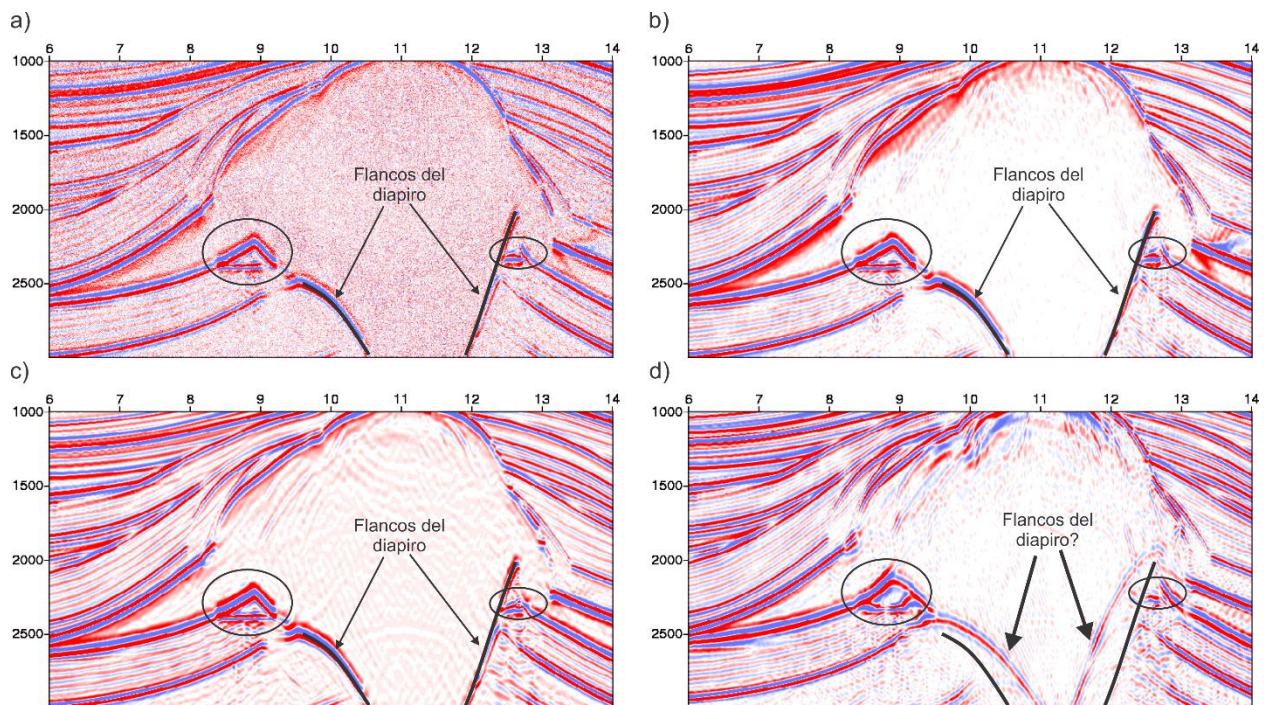


Figura 6.43 Secciones migradas para el modelo 11 en la zona de interés mostrada en la Figura 6.42, usando las versiones pre-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

