



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería
Colegio de Ingeniería Geofísica

Comparación de algoritmos de migración post-apilado en una zona con estructuras complejas.

TESIS

Presentada para obtener el título de
Licenciada en Ingeniería Geofísica

Presenta:

Stephany Ortiz Aguilar

Asesor interno:

M.C. José Castillo Román.

Asesor externo:

M.C. Guillermo Pardo Castro

Puebla, Puebla.

Septiembre de 2015

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios por las oportunidades que me da cada día, por su infinito amor y fidelidad, a mis padres por su apoyo incondicional, por sus enseñanzas y por el amor que me han brindado a lo largo de mi vida, a mis pastores por sus oraciones y por sus consejos. A mi esposo Josué G. González por su constante paciencia y por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias.

Agradezco también a todos mis maestros, por su perseverancia, pasión y constante esfuerzo en la enseñanza; a todo el equipo del centro de procesamiento de COMESA que me apoyó y guio en la elaboración de este trabajo, en especial al ingeniero Ricardo Flores por la oportunidad, al ingeniero Guillermo Pardo y a la ingeniera Angélica Cortés.

RESUMEN

En este trabajo se realiza el procesamiento de dos líneas sísmicas y se presentan diferentes técnicas o algoritmos de migración post apilado, con la finalidad de comparar las imágenes y poder establecer o definir cuál de estos produce mejores resultados.

Con el objetivo de visualizar los efectos de la migración, las líneas seleccionadas presentan ciertas características que se ven mejoradas al aplicar esta técnica. Una de ellas es la complejidad de la geología asociada a las diferentes formas de los cuerpos de sal, la otra es el cambio brusco de velocidades que se presenta entre los materiales circundantes y los domos salinos.

Para cada línea se realizó un procesamiento similar, comenzando con la carga de geometría hasta el acondicionamiento de la información para poder realizar la migración.

La metodología utilizada para lograr el objetivo de este trabajo, fue realizar pruebas de respuesta al impulso para definir los parámetros óptimos para cada módulo, posteriormente se aplicaron por separado cada método y se compararon entre si los resultados.

A través de estas comparaciones se pudieron definir las características principales de cada algoritmo, así como las ventajas y desventajas de uno respecto de otro.

Palabras clave: procesamiento sísmico, algoritmos de migración, migración, migración post apilado, domos salinos.

ÍNDICE

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Contenido	iii
Lista de figuras	vi
Lista de tablas	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
3. OBJETIVOS	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
4. SECUENCIA DE PROCESAMIENTO SISMICO	6
Cambio de formato y asignación de geometría	7
Recuperación de amplitudes	7
Atenuación de ruidos	8

Estáticas de elevación y refracción	10
Análisis de velocidades y corrección NMO	11
Deconvolución consistente con superficie	12
Estáticas residuales	13
Respuesta al impulso	13
Migración sísmica	13
Tipos de migración	16
Parámetros de migración	18
Algoritmos de migración	19
Diferencias finitas	20
Kirchhoff	22
5. METODOLOGIA	25
Ubicación	25
Secuencia de procesado sísmico	26
6. RESULTADOS	54

Parámetros migración Kirchhoff	54
Parámetros migración Omega X	55
Parámetros migración WEM	55
Análisis de resultados	62
6. DISCUSIÓN	64
7. CONCLUSIONES	65
8. RECOMENDACIONES	66
9. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA	67
ANEXO 1) Glosario	70
ANEXO 2) Principios de Reflexión	73
ANEXO 3) Concepto de difracción	74

LISTA DE FIGURAS

Fig.1- Secuencia de procesamiento sísmico que se aplicó a las líneas de estudio	6
Fig.2- Propagación de un frente de onda	8
Fig.3- Identificación de eventos sísmicos y ruidos.	9
Fig.4- Correcciones estáticas	10
Fig.5- Picado de velocidades y corrección NMO	11
Fig.6- Modelo convolucional de la Tierra	12
Fig. 7- Diferencia entre CMP y CDP	14
Fig.8- Migración de la energía sísmica reflejada.	14
Fig. 9- Principio de la migración.	15
Fig.10- Clasificación de la migración	17
Fig.11 -Continuación hacia abajo del campo de onda.	21
Fig.12- Principios de migración basada en suma de difracciones.	23
Fig.13- Ubicación de las líneas sísmicas	25
Fig.14- Shot de campo	27

Fig.15- Apilado de datos de campo	28
Fig.16- Apilado: recuperación de amplitudes	30
Fig.17- Apilado: atenuación de ruido.	31
Fig. 18- Modelo de refracción de dos capas a partir de los primeros arribos con el software Paradigm.	32
Fig.19- Apilado con estáticas de elevación	33
Fig.20- Apilado con estáticas de refracción.	34
Fig.21- Apilado con estáticas residuales 1er paso	36
Fig.22- Apilado con estáticas residuales 2do paso L1113	37
Fig.23- Campo de velocidades de la línea L1113	38
Fig.24- Apilado con estáticas residuales 2do paso L1109	39
Fig.25- Campo de velocidades de la línea L1109	40
Fig.26- Traza 4712 para realizar pruebas de respuesta al impulso.	41
Fig.27- Respuesta al impulso K con buzamiento de 89°, sin suavizar el campo de velocidades.	42

Fig.28- Respuesta al impulso K con buzamiento de 89°, con suavizado horizontal de 200 trazas al campo de velocidades.	43
Fig.29- Respuesta al impulso K con buzamiento de 89°, con suavizado horizontal de 500 trazas al campo de velocidades.	44
Fig.30- Respuesta al impulso K con buzamiento de 60°, con suavizado horizontal de 200 trazas al campo de velocidades.	45
Fig.31- Respuesta al impulso K con buzamiento de 40°, con suavizado horizontal de 200 trazas al campo de velocidades.	46
Fig.32- Respuesta al impulso ω_x con buzamiento de 65-70°, con suavizado vertical de 100 ms al campo de velocidades.	48
Fig.33- Respuesta al impulso ω_x con buzamiento de 65-70°, con suavizado vertical de 300 ms al campo de velocidades.	49
Fig.34- Respuesta al impulso ω_x con buzamiento de 65-70°, con suavizado vertical de 500 ms al campo de velocidades.	50
Fig.35- Respuesta al impulso ω_x con buzamiento de 60-65°, con suavizado vertical de 500 ms al campo de velocidades.	51
Fig.36- Respuesta al impulso ω_x con buzamiento de 50-60°, con suavizado vertical de 500 ms al campo de velocidades.	52
Fig.37- Respuesta al impulso ω_x con buzamiento de 40-45°, con suavizado vertical de 500 ms al campo de velocidades.	53

Fig.38- Migración K de la línea L1109 con suavizado horizontal de 200 trazas, con pendiente máxima de 60°	56
Fig.39- Migración ωx de la línea L1109 con suavizado vertical de 500 ms, con pendiente máxima de 65-70°	57
Fig.40- Migración WEM de la línea L1109 con pendiente máxima de 60°	58
Fig.41- Migración K de la línea L1113 con suavizado horizontal de 200 trazas, con pendiente máxima de 60°	59
Fig.42- Migración ωx de la línea L1113 con suavizado vertical de 500 ms, con pendiente máxima de 65-70°	60
Fig.43- Migración WEM de la línea L1113 con pendiente máxima de 60°	61
Anexo 3.1- Fenómeno de difracción.	74
Anexo 3.2- Difracción en función de la longitud de onda y tamaño de la abertura	74
Anexo 3.3- Propagación frente de ondas plano y circular.	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1- Principales características de las líneas sísmicas.	26
Tabla 2. Parámetros utilizados en la migración Kirchhoff	54
Tabla 3- Parámetros utilizados en la migración Omega x	55
Tabla 4- Parámetros utilizados en la migración WEM	55
Tabla 5- Comparación de los diferentes algoritmos de migración.	63

INTRODUCCIÓN

No cabe duda que actualmente el petróleo y sus derivados representan una de las fuentes de energía no renovables más importantes en el planeta. Hemos escuchado interminables críticas y quejas sobre la explotación de estos yacimientos pero, lo que es un hecho es que, hasta que no se encuentre alguna otra fuente de energía tan importante como lo es el hidrocarburo, éste seguirá siendo un negocio rentable e importante, no solo para los países productores, sino para todos los consumidores: el mundo entero.

Una de las técnicas o métodos que más auge han tenido en el mundo para definir la ubicación de yacimientos de esta naturaleza, han sido los métodos sísmicos, en especial el de reflexión sísmica con fuente controlada.

La sísmica de reflexión es un método indirecto que permite obtener información del subsuelo a través de las mediciones del comportamiento de las ondas, no sólo a nivel terrestre sino también marino. Ésta técnica involucra la adquisición de los datos, así como el procesamiento y la interpretación de las imágenes sísmicas, para lo cual se requiere una combinación de conocimientos geológicos, geofísicos, matemáticos e informáticos.

El proceso de adquisición sísmica comienza con el diseño del tendido o arreglo que va a llevarse a cabo en campo dependiendo de los objetivos y del presupuesto que se tenga para el estudio.

La adquisición sísmica está constituida principalmente por dos etapas:

La primera es la topografía y perforación, ésta etapa consiste principalmente del reconocimiento del terreno y la ubicación de las fuentes y las líneas receptoras, así como de la perforación en ciertas zonas precisamente, para colocar las fuentes explosivas por debajo de la capa intemperizada.

La segunda etapa, la de grabación, comienza una vez que se han realizado las pruebas para calibrar los equipos y para verificar que todo esté en orden. Ésta consiste en registrar y almacenar conjuntos de trazas sísmicas para cada disparo,

que surgen como resultado de la interacción entre los rayos de las ondas generadas por la fuente sísmica y las diferentes capas que componen el subsuelo.

Una vez que los datos han sido adquiridos, a estos se les aplica una secuencia básica de procesamiento para visualizar la calidad de la información.

Posterior a esto, los datos son llevados a un centro de procesamiento sísmico, donde se les aplicará una secuencia más elaborada para mejorar la calidad de la información y con esta poder obtener secciones sísmicas del subsuelo.

Dicha secuencia comienza con la lectura de los datos y la asignación de geometría, que es asociar cada traza sísmica a sus correspondientes coordenadas, en seguida se realiza una recuperación de amplitudes por divergencia esférica y una atenuación de ruidos (lineales y aleatorios) para mejorar la relación señal/ruido de los datos.

Inmediatamente se calculan y aplican las correcciones estáticas de refracción, estas consisten en calcular pequeños retrasos en el tiempo en base a un análisis de velocidad hecho a partir de la lectura de primeros arribos.

A esos datos con correcciones estáticas se les aplica un proceso de deconvolución para atenuar los efectos de filtrado que la Tierra ha efectuado sobre la señal de entrada, dicho proceso se ve reflejado en una recuperación de altas frecuencias y en la eliminación de los efectos secundarios que el equipo tiene sobre la señal (reverberaciones).

Las correcciones estáticas se utilizan para mejorar la visibilidad de los eventos así como para lograr una alineación de estratos, sin embargo, las correcciones estáticas de refracción muchas veces no cumplen con éste objetivo, por lo que es necesario hacer un proceso de correcciones estáticas residuales.

Finalmente se hace un acondicionamiento de información a través de atenuación de ruidos remanentes, regularización de datos e interpolación de los mismos para posteriormente aplicar procesos de migración y algunos otros procesos especiales, como AVO.

La tercera fase de la sísmica de reflexión es la interpretación de las imágenes obtenidas en el centro de procesado.

La interpretación es una de las fases más importantes dentro de cualquier método indirecto, ya que a partir de las soluciones o conclusiones a las que se lleguen en este paso dependerá la decisión de perforar o explorar de forma directa un área.

Para realizar una interpretación se utiliza toda la información geológica y geofísica disponible, como secciones sísmicas, estudios estratigráficos y estructurales, registros de pozos y otros datos como velocidades e impedancia del medio.

En estudios enfocados a la exploración petrolera existen estructuras geológicas, como fallas y diapiros de gran importancia, las cuales funcionan como trampas en donde el hidrocarburo es almacenado.

Desde el punto de vista de la geología estructural la técnica de sísmica de reflexión es un método que presenta ciertas limitaciones, por ejemplo con la presencia de diapiros o cuerpos de sal. El lograr iluminar por debajo de estas estructuras hasta el día de hoy, ha sido un proceso complicado debido a inversiones de velocidades, generadas por los fuertes contrastes entre las velocidades sísmicas de estos cuerpos y del material que los circunda.

Otro problema, también muy común en sísmica es definir o posicionar correctamente fallas y estructuras con pendientes muy pronunciadas. El primer caso debido a la generación de difracciones sobre los extremos de las fallas, sin embargo, gracias al método de migración, esta situación ha podido ser corregida.

En el segundo caso, el problema se debe principalmente a las variaciones laterales de velocidad ya que teóricamente se asume que estas únicamente varían verticalmente o con la profundidad, sin embargo, este es un problema para el que también ya se tiene una solución: migrar en profundidad.

Se sabe que en este negocio la incertidumbre o la probabilidad de que un yacimiento resulte productor o fallido es en una relación 50 a 50, sin embargo hay

investigadores que siguen trabajando día a día en mejorar o desarrollar nuevas técnicas que permitan que esta probabilidad de acertar un yacimiento incremente.

Se ha dicho también que la sísmica de reflexión es una técnica que en los próximos años estará en recesión debido a los altos costes que esta implica y a las limitantes que esta presenta en cuanto a las zonas en las que puede adquirirse información. Pero esto aún está en veremos...

PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

A todos los datos geofísicos o recabados indirectamente, sin importar el método o técnica utilizada, es necesario aplicarles un conjunto de correcciones a fin de acondicionarlos y generar imágenes o secciones interpretables, esto se logra a través de ciertos procesos o secuencias dependiendo del método aplicado.

Dentro de la secuencia de procesamiento sísmico es necesario aplicar un proceso de migración a los datos debido a que las capas del subsuelo no suelen estar totalmente horizontales y a la presencia de estructuras que no logran ser definidas adecuadamente con el método convencional de sísmica de reflexión.

Kirchhoff es el algoritmo de migración que más se utiliza en producción a nivel compañía en el dominio del tiempo: del cien por ciento de migraciones que se aplican a los datos aproximadamente un 99% se hace a través de este algoritmo al ser uno de los que mejores resultados generan. Sin embargo, no se debe dejar de lado la posibilidad de utilizar alguno de los otros métodos ya desarrollados a lo largo de la historia de la sísmica, ya que por diversas cuestiones Kirchhoff pudiese no responder de la manera esperada.

Algunas de las circunstancias por las que los algoritmos pudieran no funcionar adecuadamente pueden variar, desde un mal uso de los módulos para implementar el algoritmo (no tener conocimiento del funcionamiento), debido a la mala programación del mismo (dependiendo del Software) o a las limitantes en cuanto a equipo de cómputo, entre otras.

Para este estudio, se considerara el caso en el que el modulo del algoritmo Kirchhoff no funciona adecuadamente, por lo que surge la necesidad de aplicar una secuencia de procesamiento a ciertos datos y migrarlos con diferentes algoritmos de migración esto con el objetivo de encontrar un módulo o algoritmo con el que se obtengan resultados similares a los generados por Kirchhoff. Dichos algoritmos son los basados en los métodos de diferencias finitas, en este caso, los ofertados por Paradigm: WEM y Omega X.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Comparar tres diferentes algoritmos de migración post-apilado y determinar cuál de estos métodos es el más óptimo para los datos sísmicos disponibles.

Objetivos específicos:

- Dar un panorama general de la migración, así como de los parámetros necesarios para su implementación.
- Visualizar la respuesta de los diferentes algoritmos de migración ante las condiciones del campo de velocidades.
- Determinar los parámetros óptimos de funcionamiento para cada algoritmo.
- Analizar la resolución y el comportamiento de los diferentes métodos de migración post apilado en presencia de estructuras geológicas complejas.

SECUENCIA DE PROCESADO SÍSMICO

El procesado es la etapa de exploración sísmica que tiene como objetivo mejorar los datos adquiridos en campo hasta que estos puedan ser interpretables.

A continuación se mencionan los pasos del procesamiento de datos sísmicos que se aplicaron en el desarrollo del proyecto, no se profundiza en la explicación de cada uno ya que no se encuentran contemplados como objetivos en este trabajo.

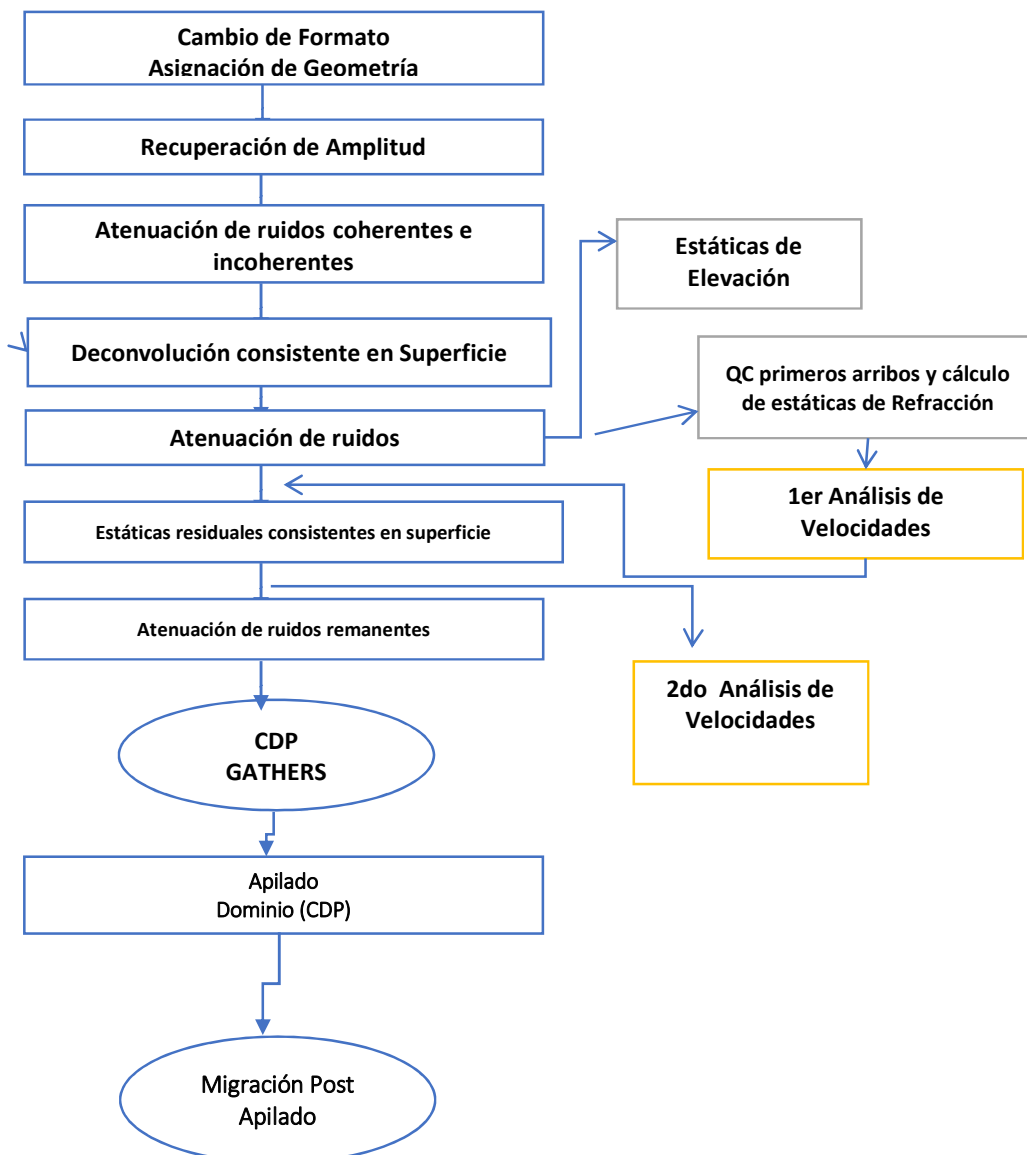


Fig. 1- Secuencia de procesamiento sísmico que se aplicó a las líneas de estudio.

Es importante mencionar que no existe una secuencia única para procesar datos, ésta puede tener ciertas modificaciones dependiendo de la condición de los datos adquiridos en campo y de la geología del área en la que se realice el estudio.

Cambio de formato y asignación de geometrías

La primera etapa consiste en la lectura de los datos desde un SEG-Y, SEG-D o desde algún formato de grabación con el software con el que va a procesarse la información.

La asignación de geometría se refiere a la representación del arreglo o diseño utilizado en campo para la grabación de la información. A cada traza sísmica se le asigna su ubicación y ciertos parámetros de adquisición como coordenadas (x, y), elevación, distancia entre fuentes, distancia entre receptores, offset, etc.

Este es uno de los pasos más importantes, por no decir el de mayor relevancia dentro del procesado de datos sísmicos, ya que de esto dependerá la correcta ubicación de las estructuras de interés, así como la precisión de las correcciones que se hacen a los datos.

Recuperación de amplitudes

La pérdida o disminución de amplitudes se debe a dos factores, primeramente a la interacción del rayo con una capa o estrato (absorción de energía) y en segundo lugar, a la distancia que va recorriendo el frente de ondas. La proporción en la que la energía o amplitud es atenuada depende directamente del tipo de roca con el que interactúe el rayo.

La divergencia esférica es un término que se refiere a la pérdida de la energía de un frente de onda conforme este va propagándose en todas direcciones al interior de la Tierra. La divergencia esférica que se produce desde una fuente, causa que la energía disminuya inversamente al cuadrado de la distancia que el frente de onda ha viajado desde el momento del disparo.

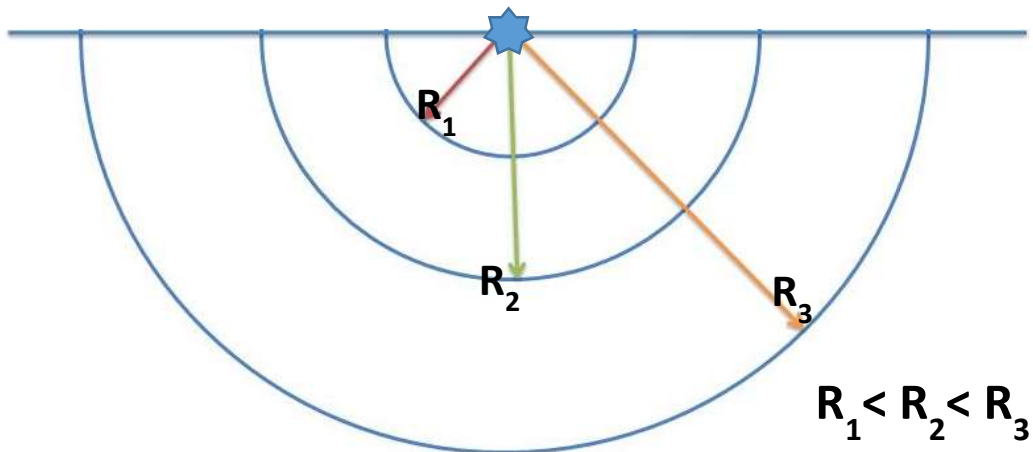


Fig.2– Propagación de un frente de ondas.

La compensación para la pérdida de amplitudes conlleva la multiplicación de cada traza por una función exponencial dependiente del tiempo:

$$G(t) = AT^n$$

Donde:

$G(t)$ es la amplitud de la traza ya recuperada a un tiempo t , A es la amplitud, T es el tiempo en segundos del ajuste y n es el factor exponencial. (Yilmaz 1987).

La idea fundamental es probar un conjunto de valores de n , y escoger uno tal que sea capaz de recuperar las amplitudes a tiempos mayores manteniendo una coherencia con las amplitudes para tiempos menores.

Atenuación de ruidos

En el procesamiento sísmico lo que se busca es mejorar la relación señal/ruido de los datos a fin de que los eventos o las reflexiones puedan verse más claros y reales, por lo que es importante remover todos aquellos efectos generados por el medio en el que se está propagando la onda que no están relacionados con la información.

Los ruidos pueden identificarse en base a su curvatura o alineamiento, velocidad, origen en tiempo y distancia, su amplitud y frecuencia.

Los ruidos pueden ser clasificados en dos grupos principalmente:

- Ruidos coherentes: se le llama así a todos los ruidos que presentan un comportamiento lineal, dentro de esta clasificación podemos mencionar a la onda directa, a las ondas refractadas y la onda de aire.

+ Múltiples: un rayo puede ser reflejado más de una vez dentro de una misma capa, estos rayos también son detectados por los receptores y es lo que conocemos como múltiples. Estos pueden llegar a confundirse con un evento primario, debido a que su comportamiento también es hiperbólico, sin embargo, los múltiples presentan ciertas características con las que podemos identificarlos, como su velocidad y la periodicidad o repetición con la que se presentan.

-Spikes y ruido aleatorio: un spike es un impulso de gran amplitud contenido en una traza respecto a los demás valores ; el ruido aleatorio como su nombre lo dice, es aquel que no presentan un comportamiento lineal o tendencia, es decir, no es predecible.

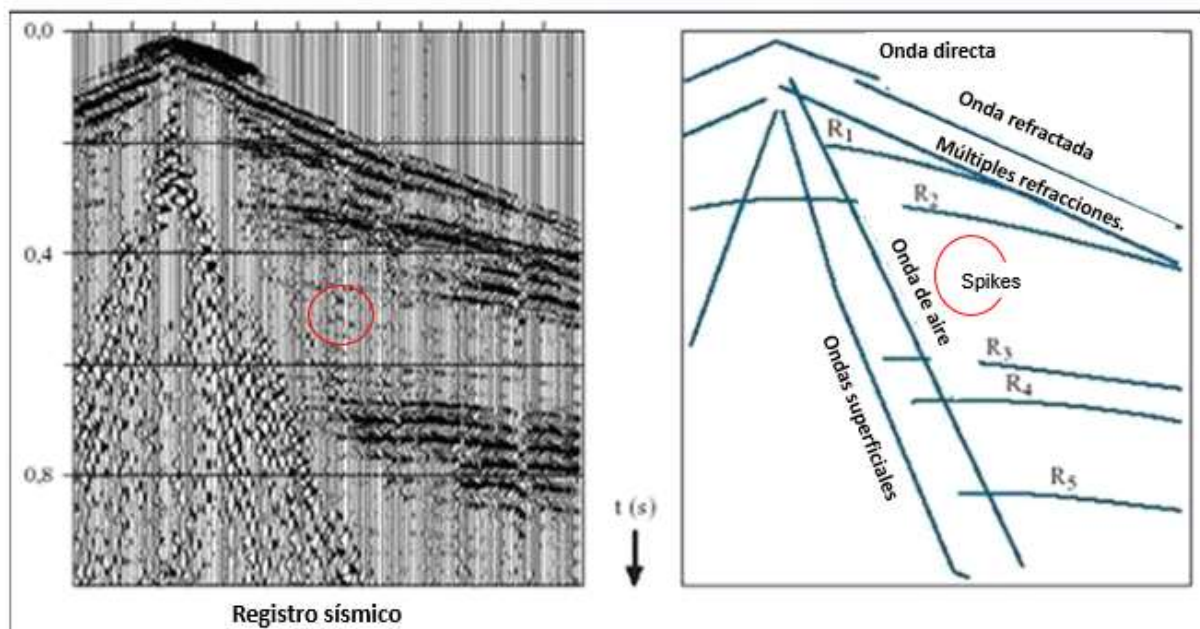


Fig.3– Identificación de eventos sísmicos y ruidos (Rel. Dr. Vincenzo Di Fiore, IAMC-CNR, Napoli).

