

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EFFECTOS DE LA APERTURA DE MIGRACIÓN DE
KIRCHHOFF EN LA CALIDAD DE LA IMAGEN EN DATOS
SÍSMICOS 3D MARINOS DEL GOLFO DE VENEZUELA**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Toloza L., Amaury A.
para optar al Título de
Ingeniero Geofísico

Caracas, 2014

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EFFECTOS DE LA APERTURA DE MIGRACIÓN DE KIRCHHOFF EN LA CALIDAD DE LA IMAGEN EN DATOS SÍSMICOS 3D MARINOS DEL GOLFO DE VENEZUELA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Jesús González

TUTOR INDUSTRIAL: Msc. Hugo Cerquone

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Toloza L., Amaury A.
para optar al Título de
Ingeniero Geofísico

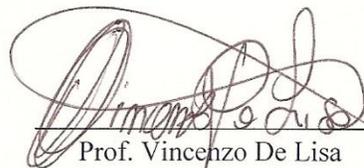
Caracas, 2014

Caracas, febrero 2014

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Amaury Toloza, titulado:

"EFECTOS DE LA APERTURA DE MIGRACIÓN DE KIRCHHOFF EN LA CALIDAD DE LA IMAGEN EN DATOS SÍSMICOS 3D MARÍÑOS DEL GOLFO DE VENEZUELA"

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Vincenzo De Lisa

Jurado



Prof. José Cavada

Jurado



Prof. Jesús González
Tutor Académico

DEDICATORIA

A Dios, por darme salud y permitirme disfrutar el sol de cada nuevo día

Esto me es suficiente para continuar cumpliendo mis sueños

A mi familia, a la que todo debo

Mis logros como hijo son sus logros como padres

A la memoria de Amparo Santini

La mejor maestra y compañera de viaje que alguien pudo tener

AGRADECIMIENTOS

A Dios, motor de mi existencia, gracias por seguirme dando vida y salud, por cuidar de los míos e iluminar mi sendero para seguir generando frutos. Por existir, por sonreír y celebrar que aún queda mucho por venir.

A Venezuela, mi país, tierra de luz y abundancia, por ser mi cuna y sentirte mía. Donde tuve la suerte de tener una familia unida, donde viví la inocencia de la infancia, los sueños de la adolescencia y la realidad de la calle. Ahora sólo pienso en hacerte un lugar mejor.

A mi mamá, Neuri Lara, a mi padre Orlando Toloza, a mi hermana Selene. Que me arroparon con besos, voy hacerlos sentir orgullosos toda la vida. Gracias por enseñarme que el secreto es el trabajo y la constancia. Por los consejos, el apoyo, el amor, los regaños, los sacrificios, las noches en vela, la educación y tantas cosas que me dieron y me siguen dando. Esto es por y para ustedes. A mis Abuelas Mercedes y Blanca por tanto amor, cariño y platos rebosantes de comida, viejas esto también es para ustedes. Para todos mis tíos, primos y sobrinos que son interminables, siempre llenos de refranes y vivencias. A todas las hermanas Santini que me abrieron las puertas de casa, se que encontraré respeto y afecto siempre que allí vuelva. En especial a ese lugar que tantas veces fue mi casa, mi escuela, mi parque de diversiones, el Cucurucho. Amparo y Norma Santini, no saben cuánto les debo y cuan agradecido estoy.

A mi tutor industrial Hugo Cerquone, por darme la oportunidad y confianza de desarrollar este proyecto de investigación, por mediar con las empresas de servicio para tener las condiciones adecuadas, por su tiempo, disposición y gestión.

A mi tutor académico y profesor Jesús González, por su dedicación y esfuerzo en ayudarme en todo lo posible durante la tesis, siempre con buena disposición. Siempre le estaré muy agradecido.

A Tricon Geophysics y todas las personas que representan a esta empresa, al gerente general Bernardo Briones, al gerente de administración José Manuel a quien agradezco profundamente su cordialidad y buena disposición, a la excelentísima persona que es Eduardo Barrios, Al señor Luis a quien debo el 99,9 % del trabajo técnico de esta tesis, al gerente de procesamiento Marco Grossi por su grandísima ayuda y opiniones, al señor Dimas Luna sinceramente que calidad de persona que vive para servir y enseñar, muchas gracias señor Dimas, a Jackeline, Manuel, Kleiber,

Leonel, Nikita y demás trabajadores que hicieron de esta experiencia un recuerdo muy ameno.

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela, a esta casa, mi casa que vence las sombras, con la que estaré eternamente en deuda. Donde crecí tanto intelectual, emocional y espiritualmente. No sólo es el orgullo de estudiar en la mejor universidad del país, es también el éxtasis de estar bajo las nubes de Calder, esa sensación de libertad mezclada con rebeldía que genera pensar distinto a los demás, es aquella carcajada de unas risas azules, la adrenalina de manifestar y gritar “UUU UCV” al defender nuestras ideas, son los amores en tierra de nadie, los desamores en la biblioteca, un buen partido de futbol en la cancha de ingeniería, las tertulias en el comedor, un bochinche en diciembre... Son tantas vivencias y recuerdos que quedan tatuados en el alma que me hacen tan UCEVISTA que jamás dejaré de serlo.