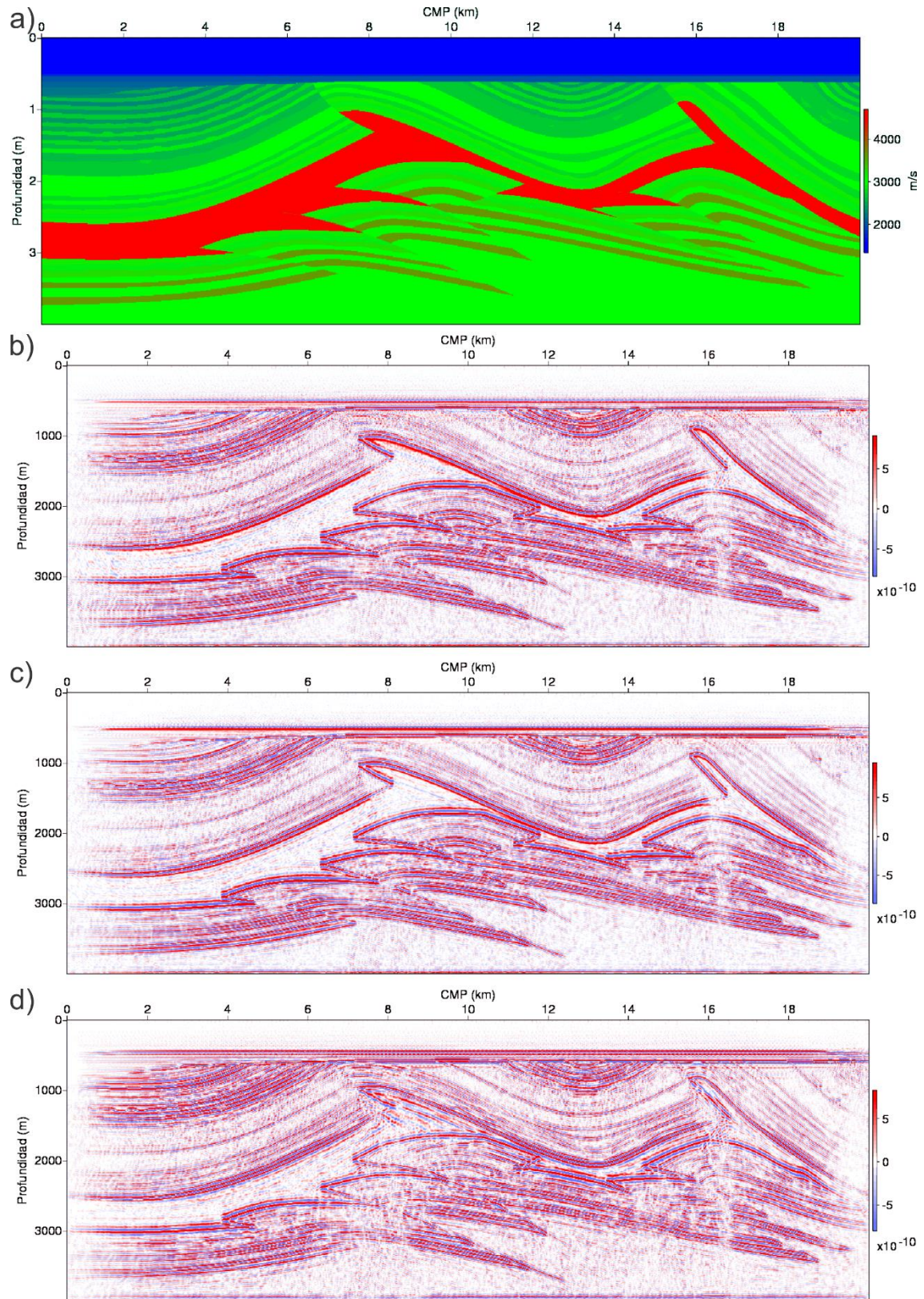


Figura 6.44 a) distribución del campo de velocidad de onda P para el modelo 12. Secciones migradas en profundidad usando los algoritmos: b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

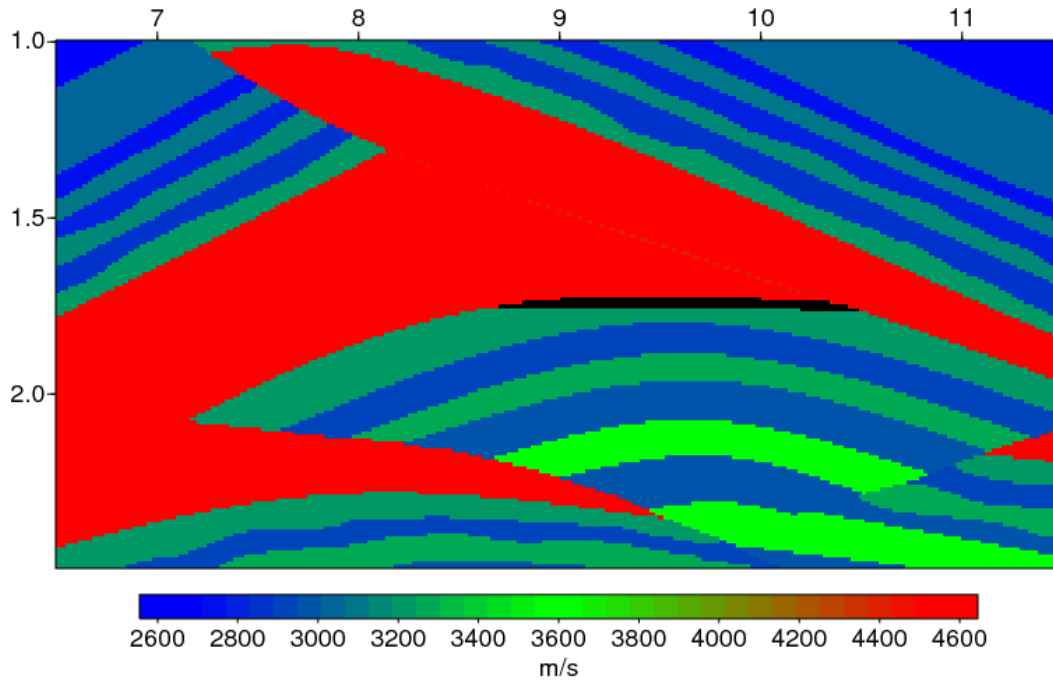


Figura 6.45 Distribución del valor de la velocidad de onda P para la zona de interés del modelo 12.