Estáticas de elevación y de refracción.

Las correcciones estáticas son pequeñas diferencias de tiempo que se aplican a los datos para ajustarlos debido a las diferentes elevaciones en la superficie y por la influencia de la capa meteorizada (weathering) sobre la velocidad del rayo.

Las estáticas de elevación son correcciones que tienen como objetivo ajustar el tiempo de viaje al que se observarían los eventos si la fuente y los receptores estuvieran ubicados sobre un mismo nivel o plano de referencia (datum) por debajo de la capa meteorizada (capa de baja velocidad).

Para el cálculo de las estáticas de refracción es importante que primero se haga la lectura de los primeros arribos de las ondas, ya que con estos datos pueden estimarse la profundidad y velocidad de la capa meteorizada. Una vez caracterizada la capa, puede procederse a realizar la corrección en tiempo de su influencia sobre los rayos.

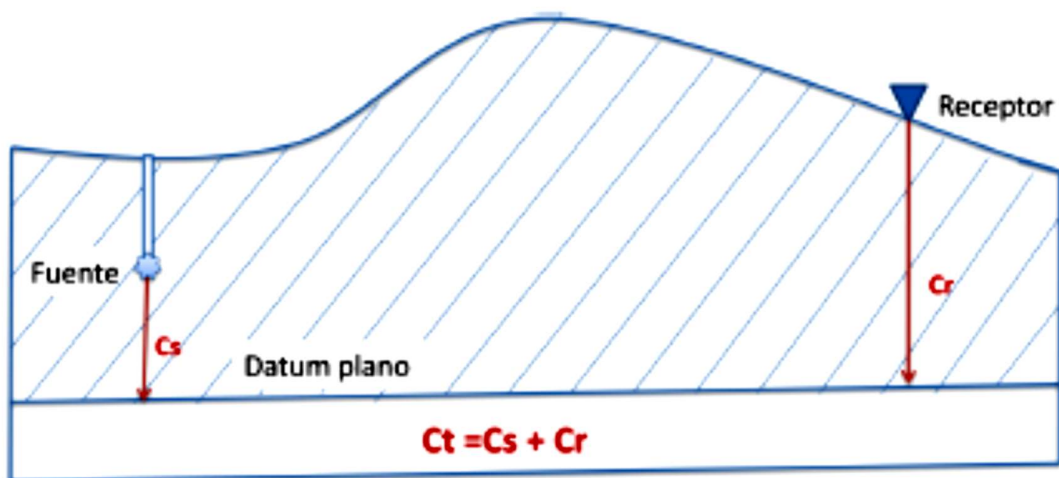


Fig.4–Correcciones estáticas.

Donde C_s es la corrección estática en el punto de disparo, C_r es la corrección estática en el receptor, y C_t es la corrección estática total aplicada a la traza. Cabe mencionar que cada corrección está en función de la velocidad y la distancia a la que se encuentra la fuente o el receptor, según sea el caso, de la base de la capa intemperizada o de la ubicación del datum.

Análisis de velocidad y corrección NMO (Normal Moveout)

El análisis de velocidades tiene como objetivo obtener pares de puntos de tiempo-velocidad para un conjunto de CDP's espaciados uniformemente. A partir de estos valores de velocidad se construye una función o campo de velocidades que se utilizara para la corrección NMO.

La corrección NMO es una corrección dinámica que busca eliminar la influencia o el efecto que tiene el offset sobre las llegadas de las ondas reflejadas (retraso), es decir, todas las trazas serán corregidas como si estas hubieran sido grabadas en offset cero: la distancia entre la fuente y el receptor es nula.

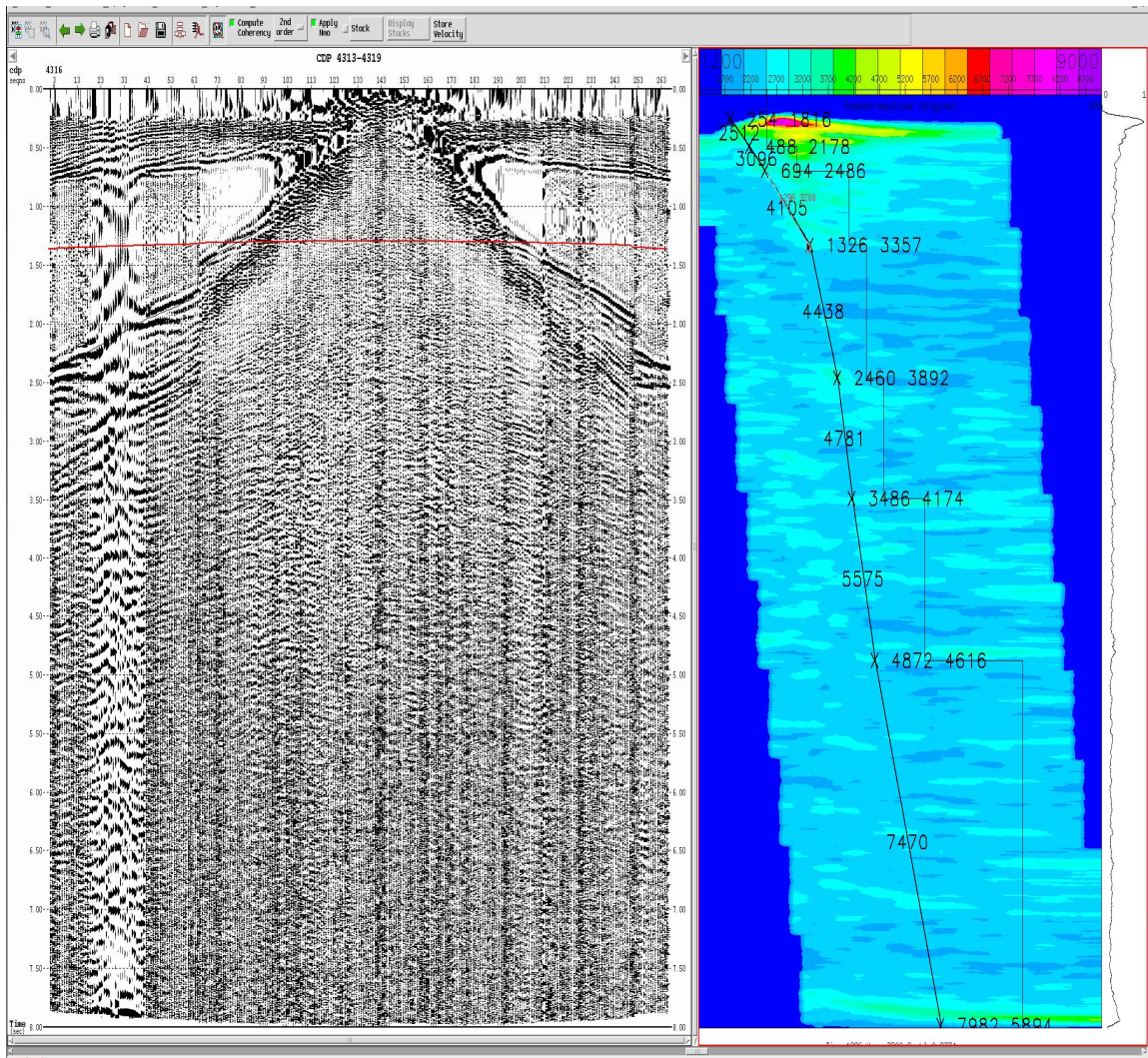


Fig. 5- Picado de velocidades y corrección NMO (Pdgm 2014.1)

Deconvolución consistente con superficie.

Si consideramos que una traza sísmica es el resultado de la convolución entre una señal de entrada (ondícula), la respuesta de la interacción de ésta con las capas reflectoras y los efectos de la Tierra ante el paso de la misma, entonces diremos que la deconvolución busca remover los efectos que tiene la Tierra sobre dicha señal.

Dicho fenómeno puede ser descrito como:

$$h = w * e * g$$

Donde **h** es la traza sísmica grabada, **w** es la ondícula de la fuente, **e** la respuesta impulsiva del subsuelo (resultado esperado) y **g** representa todas las otras respuestas no deseadas.

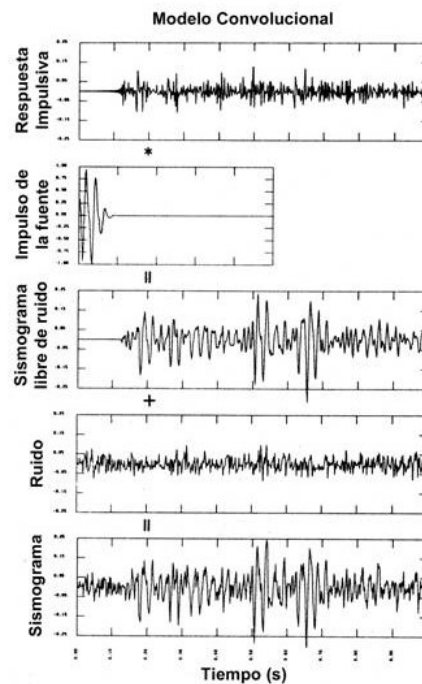


Fig.6- Modelo convolutivo de la Tierra (Yilmaz, 2001)

La deconvolución es una operación matemática que reduce las reverberaciones (efectos secundarios causados por los receptores) y los múltiples, intenta devolver la forma de cada ondícula a un pulso, es decir, a la serie de reflectividad del

subsuelo, debido a que este actúa como un filtro; por lo tanto se puede concluir que la deconvolución es un tipo de filtro inverso.

Se dice que es consistente con superficie porque asume que la forma de la ondícula depende únicamente de la localización de la fuente y los receptores, y no del frente de onda.

Estáticas residuales.

Después de la aplicación de las correcciones estáticas a los datos terrestres la mayoría de veces, quedan pequeños errores en la alineación de las amplitudes de las trazas, por lo que es necesaria la aplicación de las estáticas residuales. Las estáticas residuales consistentes con superficie son retrasos de tiempo que dependen de la ubicación fuente- receptor y no del comportamiento de la onda en el subsuelo.

La entrada para el cálculo y aplicación de las estáticas residuales son CDP gathers corregidos por NMO, en donde las reflexiones en todas las trazas de un CDP deben ser horizontales.

Respuesta al impulso

Antes de proceder a realizar la migración sísmica de toda la información con diferentes algoritmos, se realizan pruebas conocidas como respuesta al impulso, estas consisten en migrar una traza de todo el apilado para poder parametrizar de manera adecuada cada algoritmo, también se usa para verificar y comprobar la condición en la que se encuentra el campo de velocidades con el que se realizará la migración.

Migración sísmica

Según los principios de la sísmica de reflexión, la señal sísmica grabada por un receptor es asociada con la energía proveniente de un punto común de reflexión o punto común medio (CMP). Tal suposición, por lo general, es incorrecta ya que ésta funciona solo con capas totalmente horizontales, mientras que en la naturaleza la

mayoría de los estratos poseen inclinación, es decir, las capas son buzantes. Para corregir los errores producidos en la imagen por esta suposición, es necesario aplicar una migración a los datos sísmicos.

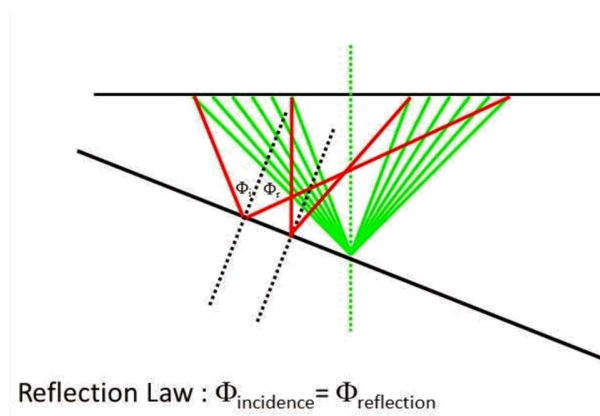


Fig.7- Imagen que muestra como el punto común medio no coincide con los puntos reflectores para una capa inclinada. Las líneas verdes representan los rayos que tendrían en común un CMP si las capas fueran horizontales, mientras que las líneas rojas representan rayos para offsets más cortos y largos, desplazados por la inclinación de la capa. (Blog: Seismic Reflections: A technical blog about seismic data processing powered by GLOBE Claritas)

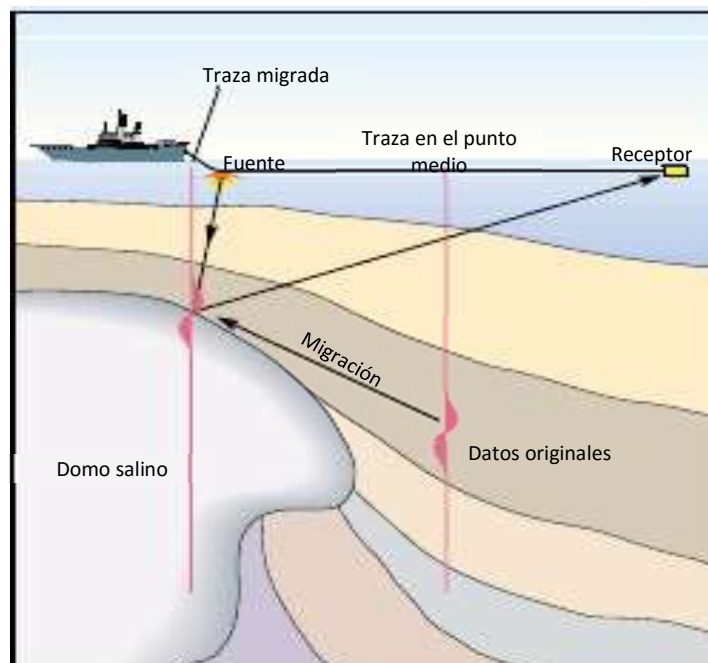


Fig.8-Migración de la energía sísmica reflejada. Para este ejemplo la migración reubica la traza de datos pasando de la posición registrada en el punto medio del par fuente-receptor a su verdadera posición.

Según Yilmaz (2001) la migración se encarga de mover los reflectores buzantes a su verdadera posición en el subsuelo y colapsar las difracciones. Así mismo incrementa la resolución espacial produciendo una imagen sísmica del subsuelo.

Según Sheriff (2002) la migración consiste en reposicionar o reubicar datos para definir la correcta ubicación de los reflectores y puntos difractores. La necesidad de migrar datos sísmicos para obtener una imagen estructural comenzó con la exploración sísmica, la primera migración de datos sísmicos se realizó en 1921.

Considerando una situación de velocidad constante, una reflexión de un reflector con pendiente ξ en un punto C bajo la posición sobre la superficie de E, es observada en A y graficada en C' en una sección sísmica no migrada (Sheriff et. al. 1995).

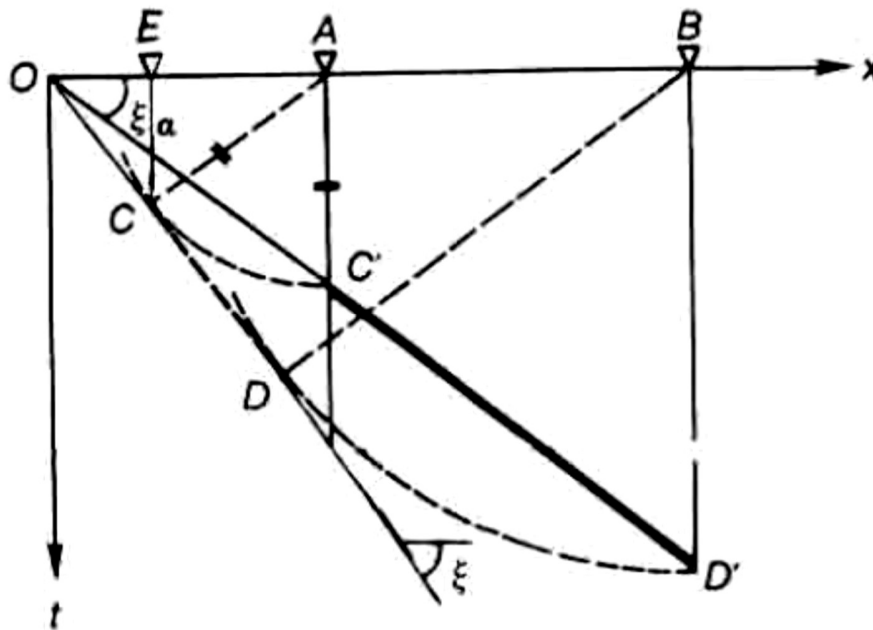


Fig. 9- Principio de la migración.

Se observa que:

$$\tan \xi_{\alpha} = \sin \xi$$

La ecuación anterior es llamada *ecuación de migración*, donde ξ_{α} es la pendiente aparente del reflector antes de migrar.

Esta igualdad se cumple, ya que geoméricamente

$$\tan \xi_{\alpha} = \frac{AC'}{OA}$$

Y:

$$\sin \xi = \frac{AC}{OA}$$

A partir del principio geométrico de migración (Fig. 9), se pueden hacer las siguientes observaciones:

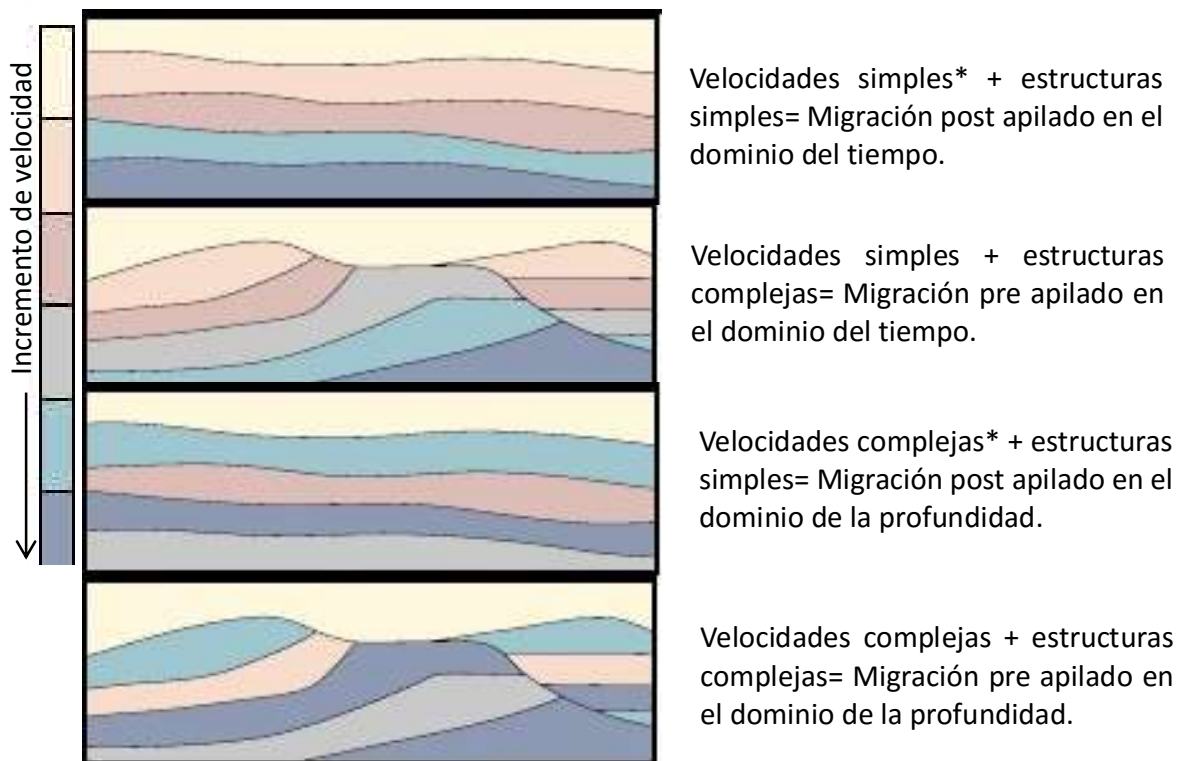
1. El ángulo de la pendiente del reflector es más grande después de que se aplica la migración, por lo que decimos que la migración hace más pronunciada la pendiente de los eventos.
2. La longitud del reflector es más corta después del proceso de migración, por lo que decimos que la migración acorta los reflectores.
3. La migración mueve los reflectores en dirección pendiente arriba. (Yilmaz, 1987)

Este tipo de migración es generalmente usada después del apilado.

El objetivo de la migración es obtener una imagen de los reflectores con su correcta localización en profundidad. Requiere conocimiento de la distribución de velocidad, cambios de velocidad que generen cambios en la dirección del rayo y los efectos sobre la migración.

Tipos de migración

La migración puede realizarse en dos dominios (tiempo o profundidad) y antes o después del apilado, por tanto se pueden elegir entre distintos tipos de migración dependiendo de la complejidad del objetivo y de las estructuras presentes en el estudio.



*Velocidad simple hace referencia al incremento de velocidades respecto a la profundidad Mientras que el termino *Velocidades complejas se refiere a cambios abruptos de velocidades en las direcciones horizontal y vertical.

Fig. 10–Clasificación de la migración dependiendo del objetivo y de las condiciones geológicas.

Migración en tiempo: el campo de velocidades varía lentamente. La velocidad aumenta con el tiempo de tránsito.

Migración en profundidad: el modelo de velocidades puede tener fuertes contrastes en la dirección horizontal y vertical.

Migración Post-apilado: toma menos tiempo en ejecutarse que la migración antes del apilado, ya que la cantidad de trazas a procesar es mucho menor. Suele aplicarse en casos de estructuras simples y campo de velocidades suaves.

Migración Pre-apilado: puede aplicarse a las estructuras y a los campos de velocidades más complejos, sin embargo su implementación tiende a tener cierto grado de dificultad.

Ciertos problemas de generación de imágenes pueden ser resueltos con la migración en el dominio del tiempo, pero los más complejos requieren una migración en el dominio de la profundidad.

Es importante mencionar que desde el punto de vista de costos, la migración post apilado es mucho más recomendable, ya que tarda menos tiempo en ejecutarse que una migración pre apilado, porque el apilamiento reduce en un orden de magnitud la cantidad de trazas que deben procesarse. Sin embargo en cuanto a la calidad, la imagen generada por una migración post apilado no definirá tan bien las estructuras como una pre apilado.

Parámetros de la migración

El resultado de la migración se ve influenciado por ciertos factores que varían desde el algoritmo con el que se aplica la técnica, el campo de velocidades de la sección sísmica y la inclinación de los eventos.

Cada algoritmo que desee implementarse está limitado por ciertos parámetros, los cuales aumentan o reducen la eficacia de cada método:

En la migración Kirchhoff los parámetros más importantes son la apertura de migración y la máxima pendiente o inclinación a migrar.

En las migraciones de diferencias finitas y cambio de fase, el tamaño del escalón o la longitud de la capa necesita ser seleccionada adecuadamente.

Campo de velocidades: Estas son muy importantes ya que de ellas dependerá la definición correcta del tamaño de las estructuras. Por ejemplo a mayor velocidad, mayor migración y por lo tanto menor tamaño de la estructura (sinclinal). En la mayoría, por no decir en todos los algoritmos de migración se permite hacer un suavizado de dicho campo de velocidades a fin de que las velocidades se asemejen más a las reales. Este suavizado puede realizarse a través de la multiplicación del campo de velocidades por un factor (porcentaje), o a través del suavizado en términos de número de trazas y milisegundos.

Máxima pendiente para migrar: definir este parámetro puede resultar muy útil cuando se busca suprimir el ruido generado por el buzamiento. Este valor, define el valor de la pendiente máxima que debe respetarse a la hora de migrar, es decir, si se selecciona un valor de 60° , todas las pendientes que sean mayores a esta son eliminadas o suprimidas. Limitar el valor de la pendiente es una manera de reducir costos computacionales.

Tamaño del escalón o capa: esta propiedad se utiliza principalmente en las migraciones por diferencias finitas. Este parámetro de definir la longitud de la capa o el escalón puede generar una “falta de migración” además de generar como pequeños pliegues en los flancos de la curva de difracción. Se usa como intervalos de profundidad al realizar la migración.

Algoritmos de migración

La migración se logra a través de diversas soluciones de la ecuación de onda que describe la propagación de las ondas elásticas a través de las rocas.

Los métodos computacionales comúnmente desarrollan la solución a partir de la ecuación de onda en su forma escalar ($\psi(x, z, t)$ donde x es la ubicación sobre la horizontal, z es la profundidad y t es el tiempo). Los registros que nosotros obtenemos se describen por la función $\psi(x, 0, t)$ que indica que los datos fueron grabados en la superficie, es decir, a una profundidad cero y que fueron tomados en un tiempo T después del disparo.

El proceso de migración convierte nuestros datos de $\psi(x, 0, t)$ a datos determinados por la función $\psi(x, z, 0)$ que representa la respuesta del medio en un perfil del subsuelo x - z , en un tiempo igual a cero, que es el instante en donde no ha incidido la energía de la fuente y por lo tanto no se han generado difracciones.

Existen varios métodos para resolver $\psi(x, z, 0)$, conocidos como algoritmos de migración, estos suelen llevar el nombre de su inventor como Kirchhoff, o el nombre del tipo de solución matemática por ejemplo diferencias finitas.

Los algoritmos de migración pueden ser clasificados dentro de tres categorías principalmente (Yilmaz, 2001):

1. Los que están basadas en la solución integral de la ecuación de onda escalar.
2. Los que están basados en la solución por diferencias finitas.
3. Y aquellos que se basan en las implementaciones de frecuencia-número de onda

Los diferentes métodos o algoritmos de migración pueden traer consigo soluciones diferentes dependiendo del modelo de velocidades y de la calidad de los datos a procesar.

Actualmente los algoritmos de migración que más se estudian son basados en métodos de soluciones numéricas de problemas de propagación hacia atrás, sin embargo, nosotros estudiaremos los más comunes: Kirchhoff, WEM y Omega X. Estos dos últimos basados en el método de diferencias finitas.

Diferencias finitas

Basado en el método de continuación hacia abajo del campo de onda registrado en superficie.

Es bien sabido que las difracciones ocurridas en el subsuelo se registran en superficie como hipérbolas debido al comportamiento de sus trayectorias de viaje. La migración por diferencias finitas consiste en hacer una continuación descendente del campo de onda registrado, extrapolarlo este campo como si se hubiese registrado a una profundidad determinada por medio de la aproximación a la solución de la ecuación de onda escalar con el método de diferencias finitas.