A los profesores que pusieron un grano de arena en mi formación, les quiero agradecer profundamente por tan noble labor: Inírida Rodríguez, Nuris Orihuela, José Cavada, Juan Infante, Antonio Ughi, Jesús González, Michael Schmitz, Yaraixa Pérez, Vincenzo De Lisa, Ronny Meza, Ricardo Ambrosio, Ricardo Alezones, Ander De Abrisqueta, y demás profesores a quien hago extender este agradecimiento.

A mis compañeros de la facultad con quienes compartí desde el día 1, el negro David, Juancarlos “smiley”, el gordo Germain, Carlos “oreja”, Mauro Anselmi, a Mayerlin, Angélica, Leidy y a la eterna “cara ‘e pan” Verónica Pérez. A la gente de la escuela con los que más compartí campos, aulas y cervezas: Elizabeth, Macero, Anita, Dionisio, Luis Miguel, Giannina, Said, Dianeidy, Yuniev, Luis López, Sinaí, Néstor, Evis, María Grazia, María Aurora, Lisfer, Fiorella, Kathryn, Jesús Alberto, Campos, Emilio, Henry y la Colonia Tovar. Quiero hacer una mención especial a Carlos Corredor, Fabián Linares, El gocho Manuel, Juan Natera, Gerardo Rumbos, Verónica Pérez, José Hernández y Miguel Castro que no sólo son grandes amigos sino también grandes personas. Una mención especial también a Katiuska Sánchez y su familia con quien compartí muchos momentos y logros durante estos años universitarios, siempre les estaré profundamente agradecidos. A los muchachos del equipo de futbol, Ali Ricardo, Marcos colina, Marco Pérez, Gustavo, Daniel, Danny, El profe Ricardo y un largo etc por tan buenos ratos. A las plagas de siempre que han estado en las buenas y malas Pablo Dorante, Pedro Jiménez, Luis machado, Dans, Leonardo Mata, Deyvid, Harlin Larez, Guaramato, Jesús Navarrete, Edward, Ricardo koki, John Sirvent, Gabriel Castro, Sanjay y pare de contar. A Susany Yvel por ser la mejor novia amiga de este mundo, por su apoyo incondicional, por su amor, por su compañía, preocupación y sobre todo por tener ese don de hacerme tan feliz.

Toloza L., Amaury A.

**EFFECTOS DE LA APERTURA DE MIGRACIÓN DE
KIRCHHOFF EN LA CALIDAD DE LA IMAGEN EN DATOS
SÍSMICOS 3D MARINOS DEL GOLFO DE VENEZUELA**

Tutor Académico: Prof. Jesús González.

Tutor industrial: Ms. Hugo Cerquone.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería

Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2014, 182 p.

Palabras claves: migración sísmica-PSTM Kirchhoff, migración-apertura, sísmica marina 3D

Resumen. La apertura de migración es un parámetro clave en los algoritmos de migración basados en la integral de Kirchhoff y en la cual la calidad de la imagen sísmica depende en gran medida. Tanto la magnitud como la forma de la apertura afectan directamente la eficiencia computacional, la relación señal-ruido de la imagen, la máxima pendiente de las estructuras a ser migradas y la información contenida en la amplitud y fase de la señal. El presente trabajo de investigación evalúa los efectos de la apertura en la imagen sísmica a partir del análisis de secciones migradas para distintas magnitudes y formas de implementación de dicho parámetro y define una apertura óptima para datos sísmicos 3D del Golfo de Venezuela. Los resultados de la investigación evidencian diversos efectos en la imagen sísmica; una apertura constante tiende a generar secciones someras ruidosas, mientras que una apertura angular limita la apertura en esta zona mejorando la relación señal-ruido además de reducir el tiempo de cómputo por lo que esta forma es preferible antes que la anterior. La apertura funciona como un filtro de pendiente, entre mayor sea la apertura mayor es la pendiente que puede ser correctamente migrada. En condiciones de pobre relación señal-ruido una apertura de magnitud considerable puede comprometer en gran medida la calidad de la imagen sísmica. Existen aproximaciones teóricas basadas en modelos simplificados del subsuelo para determinar la apertura requerida para migrar un evento de interés y que generan resultados bastante cercanos a los hallados de manera empírica para los datos sísmicos disponibles, alrededor de 4 km. Estas aproximaciones también son usadas en el diseño de adquisición para definir la apertura extra necesaria para grabar la señal que viaja más allá del objetivo de interés.