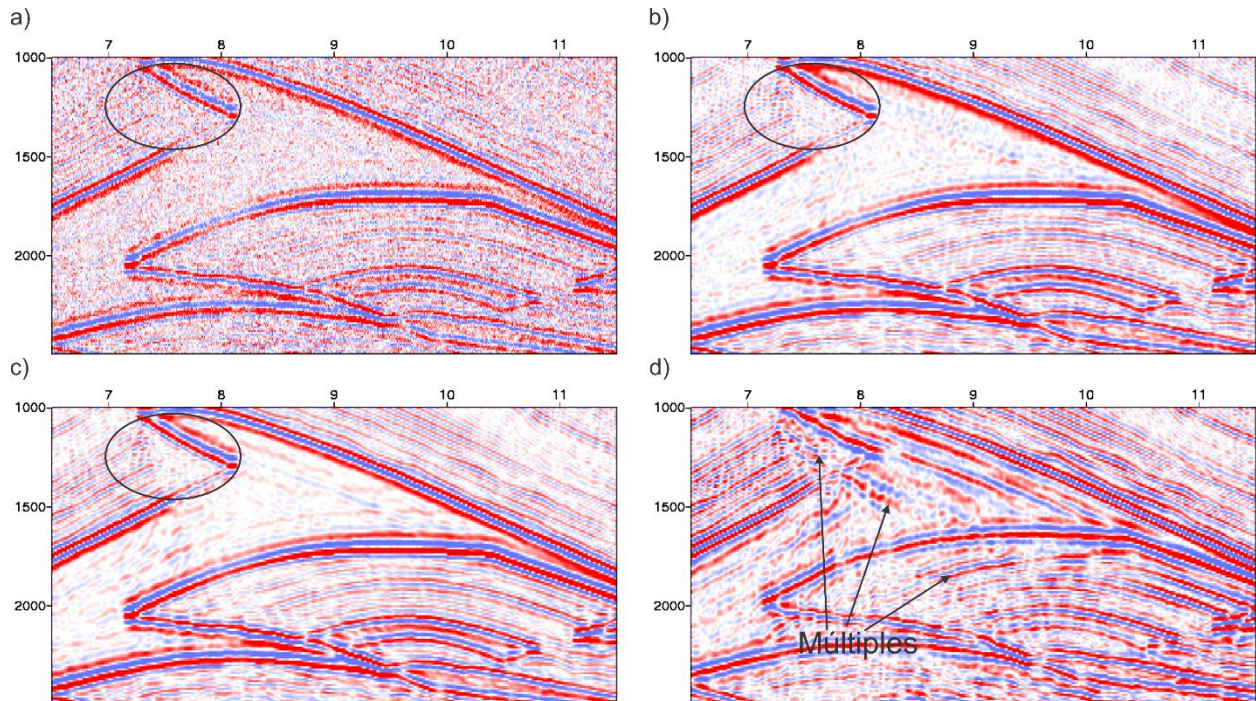


Figura 6.46 Secciones migradas para el modelo 12 en la zona de interés mostrada en la Figura 6.45, usando las versiones pre-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

# MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

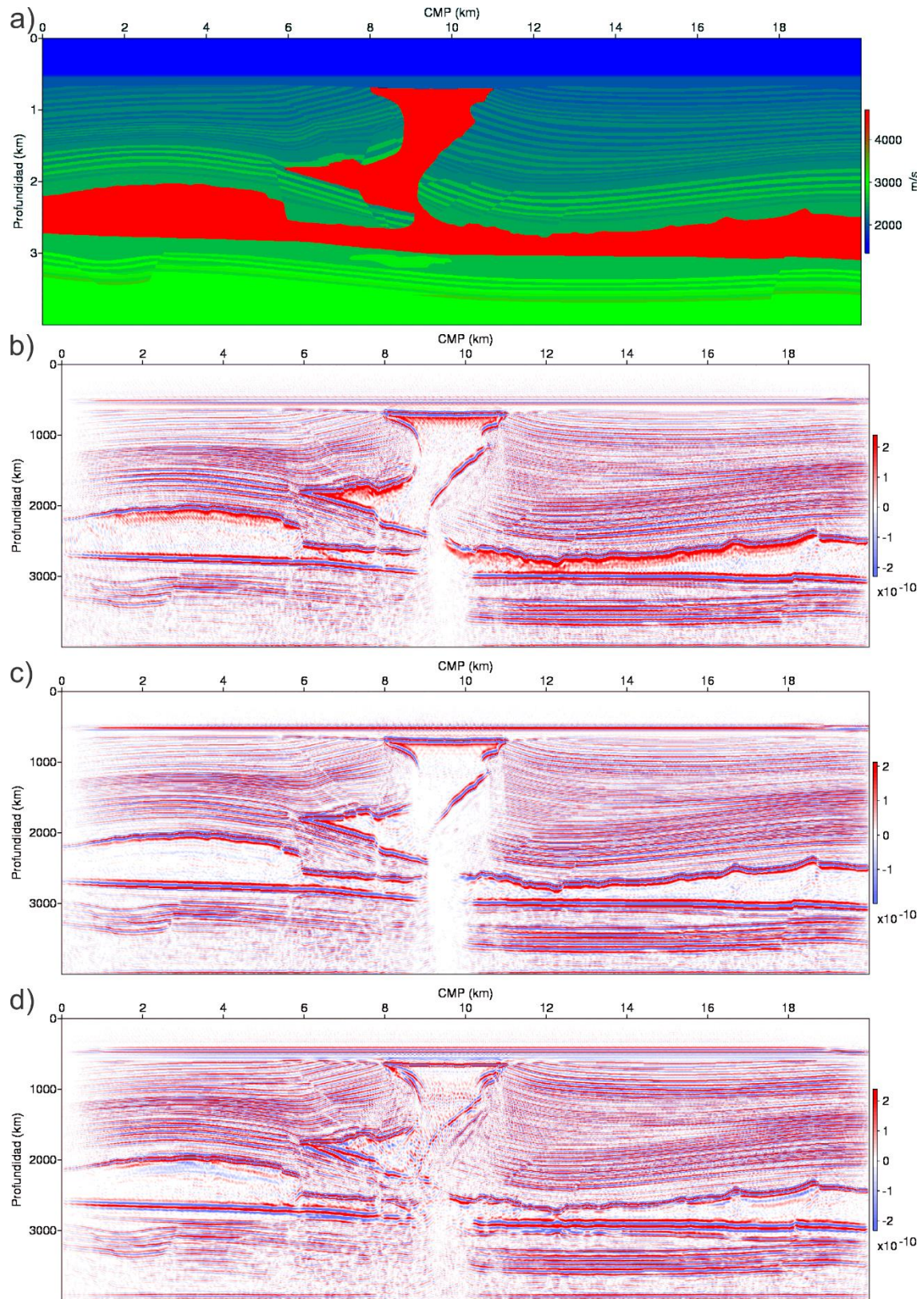


Figura 6.47 a) distribución del campo de velocidad de onda P para el modelo 13. Secciones migradas en profundidad usando los algoritmos: b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