Este método consiste en dividir el subsuelo en múltiples subcapas para después en base a la solución de la ecuación de onda por diferencias finitas y a la imagen sísmica grabada en superficie, hacer una continuación del campo de onda como si este hubiese sido grabado a una profundidad z de la superficie. Esto hace que la hipérbola de migración grabada en superficie se comporte como si se hubiese grabado en un tiempo t menor por lo que la hipérbola se ira cerrando conforme la

profundidad z sea más próxima al punto difractor (fig11). Cuando se llega a una profundidad tal que el punto difractor es grabado en un tiempo 0, esto es que la profundidad sea la profundidad del reflector, las difracciones dejan de comportarse como una hipérbola en el registro y son más bien registradas como un punto. Es muy importante definir correctamente el tamaño de las capas ya que de no hacerlo se tendría una sobre migración o sonrisas de migración al igual que si se hubiese migrado con velocidades erróneas.

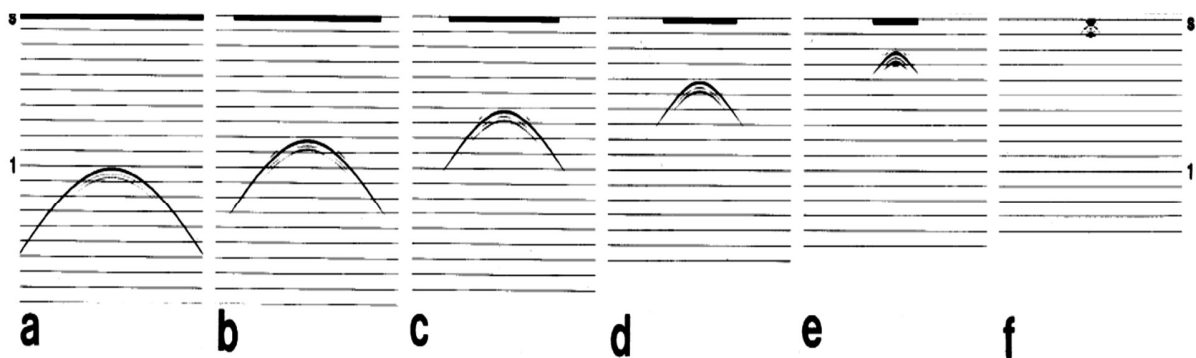


Fig.11 -Continuación hacia abajo del campo de onda. La imagen "a" representa el campo medido en superficie, las siguientes imágenes representan la continuación hacia abajo hasta llegar a la profundidad del punto difractor.

Los métodos de diferencias finitas son una excelente herramienta numérica para resolver la ecuación de onda a través de la aproximación de derivadas parciales usando las siguientes ecuaciones:

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{f(x) - f(x - \Delta x)}{\Delta x} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2\Delta x} \dots \dots \dots (3)$$

Donde las ecuaciones (1) y (2) son las aproximaciones por diferencias progresivas y regresivas respectivamente, mientras que la ecuación (3) es la aproximación por diferencias centradas.

La principal diferencia entre el algoritmo de WEM y Omega X, es que el primero está basado en el principio del reflector explotante, el cual consiste en colocar diversas fuentes sobre el reflector, mientras que las receptoras se ubican sobre la superficie, todas las fuentes son detonadas simultáneamente sobre un mismo reflector, por lo que los rayos registrados sobre la superficie estarán dados en un tiempo de viaje de ida; mientras que Omega X considera una sección de offset cero, cuya geometría consiste en colocar la fuente y el receptor sobre la superficie en una misma posición, el tiempo de llegada de los diversos rayos estará relacionado con un tiempo doble de viaje (fuente- reflector, reflector-receptor.)

Condiciones óptimas de funcionamiento:

Para el caso de **WEM**: La condición para que este algoritmo genere buenos resultados es que el campo de velocidades con el que se realizó la migración debe ser simple, y las variaciones de velocidad en sentido horizontal deben ser suaves.

Y para **Omega X**: Puede procesar tanto variaciones laterales como verticales de velocidad. Es muy sensible a fuertes amplitudes presentes en la sección a migrar, ya que estas pueden provocar ruido de migración, por lo que es necesario atenuar dichas amplitudes (scaling down).

Kirchhoff

Está basado en el método de la suma de difracciones que incorpora el factor de oblicuidad, de divergencia esférica y de la forma de la ondícula.

La técnica de suma de difracción consiste en buscar los datos de entrada en el plano $x-t$ para la energía que habría resultado si una fuente de difracción se encontrara en un punto particular del plano $x-z$ (salida). Esta búsqueda se lleva a cabo mediante la suma de amplitudes en el plano $x-t$ a lo largo de la curva de difracción que corresponde a la fuente secundaria de Huygens en cada punto del plano $x-z$. El resultado de esta suma se proyecta sobre el punto correspondiente en el plano $x-z$. (z es igual al tiempo migrado). La curvatura de la trayectoria de la hipérbola está en función de la velocidad.

La ecuación de la trayectoria puede ser definida de la siguiente figura

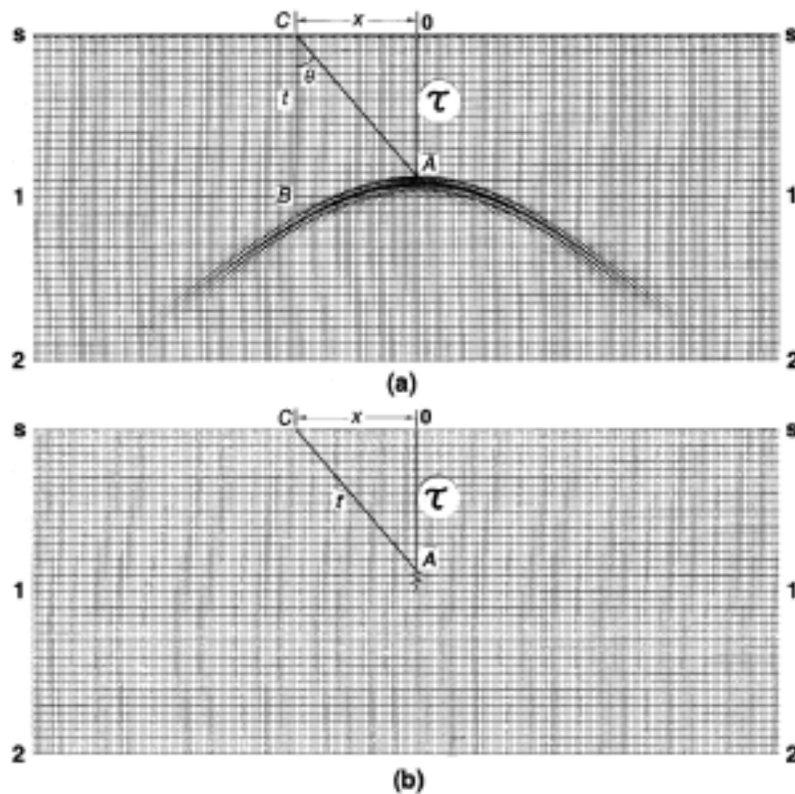


Fig.12- Principios de migración basada en suma de difracciones. (a) Sección de offset cero, (b) migración.

Del triángulo COA de la figura anterior, se observa que:

$$t^2 = \tau^2 + \frac{4x^2}{V_{rms}^2}$$

Habiendo calculado el tiempo t de entrada, la amplitud en la posición B es colocada en la sección de salida, en el punto A que corresponde al ápice de la hipérbola.

Antes de realizar la suma de difracciones es muy importante considerar los siguientes tres factores que afectan las amplitudes:

1. El factor de oblicuidad o de directibilidad, el cual describe la dependencia de amplitud en función del ángulo de incidencia, está dado por el coseno del

ángulo formado entre la vertical (z) y la dirección de propagación del rayo incidente.

2. El factor de divergencia esférica, sabemos que la energía de una onda decae en una proporción de $1/r^2$, donde r es la distancia entre la fuente y el frente de onda, y la amplitud decae en una proporción de $1/r$, por lo que es necesario la corrección de las amplitudes antes de realizar las sumas.
3. Forma de la ondícula: la fuente secundaria (Huygens) debe responder como una ondícula a lo largo de la hipérbola con una fase y frecuencia características.

La solución integral de Kirchhoff para la ecuación de onda escalar es la siguiente:

$$P_{out} = \frac{\Delta x}{2\pi} \sum_x \left[\frac{\cos\theta}{\sqrt{V_{rms}r}} \rho(t) * P_{in} \right]$$

Donde $\cos\theta$ es el factor de oblicuidad, $\sqrt{V_{rms}}$ es el factor de divergencia esférica y P_{in} es el término correspondiente a la forma de la ondícula.

Condiciones óptimas de funcionamiento:

Este algoritmo puede manejar pendientes de hasta 90° , pero los resultados en cuanto a manejo de variaciones laterales de velocidades no son los mejores (las variaciones laterales de velocidad distorsionan la trayectoria hiperbólica de las difracciones).

METODOLOGÍA

Ubicación

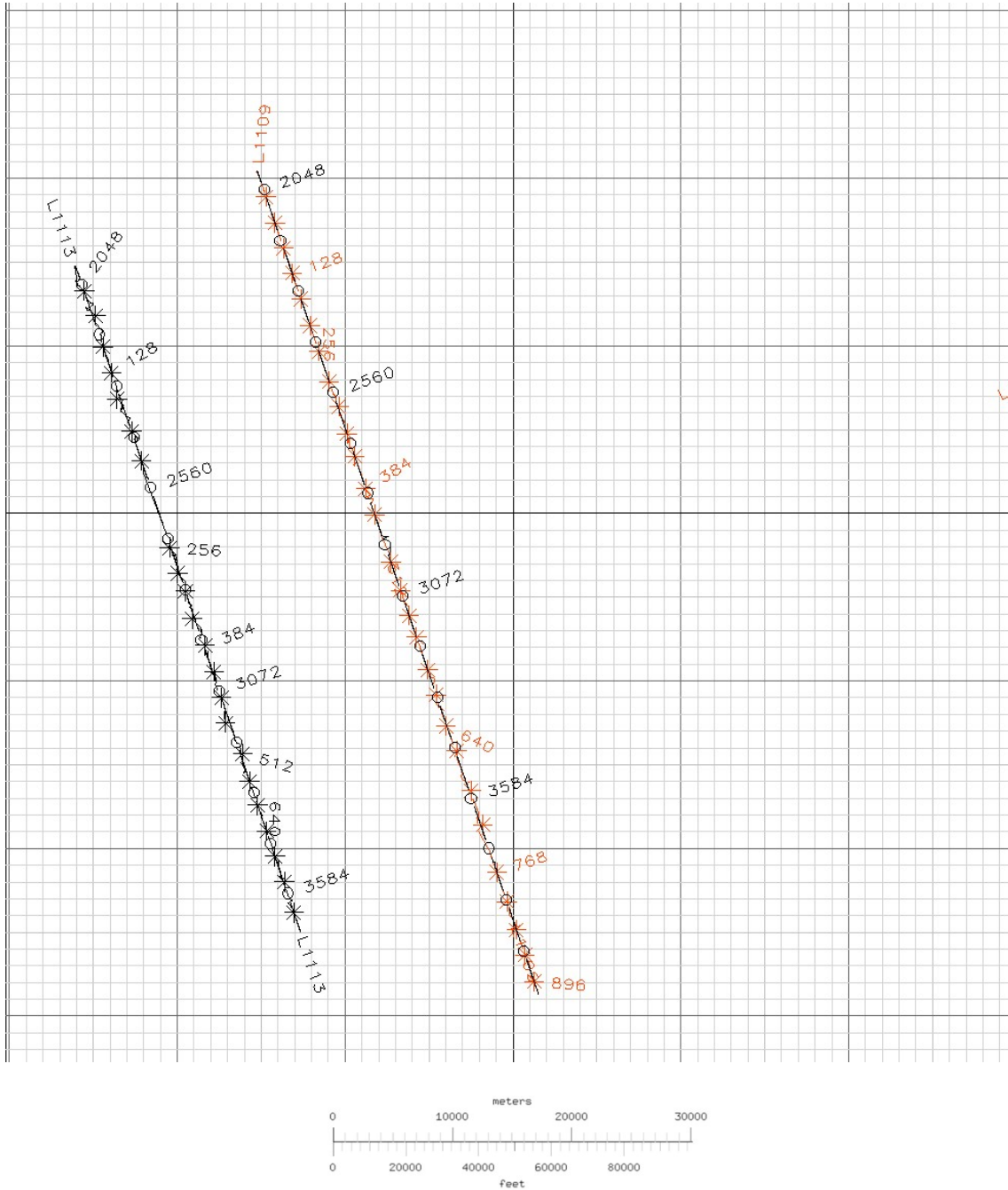


Fig. 13- Ubicación de las líneas que se procesaron

A continuación se mencionan las principales características de las líneas que se procesaron en este estudio:

Características	L1109	L1113
Tipo de fuente	Dinamita	Dinamita
Tiempo de registro	14 s / recortado a 8s	14 s/ recortado a 8s
Intervalo de muestreo	2 ms	2 ms
No. de disparos	911	724
Distancia entre disparos	50 m	50 m
No. de receptoras	2078	1680
Distancia entre receptoras	25 m	25 m
No. de CDPs	4148	3347
Distancia entre CDPs	12.5 m	12.5 m
Offset	Min. 50/ Max. 14000	Min. 50/ Max. 14000
Fold nominal	280	280
Longitud de la línea	52 km	42 km
Orientación de la línea	N-E	N-E

Tabla 1– Principales características de las líneas sísmicas.

Secuencia de procesamiento sísmico

La secuencia de procesamiento comenzó con la carga de las líneas en el software Paradigm (2014.1) a través de formatos SEG-Y. Se asignó la geometría a la sísmica y se comenzaron a realizar diferentes pruebas para determinar los parámetros para cada paso de la secuencia.

Shot de campo

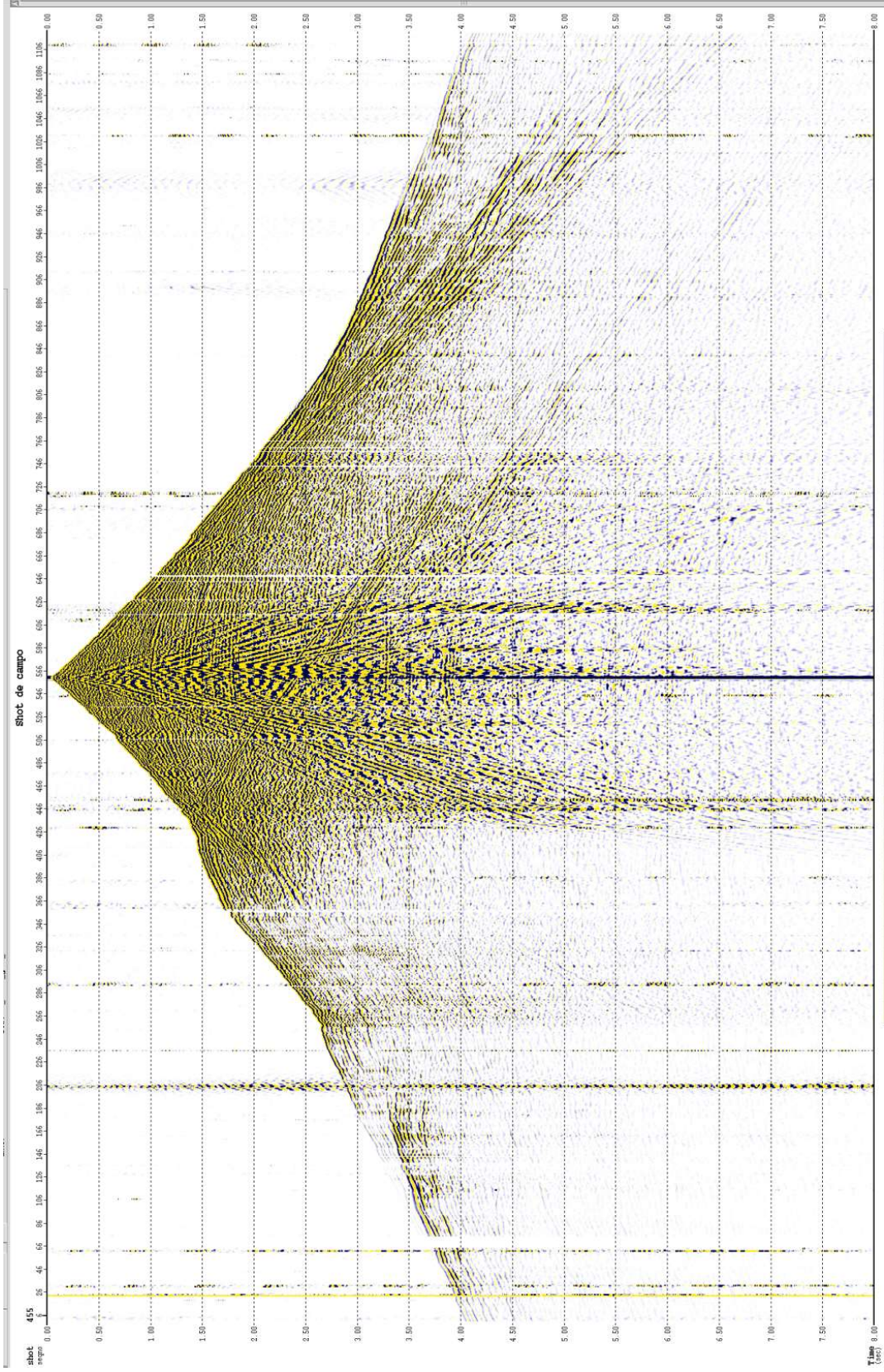
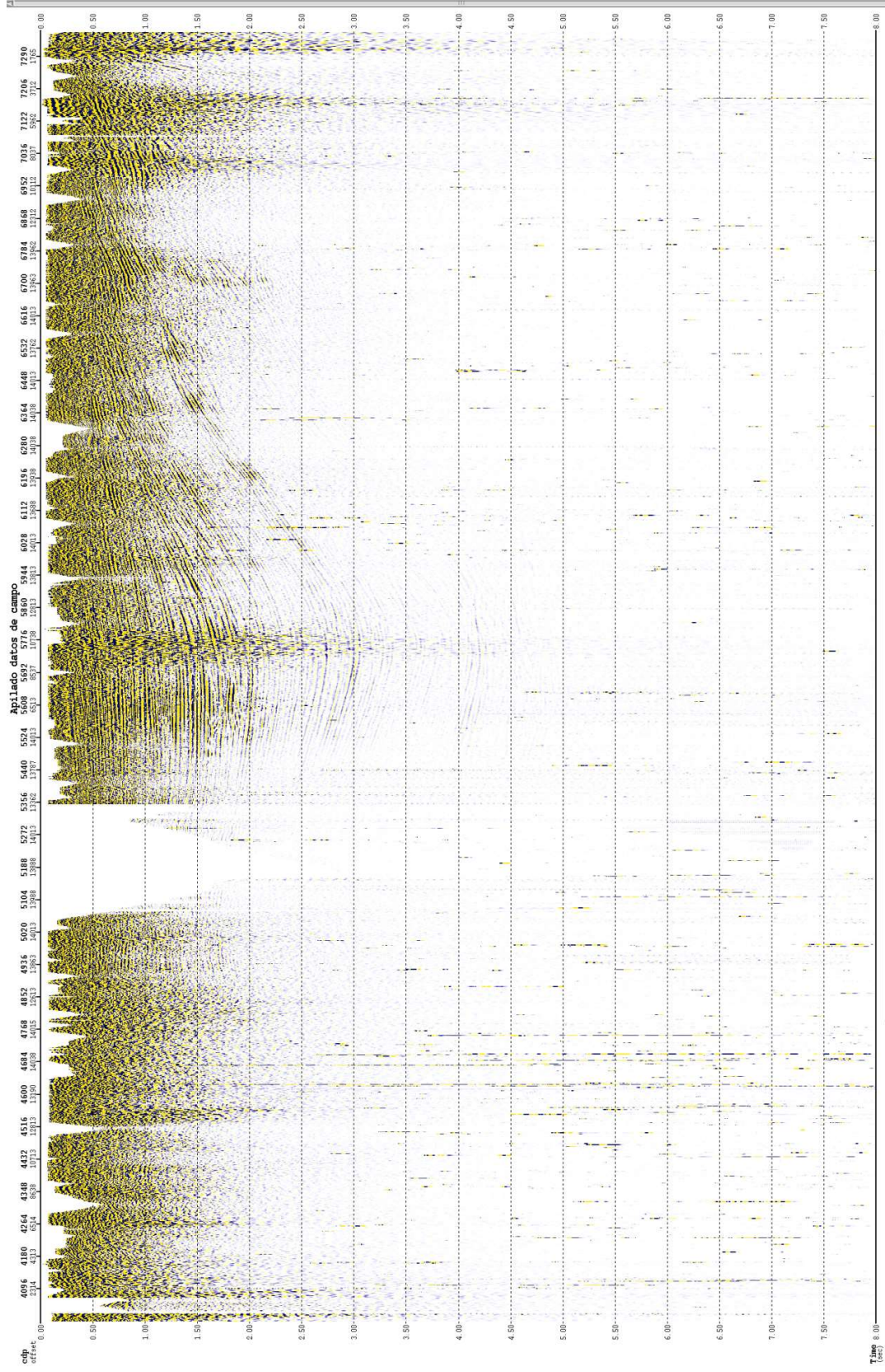


Fig. 14 – Shot de campo sin filtro y sin ganancia.

Apilado de datos de campo



Primeramente, para la *recuperación de amplitudes* por divergencia esférica se hicieron diferentes pruebas variando el valor de la exponencial del tiempo (n), valores como 1.75, 2, 2.25 y 2.5 fueron los primeros en ser probados. Se decidió trabajar con el valor de $n=2$ al ser el que mejor recuperaba las amplitudes manteniendo la coherencia, a mayor profundidad la energía disminuye y por lo tanto las amplitudes también, y sin hacer que en la parte somera de los shots las amplitudes fueran atenuadas de tal manera que dichas partes se observaran “blanqueadas”.

La recuperación de amplitudes se muestra a nivel apilado en la fig. 16.

Después, para la *atenuación de ruidos* se realizaron dos pruebas: una consistió en aplicar el método de Lift, que es un flujo predeterminado por los expertos de Paradigm, y otra en ir generando una secuencia de módulos de manera que los ruidos fueran atenuados en base a sus principales características (frecuencias, velocidades, comportamiento, linealidad, etc.), primero atenuando ruidos lineales y finalmente los aleatorios. El resultado de aplicar la secuencia de atenuación de ruidos, se observa en la fig.17 a nivel apilado.

En el caso de la *deconvolución consistente con superficie*, se aplicó una deconvolución tipo impulsiva, con una longitud del operador de 50 muestras (100ms), un rango de frecuencias de entre 5 y 70 Hz, un porcentaje de ruido blanco de 0.5 y se seleccionó una ventana de 400 ms en la que estaba presente un área con reverberaciones.

Posterior a la deconvolución, se aplicó otra etapa de atenuación de ruidos, para lo cual se aplicó nuevamente la secuencia desarrollada anteriormente.

Es importante mencionar que para avanzar de un paso a otro dentro de la secuencia de procesamiento sísmico es necesario realizar controles de calidad, para verificar y corroborar que el paso que se realiza o implementa logra mejorar la relación señal-ruido de la imagen previa a ese paso, es decir, aumentar la calidad de la imagen, haciendo que los eventos principales sean más notables y claros y atenuando la señal que no es de utilidad en el estudio.

Apilado: recuperación de amplitudes

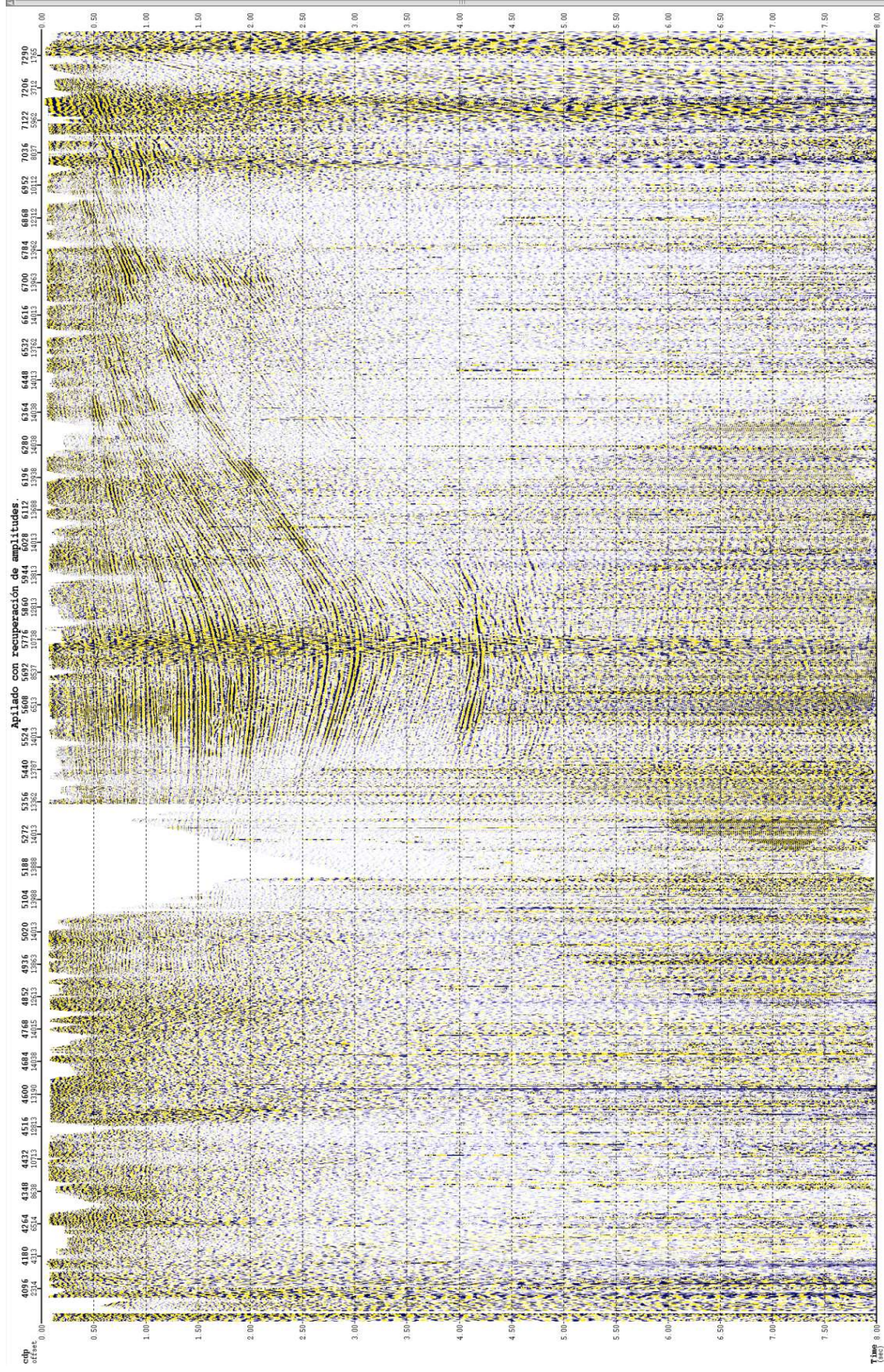


Fig. 16 -Apilado de datos con recuperación de amplitudes sin filtro y sin ganancia

Apilado: Atenuación de ruidos.