ÍNDICE GENERAL

| | Página |
|--|--------|
| ÍNDICE GENERAL..... | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | x |
| ÍNDICE DE TABLAS | xvi |
| CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 1 |
| 1.1 El problema de la investigación | 1 |
| 2.2 Objetivo general | 2 |
| 2.3 Objetivos específicos..... | 3 |
| 2.4 Justificación..... | 3 |
| 2.5 Ubicación del área de estudio..... | 4 |
| 2.6 Aspectos generales de los datos | 5 |
| CAPÍTULO II MARCO GEOLÓGICO | 6 |
| 2.1 Marco regional | 6 |
| 2.2 Sub cuenca oriental del golfo de Venezuela | 8 |
| 2.3 Sub cuenca occidental del golfo de Venezuela | 9 |
| 2.4 Marco estructural..... | 9 |
| 2.5 Síntesis estratigráfica..... | 12 |
| CAPÍTULO III MARCO TEÓRICO..... | 15 |
| 3.1 Sísmica de exploración..... | 15 |
| 3.2 Sísmica 3D | 16 |
| 3.3 Generalidades de sísmica 3D costa afuera | 17 |
| 3.3.1 Planificación, diseño y adquisición | 17 |
| 3.3.2 Geometrías convencionales de adquisición con streamers | 23 |
| 3.3.3 Técnicas de adquisición y distribución azimutal | 25 |
| 3.4 Generalidades del procesamiento de datos sísmicos 3D marinos | 30 |
| 3.4.1 Secuencia de procesamiento de datos sísmicos 3D marinos | 31 |
| 3.4.2 Remuestreo y formato..... | 32 |
| 3.4.3 Carga de la geometría y edición de trazas | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4.4 Procesamiento de la ondícula | 33 |
| 3.4.5 Recuperación de amplitudes | 34 |
| 3.4.6 Atenuación de ruido coherente y ambiental | 34 |
| 3.4.7 Deconvolución | 36 |
| 3.4.8 Ordenamiento por CMP..... | 36 |
| 3.4.9 Análisis de velocidad | 37 |
| 3.4.10 Corrección dinámica o normal moveout..... | 39 |
| 3.4.11 Dip moveout (DMO) | 39 |
| 3.4.12 Apilamiento | 40 |
| 3.4.13 Atenuación de múltiples | 41 |
| 3.5 Migración | 41 |
| 3.6 Algoritmos de migración..... | 44 |
| 3.6.1 Migración por Diferencias finitas | 45 |
| 3.6.2 Migración en el dominio F-K | 46 |
| 3.7 Migración de Kirchhoff..... | 46 |
| 3.7.1 Apertura de migración | 49 |
| CAPITULO IV METODOLOGÍA | 55 |
| 4.1 Inventario de datos y validación de la información..... | 56 |
| 4.2 Definición y carga de la geometría con Paradigm Focus 5.4 | 59 |
| 4.3 Carga de datos con Paradigm Focus 5.4..... | 61 |
| 4.4 Modelo de velocidad a la base de datos | 64 |
| 4.5 Visualización y control de calidad de los datos cargados | 65 |
| 4.6 Selección de área de interés..... | 67 |
| 4.7 Acondicionamiento de los datos para la migración..... | 71 |
| 4.8 Migración con Tsunami..... | 73 |
| 4.9 Migración con distintas aperturas..... | 75 |
| 4.10 Comparación de migraciones para las distintas aperturas de migración y selección de apertura optima | 79 |
| 4.10.1 Análisis cualitativo | 79 |
| 4.10.2 Análisis cuantitativo | 80 |

| | |
|---|------------|
| 4.11 Refinación del modelo de velocidad | 80 |
| 4.12 Migración con apertura óptima y modelo de velocidad refinado..... | 81 |
| 4.13 Comparación de migraciones de diferentes dominios..... | 81 |
| 4.14 Post procesos para generar una imagen final del subsuelo..... | 82 |
| CAPITULO V RESULTADOS Y ANÁLISIS | 84 |
| 5.1 Migración con apertura constante | 84 |
| 5.2 Migración con apertura angular | 116 |
| 5.3 Migración con apertura hibrida óptima | 135 |
| 5.4 Migración con modelos de velocidad refinados | 137 |
| 5.4 Migración de Kirchhoff en post apilamiento vs pre apilamiento | 144 |
| 5.6 Procesamiento post migración..... | 148 |
| CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 156 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 159 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| Figura 1. Localización relativa del área de estudio. Bloque Cardón IV en rojo. | 4 |
| Figura 2. Provincias estructurales de la cuenca del Golfo de Venezuela. En rojo la sub cuenca oriental, en azul la sub cuenca occidental (modificado de Guevara et al, 1977). | 7 |
| Figura 3. Sección sísmica de datos marinos con fuerte ruido ocasionado por múltiples. | 19 |
| Figura 4. Esquema de las distintas metodologías de adquisición de datos sísmicos marinos. | 20 |
| Figura 5. Técnica de undershooting | 21 |
| Figura 6. El desvío del streamer ocasiona que puntos medios se desplacen lateralmente. | 22 |
| Figura 7. Técnica de navegación para grabación de datos sísmicos marinos 3D | 23 |
| Figura 8. Configuración convencional de embarcación con multi streamer/fuente.... | 24 |
| Figura 9. Esquema de adquisición con un único barco y diagrama de distribución de azimuts. | 26 |
| Figura 10. Comparación en la calidad de imagen Narrow vs Multi Azimuth | 27 |
| Figura 11. Esquema de las distintas estrategias de adquisición y su distribución azimutal. | 29 |
| Figura 12. Esquema de flujo de procesamiento de datos marinos 3D | 32 |
| Figura 13. Atenuación de ruido de baja frecuencia y alta amplitud en datos sísmicos marinos. | 35 |
| Figura 14. Conjunto de trazas para un mismo CMP luego de la corrección dinámica | 39 |
| Figura 15. Diferencia en trayectoria, tiempo y posición de reflexión entre una capa buzante y plana. | 40 |
| Figura 16. Estrategias adecuadas de migración según contexto geológico de aplicación | 44 |
| Figura 17. Esquema de trabajo de migración por Diferencias Finitas | 45 |
| Figura 18. Efectos de borde producto de la limitación de la apertura del operador de Kirchhoff | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 19. Distintas formas de escoger la apertura de migración. (a) por rango de trazas o (b) por ángulo de apertura..... | 51 |
| Figura 20. Familia de hipérbolas de difracción donde aumenta la velocidad con la profundidad | 52 |
| Figura 21. Esquema general de la metodología empleada en la investigación..... | 55 |
| Figura 22. Diagrama de la geometría de adquisición..... | 57 |
| Figura 23. Secuencia de procesamiento aplicada a los datos apilados disponibles. | 58 |
| Figura 24, Mapeo de los encabezados de las trazas de los datos apilados..... | 58 |
| Figura 25. Encabezado textual del CDP GATHER. | 59 |
| Figura 26. Job para definir geometría usando tres esquinas del proyecto. | 60 |
| Figura 27. Información de la geometría cargada en la base de datos. | 61 |
| Figura 28. Job para cargar datos en Focus. | 62 |
| Figura 29, Mapeo del encabezado donde se evidencia el error en la numeración de los CDP..... | 63 |
| Figura 30, Job para cargar CDP GATHER..... | 64 |
| Figura 31. Job para definir el modelo de velocidades en la base de datos..... | 65 |
| Figura 32. Visualización y control de calidad de una sección apilada..... | 66 |
| Figura 33. Visualización y control de calidad del CDP GATHER..... | 67 |
| Figura 34. Inline 1600, acortamiento de los inlines debido a la geometría de adquisición. | 68 |
| Figura 35. Inline 1700, acortamiento de los inlines debido a la geometría de adquisición. | 68 |
| Figura 36. Falta de información en las coordenadas origen del proyecto por perdida de cobertura. | 69 |
| Figura 37. Falta de información en las coordenadas nor-centrales del proyecto por perdida de cobertura. | 70 |
| Figura 38. Corte en tiempo del proyecto donde se observan las áreas con falta de información. | 70 |
| Figura 39. Área de interés seleccionada para ser migrada. | 71 |
| Figura 40. Job para generar el archivo de salida de los datos apilados para Tsunami. | 72 |
| Figura 41. Job para generar el archivo de velocidad para Tsunami..... | 73 |