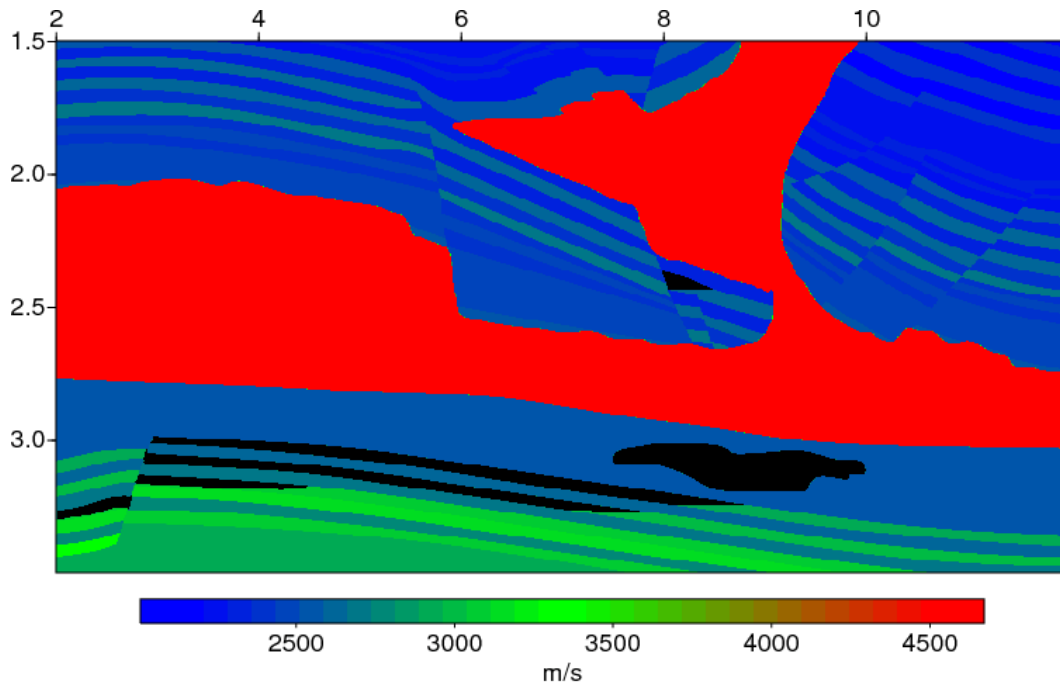


Figura 6.48 Distribución del valor de la velocidad de onda P para la zona de interés del modelo 13.

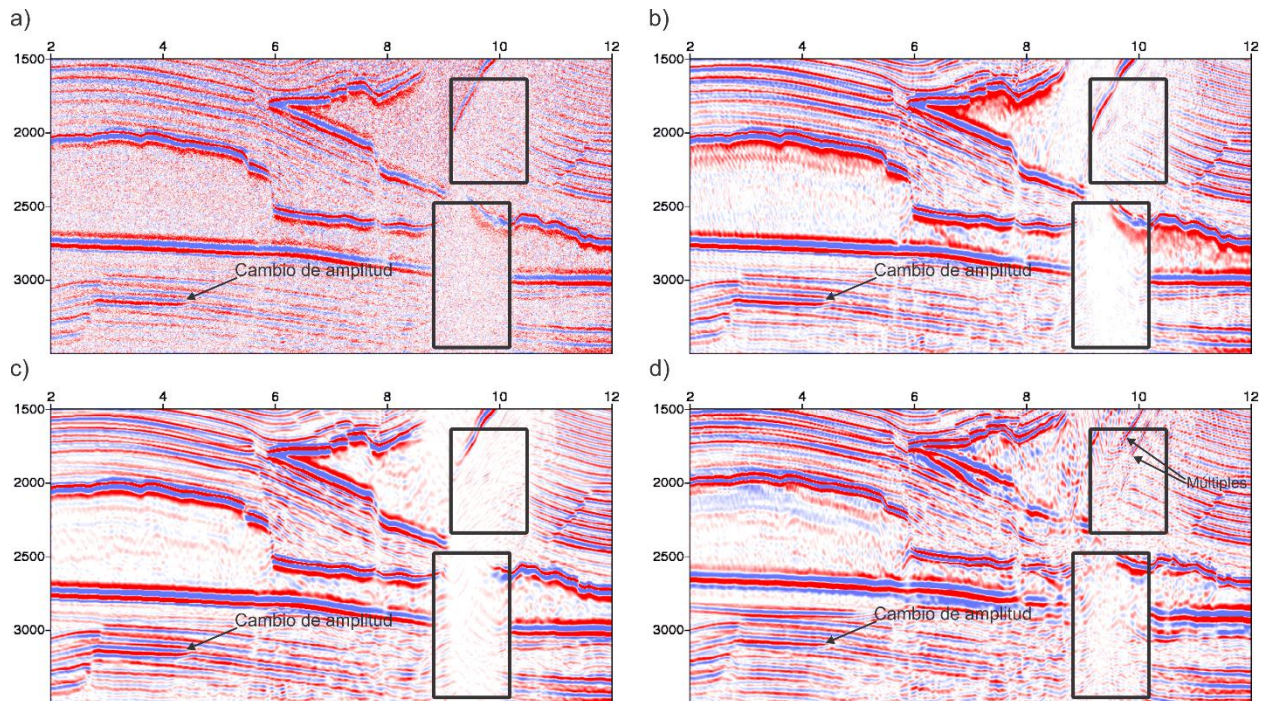


Figura 6.49 Secciones migradas para el modelo 13 en la zona de interés mostrada en la Figura 6.48, usando las versiones pre-apilado de los algoritmos: a) FD 90°, b) FFD, c) PSPI y d) SSF.