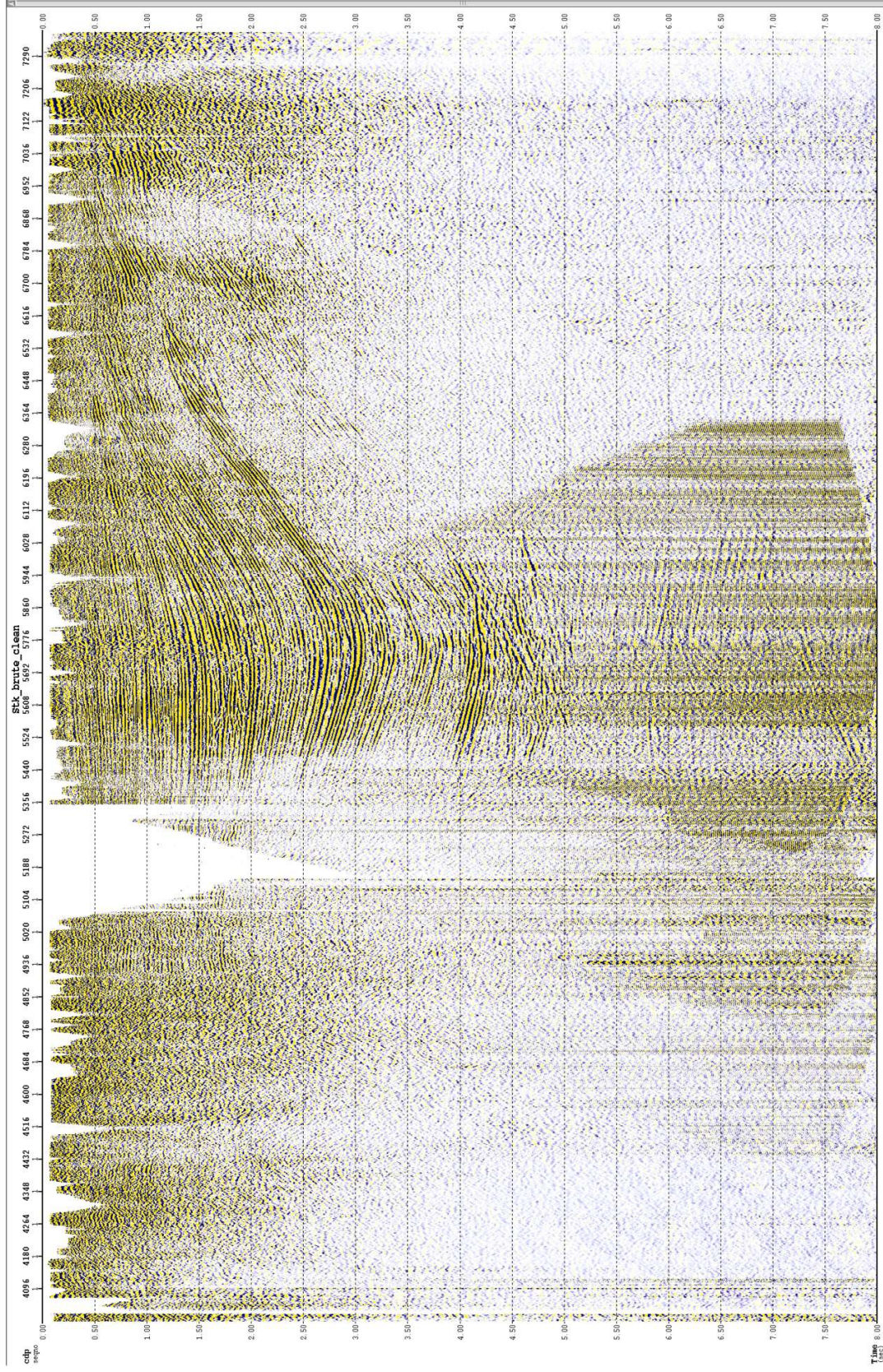


Fig. 17 – Apilado de datos con atenuación de ruido sin filtro y sin ganancia.

Correcciones estáticas:

En las *estáticas de elevación* (fig. 19) la corrección se llevó a un datum plano de 100 m, se propuso una velocidad de weathering (o capa intemperizada) de 800 m/s y una velocidad de remplazamiento de 2500 m/s. Recordemos que estas correcciones toman en cuenta la posición y elevación de las fuentes y receptoras, dichos datos son extraídos de los encabezados del SEG-Y.

Para las *estáticas de refracción* (fig. 20) no fue necesario hacer el picado de los primeros arribos, el SEG- Y ya los contenía por lo que únicamente fueron importados a la base de datos del Software. Luego se procedió a hacer el modelo de refracción de dos capas (con las domocronas) con sus correspondientes velocidades y se usaron los mismos datos de datum, velocidad del weathering y de remplazamiento que en las estáticas de elevación para su cálculo.

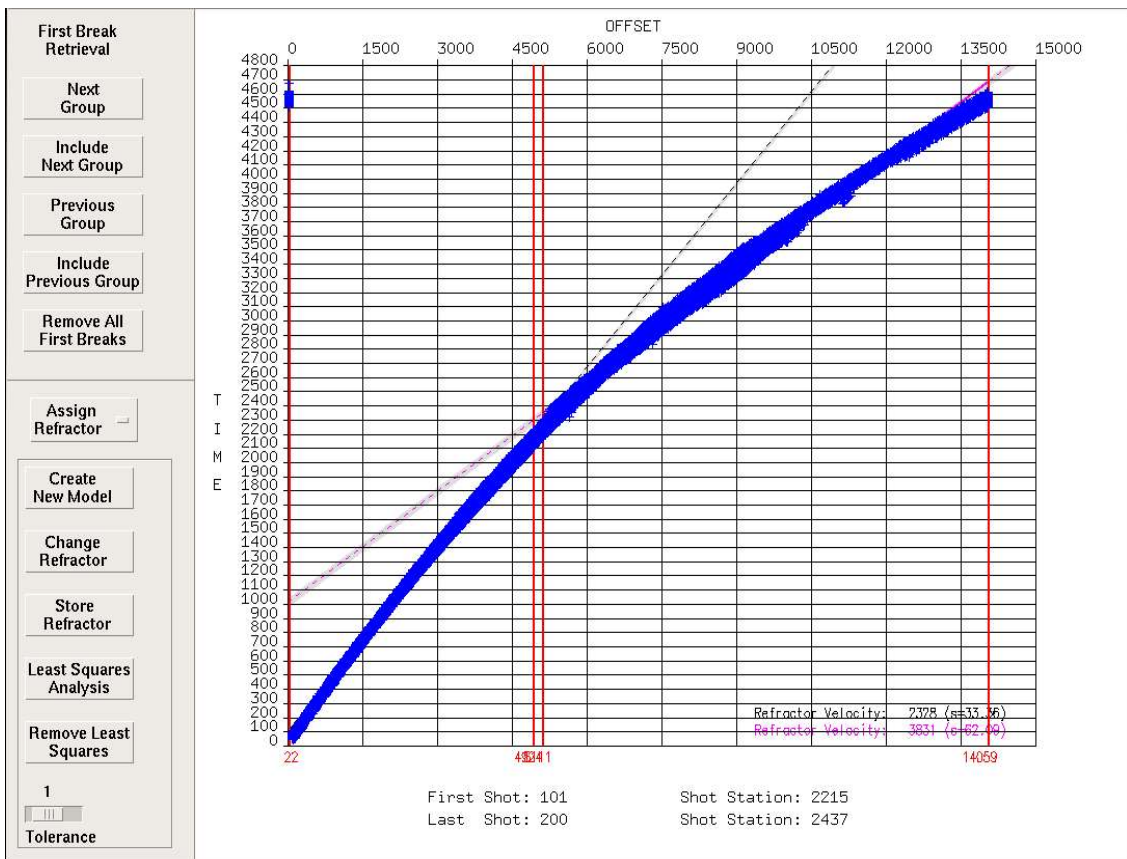


Fig.18– Modelo de refracción de dos capas, generado a partir de los primeros arribos con el software Paradigm.

Apilado con estáticas de elevación.

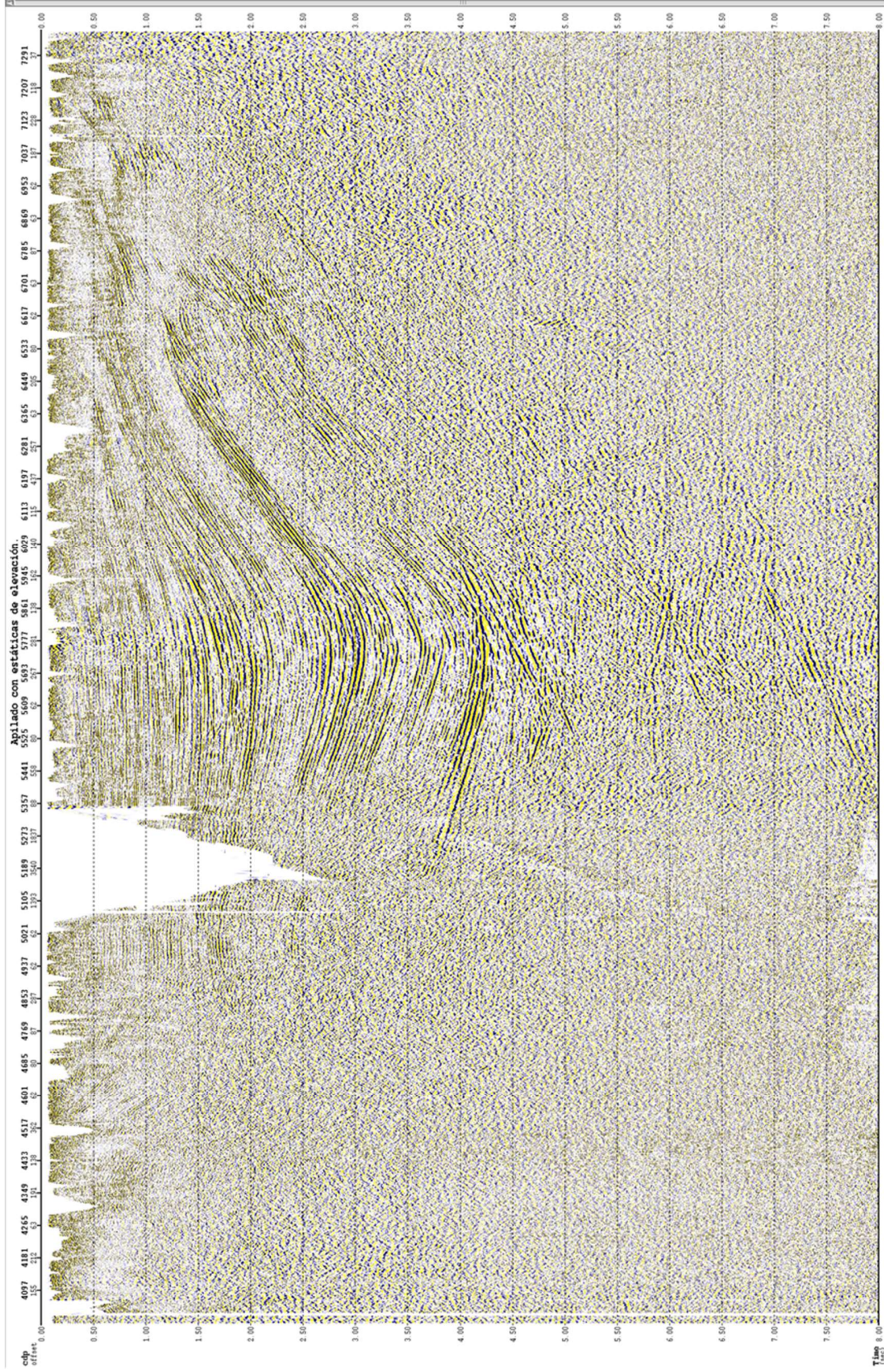


Fig. 19. —Apilado de datos con deconvolución, atenuación de ruidos, con filtro y ganancia.

Apilado con estáticas de refracción.

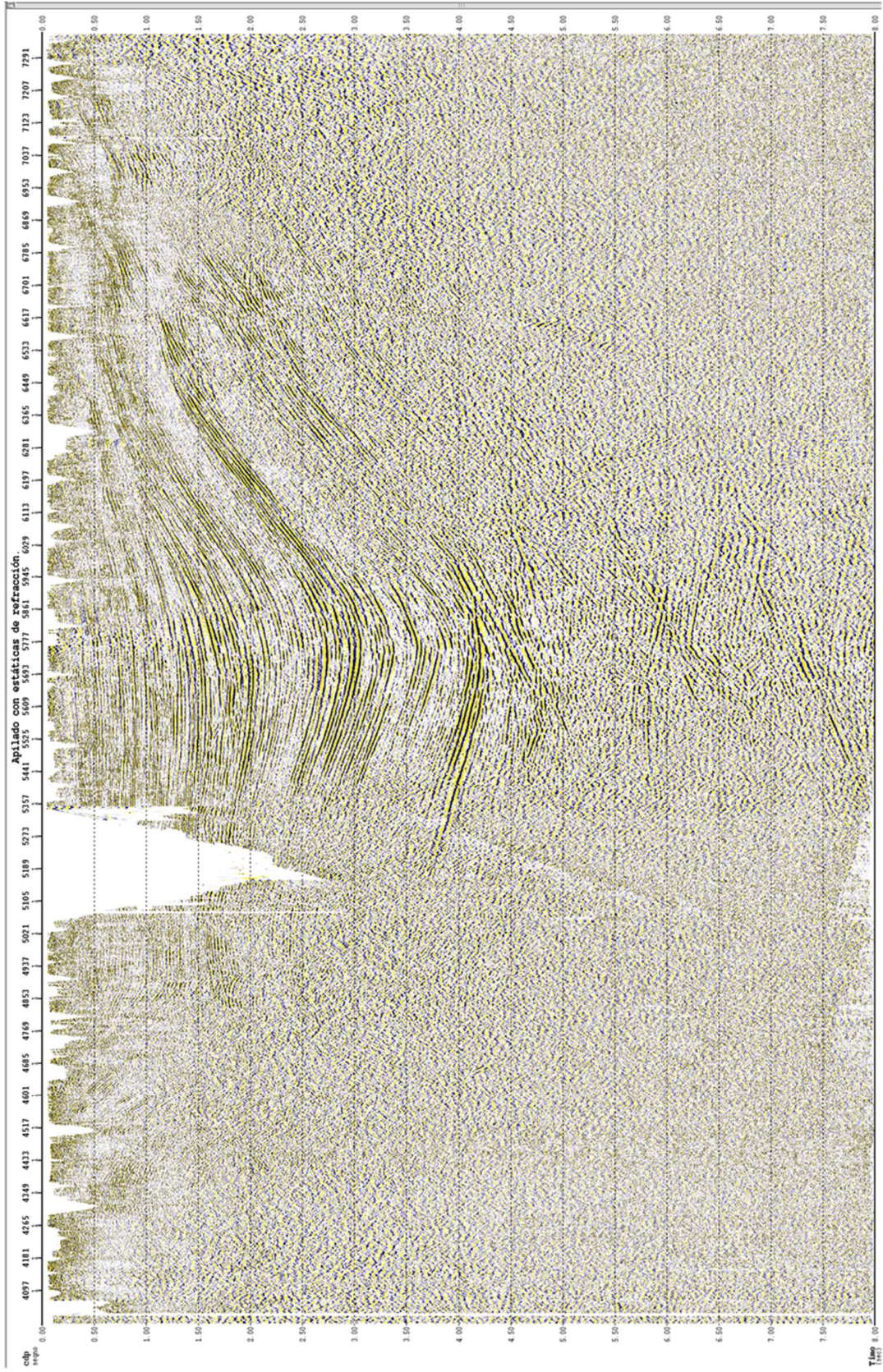


Fig. 20 —Apilado de datos con deconvolución, atenuación de ruidos, con filtro y ganancia.

El cálculo de las *estáticas residuales* consistentes con superficie (paso uno y dos) con el Software Paradigm, consiste en generar trazas pilotos las cuales son crosscorrelacionadas con cada traza pertenecientes a un CDP. El cambio o la diferencia entre ambas es lo que conocemos como el shift, que son pequeños desplazamientos en el tiempo que hacen que los eventos sean alineados y tengan continuidad.

Las trazas pilotos se seleccionan partir de un apilado con estáticas de refracción, como ya sabemos en un apilado cada CDP está representado por una traza considerada como maestra o piloto, ya que es la mejor traza que se pudiese haber obtenido al grabar los datos.

Para el cálculo de las residuales se seleccionó una ventana de 4000 ms, área donde se encontraban la mayor cantidad eventos y se seleccionó como límite de shift un valor de 20 ms. Estos parámetros se implementaron para los dos pasos de correcciones estáticas residuales.

Cabe mencionar que en cada paso de correcciones estáticas es necesario hacer la corrección de velocidades, por lo que se tiene que estar picando velocidades cada vez que alguna de estas correcciones es aplicada.

Cada uno de los pasos de la secuencia de procesamiento sísmico, con sus correspondientes parámetros fueron aplicados a las dos líneas de este estudio, sin tener alguna modificación, esto no porque sean iguales los datos, sino porque están localizadas en una misma región o área, en la que los cambios geológicos se consideran nulos.

Sin embargo, todas las imágenes de los apilados que se muestran pertenecen a una misma línea: L1113, a excepción del apilado que es la entrada a la migración, el campo de velocidades y sus correspondientes resultados.

Apilado con estáticas residuales 1er. Paso, L1113

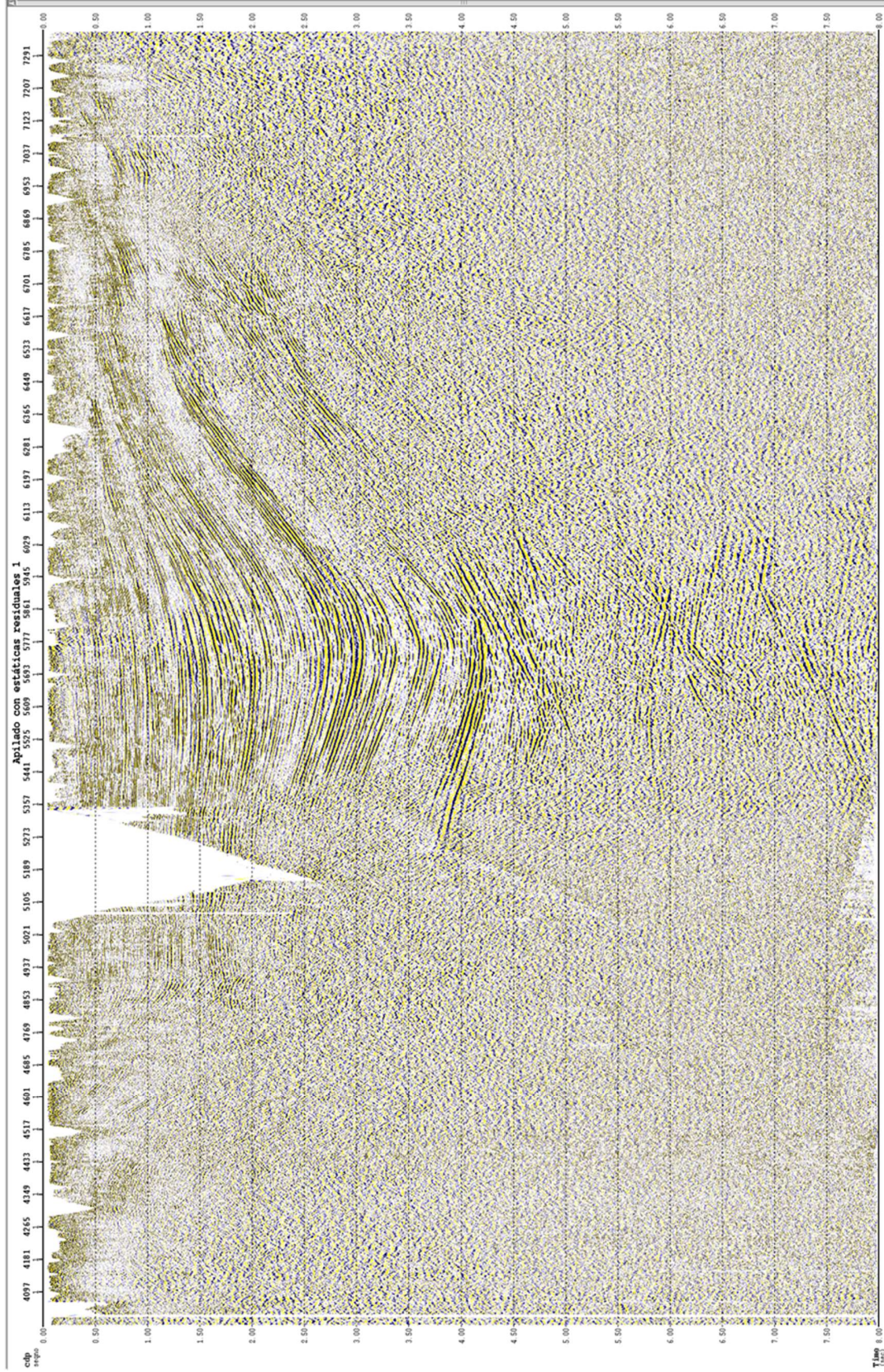


Fig. 2.1 - Apilado de datos con deconvolución, atenuación de ruidos, con filtro y ganancia.

Apilado con estáticas residuales 2do. Paso L1113.

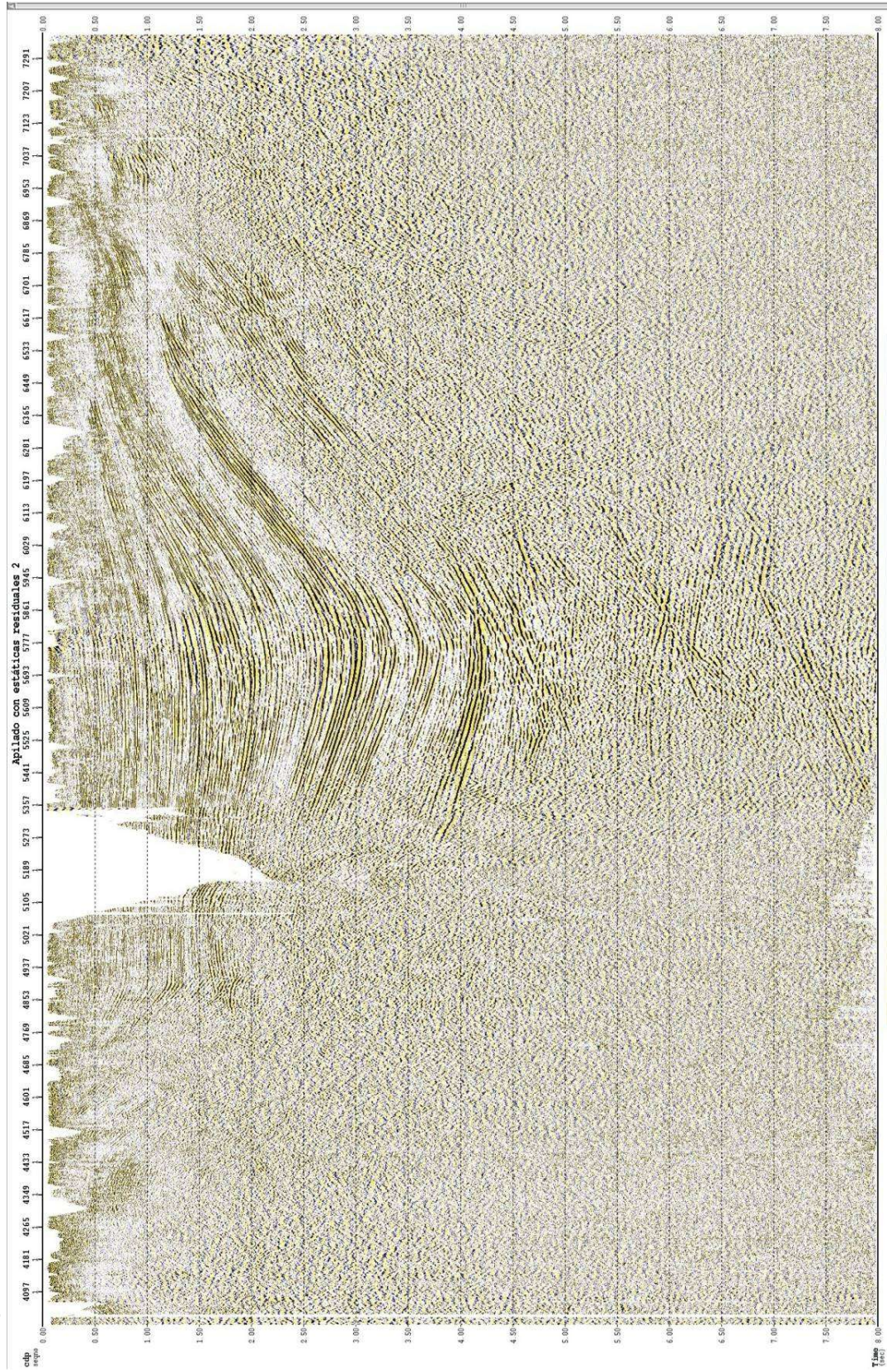


Fig. 22—Apilado de datos con deconvolución, atenuación de ruidos, con filtro y ganancia.