| | |
|--|-----|
| Figura 42. Definición de la apertura de migración y otros parámetros de migración. | 75 |
| Figura 43. Prueba de apertura, apertura constante de 3000 m y taper angular de 45°. | 77 |
| Figura 44. Prueba de apertura. Apertura constante 2000 m y taper angular de 90°. | 78 |
| Figura 45. Prueba de apertura. Apertura constante 6000 m y taper angular de 30°. | 79 |
| Figura 46. Comparación del modelo de velocidad original con el refinado. | 81 |
| Figura 47. CDP gather migrado con NMO y stretching. | 82 |
| Figura 48. Esquema de suma del operador de migración para una apertura constante. | 85 |
| Figura 49. Inline 1120, sección apilada (A), migración con apertura de 500 m (B) y 2000 m (C), zona somera. | 87 |
| Figura 50. Inline 1120, migración con apertura de 3000 m (A), migración con apertura de 7000 (B) y resta de ambas secciones (C), zona somera. | 88 |
| Figura 51. Inline 1180, sección apilada (A) y migración con apertura de 3000 m (B), zona somera. | 91 |
| Figura 52. Crossline 3400, sección apilada (A) y migración con apertura 500 m (B), zona somera. | 92 |
| Figura 53. Crossline 3400, migración con apertura 2000 (A) y 1000 m (B), zona somera. | 93 |
| Figura 54. Crossline 3400, migración con apertura de 3000 m (A), migración con apertura de 7000 (B) y resta de ambas secciones (C), zona somera. | 94 |
| Figura 55. Inline 1240, sección apilada (A) y migrada con apertura de 500 m (B), zona intermedia. | 97 |
| Figura 56. Inline 1240, sección migrada con apertura de 2000 m (A) y 1000 m (B), zona intermedia. | 98 |
| Figura 57. Inline 1240, sección migrada con apertura de 3000 m (A) y 4000 m (B), zona intermedia. | 99 |
| Figura 58. Inline 1240, sección migrada con apertura de 3000 m (A), 7000 m (B) y la resta de ambas migraciones (C), zona intermedia. | 100 |
| Figura 59. Crossline 2200, sección apilada (A) y migrada con apertura de 500 m (B), zona intermedia. | 103 |
| Figura 60. Crossline 2200, sección migrada con apertura de 2000 m (A) y 1000 m (B), zona intermedia. | 104 |