## 7 Análisis de resultados

### 7.1 Tiempos de cómputo

La Figura 7.1 muestra los tiempos de cómputo promedio de cada uno de los métodos de migración en sus versiones post y pre apilado. Es clara la diferencia de tiempo entre las dos versiones, a causa del volumen de datos manejados. Mientras el dato de entrada de las migraciones post-apilado (la sección apilada) contiene 1,990 trazas, el dato de entrada de las migraciones pre-apilado (disparos acondicionados) contiene 107,125 trazas. El procesador usado para llevar a cabo las migraciones fue un Intel Core i7-4700HQ @ 2.40GHz.

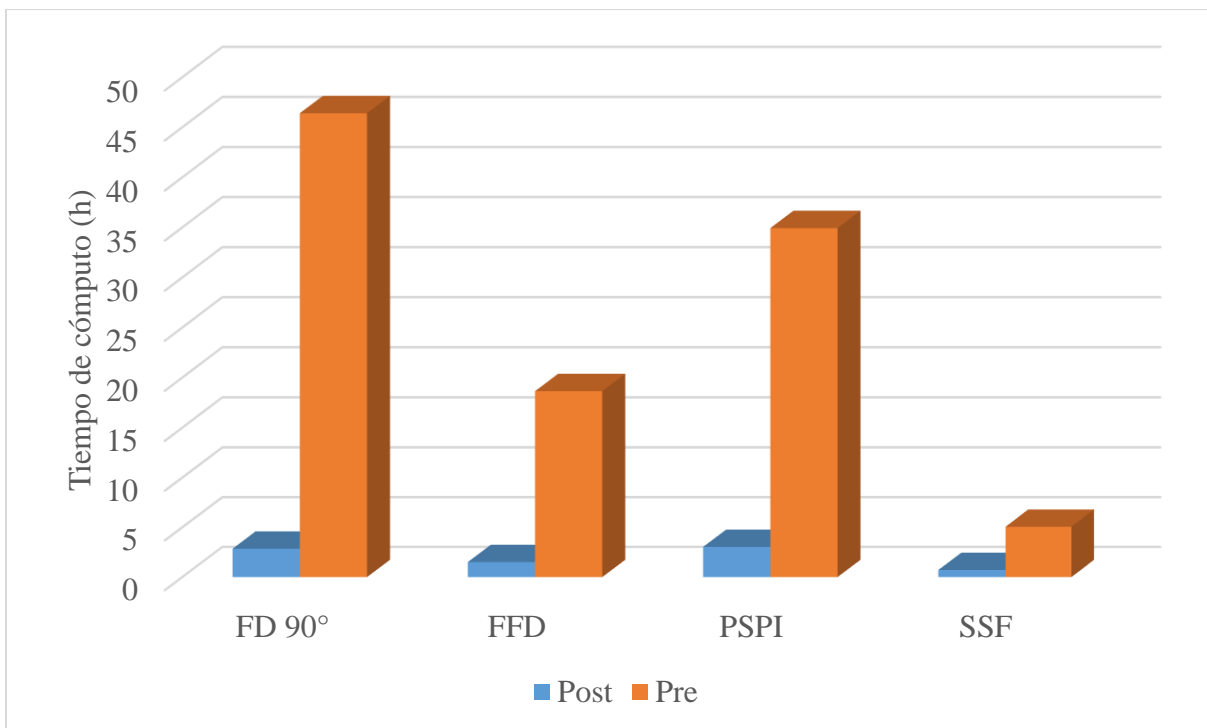


Figura 7.1 Comparación de los tiempos de cómputo para las versiones post y pre apilado de los métodos de migración.

### 7.2 Identificación de rasgos importantes

En el sub-capítulo 2.5 vimos los indicadores directos de hidrocarburos, los cuales son rasgos de los datos sísmicos que se dan debido a la presencia de yacimientos de hidrocarburos. A continuación, veremos cuales, de estos, y bajo que condiciones, se presentan en zonas ubicadas bajo la sal.

- **Puntos brillantes:** estos son claramente identificables cuando se usan las versiones pre-apilado de los todos los métodos evaluados. Estos siguen siendo identificables, aunque se encuentren en zonas cercanas a la sal donde hay presencia de múltiples o cuando se encuentran debajo de estructuras verticales que generan distorsión fuerte.
- **Cambios o inversiones en los valores de la amplitud:** estos son identificables cuando se usan las versiones pre-apilado de los métodos FFD, PSPI y SSF, siempre y cuando no se encuentren ubicados en las zonas cercanas a la sal donde se presentan múltiples ni debajo de las estructuras verticales, ya que el ruido generado enmascara su presencia.
- **Concordancia de las estructuras locales:** estos son identificables cuando se usan las versiones pre-apilado de los métodos FFD, PSPI y SSF, siempre y cuando no se encuentren ubicados en las zonas cercanas a la sal donde se presentan múltiples ni debajo de las estructuras verticales, ya que el ruido generado no permite la correcta interpretación de las estructuras.
- **Flat spots:** Estos son identificables en cualquier caso para las versiones pre-apilado de todos los métodos siempre y cuando la amplitud del evento se alta. Si la amplitud del *flat spot* no es alta, cuando se encuentren en las zonas donde se dan múltiples de la sal o bajo estructuras verticales, resultaran enmascarados por el ruido.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

Para las versiones post-apilado de los cuatro métodos, es posible identificar estos DHIs, pero solo cuando la complejidad estructural es nula o muy baja, lo cual no es común en las zonas con presencia de sal.