Campo de velocidades de la línea L1113

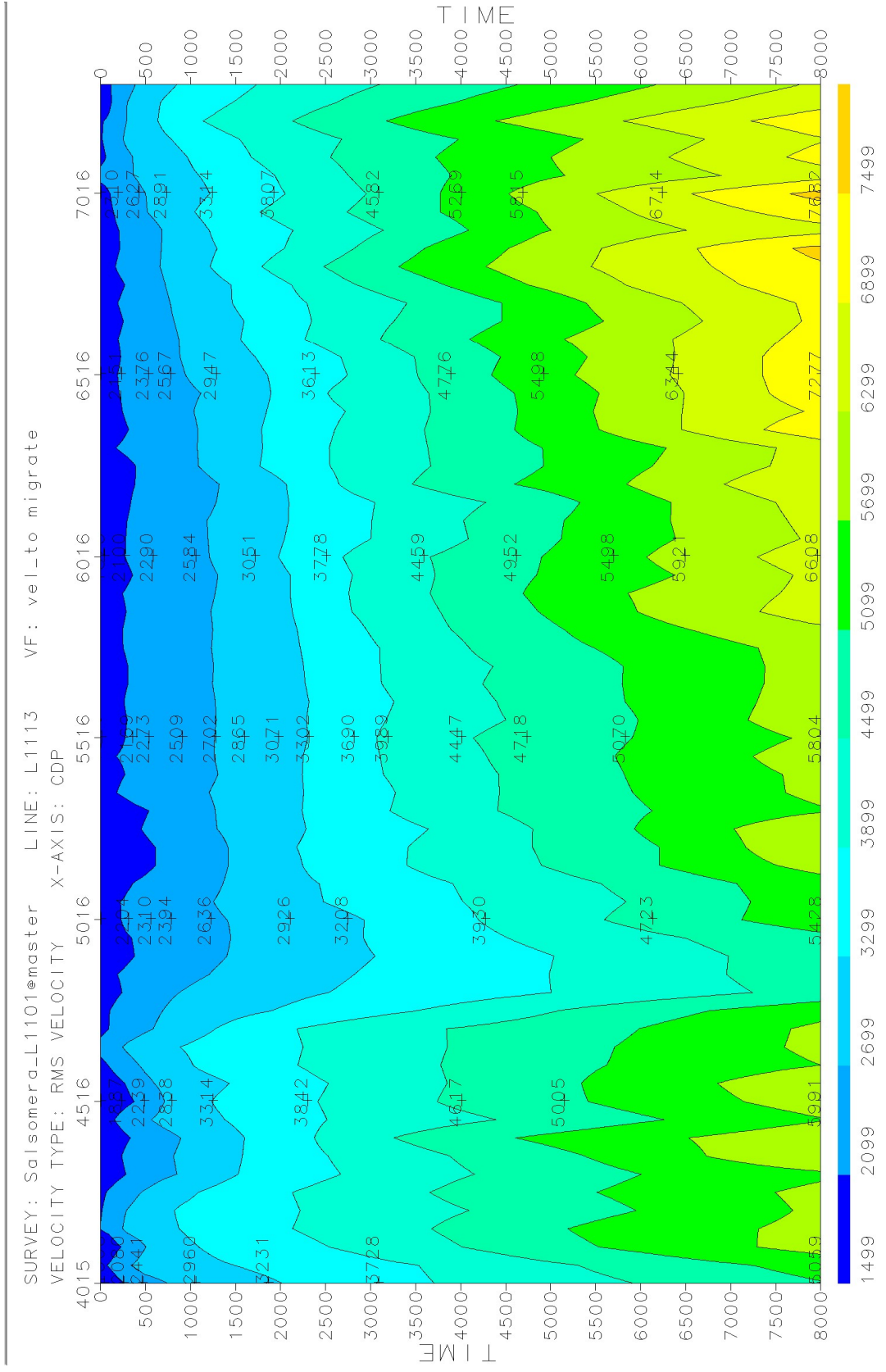


Fig. 23 –Campo de velocidades con el que se realizó la migración y las pruebas de respuesta al impulso.

Apilado con estáticas residuales 2do. Paso L1109.

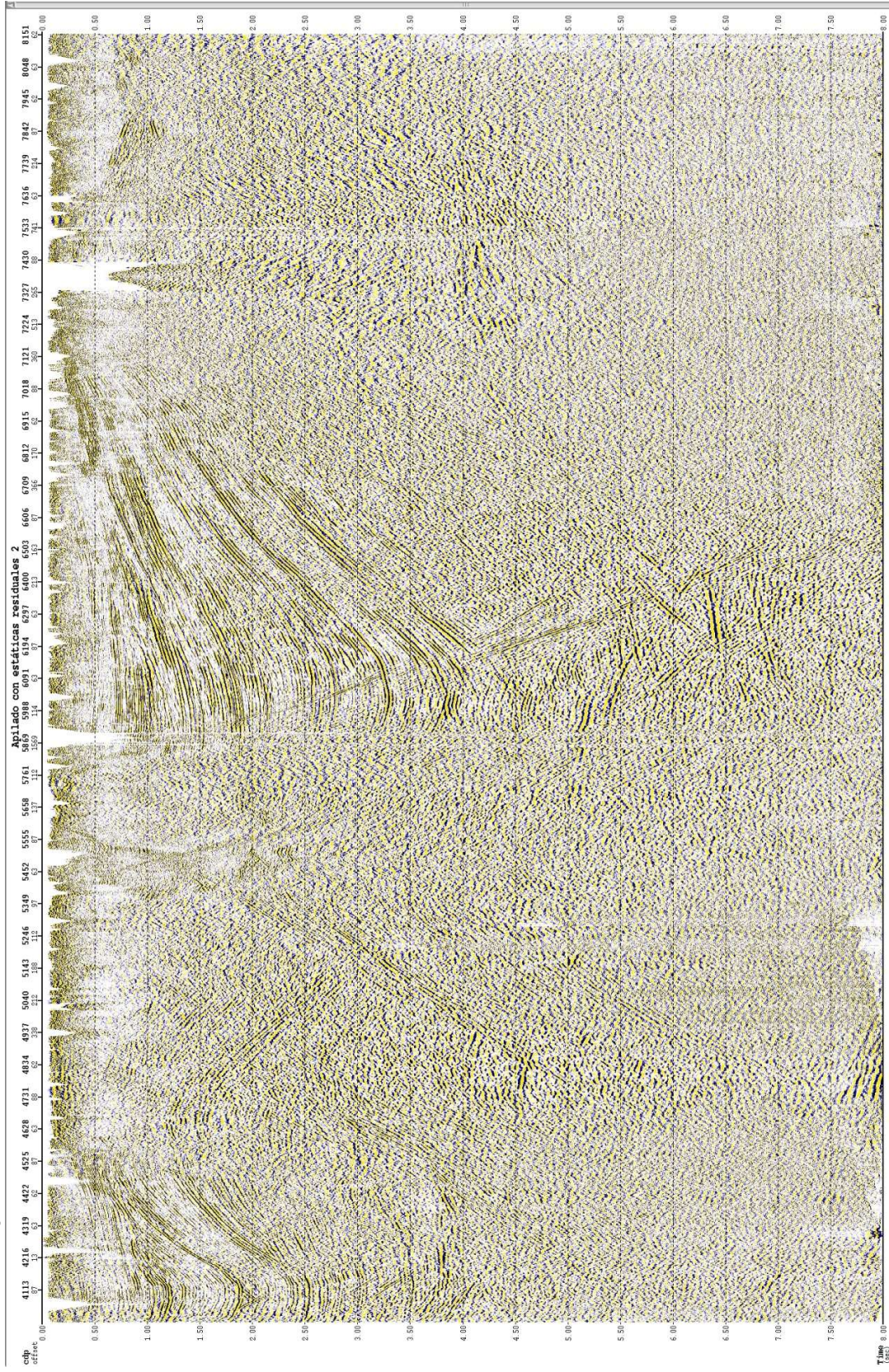


Fig. 24 –Apilado de datos con deconvolución, atenuación de ruidos, con filtro y ganancia.

Campo de velocidades de la línea L1109

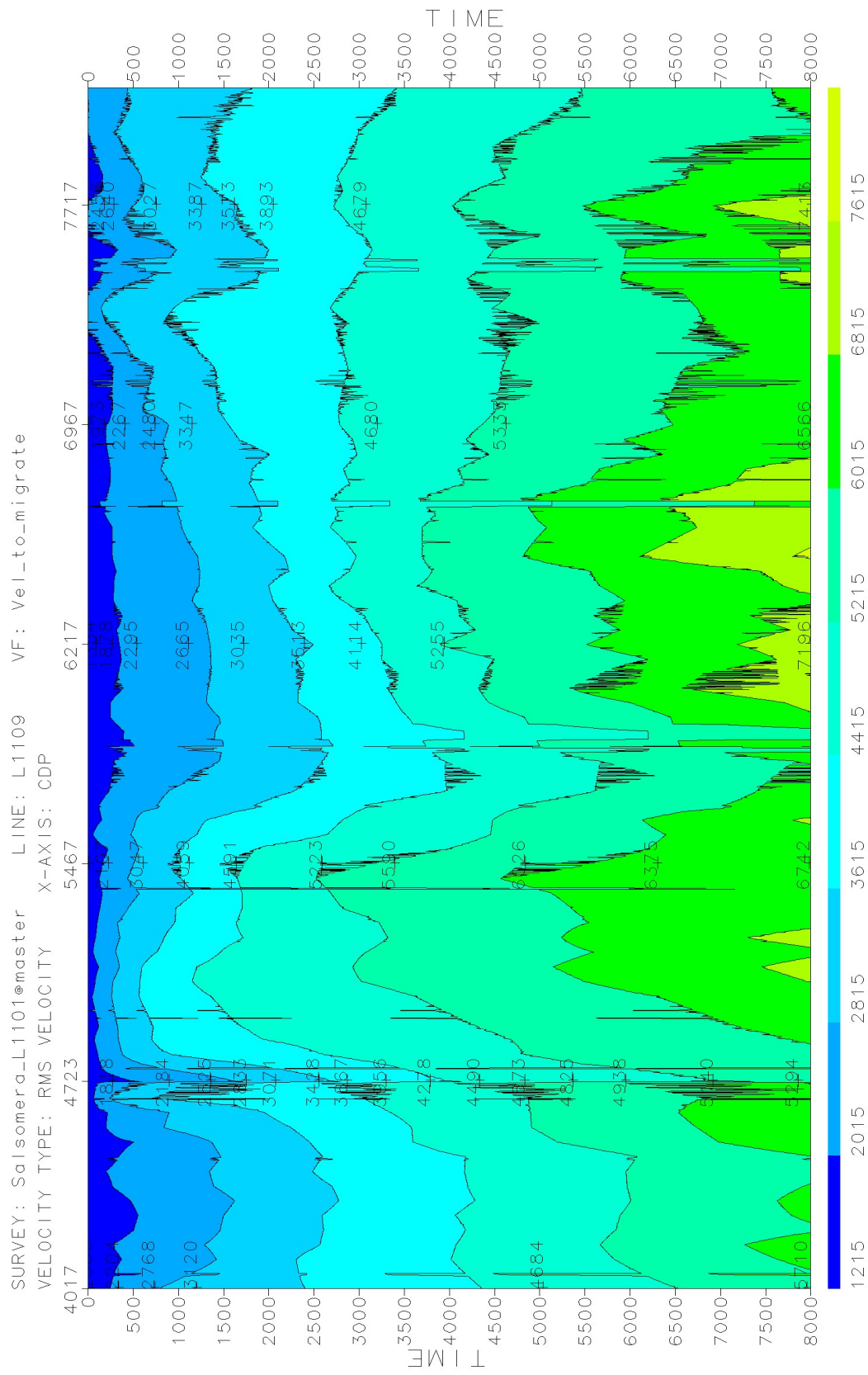


Fig. 25 –Campo de velocidades con el que se realizó la migración.

Una vez que ya se tenía el apilado de estáticas residuales dos (fig. 22), con sus correspondientes velocidades (Fig. 23), se procedió a realizar las pruebas de respuesta al impulso con los diferentes algoritmos de migración sobre la línea L1113. Se seleccionó el CDP 4712 de este apilado, se agregaron 1300 trazas con amplitud nula antes y después de dicho CDP para poder realizar las pruebas.

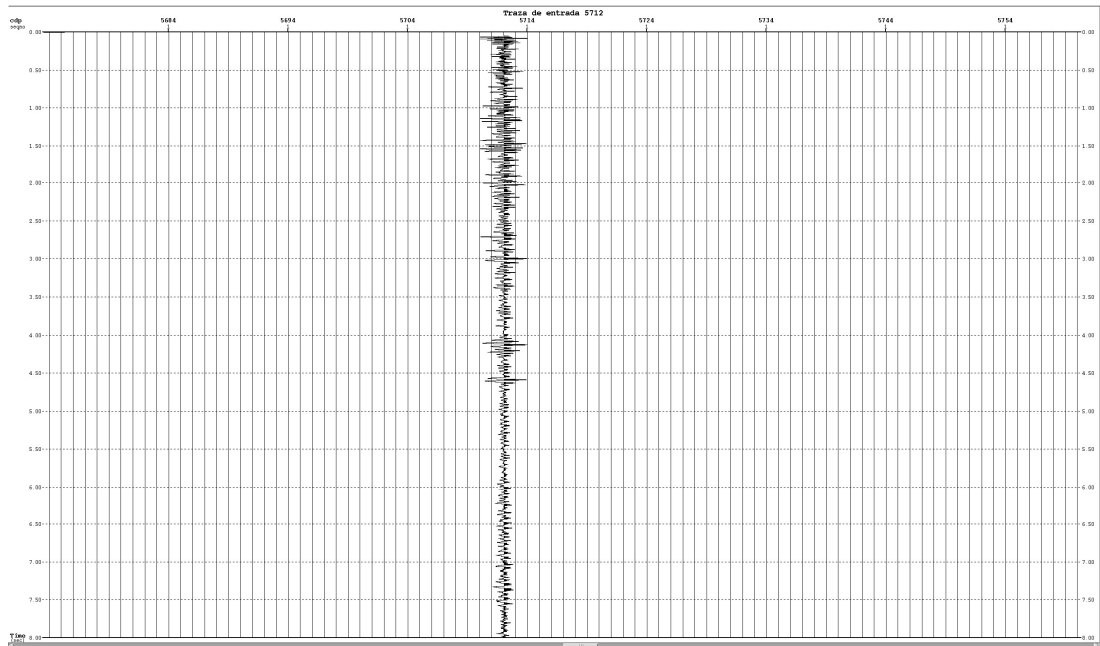


Fig.26 – Traza 4712 para realizar pruebas de respuesta al impulso

Se realizaron pruebas para cada algoritmo de migración: Kirchhoff, Wave Equation Migration (WEM) y Omega X, con la finalidad de poder parametrizar cada módulo con el que se realizaría la migración y observar las condiciones del campo de velocidades.

Para el caso de Kirchhoff fue necesario hacer pruebas para determinar el buzamiento, así como el suavizado horizontal (no. de trazas) y vertical (milisegundos) del campo de velocidades. Con Omega X fue necesario determinar el rango de frecuencias, el buzamiento y el suavizado vertical del campo de velocidades. Se intentaron realizar estas pruebas para el algoritmo WEM, sin embargo el modulo del software con el que se realizó el procesado no lo permitió, por lo que se llegó al acuerdo de tomar parámetros muy semejantes o iguales a los arrojados en las pruebas para los otros dos algoritmos.

Pruebas de respuesta al impulso para el algoritmo Kirchhoff

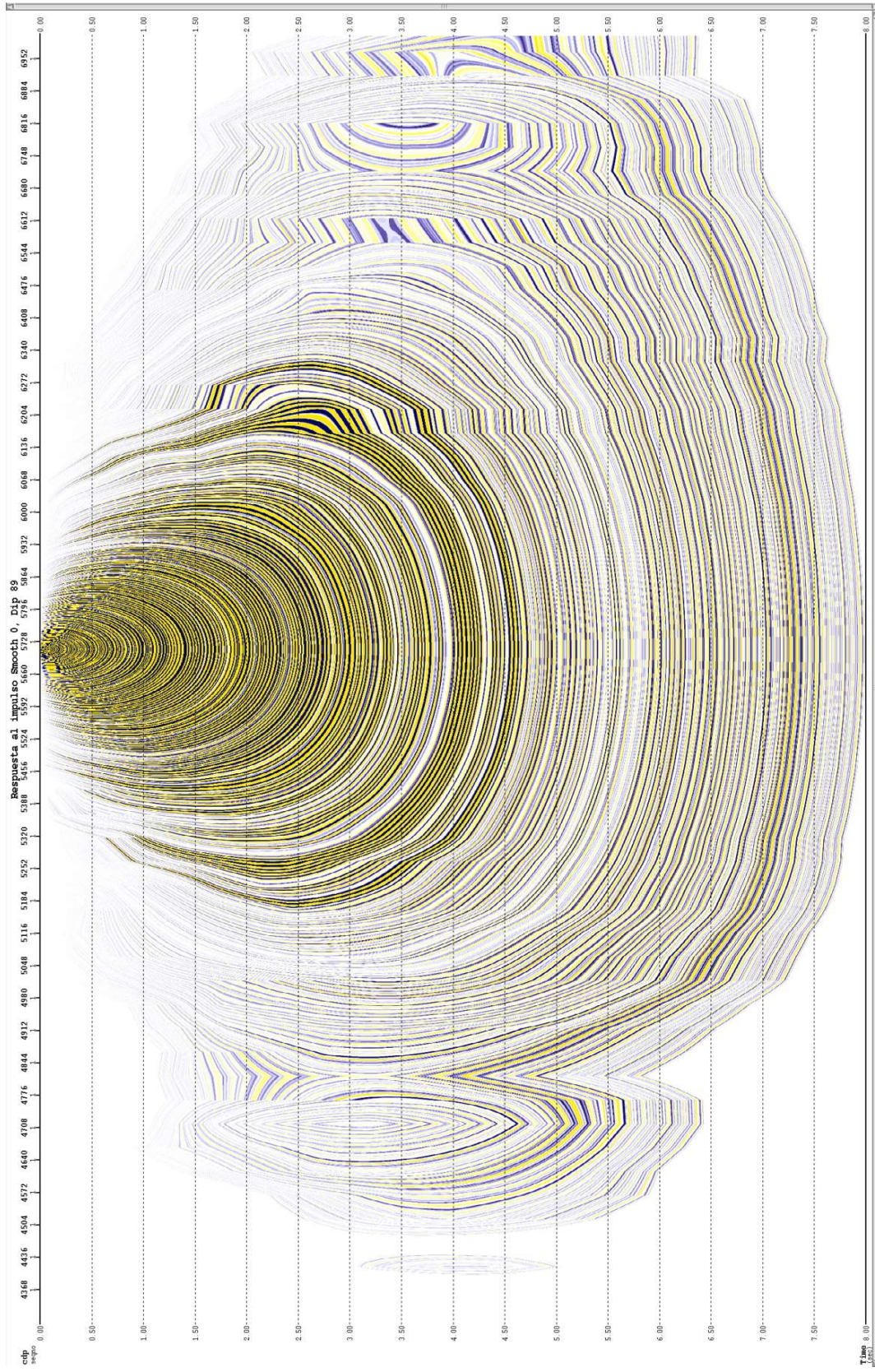


Fig. 27—Respuesta al impulso Kirchhoff con un buzamiento de 89°, sin suavizar el campo de velocidades.

Pruebas de respuesta al impulso para el algoritmo Kirchhoff

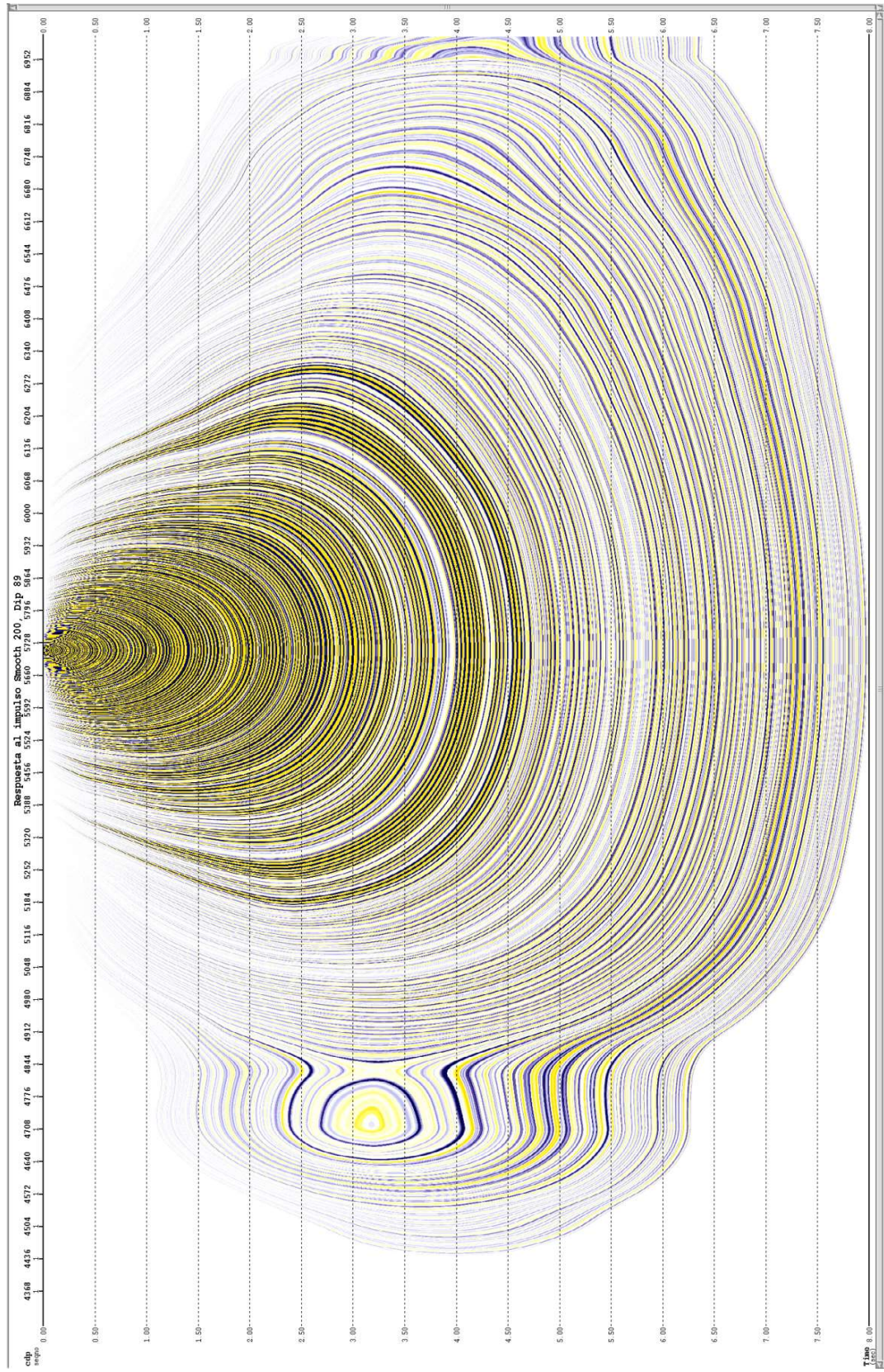


Fig. 28— Respuesta al impulso K con buzamiento 89° con suavizado horizontal de 200 trazas al campo de velocidad.

Pruebas de respuesta al impulso para el algoritmo Kirchhoff

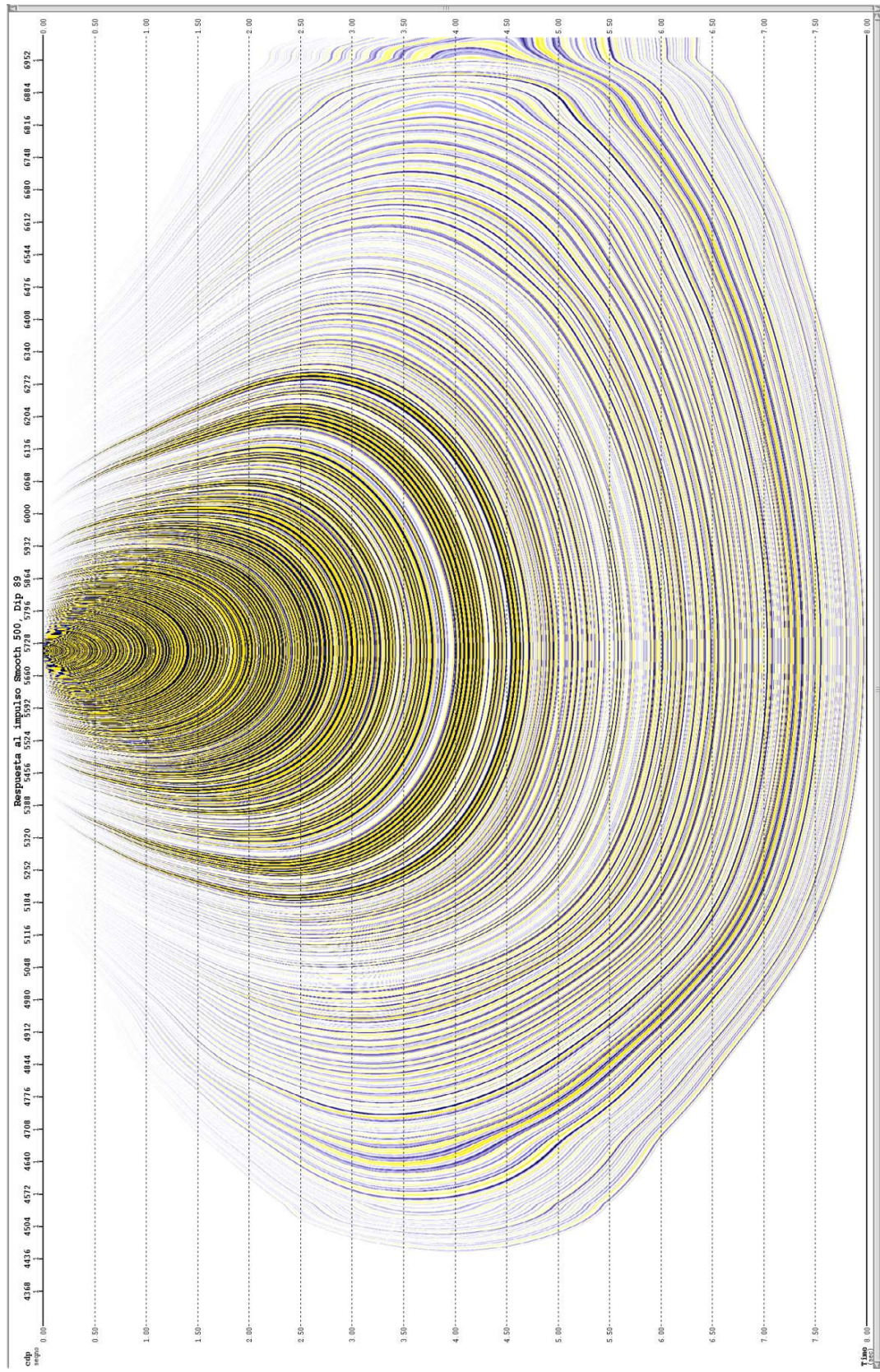


Fig. 29— Respuesta al impulso K con buzamiento 89° con suavizado horizontal de 500 trazas al campo de velocidad.