| | |
|---|-----|
| Figura 61. Crossline 2200, sección migrada con apertura de 3000 m (A) y 4000 m (B), zona intermedia..... | 105 |
| Figura 62. Crossline 2200, sección migrada con apertura de 4000 m (A), 7000 m (B), y resta de ambas migraciones (C), zona intermedia..... | 106 |
| Figura 63. Inline 1000, sección apilada (A) y migrada con apertura de 500 m (B), zona profunda..... | 109 |
| Figura 64. Inline 1000, sección migrada con apertura de 3000 m (A) y 4000 m (B), zona profunda..... | 110 |
| Figura 65. Inline 1000, sección migrada con apertura de 4000 m (A), 7000 m (B), y resta de ambas migraciones (C), zona profunda. | 111 |
| Figura 66. Crossline 2000, sección apilada (A) y migrada con apertura de 500 m (B), zona profunda. | 112 |
| Figura 67. Crossline 2000, sección migrada con apertura de 3000 m (A) y 4000 m (B), zona profunda. | 113 |
| Figura 68. Crossline 2000, sección migrada con apertura de 4000 m (A), 7000 m (B), y resta de ambas migraciones (C), zona profunda. | 114 |
| Figura 69. Comparación de los espectros de amplitud para migraciones con apertura constante..... | 115 |
| Figura 70. Esquema de suma del operador de migración para una apertura angular. | 116 |
| Figura 71. Inline 1120, sección apilada (A) y migrada con apertura 15° (B), zona somera. | 119 |
| Figura 72. Inline 1120, sección migrada con apertura 45° (A) y 30° (B), zona somera. | 120 |
| Figura 73. Inline 1120, sección migrada con apertura 45° (A), 60° (B) y resta entre ambas migraciones (C), zona somera..... | 121 |
| Figura 74. Inline 1240, sección apilada (A) y migrada con apertura angular de 15° (B), zona intermedia..... | 123 |
| Figura 75. Inline 1240, sección migrada con apertura angular de 45° (A) y 30° (B), zona intermedia. | 124 |
| Figura 76. Inline 1240, sección migrada con apertura angular de 45° (A), 60° (B) y resta de ambas migraciones, zona intermedia. | 125 |
| Figura 77. Crossline 2200, sección apilada (A) y migrada con apertura angular de 15° (B), zona intermedia..... | 127 |

| | |
|--|-----|
| Figura 78. Crossline 2200, sección migrada con apertura angular de 45° (A) y 30° (B), zona intermedia..... | 128 |
| Figura 79. Crossline 2200, sección migrada con apertura angular de 45° (A), 60° (B) y la resta entre ambas migraciones, zona intermedia..... | 129 |
| Figura 80. Inline 1000, sección apilada (A) y migrada con apertura angular de 15° (B), zona profunda. | 131 |
| Figura 81. Inline 1000, sección migrada con apertura angular de 45° (A), 60° (B) y la resta entre ambas migraciones, zona profunda. | 132 |
| Figura 82. Crossline 2000, sección completa apilada (A), migrada con apertura angular de 45° (B) y 60° (C). | 133 |
| Figura 83. Análisis espectral de la zona somera del crossline 2000, migraciones con aperturas de 60° y 45° | 134 |
| Figura 84. Análisis espectral de la sección completa apilada, migrada con apertura de 30°, 45° y 60° | 135 |
| Figura 85. Migración híbrida con apertura híbrida 60° y 4000 m (A) y resta con sección migrada con apertura de 60° (B). | 136 |
| Figura 86. Modelo de velocidad sin modificar (A). Modelo de velocidad suavizado y reescalado al 90% del original | 137 |
| Figura 87. Inline 1240. Sección migrada con apertura óptima con modelo de velocidad original (A), con modelo suavizado y re-escalado al 90% (B) y al 80 % (C) | 140 |
| Figura 88. Inline 1180. Sección migrada con apertura óptima con modelo de velocidad original (A), con modelo suavizado y re-escalado al 90% (B) y al 80 % (C) | 141 |
| Figura 89. Crossline 2200. Sección migrada con apertura óptima con modelo de velocidad original (A), con modelo suavizado y re-escalado al 90% (B) y al 80 % (C) | 142 |
| Figura 90. Crossline 3800. Sección migrada con apertura óptima con modelo de velocidad original (A), con modelo suavizado y re-escalado al 90% (B) y al 80 % (C) | 143 |
| Figura 91. Inline 1380. Migración con parámetros óptimos en post apilamiento (A) y en pre apilamiento (B)..... | 145 |
| Figura 92. Crossline 3000. Migración con parámetros óptimos en post apilamiento (A) y en pre apilamiento (B). | 146 |

| | |
|--|-----|
| Figura 93. Espectro de amplitud para las secciones migradas en pre y post apilamiento..... | 147 |
| Figura 94. Inline 1240. Migración post apilamiento con parámetros óptimos sin post procesos (A) y con post procesos (B). | 149 |
| Figura 95. Inline 1400. Migración pre apilamiento con parámetros óptimos sin post procesos (A) y con post procesos (B). | 150 |
| Figura 96. Análisis espectral para las migraciones en pre y post apilamiento con y sin post procesos. | 151 |
| Figura 97. Esquemas geométricos para determinar la apertura de migración óptima. | 153 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Página |
|--|--------|
| Tabla 1. Vértices del proyecto, Proyección UTM 19 N..... | 56 |
| Tabla 2. Tiempos de cómputo de las migraciones | 76 |
| Tabla 3. Calculo de aperturas para distintos criterios y profundidades. | 154 |

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 El problema de la investigación

Existen tres elementos claves que deben tomarse en cuenta con mucho detalle en un proyecto de adquisición sísmica 3D para garantizar un correcto procesamiento de los datos, lo que deriva en una imagen confiable del subsuelo. Estos elementos son: buena relación señal-ruido, alta resolución y una adecuada cobertura espacial (Ashton *et al*, 1994). Con respecto al último elemento, un proyecto sísmico diseñado con una buena cobertura espacial que suponga capas planas puede fallar en estructuras complejas. Las reflexiones de capas buzantes no coinciden con los puntos medios comunes en superficie y es el proceso de migración en procesamiento, el que permite migrar las reflexiones a sus verdaderas posiciones y tiempos en el subsuelo y colapsar las difracciones, mejorando la resolución espacial y derivando en una imagen sísmica representativa del subsuelo (Yilmaz, 2001).