- **Chimeneas de gas:** No es posible saber bajo que condiciones estas se puedan identificar, dato que la construcción de modelos sintéticos que simulen el escape de gas de un yacimiento requeriría un tamaño de muestreo en los modelos que haría que el tiempo de adquisición sea varios ordenes mayor al de los modelos actuales.
- **Blanqueamiento de amplitudes:** en ninguno de los casos fue posible identificar blanqueamientos de amplitud.

### 7.3 Ventajas y desventajas

La Tabla 7.1 resume las ventajas y desventajas de las versiones pre-apilado de los métodos analizados cuando está explorando las zonas ubicadas bajo la sal. No se tuvo en cuenta las versiones post-apilado dado que la calidad de los resultados es mala en la mayoría de casos.

Tabla 7.1 Evaluación del rendimiento de las versiones pre-apilado de los métodos analizados.

	FD 90°	FFD	PSPI	SSF
Tiempo de computo	Muy alto	Medio	Alto	Bajo
Iluminación de estructuras	Mala	Muy buena	Muy buena	Buena
Continuidad de reflectores	Mala	Muy buena	Muy buena	Buena
Relación señal/ruido	Muy baja	Alta	Alta	Media
Susceptibilidad a las distorsiones	Alta	Media	Media	Alta

## 8 Conclusiones

- Las versiones post-apilado de los métodos analizados, aunque tenga un costo computacional muy bajo, no iluminan apropiadamente la sal ni las zonas ubicadas bajo la sal.
- Las versiones pre-apilado de los métodos FFD y PSPI son las que mejor desempeño cuando hay presencia de estructuras de gran complejidad, ya que logran iluminar las estructuras salinas y las estructuras ubicadas bajo la sal, siendo un poco mejor el método FFD dado que consume solo la mitad del tiempo del método PSPI y porque logra iluminar un poco mejor las zonas verticales.
- Para zonas donde las estructuras salinas no son demasiado complejas, la versión pre-apilado del método SSF es la más destacada, dado que ofrece imágenes de buena calidad y en un tiempo mucho menor a las versiones pre-apilado de los métodos FFD y PSPI.
- Para poder obtener un buen desempeño de las versiones pre-apilado de los métodos FFD y PSPI, se hace necesario tener un modelo de velocidades refinado, de lo contrario, los resultados serán iguales a los obtenidos al usar la versión pre-apilado del método SSF, que consume mucho menos tiempo
- La versión pre-apilada del método FD es la que peor desempeño tiene, dado que es la que más consume recursos computacionales y por el ruido inherente del mismo método no permite iluminar bien las zonas bajo la sal.
- Los múltiples generados al interior de la sal son un importante factor de enmascaramiento de las zonas cercanas a la sal, sobre todo si las reflexiones generadas allí no son lo suficientemente alta.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

- Las estructuras salinas con forma vertical, son fuertes generadoras de ruido sísmico, dicho ruido enmascara fácilmente los eventos de baja amplitud ubicadas bajo la sal.
- La nueva metodología implementada para la creación de los modelos sintéticos, permite ahorrar grandes cantidades de tiempo respecto a la metodología convencional basada en el uso del módulo *trimodel*, y a su vez permite crear modelos con un detalle y complejidad muchísimo mayor.
- Se hace necesario un mejoramiento de las versiones pre-apilado de los métodos FFD, PSPI y SSF a fin de que puedan suprimir apropiadamente los múltiples generados por la sal, ya que las estructuras ubicadas cerca de la sal usualmente resultan enmascaradas por su presencia.

### 9 Recomendaciones

- Dado que calidad de los resultados depende de la calidad del modelo de velocidad usado para migrar, es recomendable integrar al flujo de procesamiento el uso de técnicas como la inversión de forma de onda completa (FWI) para construir modelos más refinados.
- Se recomienda implementar la metodología de creación de modelos sintéticos planteada por (Goyes & Reina, 2015), para la enseñanza de asignaturas como geología estructural, estratigrafía y geología de hidrocarburos, porque permite la creación de secciones sísmicas que simulen las condiciones que el docente desee de una manera sencilla, ofreciendo a sus estudiantes una visión de cómo se observan los eventos y las estructuras geológicas en las secciones sísmicas.
- Para futuros trabajos, es aconsejable tener acceso a un servidor, ya que los procesos llevados a cabo tardan demasiado tiempo en los computadores de uso personal.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

- Para ver con más detalle todo el proceso llevado a cabo en el desarrollo del presente trabajo, se aconseja ingresar al siguiente sitio web para ver los tutoriales dispuestos:

<https://sites.google.com/site/semillerogeofisicauis/cursos/procesamiento-de-datos-de-sismica-de-reflexion>