Pruebas de respuesta al impulso para el algoritmo Kirchhoff

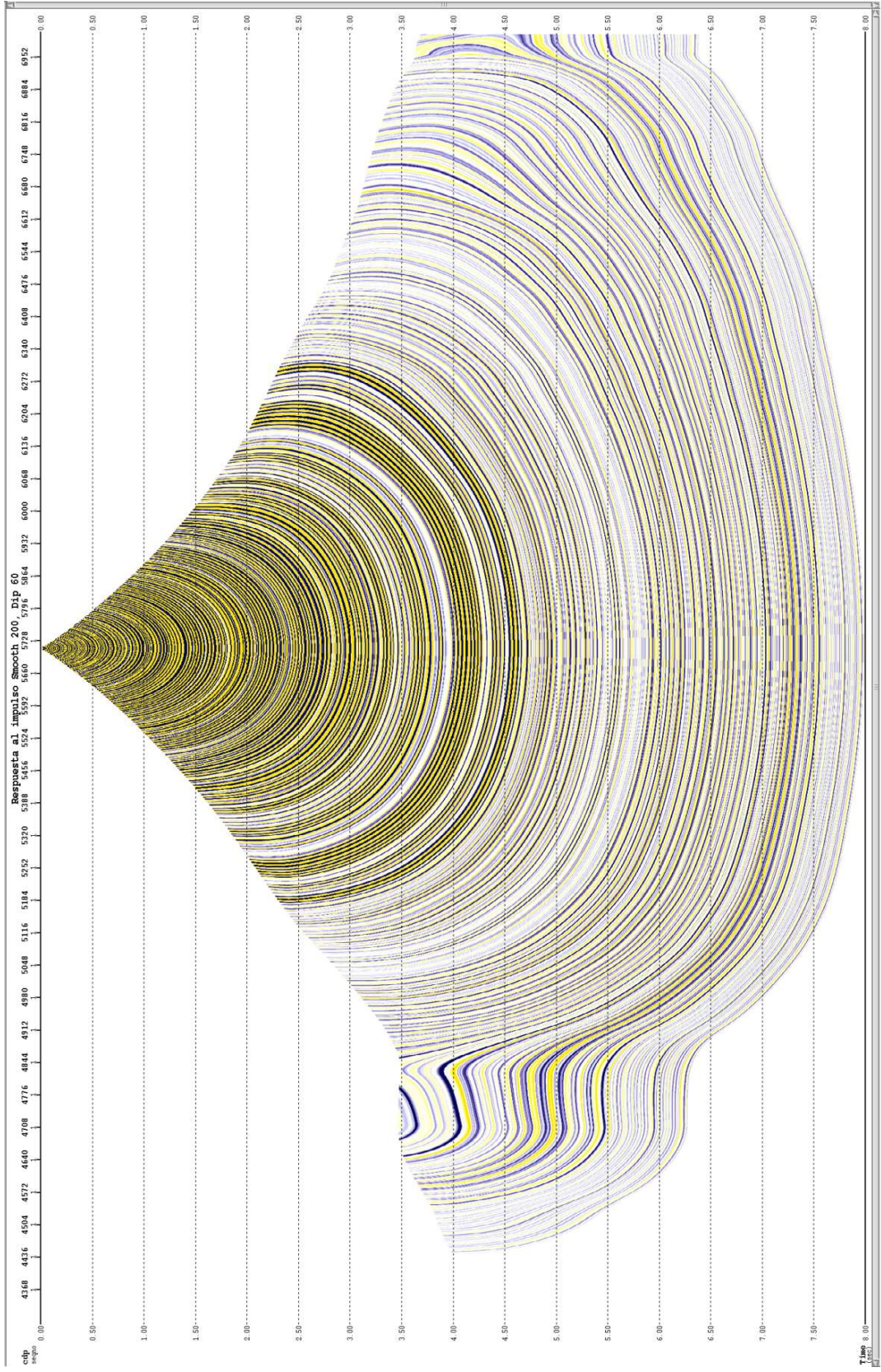


Fig. 30— Respuesta al impulso K con buzamiento 60° con suavizado horizontal de 200 trazas al campo de velocidad.

Pruebas de respuesta al impulso para el algoritmo Kirchhoff

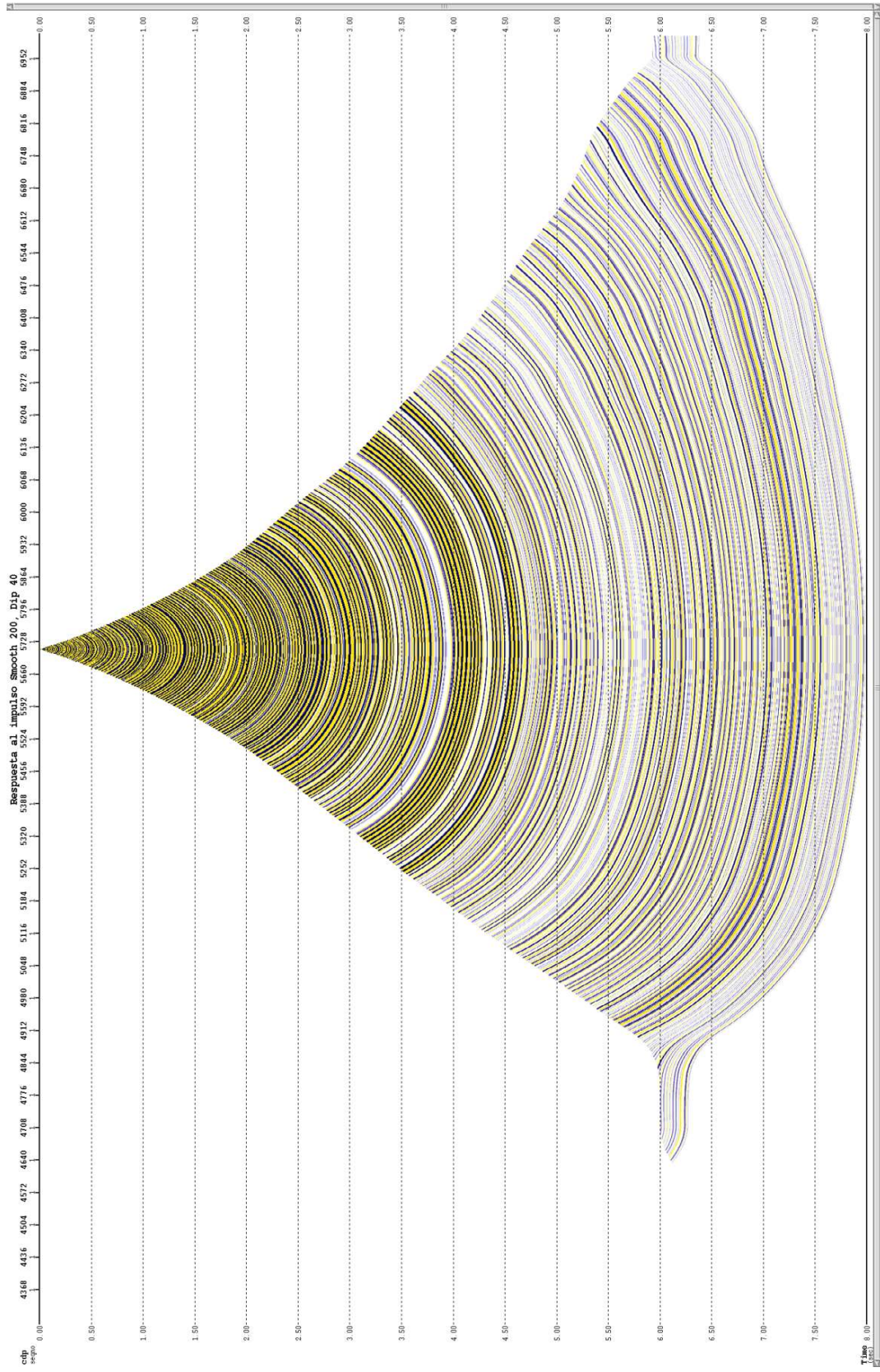


Fig. 31— Respuesta al impulso K con buzamiento 40°, con suavizado horizontal de 200 trazas al campo de velocidad.

Respuesta al impulso para el algoritmo Omega X

Para parametrizar este módulo se hicieron pruebas a fin de determinar el suavizado del campo de velocidades, la pendiente con la que se deben migrar los datos y el rango de frecuencias.

Para el suavizado de velocidades, primero se hicieron pruebas en sentido horizontal, los valores se variaron entre 100 trazas (que es el valor por default) y 500 trazas, sin embargo se observó los resultados eran muy similares, por lo que se decidió dejar trabajar con el valor de 100.

Posteriormente se hicieron pruebas en sentido vertical, al igual que en el caso anterior se tomaron valores de 100 (fig.32), 300 (fig.33) y 500 ms (fig.34). En este caso se seleccionó el valor de 500 ms, al verse una mejora en la imagen (ver comparación en los recuadros rojos).

Es importante mencionar que en las pruebas realizadas en los dos casos anteriores se tomaron valores de pendiente de 65 a 70° y un rango de frecuencias de 5 a 70 Hz.

Por último se realizaron pruebas con diferentes valores de pendientes: 40°, 55-60°, 60-65°, 65-70°, ya que este método solo funciona con esos valores.

Para esta última prueba se seleccionó el rango de pendiente de 65-70°.

Al ver que se obtenía una buena imagen con los parámetros ya seleccionados, ya no se procedió a realizar una prueba para estimar el rango de frecuencias con el que debía realizarse la migración, se dejaron los valores de 5 a 70 Hz.

Pruebas de respuesta al impulso para el algoritmo Omega X

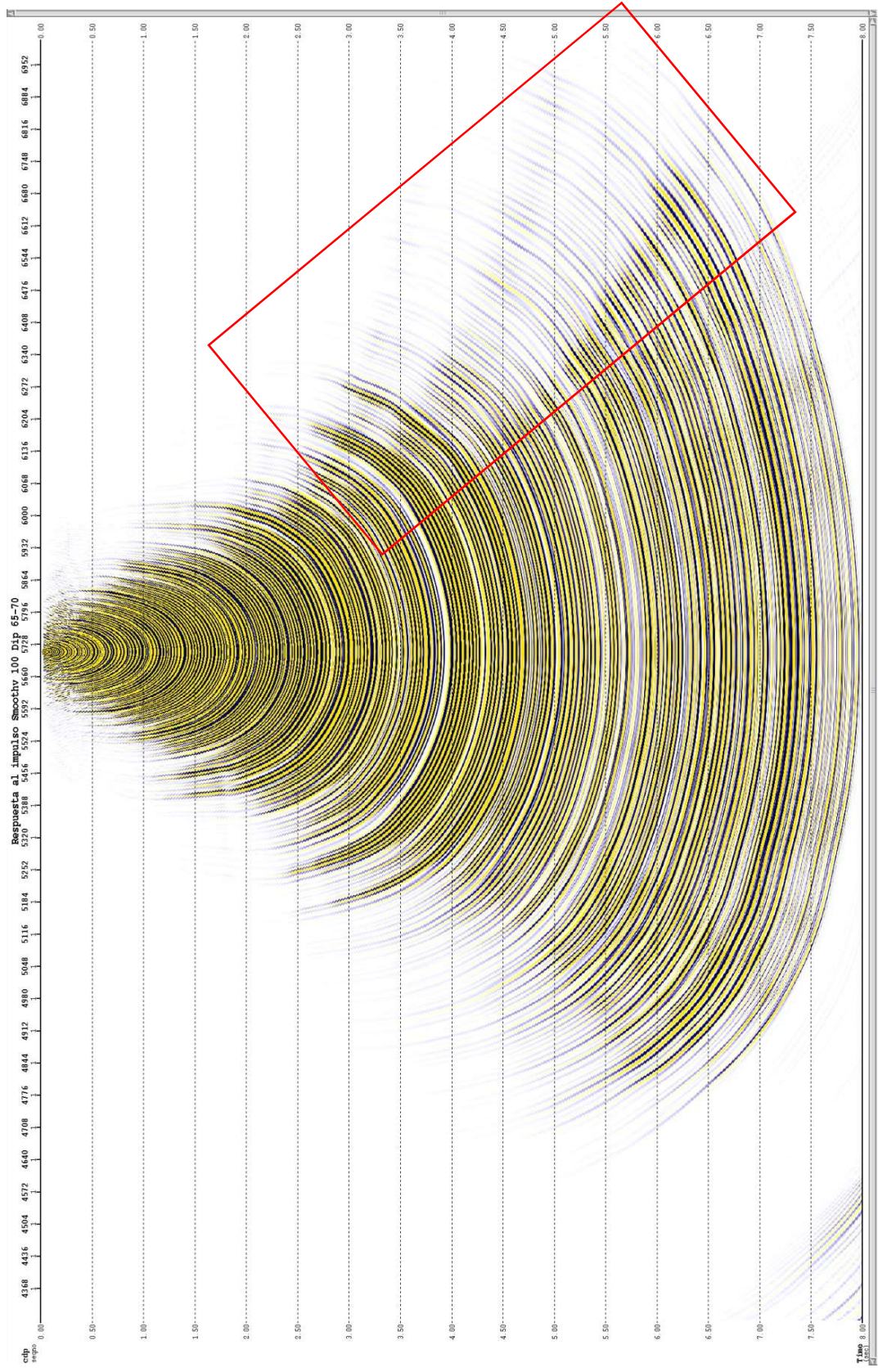


Fig.32— Respuesta al impulso ω X con buzamiento 65-70°, con suavizado vertical de 100 trazas al campo de velocidad.

Pruebas de respuesta al impulso para el algoritmo Omega X

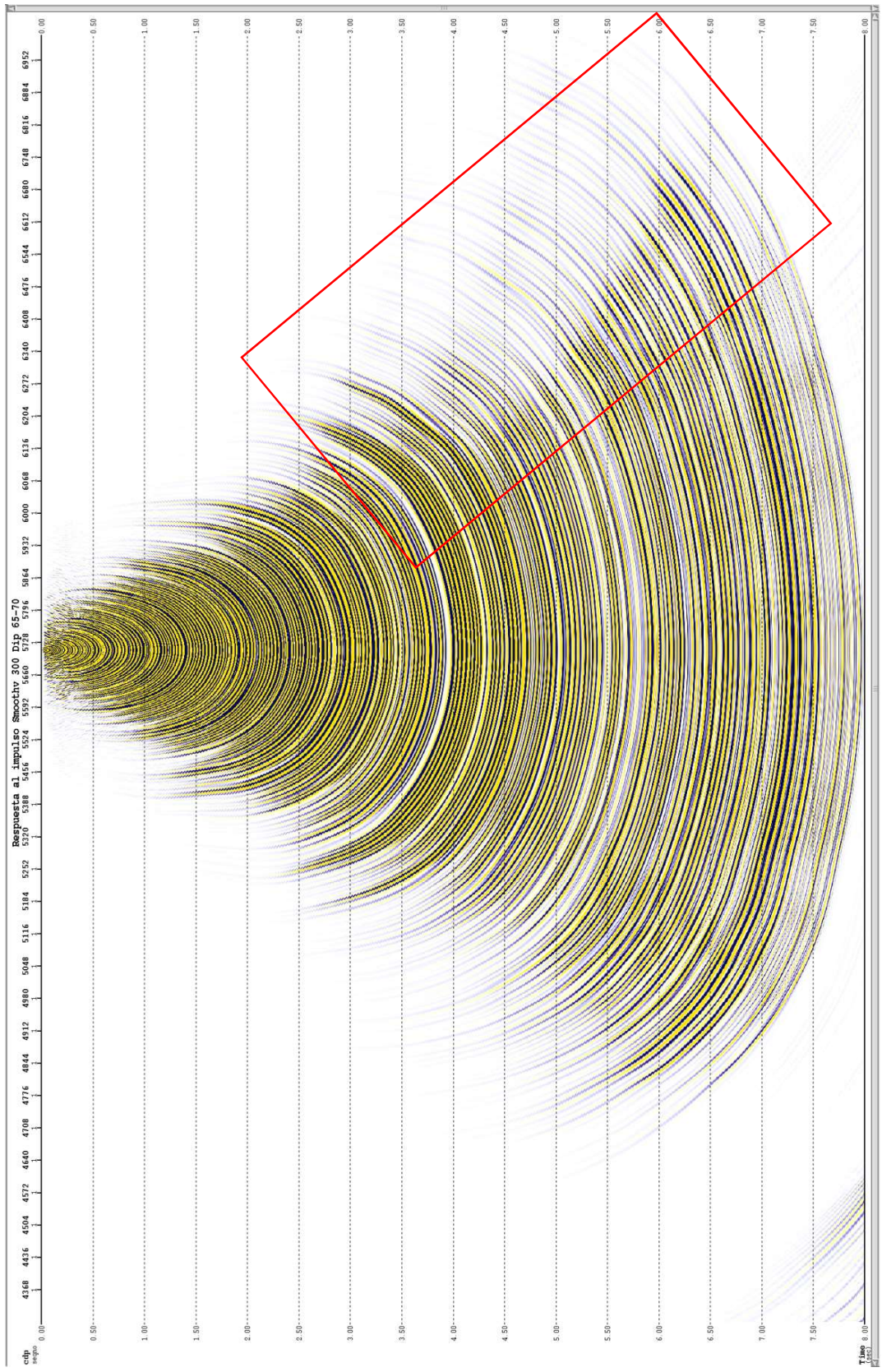


Fig. 33— Respuesta al impulso ω X con buzamiento 65-70°, con suavizado vertical de 300 trazas al campo de velocidad.

Pruebas de respuesta al impulso para el algoritmo Omega X

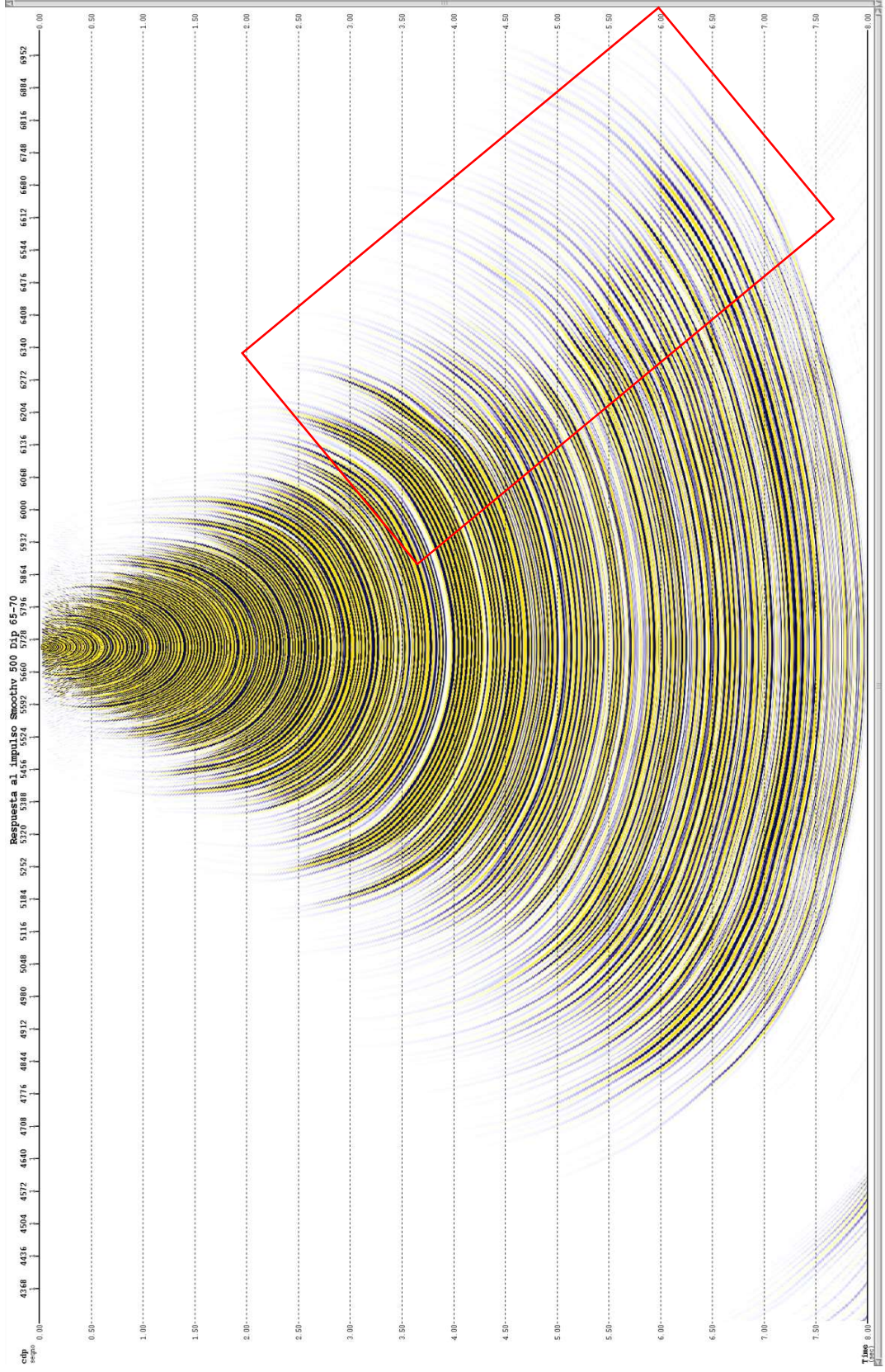


Fig. 34— Respuesta al impulso ω X con buzamiento 65-70°, con suavizado vertical de 500 trazas al campo de velocidad.

Pruebas de respuesta al impulso para el algoritmo Omega X

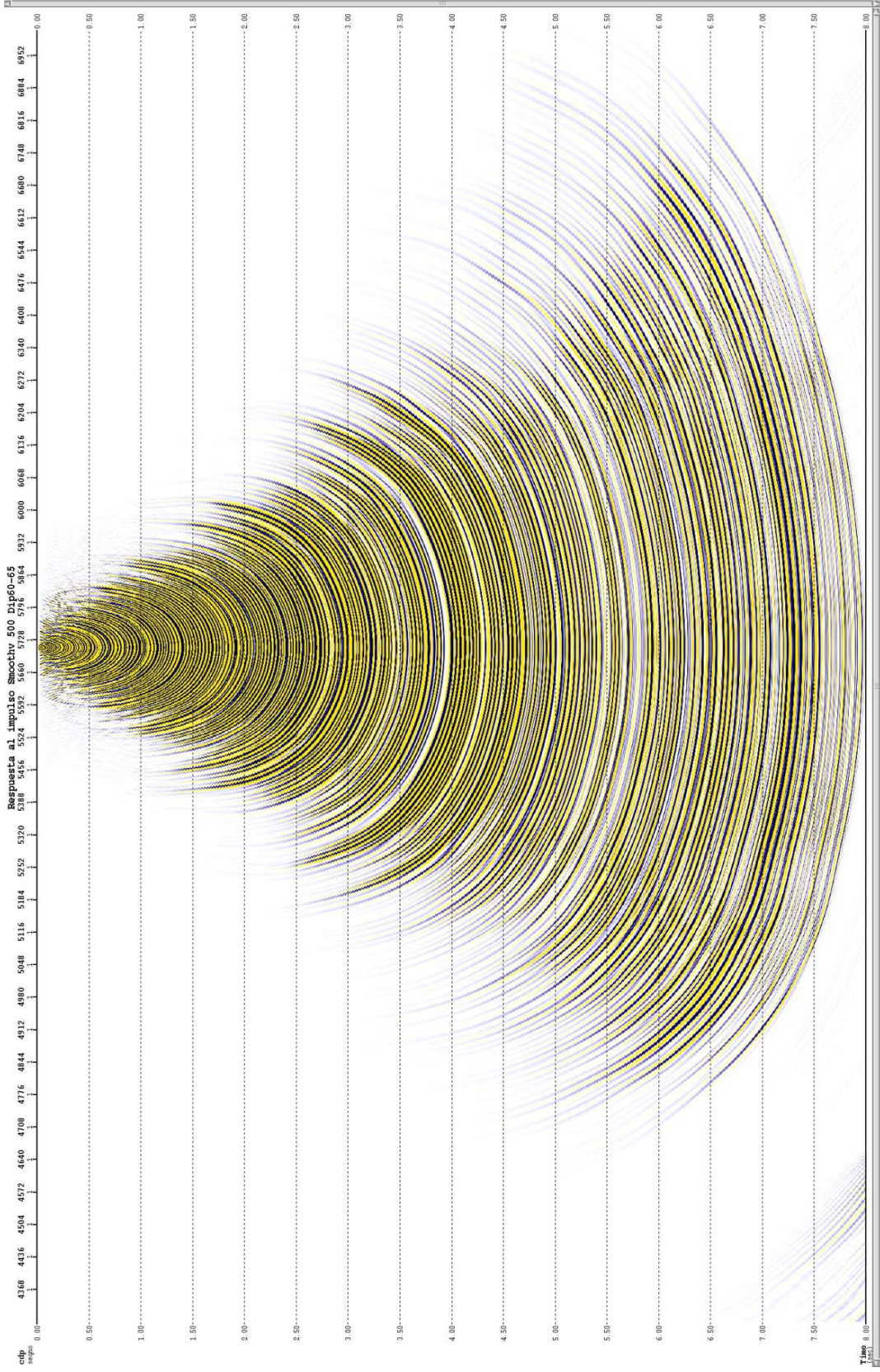


Fig. 35— Respuesta al impulso ω X con buzamiento 60-65°, con suavizado vertical de 500 trazas al campo de velocidad.