Existen distintos algoritmos de migración, donde la migración de Kirchhoff probablemente sea el algoritmo más popular, por su versatilidad y porque es conceptualmente simple (Gray, 2001). Está basado en la solución integral de la ecuación escalar de onda y este operador teóricamente realiza una suma infinita, sin embargo, los datos son grabados dentro de límites finitos de espacio y tiempo por lo que el operador de suma debe estar limitado y la extensión espacial donde opera es conocida como la apertura de migración (Schneider, 1978).

La apertura de migración siempre es un parámetro difícil de establecer y en el cual la calidad de la imagen final migrada depende mucho. En términos generales se considera que cuanto mayor sea la apertura de migración mejor serán los resultados de la migración; no obstante, Sun y Bancroft (2001) mencionan que esto no es

necesariamente cierto, si no que más bien existe una mínima apertura de migración que garantiza las verdaderas amplitudes luego de migrar. Sun (1998) y Bancroft (1998) incluso comentan que aquellas trazas que no tienen una contribución efectiva en la migración pueden generar artefactos en la imagen sísmica además de implicar altos costos computacionales. Sin embargo, la elección de una apertura de migración óptima que permita obtener la mejor imagen sísmica con el menor tiempo de cómputo posible es uno de los objetivos principales al aplicar la migración de Kirchhoff, tanto para optimizar costos operacionales como para garantizar mejores resultados en procesamiento. Diversos autores (Hertweck *et al*, 2003; Klovov y Fomel, 2012; Rastogi y Phadke, 2002; Schleicher *et al*, 1997) han trabajado en determinar una apertura de migración óptima, ya sea en función a la zona de Fresnel o con simple explicación geométrica, pero todos coinciden en las dificultades que esto representa, en especial para estructuras complejas y profundas.

La presente investigación evalúa los efectos entre la apertura de migración y la calidad de los resultados generados en la migración para datos sísmicos marinos 3D a partir del análisis de los resultados generados por el algoritmo de migración basado en la integral de Kirchhoff. La naturaleza de adquisición de datos marinos 3D convencionales imponen una condición adicional sobre la iluminación de los objetivos debido a la estrecha distribución de azimuts, donde existe una dirección preferencial de iluminación; en la dirección perpendicular a dicha dirección preferencial existen una pobre relación señal ruido debido a que la cobertura es uno por lo que popularmente se le conoce a este tipo de datos sísmicos como un pseudo 3D o sísmica 2.5 D (Moldoveanu y Egan, 2006), lo cual tiene incidencia directa en la calidad de la migración, condición que también es evaluada.

2.2 Objetivo general

Evaluar los efectos de la apertura de migración en la calidad de imagen sísmica a partir de la migración de Kirchhoff en datos sísmicos marinos 3D convencionales del Golfo de Venezuela.

2.3 Objetivos específicos

- Comparar los resultados de la migración de Kirchhoff con distintas magnitudes y formas de implementación de la apertura.
- Estimar la apertura de migración óptima requerida para generar imágenes sísmicas del subsuelo de alta calidad.
- Contrastar las secciones migradas con apertura óptima para la migración en pre y post apilamiento.
- Establecer una relación entre el diseño de adquisición y la apertura de migración óptima.

2.4 Justificación

El presente trabajo de investigación implica la evaluación del efecto de la apertura de migración en los resultados de la migración a partir de la comparación de los resultados obtenidos a partir del algoritmo basado en la integral de Kirchhoff, el cual sea probablemente el más usado en la industria de exploración de hidrocarburos. Esto tiene una gran importancia en la etapa de interpretación puesto que al obtener mejores imágenes del subsuelo permite al intérprete tomar mejores decisiones en la propuesta de pozos exploratorios o de producción. De igual manera, representa un aporte en la metodología empleada para el diseño de futuras adquisiciones sísmicas 3D marinas. En efecto, permite definir de manera óptima la apertura de migración adecuada para asegurar buenos resultados de la migración en la etapa de procesamiento y a su vez optimizar los costos operacionales que implica una apertura del área de adquisición en este tipo de proyectos.

Como se ha mencionado, los resultados de este trabajo tiene grandes implicaciones económicas en distintas áreas de trabajo de la industrial nacional de hidrocarburos, lo que beneficia el crecimiento económico sostenido de la nación, que se encuentra avocada hoy en día a la intensificación de los procesos de estudio y conocimiento de sus reservas petroleras; por lo tanto, el impacto social que representa esta

investigación no es directa pero si es fundamental para las políticas públicas que desarrolla el estado a partir del fortalecimiento de la infraestructura nacional y la inclusión social en todos los rubros de la industria que tiene como principal motor a la industria petrolera nacional.

2.5 Ubicación del área de estudio

Los datos sísmicos se adquirieron bajo el marco del proyecto ROBALO 10L 3D ubicado en el extremo noreste del Golfo de Venezuela, específicamente en el bloque Cardón IV ubicado en la costa noroccidental de la Península de Paraguaná sobre el campo gasífero Perla (figura 1).