**Referencias Bibliográficas**

- Acosta, J. (2007). Tectónica de Sal y de Shale en Márgenes Continentales. En *Estilos Estructurales*.
- Albertin, U., Kapoor, J., Randall, R., Smith, M., Brown, G., Soufleris, C., . . . Kemme, M. (2002). La era de las imágenes en escala de profundidad. *Oilfield Review*, 14(1), 1-17.
- Al-Khateb, N. (2015). Gassmann's Fluid Substitution v1.0. *CHORUS Heavy Oil Consortium, Department of Geoscience, University of Calgary* .
- Bagaini , C., Bonomi , E., & Pieroni, E. (1995). Data parallel implementation of 3-D PSPI. *65th SEG Annual Meeting* (págs. 188–191). Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts.
- Beauheim, R. L., & Roberts, R. M. (2002). Hydrology and hydraulic properties of a bedded evaporite formation. *Journal of Hydrology*, 259(1), 66-88.
- Black, J., Brzostowski, M., Biondi, B., Fomel, S., Chemingui, N., Canning, A., . . . Lambaré, G. (2008). Migration. In I. Jones, R. Bloor, B. Biondi, & J. Etgen (Eds.), *Prestack Depth Migration and Velocity Model Building* (pp. 5-76). Society of Exploration Geophysicists.
- Blangy, J. P. (1992). *Integrated seismic lithologic interpretation: The petrophysical basis*. Ph.D. dissertation, Stanford University.
- Bourbie, T., & Coussy, O. (1987). *Acoustics of porous media*. Paris: Editions Technip.
- Bowman, S. (2011). Regional seismic interpretation of the hydrocarbon prospectivity of offshore Syria. *GeoArabia*, 16(3), 95-124.
- Cadoret, T. (1993). *Effet de la saturation eau-gaz sur les propriétés acoustiques des roches. Etude aux fréquences sonores et ultrasonores*. Ph.D. dissertation, University of Paris.
- Castagna, J. P., & Batzle, M. L. (1993). Rock physics—The link between rock properties and AVO response. *Investigations in Geophysics*, 135–171.
- Claerbout , J. (1985). *Imaging the Earth's Interior*. Oxford, Inglaterra: Blackwell Scientific Publications.
- Cohen, J. K., & Stockwell, J. J. (2017). Cwp-su: Seismic unix release 44R5. *Center of Wave Phenomena, Colorado School of Mines, Colorado*.
- Crook, K. A., Folk, R. L., Haaf, E., Beck, K. C., Schwab, F. L., & Bissell, H. J. (2017, Marzo 25). *Encyclopaedia Britannica Online*. Retrieved from Sedimentary rock: <https://global.britannica.com/science/sedimentary-rock/Evaporites#toc80293>
- Dan, N. (2014). *Aplicación de la Migración Reversa en Tiempo para la Exploración de Plays Subsalinós en el Golfo de México*. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

- Davison, I., Alsop, I., Birch, P., Elders, C., Evans, N., Nicholson, H., . . . Young, M. (2000). Geometry and late-stage structural evolution of Central Graben salt diapirs, North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 17(4), 499-522.
- Dix, C. (1955). Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 68-86.
- Downey, M. W. (1984). Evaluating seals for hydrocarbon accumulations. *AAPG bulletin*, 68(11), 1752-1763.
- Dribus, J. R., & Jackson, M. P. (2008). The prize beneath the salt. *Oilfield Review*, 15, 4-17.
- Forel, D., Benz, T., & Pennington, W. (2005). *Seismic Data Processing with Seismic Unix: A 2D Seismic Data Processing Primer*. Society of Exploration Geophysicists.
- Fossen, H. (2010). *Structural geology*. Nueva York: Cambridge University Press.
- Gazdag, J. (1978). Wave equation migration with the phase shift method. *Geophysics*, 1342-1351.
- Gazdag, J., & Sguazzero, P. (1984). Migration of seismic data by phase shift plus interpolation. *Geophysics*, 49(2), 124-131.
- Geertsma, J. (1961). Velocity-log interpretation: The effect of rock bulk compressibility. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1(04), 235-248.
- GEOExpro. (12 de Marzo de 2017). Obtenido de GEOExpro: <https://www.geoexpro.com/articles/2016/01/gulf-of-mexico-post-well-analysis>
- Goyes, Y., & Reina, G. (2015). Importar y crear un modelo de velocidad en formato binario.
- Greenberg, M. L., & Castagna, J. P. (1992). Shear-wave velocity estimation in porous rocks: theoretical formulation, preliminary verification and applications. *Geophysical prospecting*, 40(2), 195-209.
- Han, B. (1998). A comparison of four depth-migration methods. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1104-1107.
- Han, D. H. (1986). *Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments*. Ph.D. dissertation, Stanford University.
- Hay, W., Migdisov, A., Balukhovskiy, A., Wold, C., Flögel, S., & Söding, E. (2006). Evaporites and the salinity of the ocean during the Phanerozoic: Implications for climate, ocean circulation and life. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 240(1), 3-46.
- Herron, D. (2011). *First steps in seismic interpretation*. Sugar Land: Society of Exploration Geophysicists.
- Hudec, M. R., & Jackson, M. P. (2007). Terra infirma: Understanding salt tectonics. *Earth-Science Reviews*, 82(1), 1-28.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