Pruebas de respuesta al impulso para el algoritmo Omega X

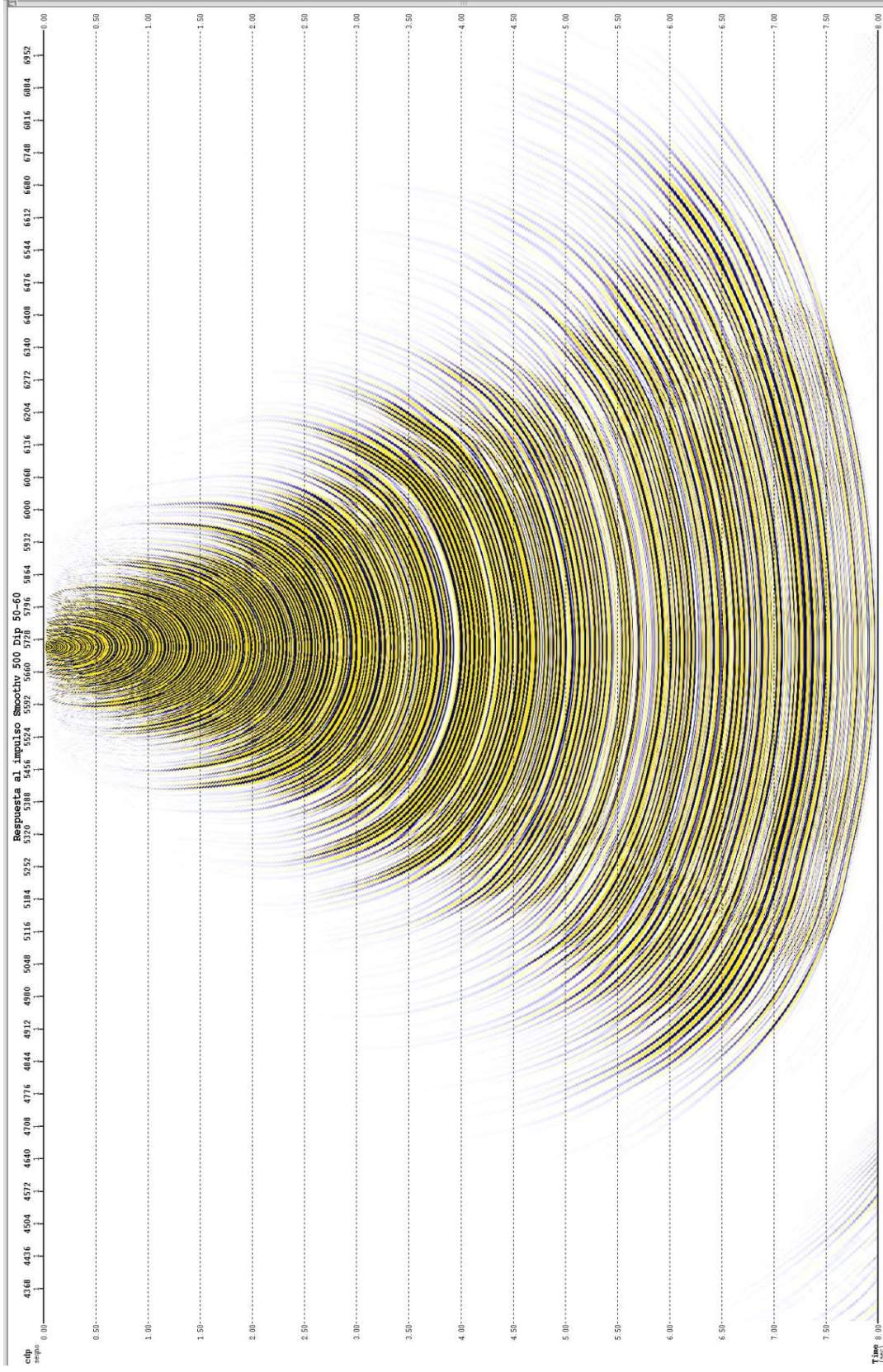


Fig. 36— Respuesta al impulso ω X con buzamiento 55-60°, con suavizado vertical de 500 trazas al campo de velocidad.

Pruebas de respuesta al impulso para el algoritmo Omega X

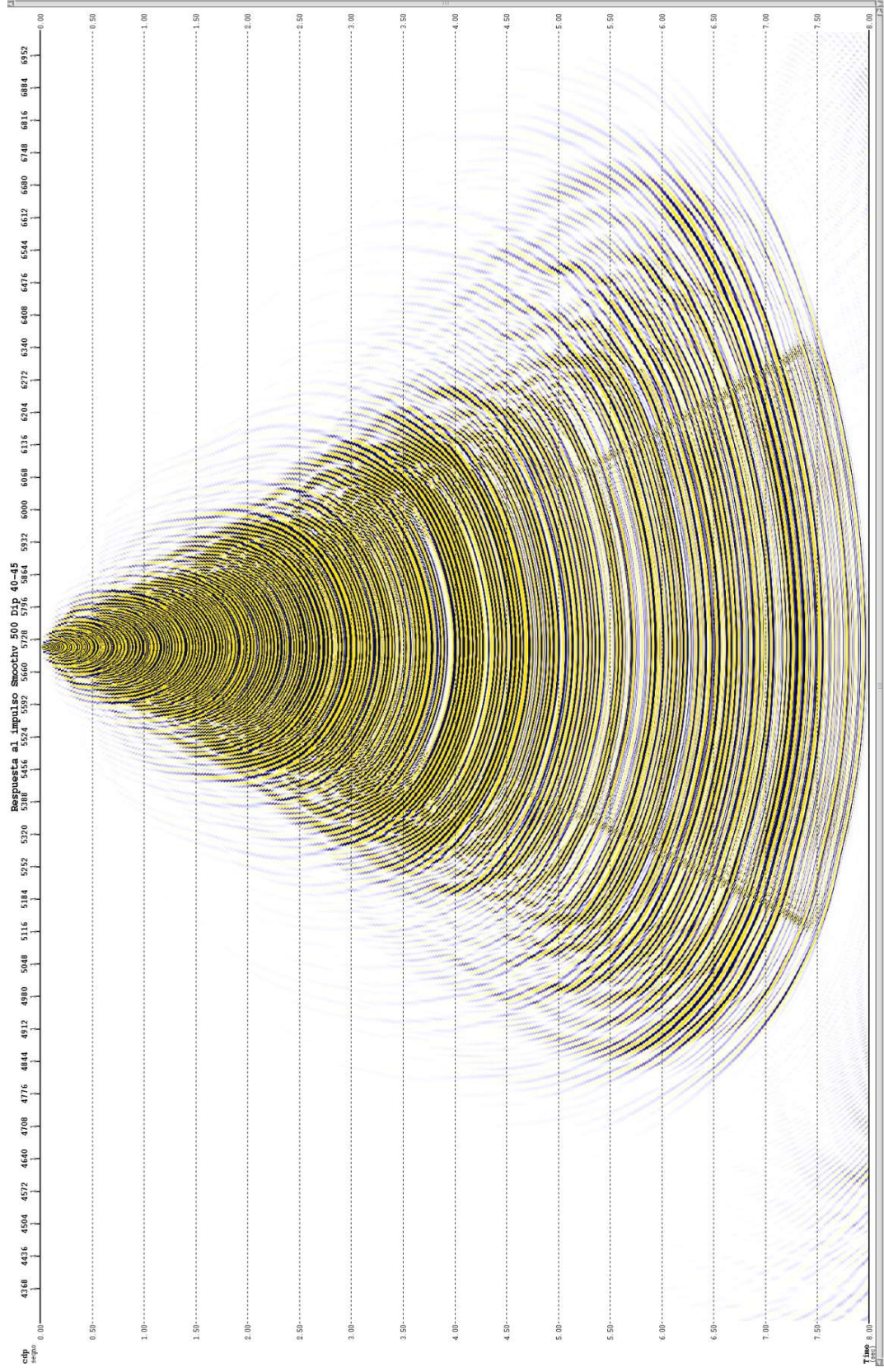


Fig. 37— Respuesta al impulso ω X con buzamiento 40-45°, con suavizado vertical de 500 trazas al campo de velocidad.

Para la realización de la *migración* con los diferentes algoritmos, se seleccionaron los parámetros que hacían que la imagen se viera mejor definida, más clara, más coherente. Más adelante se muestra una tabla que contiene los parámetros y los valores que se utilizaron para cada método.

Los indicadores que permitieron comparar y evaluar la respuesta de los algoritmos de migración fueron:

1. Visualización de estructuras.
2. Continuidad de los reflectores.
3. Colapso de difracciones.
4. Relación señal-ruido.
5. Tiempo de cómputo.

RESULTADOS

A continuación se muestran las tablas que contienen los diferentes parámetros requeridos para la implementación de cada uno de los algoritmos aplicados en el presente trabajo.

Migración Kirchhoff

Numero de CDPs a migrar	4148
Distancia entre CDPs	12.5 m
Máxima pendiente	60°
Velocidad	Vel. To migrate
Suavizado horizontal	200 trazas
Suavizado vertical	200 ms

Tabla 2- Parámetros utilizados en la migración Kirchhoff

Migración Omega X

Distancia entre CDPs	12.5 m
Numero de CDPs a migrar	4148
Freq.min/ freq. Max	5-70 Hz.
Máxima pendiente	65-70°
Velocidad	Vel. To migrate
Suavizado horizontal	100 trazas
Suavizado vertical	500 ms
Longitud de capa	32 ms

Tabla 3- Parámetros utilizados en la migración Omega X

Migración WEM

Distancia entre CDPs	12.5 m
Máxima pendiente	60°
Velocidad	Vel. To migrate
Longitud de la capa	32 ms

Tabla 4- Parámetros utilizados en la migración WEM

Migración Kirchhoff post apilado de la línea L1109

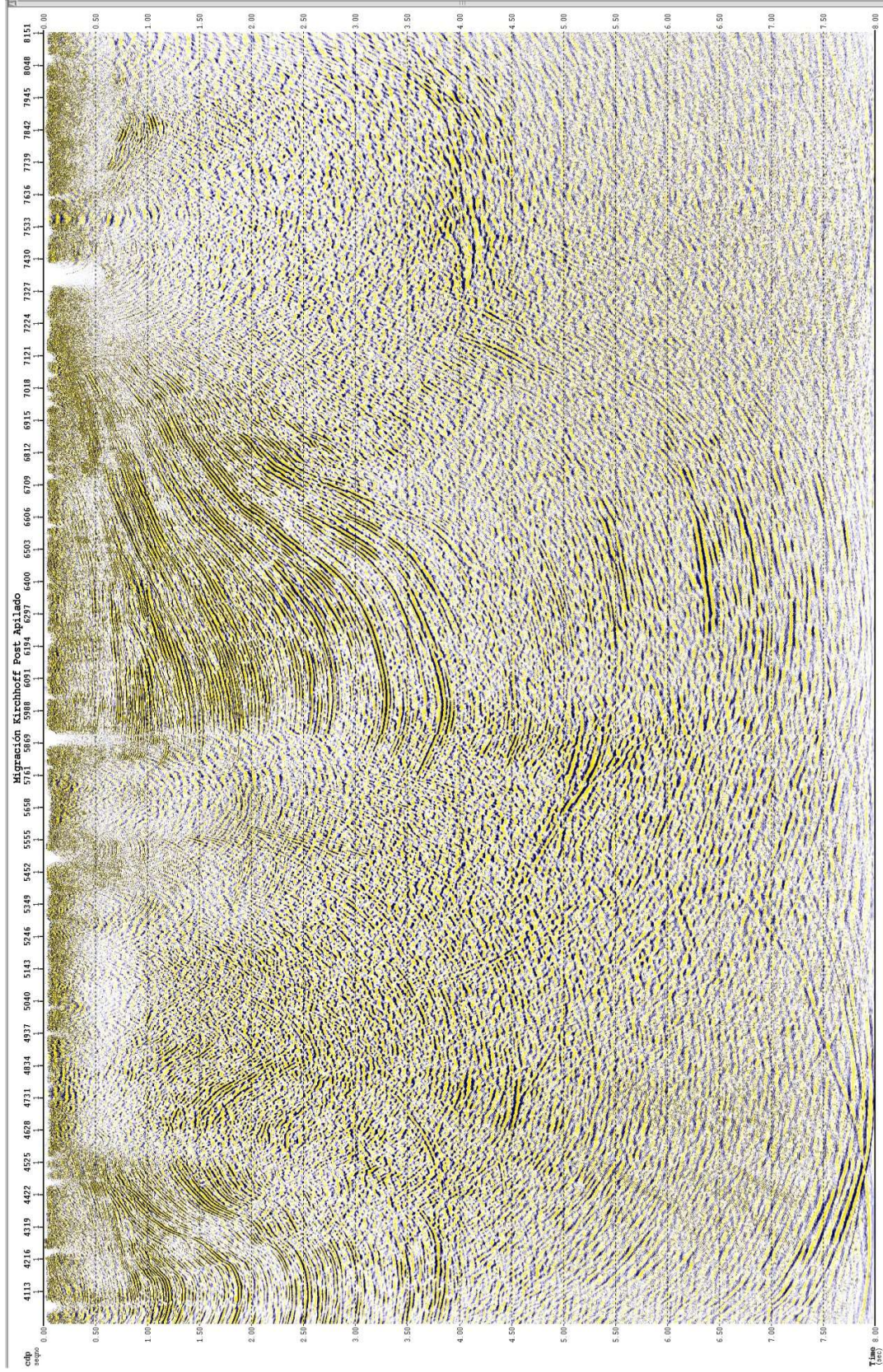


Fig. 38— Migración K con un suavizado horizontal de 200 trazas al campo de velocidades, con pendiente máxima de 60°.

Migración Omega X post apilado de la línea L1109

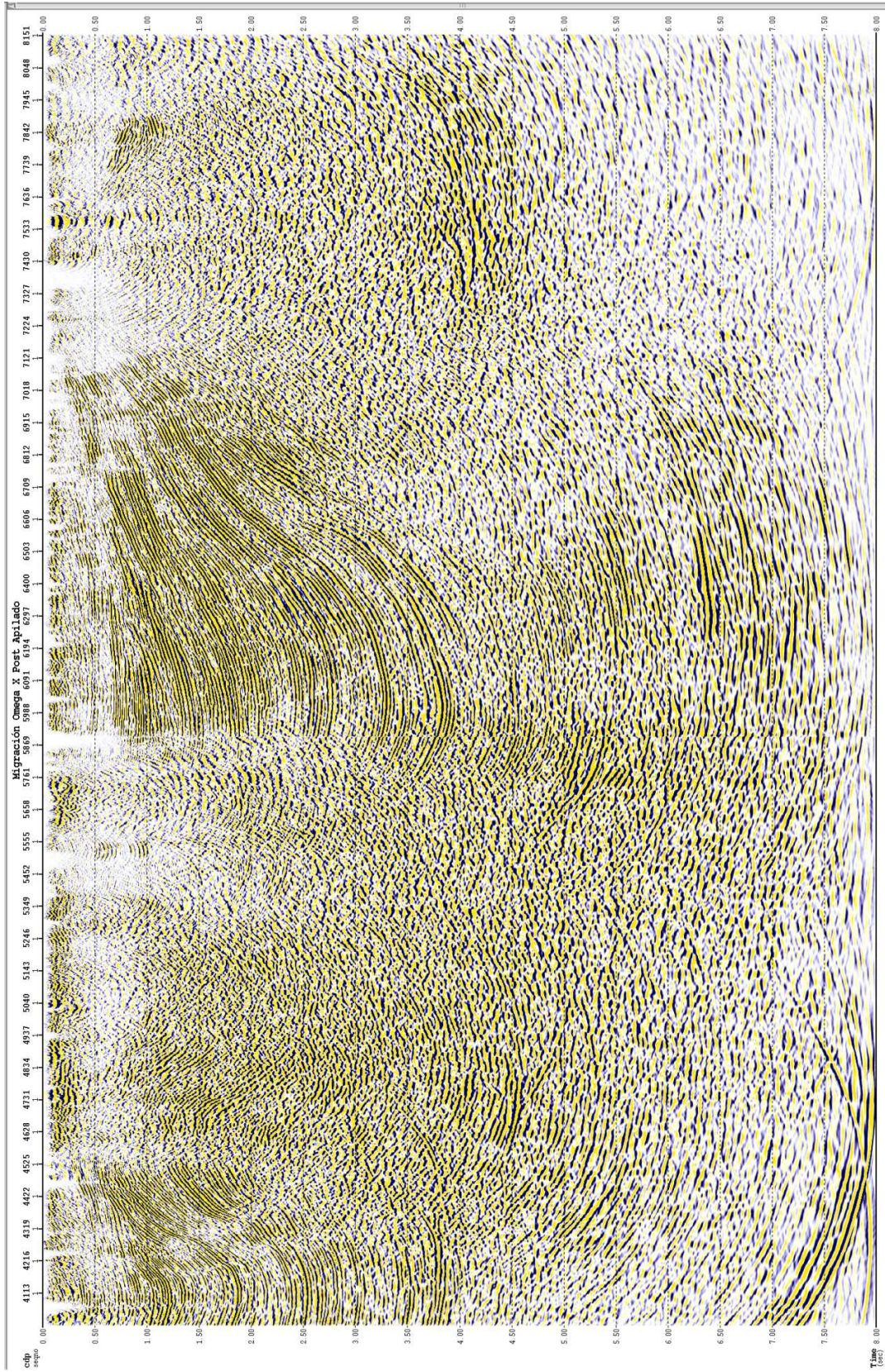


Fig. 39— Migración ω X con un suavizado vertical de 500 ms al campo de velocidades, con pendiente máxima de 65-70°.

Migración WEM post apilado de la línea L1109

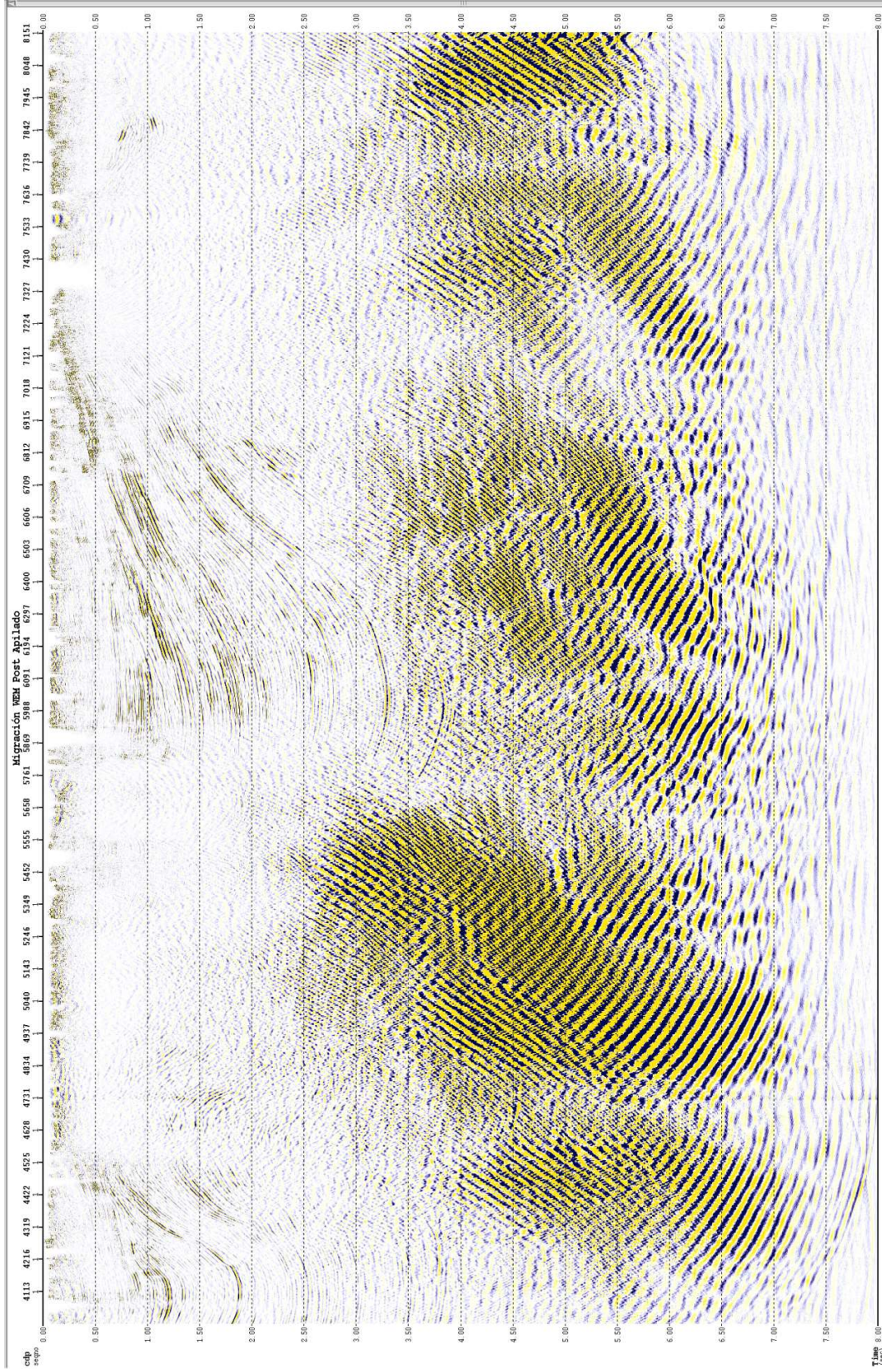


Fig. 40— Migración WEM con pendiente máxima de 60°.

Migración Kirchhoff post apilado de la línea L1113

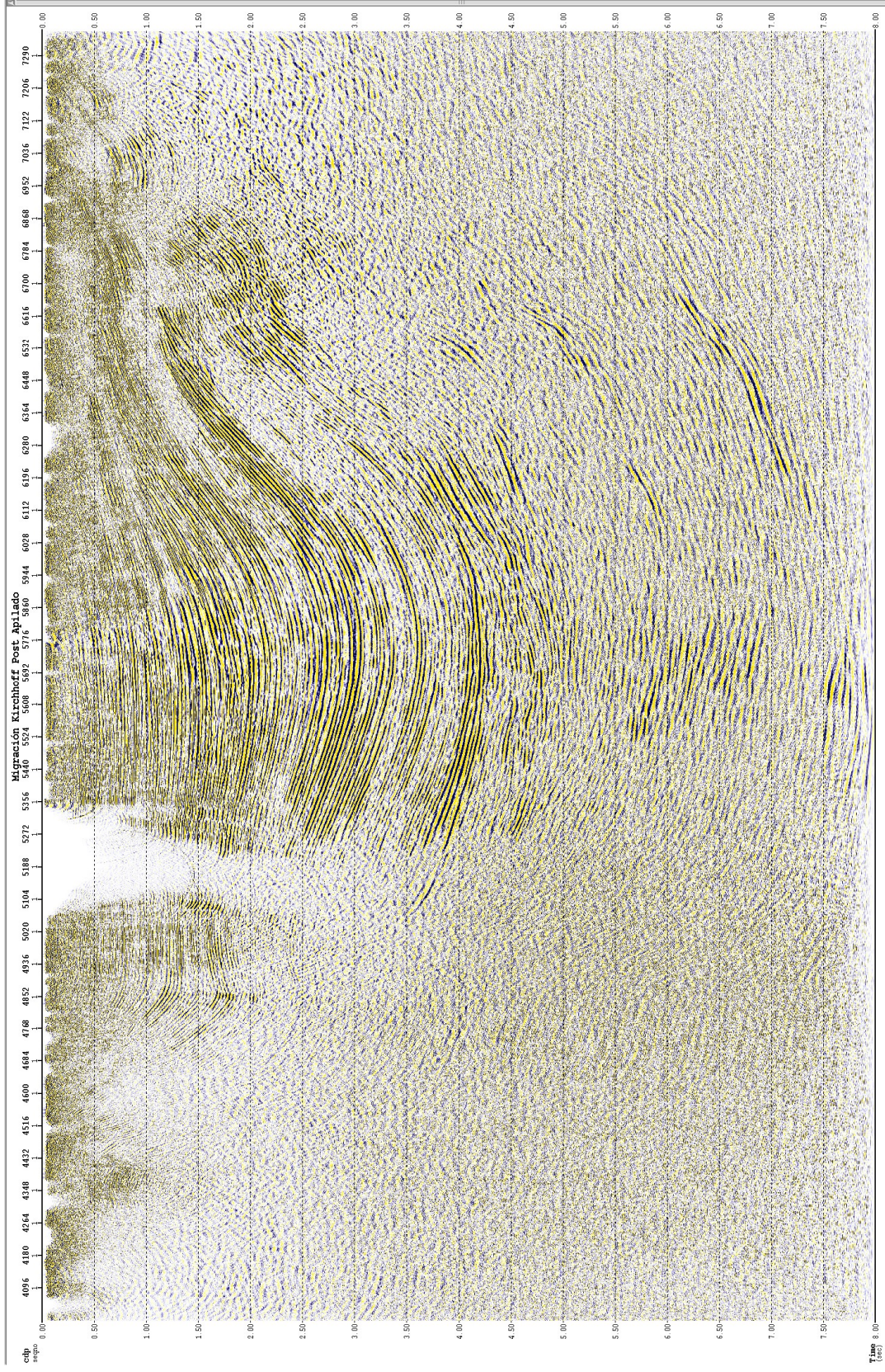


Fig. 41– Migración K con un suavizado horizontal de 200 trazas al campo de velocidades, con pendiente máxima de 60°.

Migración Omega X post apilado de la línea L1113

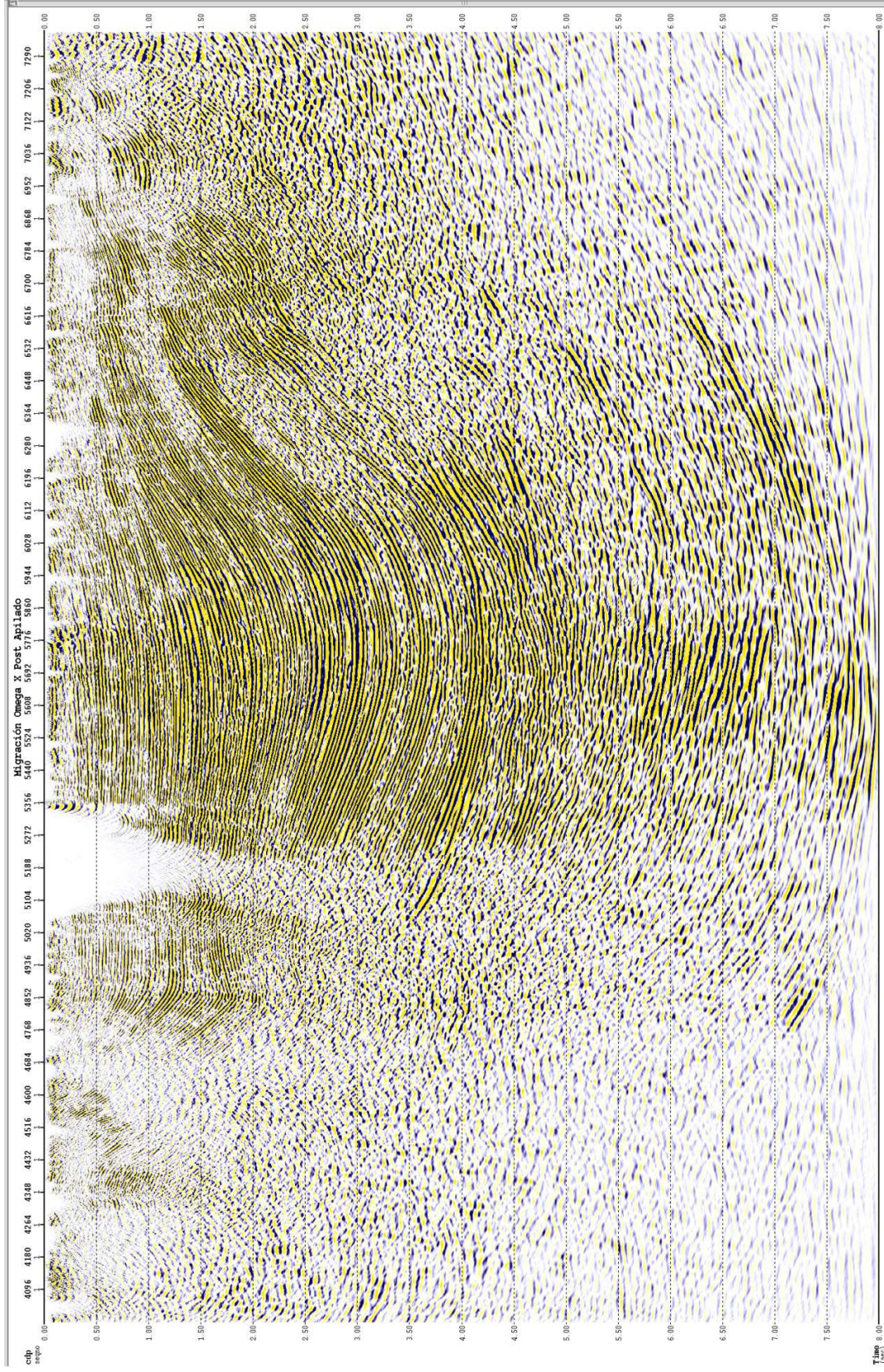


Fig. 42– Migración ω X con un suavizado vertical de 500 ms al campo de velocidades, con pendiente máxima de 65-70°.