Figura 1. Localización relativa del área de estudio. Bloque Cardón IV en rojo.

2.6 Aspectos generales de los datos

Los datos consisten en un sub cubo sísmico de interés de aproximadamente 50 km² de un cubo mayor de 400 km². La dirección preferencial de adquisición fue en el sentido N-S. La embarcación dispuso de un arreglo de 6 *streamers* con 100 metros de separación entre ellos con dos arreglos de cañones de aire. La longitud del registro fue establecida a 6 segundos, con un muestreo de 2 ms y un intervalo de disparo de 18,75 metros. Con un total de 480 hidrófonos y trazas por *streamer* con una separación de 12.5 metros entre ellos y una longitud de 6000 metros.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 Marco regional

Las cuencas sedimentarias de Falcón-Bonaire, Golfo de Venezuela y del norte de Colombia constituyen una importante provincia geológica que relaciona la región del Mar Caribe con la parte norte de la América del Sur, formando una zona de transición entre el dominio oceánico del Mar Caribe y el dominio continental de las cadenas montañosas. El Golfo de Venezuela se extiende al norte del Lago de Maracaibo hasta el Mar Caribe, entre la península de la Guajira al oeste y la península de Paraguaná en el este (Almazar, 1998).

La Cuenca del Golfo de Venezuela se caracteriza por una amplia plataforma continental que se extiende por unos 200 kilómetros en sentido sur-norte con profundidades de 36 metros en la parte interna y de hasta 146 kilómetros en el sector norte de la plataforma. Está dividida fisiográficamente en dos subcuencas por un alto estructural con profundidades menores de 20 metros conocida como el Risco de Calabozo. Hacia el oeste se encuentra una depresión cerrada en la isóbata de 20 metros que corresponde a la Ensenada o plataforma de Calabozo, y al este del Risco está el golfo abierto, un amplio valle submarino con declive suave hacia el norte y noroeste conocido como depresión oriental del Golfo de Venezuela (figura 2).

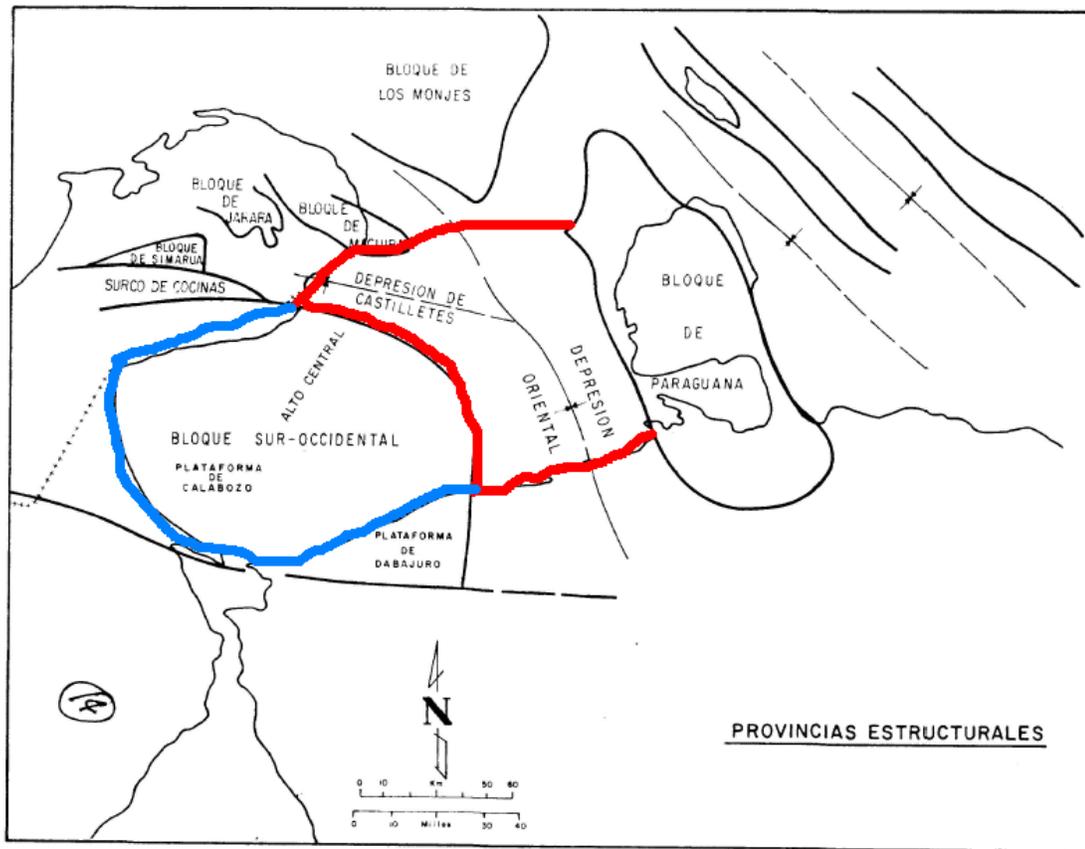


Figura 2. Provincias estructurales de la cuenca del Golfo de Venezuela. En rojo la sub cuenca oriental, en azul la sub cuenca occidental (modificado de Guevara *et al*, 1977).