- Hudec, M. R., & Jackson, M. P. (2012). De Re Salica: Fundamental principles of salt tectonics. In D. G. Roberts, & A. Bally (Eds.), *Regional Geology and Tectonics: Phanerozoic Passive Margins, Cratonic Basins and Global Tectonic Maps* (Vol. 1, pp. 19-41). Elsevier.
- Jizba, D. L. (1991). *Mechanical and acoustical properties of sandstones and shales*. Ph.D. dissertation, Stanford University.
- John Perez Graphics & Design. (16 de Marzo de 2017). Obtenido de Geoart: <https://www.geoart.com/schematic-categories/onshore/page/2/>
- Jones, I. F., & Davison, I. (2014). Seismic imaging in and around salt bodies. *Interpretation*, 2(24), SL1-SL20.
- Kessinger, W. (1992). Extended Split-Step Fourier Migration. *62nd SEG Annual Meeting* (págs. 917-920). New Orleans: Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts.
- Kumar, D. (2006). A tutorial on Gassmann fluid substitution: formulation, algorithm and Matlab code. *Geohorizons*, 4-12.
- Lee, D., & Mason, I. M. (1991). Split-step Fourier shot-record migration with deconvolution imaging. *Geophysics*, 56(11), 1786-1793.
- Lee, M., & Suh, S. (1985). Optimization of one-way wave equations. *Geophysics*, 1634-1637.
- Levander, A. R. (1988). Fourth-order finite-difference P-SV seismograms. *Geophysics*, 53(11), 1425-1436.
- Liu, F., & Zhang, G. (2011). An effective imaging condition for reverse-time migration using wavefield decomposition. *Geophysics*, 76(1), S29-S39.
- Lucet, N. (1989). *Vitesse et atténuation des ondes élastiques soniques et ultrasoniques dans les roches sous pression de confinement*. Ph.D. dissertation, University of Paris.
- Macgregor, D. S. (1996). Factors controlling the destruction or preservation of giant light oilfields. *Petroleum Geoscience*, 2(3), 197-217.
- Magoon, L. B., & Dow, W. G. (1994). The Petroleum System. En L. B. Magoon, & W. G. Dow (Edits.), *The Petroleum System--From Source to Trap* (págs. 3-24). Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists.
- Martillo, C. E. (2010). *Apuntes de clase: Sísmica en 2D*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Mavko, G., & Mukerji, T. (2009). *The rock physics handbook: Tools for seismic analysis of porous media*. Cambridge University Press.
- Mrazec, L. (1907). Despre cute cu simbure de strapungere [On folds with piercing cores]. *Society of Stiite Bulletin*, 16, 6-8.
- Nettleton, L. (1934). Fluid mechanics of salt domes. *AAPG Bulletin*, 18(9), 1175-1204.
- Ristow, D., & Rühl, T. (1994). Fourier finite-difference migration. *Geophysics*, 1882-1893.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

- Roberts, P., & Huang, L.-J. (1997). Prestack depth migration for complex 2D structure using phase-screen propagators. *67th SEG Annual Meeting* (pág. 1282/1285). Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts.
- Rowan, M., & Krzywiec, P. (2004). The Szamotuły salt diapir and Mid-Polish Trough: decoupling during both Triassic-Jurassic rifting and Alpine inversion. *Interpretation*, 2(24), SM1-SM18.
- Schlumberger. (3 de Junio de 2017). *Schlumberger Oilfield Glossary*. Obtenido de [http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/h/hydrocarbon\\_indicator.aspx](http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/h/hydrocarbon_indicator.aspx)
- Smith, T. M., & Sondergeld, C. H. (2003). Gassmann fluid substitutions: A tutorial. *Geophysics*, 68(2), 430-440.
- Stewart, L. (2011). The Search for Oil and Gas. *Oilfield Review*, 23(2), 59-60.
- Stockwell, J. (2015). A course in geophysical image processing with Seismic Unix: GPGN 461/561 Lab.
- Stoffa, P. L., & Fokkema, J. T. (1990). Split-step Fourier Migration. *Geophysics*, 55, 410-421.
- Strandenes, S. (1991). Rock physics analysis of the Brent group reservoir in the Oseberg field. Stanford Rock Physics and Borehole Geophysics Project.
- Uphoff, T., Allen, G., Stearns, M., & Monteleone, P. (1997). Exploratory well to start in Lusitanian basin, Portugal. *Oil and Gas Journal*, 95(49), 67-71.
- Van der Pluijm, B. A., & Marshak, S. (2004). *Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics*. Nueva York: W.W. Norton & Company.
- Vendeville, B. C., & Jackson, M. P. (1992). The rise of diapirs during thin-skinned extension. *Marine and Petroleum Geology*, 9(4), 331-354.
- Warren, J. (2006). *Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons*. Springer Science & Business Media.
- Warren, J. (2010). Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. *Earth-Science Reviews*, 98(3), 217-268.
- Warren, J. (2016). *Evaporites: A Geological Compendium*. Nueva York: Springer.
- Woodbury, H. O., & Murray, I. B. (1980). Diapirs and Their Relation to Hydrocarbon Accumulation. *Canadian Society of Petroleum Geologists*, 121-138.
- Wu, R.-S., & Jin, S. (1997). Windowed GSP (Generalized Screen Propagators) Migration Applied to SEG-EAGE salt model data. *67th SEG Annual Meeting* (págs. 1746-1749). SEG Technical Program Expanded Abstracts.
- Yale, D. P., & Jamieson, W. H. (1994). Static and dynamic rock mechanical properties in the Hugoton and Panoma fields. *Kansas Society of Petroleum Engineers*.

## MIGRACIÓN OWWE PARA LA EXPLORACIÓN SUB SALINA

- Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.
- Youn, O., & Zhou, H.-w. (2001). Depth imaging with multiples. *Geophysics*, 66(1), 246-255.
- Yu, Y., Tang, L., Yang, W., Huang, T., Qiu, N., & Li, W. (2014). Salt structures and hydrocarbon accumulations in the Tarim Basin, northwest China. *AAPG Bulletin*, 98(1), 135–159.
- Zhou, H.-W. (2014). *Practical Seismic Data Analysis*. New York: Cambridge University Press.