Migración WEM post apilado de la línea L1113

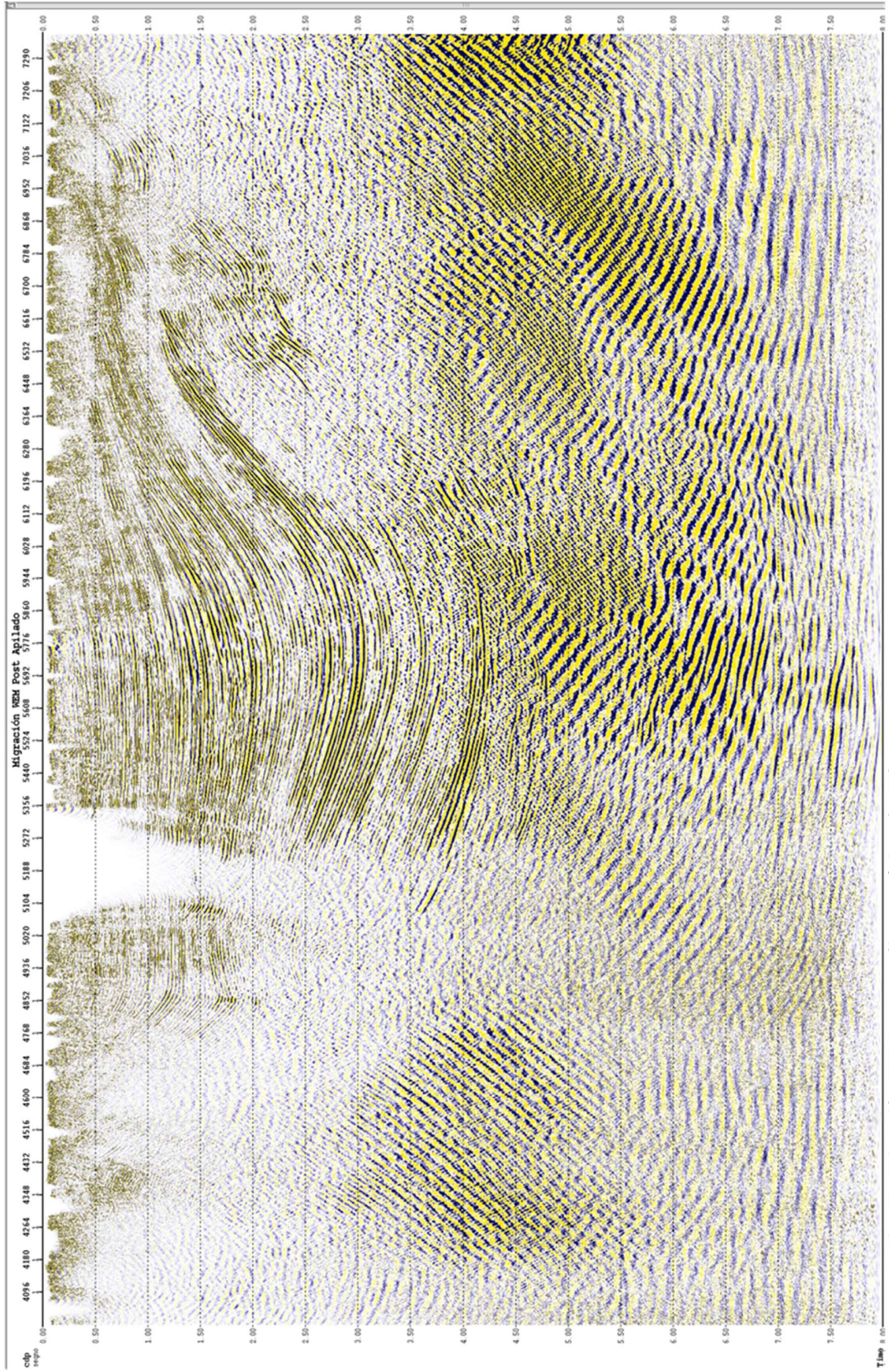


Fig. 43— Migración WEM con pendiente máxima de 60°.

Análisis de resultados

Si bien, a lo largo de la realización de las pruebas y finalmente al ejecutar la migración post apilado, se observó que el algoritmo Kirchhoff es muy sensible a las variaciones laterales de velocidad (esto puede apreciarse en la imagen generada por la migración de la línea L1113 entre los CDP 6200 y 6800), por lo que fue necesario aplicar un suavizado al campo de velocidades en esta dirección. En cuanto a la visualización de estructuras y continuidad de los reflectores, este algoritmo tuvo resultados bastante buenos al lograr reubicar los eventos y definir pliegues y fallas presentes en la zona de estudio, colapsa de manera satisfactoria las difracciones y la relación señal-ruido que se obtuvo en las dos imágenes (L1109 y L1113) fue bastante buena, ya que los eventos logran verse claramente y el realce de ruido fue mínimo. De los tres métodos este fue el que demora más en procesar la información, sin embargo, el tiempo que requirió para generar la imagen del subsuelo fue corto (equipo de procesado GPU).

En cuanto al algoritmo Omega-X es importante mencionar que es muy limitado en cuanto al parámetro de la pendiente, ya que solo puede migrar con valores de pendientes de 40-50°, 55-60°, 60-65° y 65-70°. Sin embargo, este método genera buenos resultados aun cuando se tienen cambios de velocidad en dirección horizontal. En las imágenes generadas por este algoritmo, se visualizan de manera clara las estructuras, sin embargo es un método que no logró definir de manera óptima los estratos más someros (por encima de 1.5 s). Realizó ruido de baja frecuencia el cual no permite ver la continuidad de los eventos, por lo que la relación señal- ruido no fue muy buena. Al igual que el algoritmo anterior logra colapsar las difracciones en su totalidad; en cuanto al tiempo de cómputo que se requirió para procesar la información fue menor que Kirchhoff pero mayor que WEM.

Para el caso de la migración con el algoritmo WEM, se observó que este método no genera buenos resultados cuando el campo de velocidades es complejo, es decir en presencia de inversión de velocidades o cuando éste presenta cambios abruptos en cualquier dirección. Puede observarse que este algoritmo no tuvo buenos resultados en cuanto a la generación de imágenes: la relación señal ruido fue muy

mala, en la línea L1109 no logró definir los estratos y de la mitad de la imagen hacia abajo no logra visualizarse nada, en la imagen de la línea L1113 se obtuvieron mejores resultados, sin embargo, estos no son considerables.

El ruido que se observa en la parte inferior de las imágenes generadas por este algoritmo se asocia a la mala respuesta de este método antes los cambios abruptos de velocidades; en la línea L1113 define mejor los eventos debido a que el incremento en el campo de velocidades es más gradual que en el caso de la línea L1109.

WEM logró colapsar las difracciones de manera exitosa y el tiempo de proceso que requiere es mucho menor que los otros dos métodos, pero no generó buenos resultados para los datos con los que se contaba.

Indicadores para evaluación de algoritmos	Kirchhoff	Omega-X	WEM
Visualización de estructuras	✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓	✓
Continuidad de los reflectores	✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓
Colapso de difracciones	✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓
Relación señal-ruido	✓ ✓ ✓	✓ ✓	✓
Tiempo de computo	✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓

✓ ✓ ✓ ✓ Muy bueno.

✓ ✓ ✓ Bueno

✓ ✓ Regular

✓ Malo

Tabla 5. Comparación de los diferentes algoritmos de migración.

DISCUSIÓN

Con las condiciones del estudio, en cuanto a estructuras y campo de velocidades, se debió aplicar una migración Pre Stack en el dominio de la profundidad, sin embargo, se decidió aplicar una migración post apilado en tiempo en primera instancia, debido a que la información con la que se contaba estaba en el dominio del tiempo y ya no requería hacer la conversión a profundidad, y en segundo lugar por el tiempo de proceso que implica una migración después del apilado que antes de, es mucho más rápido el proceso post-stack.

Según Yilmaz (2001) al aplicar una migración post apilado en el dominio del tiempo el resultado esperado con las condiciones ya mencionadas era la iluminación y definición de los estratos que se encuentran por encima del cuerpo de sal, esto se debe a que la migración post stack en tiempo presenta un buen manejo de las velocidades conforme estas van incrementando gradualmente con la profundidad.

En caso de que se hubiera aplicado una migración Pre apilado en el dominio del tiempo los resultados esperados serían una definición de la cima del cuerpo de sal así como de los estratos que lo sobreyacen, debido al manejo de velocidades con incremento gradual aun con presencia de estructuras como sinclinales y anticlinales.

En una post apilado en el dominio de la profundidad se esperaría la definición de estratos, cima del cuerpo de sal y posibles fallas presentes en la zona, debido a que este tipo de migración ya considera una variación lateral de velocidad; y por último en el caso de una migración pre apilado en el dominio de la profundidad, debería definir adecuadamente estratos, fallas y fracturas así como delimitar el contorno del cuerpo de sal, ya que tiene un mejor manejo de cambios de velocidades en dirección horizontal y vertical, aún en presencia de estructuras más complejas.

Al aplicar los diferentes algoritmos de migración y en función de los resultados esperados, se observó que solo Kirchhoff logró definir de manera óptima los estratos que se encuentran por encima del cuerpo de sal, esto puede atribuirse al suavizado que se le aplicó al campo de velocidades, ya que como se menciona con

anterioridad, este algoritmo tiende a ser muy sensible a los cambios laterales de velocidad.

Los algoritmos basados en la solución de la ecuación de onda por diferencias finitas generaron resultados de baja calidad en comparación a Kirchhoff, sobre todo WEM, cuyos resultados están asociados principalmente al campo de velocidades: en primera instancia el modulo del software no permitió aplicar un suavizado a este, y en segundo lugar por los cambios tan abruptos que presentaba dicho campo tanto en sentido horizontal como vertical, ya que estas no son su condiciones óptimas de funcionamiento. (Yilmaz, 2001; Paradigm 2014.1)

Por último en el caso de Omega X, el realce de ruido de baja frecuencia pudo ser ocasionado por la presencia de amplitudes altas, las cuales pueden estar asociadas a algún tipo de evento. (Pdgm. 2014.1)

Con base en el planteamiento de problema, los resultados que se obtuvieron no fueron satisfactorios, ya que lo que se buscaba era un encontrar un método alternativo a Kirchhoff con el cual se pudiera realizar la migración y con el que se obtuvieran resultados similares sin importar la falla del módulo, sin embargo las imágenes generadas por los algoritmos basados en el método de diferencias finitas no se aproximan en calidad a la generada con el algoritmo Kirchhoff.

Actualmente la migración post apilado se utiliza muy poco como material interpretable, sin embargo sigue siendo usada como un control de calidad, es decir, como un punto de referencia o una imagen de la cual se pueden observar los eventos principales y de esta manera proceder a realizar una migración mucho más detallada y eficiente como lo es la pre apilado (PSTM).

CONCLUSIONES

Comparando las imágenes generadas por los diferentes algoritmos y con la ayuda de la Tabla 5, podemos concluir que el algoritmo que logra generar una mejor imagen del subsuelo con los datos de este estudio es Kirchhoff en un tiempo

relativamente rápido (Procesado con Unidad de Procesamiento Gráfico (GPU) NVidia K10 (equivalente a 24576 Cores)).

El algoritmo Omega X pudiera ser usado en casos en los que se tengan variaciones laterales de velocidad y en los que no pudiera ser posible realizar otro tipo de migración.

WEM por su lado, pudiera ser usada en casos en los que se requiera hacer una migración “rápida”, debido a que implica menos tiempo de proceso y por ende menor costo, en los casos en los que se cuente con un campo de velocidades simple.

RECOMENDACIONES

Se recomienda aplicar los tres algoritmos de migración a datos grabados en una zona con diferentes condiciones geológicas y que presenten una mejor relación señal-ruido, para ver la respuesta de los mismos ante diferentes situaciones.

De ser posible, aplicar nuevamente la migración a los datos con los diferentes algoritmos para medir los tiempos de cómputo requeridos por cada uno y de esta manera poder establecer una comparación numérica.

Se recomienda el estudio de cada uno de los algoritmos de manera más profunda, para conocer y determinar la causa de las diferencias de los resultados generados por estos, con base en su fundamento matemático.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Alexis Vásquez Jhonny, "ANÁLISIS DE DIFERENTES ALGORITMOS DE MIGRACIÓN POST- APILAMIENTO SOBRE DATOS SISMICOS BIDIMENSIONALES AL OESTE DEL ESTADO BARINAS", Tesis, Ing. Geofísico, Universidad Central de Venezuela, mayo 2010.

Benitez R. Halis, "EVALUACION DE METODOS DE MIGRACION SISMICA ANTES DEL APILAMIENTO EN PROFUNDIDAD BASADOS TANTO EN LA INTEGRAL DE KIRCHHOFF COMO EN LA ECUACION DE ONDA EN DATOS REALES (PROYECTO ORO NEGRO 07G 3D)", Tesis, Ing. Geofísico, Universidad Central de Venezuela, Caracas, octubre de 2012.

Claerbout. John F. 1985, "Imaging the Earth's Interior", Blackwell Scientific Publications, Standford, USA. Claerbout. John F. 1985, "Fundamentals of Geophysical Data Processing with Aplications of Petroleum Prospecting", Blackwell Scientific Publications, Standford, USA.

Claerbout. John F. 2010, "Basic Earth Imaging", Blackwell Scientific Publications, Standford, USA. Claerbout. John F. 2011, "Geophysical Soundings Image Construction", Blackwell Scientific Publications, Standford, USA.

Claerbout. John F. 2010, "Earth Soundings Analysis: Processing versus Inversion", Blackwell Scientific Publications, Standford, USA.

Fajardo Carlos, Castillo Villar Javier y Pedraza Cesar, enero- junio 2013, "Reducción de los tiempos de computo de la Migración Sísmica usando FPGAs y GPGPUs: Un artículo de revisión", Ing. Cienc., Vol 9, no. 17, pp. 261-293.

Farmer P, Gray S, Whitmore D, Hodkiss G, Pieprzak A, Ratcliff D y Whitcombe D; "Structural Imaging: Toward a Sharper Subsurfce View", Oilfield Review 5, no. 1. (Enero de 1993), pp. 28-41

Hatton L, Worthington M, Makin J, "Seismic Data processing, "Blackwell Scientific Publications", 1988.

Herrera Rivero Carlos Manuel, "SECUENCIA BASICA DE PROCESAMIENTO SISMICO DE DATOS COMPLEJOS 2D, LINEA ME-90B-27, MATORIN, EDO. MONAGAS.", Tesis, Ing. Geofísico, Universidad Simón Bolívar, octubre 2005.

Herrera Yajaira y Cooper Norman, "MANUAL PARA LA ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SÍSMICA TERRESTRE Y SU APLICACIÓN EN COLOMBIA", Universidad Nacional de Colombia, enero 2010.

Kearey Philip, Books Michael, Hill Ian, "An introduction to Geophysical Exploration, Third Edition, 2002, pp. 31 &32.

Lowrie William, "Fundamentals of Geophysics", Second Edition, Cambridge University, 2007.

Paradigm 2014.1, "Seismic Data Processing with Echos", Training Guide, United States of America.

Sheriff. Robert E., et al, 1995, "Exploration Seismology", Second Edition, Cambridge University Press, New York, USA.

Uwe Albertin, Jerry Kapoor, Richard Randall, Mart Smith, Gilian Brown, Chris Soufleris, Phil Whitfield, Fiona Dewey, Jim Farnsworth, Gary Grubitz, Mark Kemme; "La era de las imágenes en escala de profundidad", Oilfield Review (abril de 2002), pp. 1-5.

Valdés Bernal Luis Antonio, "Procesamiento Sísmico mediante la Migración Pre-Apilado en Tiempo (PSTM) aplicada en una línea del área de Ébano Norte 2D". Tesis, Lic. Ing. Geofísica, UNAM, Fac. Ing., 2013.

Yilmaz. Özdoğan. 2001, "Seismic Data Analysis, Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data", Tulsa, Oklahoma, USA, Society of Exploration Geophysicists

Yilmaz. Özdoğan. 1987, "Seismic Data Processing", Tulsa, Society of Exploration Geophysicists.

Páginas WEB:

Curso de sísmica 2D: <http://es.scribd.com/doc/29077671/Sismica-2D#scribd>.

Curso de sísmica: <http://slideplayer.it/slide/599114/>.

Blog: <http://seismicreflections.globeclaritas.com/>

ANEXO 1)

Glosario

Apilado: con la finalidad de obtener una mejor relación señal-ruido, se suman distintos disparos pertenecientes a un mismo punto de reflexión o al mismo punto común medio, obteniéndose una traza para cada CDP con menor ruido y mayor calidad de la señal. El apilado comprime la dimensión del offset a valor cero, a manera de simular el efecto de incidencia normal.

Autocorrelación: es la correlación de una función consigo misma. Mediante la autocorrelación de una función se pueden predecir valores futuros de esa función a través del análisis de valores pasados, si y solo si el proceso es estacionario.

Autocorrelograma: es la representación gráfica de una autocorrelación sobre un grupo de trazas sísmicas. El autocorrelograma es una buena herramienta para detectar tanto las reverberaciones como los múltiples asociados a una traza sísmica.

Capa alterada (weathering): es el espesor del terreno más cercano a la superficie del suelo. Esta capa se caracteriza por una velocidad pequeña de propagación de las ondas, entre 300 y 1000 m/s, un coeficiente de amortiguación elevado, es decir, la amplitud de una onda que se propaga en la capa intemperizada disminuye rápidamente.

CDP: por sus siglas en inglés (Common Depth Point) punto común en profundidad o mejor traducido como punto de reflexión común. Corresponde al punto situado a la mitad de la distancia fuente-receptor sobre la capa reflejante cuando esta presenta una inclinación.

CMP: por sus siglas en inglés (Common Mid Point) punto común medio, Corresponde al punto situado a la mitad de la distancia fuente-receptor sobre la capa reflejante cuando esta es paralela al subsuelo.

Correlación: es una operación matemática en el dominio del tiempo, entre dos o más funciones para evaluar el grado de similitud entre ellas.

Cabe destacar que la correlación de dos señales solo contiene las frecuencias comunes en ambas.

Curvatura de rayos: se refiere a las trayectorias que adquieren los rayos cuando atraviesan capas muy delgadas rápidamente o cuando las velocidades no cambian gradualmente.

Estructuras complejas: se refiere a la presencia de ciertas estructuras que no pueden ser iluminadas correctamente como pliegues, fallas de gran pendiente, sinclinales, anticlinales y cuerpos salinos.

Estructuras simples: se refiere a la presencia de nulas estructuras, terrenos con capas casi paralelas.

Fold: también conocido como cobertura, se refiere al número de trazas que componen un CDP.

Gather: por lo regular son CDP gather. Está dado por la colección de todas las trazas que se reflejan en el punto del subsuelo cuya imagen se pretende generar. Este conjunto se crea buscando todos los rayos posibles en la geometría de adquisición y recolectando solo los que se reflejan en el punto de interés.

Modelo de velocidades: representación espacial de las velocidades a través de cada uno de los estratos o capas del subsuelo, tomando generalmente, la velocidad de cada capa constante a través de las cuales pasan los rayos de los distintos frentes de ondas.

Modelo de velocidades refinado: Un modelo de velocidades es correcto cuando los eventos de reflexión o reflectores en los CDP gathers son planos. Un modelo refinado es aquel que se obtiene tras la modificación del campo de velocidades, para lo cual se da a conocer la siguiente regla:

- Reflector cóncavo hacia arriba tiene déficit de velocidad.

- Reflector cóncavo hacia abajo tiene exceso de velocidad.

Offset: se refiere a la distancia que existe entre la fuente y el receptor.

Ruido: se define como la energía indeseable que se registra en los sismogramas.

Señal: se define como la energía útil adquirida durante un estudio sísmico.

Uphole Survey (extracción de muestras): permite medir directamente las propiedades como el espesor y la velocidad vertical de la capa alterada.

Velocidades complejas: pueden presentarse inversiones de velocidad o cambios laterales en la misma, así como cambios abruptos.

Velocidades simples: la velocidad aumenta con la profundidad y se considera que los cambios laterales de velocidad son nulos.

ANEXO 2)

Principios de reflexión

1. La señal emitida por una fuente es una onda esférica.
2. La señal emitida por una fuente puntual tiene infinitos puntos de reflexión sobre la correspondiente superficie reflectiva.
3. El vector que parte desde la posición de la fuente hasta cada uno de los infinitos puntos sobre la superficie reflectiva se denomina rayo sísmico.
4. El número de rayos registrados en el proceso de adquisición es limitado y depende del número de receptores que estén disponibles.
5. La trayectoria que recorre un rayo, está determinada por el principio de Fermat, el cual establece que este viajara por la trayectoria que tenga la mínima o máxima distancia a recorrer.
6. Para la señal emitida por una fuente, se tienen varias trazas sísmicas registradas y que corresponden a diferentes puntos de reflexión.
7. Para varias señales emitidas por numerosas fuentes, se tendrá cobertura múltiple sobre un mismo punto de reflexión.
8. El ángulo de reflexión siempre será simétrico con respecto a una recta perpendicular a la superficie de reflexión.
9. Cuando un rayo sísmico pasa de un medio 1 a un medio 2 con naturaleza diferente, existirá un rayo refractado y un correspondiente ángulo de refracción.
10. La energía de la onda sísmica emitida por la fuente, disminuye con la profundidad.

ANEXO 3)

Difracción

Es un fenómeno por el cual una onda modifica su dirección de propagación al encontrarse con aberturas u obstáculos.

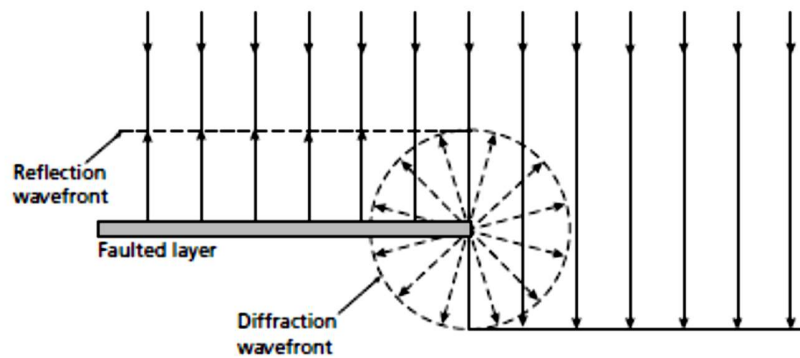


Fig. Anexo 3.1- Fenómeno de difracción causado por el límite de una falla.

La difracción depende de la longitud de la onda y del tamaño de la discontinuidad, para que este fenómeno se produzca es necesario que la longitud de onda de la onda que incide sea del orden de la abertura o del tamaño del obstáculo que interfiere con el frente de onda. Entre menor sea el tamaño de la abertura en comparación a la longitud de onda, el fenómeno de difracción será más evidente.

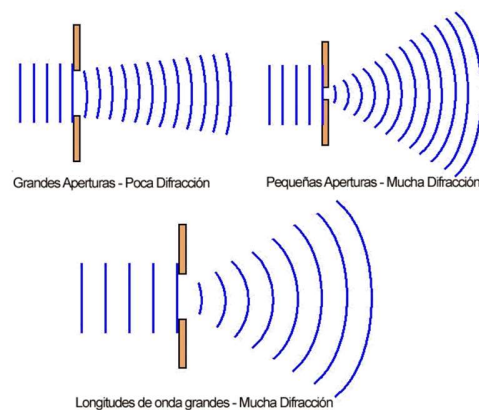


Fig. Anexo 3.2- Difracción en función de la longitud de onda y tamaño de la abertura

La difracción se explica mediante el principio de Huygens, el cual establece que: “todo punto de un frente de ondas puede considerarse como una nueva fuente de ondas secundarias que se extienden en todas direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el foco inicial”.

Es importante recalcar que el nuevo frente de onda generado a consecuencia de la presencia de un obstáculo, tiene las mismas características que la fuente de donde proviene (foco inicial): frecuencia, longitud de onda, fase.

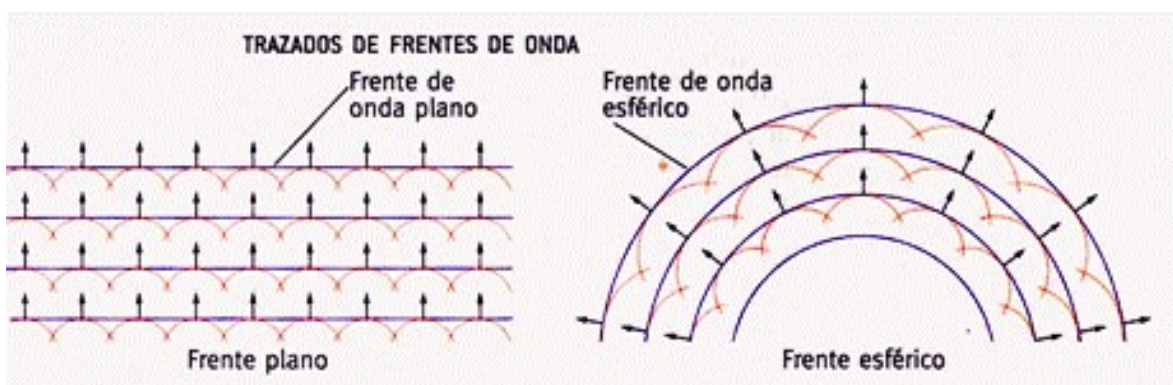


Fig. Anexo 3.3- Propagación de frente de onda plano y esférico.

Cada línea de un frente de onda, como los mostrados en las figuras, representa la cresta de las ondas mientras que los puntos intermedios entre las líneas representan los valles de las mismas, es importante mencionar esto para poder explicar de una manera más sencilla la interferencia destructiva y constructiva de los frentes de ondas. Cabe resaltar también, que los rayos (representación de la trayectoria de las ondas) son perpendiculares a los frentes de ondas, y se propagan en todas direcciones.

Un frente de ondas se considera plano cuando ha transcurrido cierto tiempo desde que se generó, es decir, una vez que esta ha recorrido cierta distancia en la que ya solo se logra visualizar una parte de este.