La dinámica sedimentaria actual aporta un volumen muy bajo de sedimentos desde las penínsulas de Paraguaná y La Guajira. En líneas generales las costas de Falcón y Zulia contienen zonas de erosión y playas de barrera. A nivel estratigráfico las sub cuencas fisiográficas del Golfo de Venezuela están claramente diferenciadas, ya que la ensenada de Calabozo se caracteriza por presentar un ambiente paludal ligeramente reductor con poca circulación de las corrientes donde domina las facies de limos y arcillas deltaicas derivadas del estuario del Lago de Maracaibo, mientras que el golfo abierto presenta un ambiente oxigenado, con un grado de salinidad adecuado y buena circulación para que domine una facies calcárea originada por la acumulación de carbonato de calcio de algas rojas. Las cuencas sedimentarias del norte de Colombia y Venezuela, desde las islas hasta la línea de costa, presentan una columna

estratigráfica compuesta generalmente por sedimentos depositados desde el Terciario hasta el Reciente. El rasgo sedimentario más interesante es la existencia de dos plataformas de erosión; una sobre el Risco de Calabozo y la otra en el fondo marino entre Punta Perret y Cojoro, en la costa occidental del golfo. Las facies de arenas basales reconocidas son tanto terrígenas como calcareníticas donde la mayor extensión se encuentra en la parte oriental del lago cerca de la costa de Falcón que pueden representar facies fluvio-deltaicas reliquia, re depositadas durante la transgresión. La facies reliquia calcárea se ubica en la plataforma externa, alrededor de la península de Paraguaná y del archipiélago de Los Monjes por lo que puede clasificarse como una facies calcárea plataformal. La escasa profundidad del Golfo condicionó su inundación total a finales de la transgresión del Holoceno hace unos 6.000 años, y el nivel actual del comenzó a estabilizarse hace unos 4.000 años. En consecuencia, la mayor parte de los sedimentos presentes en el golfo son de facies reliquia recubiertas localmente por una alfombra de facies deltaicas marina o calcárea (González de Juana *et al*, 1980).

2.2 Sub cuenca oriental del golfo de Venezuela

En la región oriental del Golfo de Venezuela, hacia las costas de Falcón, la información sísmica señala la existencia de una sub-cuenca. Esta sub-cuenca oriental se extiende hacia el Surco de Urumaco y está limitada en su parte sur por la falla Lagarto. Se reconocen dos ciclos sedimentarios del Terciario, con una discordancia intermedia, descansando sobre un basamento ígneo-metamórfico de naturaleza alóctona, en una situación semejante a la Ensenada de La Vela, donde el Mioceno yace en discordancia sobre rocas alóctonas del Sistema Montañoso del Caribe. De igual forma algunos datos sismográficos indican que al norte del Surco de Urumaco el Canal Falconiano estaba unido en el Mioceno inferior al sector oriental del Golfo de Venezuela hasta Paraguaná. Luego el canal sufrió el retiro de los mares hacia el NO en el Mioceno medio y superior y en el Alto de Dabajuro comienzan ambientes costeros que rápidamente pasan a continentales (Almazar, 1998).

2.3 Sub cuenca occidental del golfo de Venezuela

Esta sub cuenca del Golfo de Venezuela presenta una situación diferente a la del sector oriental, y capas sub-horizontales del ciclo de sedimentación más somero descansan en discordancia sobre un monoclin al de fuerte buzamiento al este, en el cual se han identificado reflectores sísmicos que posiblemente representan rocas cretácicas semejantes a las encontradas en la plataforma del Lago de Maracaibo y en los pozos de la parte occidental del Alto de Dabajuro (Almazar, 1998).

2.4 Marco estructural

La cuenca ha tenido una historia estructural en la que ha predominado la formación del continente provocada por el lento desplazamiento de la corteza terrestre en la zona y la posterior sedimentación causada por aluviones. La epirogénesis ha causado que se forme un bloque occidental relativamente estable y uno oriental decreciente y que sufre erosiones. Durante el Terciario superior el Golfo de Venezuela es una región subsidente igual que la Cuenca de Maracaibo-Falcón. Durante el Oligoceno se desarrollaron en el margen continental una serie de cuencas (Bajo Magdalena, Guajira, Golfo de Venezuela, Falcón-Bonaire, Tuy-Cariaco, Carúpano-Norte de Trinidad), algunas de las cuales se iniciaron con carácter restringido a partir del Eoceno como cuencas marginales de hundimiento fracturadas. En el Golfo de Venezuela el período Oligoceno-Mioceno inferior es un ciclo intermedio y una faja de acuñamiento contra la zona montañosa estructuralmente levantada en continuación hacia el sur con el borde de la plataforma de Dabajuro. Un acuñamiento similar se observa en el sinclinal de Cocinetas de la península de La Guajira (Almazar, 1998).

El marco tectónico regional de la plataforma continental venezolana se relaciona estrechamente con el borde meridional de la placa tectónica del Caribe y sus rasgos geológicos se asocian genéticamente con movimientos transcurrentes dextrales convergentes de la placa del Caribe. La región está caracterizada por una tectónica extensiva o transtensiva y el desarrollo de estructuras de tracción que se desarrollaron

desde el Oligo-mioceno. Los rasgos tectónicos dominantes del margen continental de Venezuela son los plegamientos y corrimientos de rumbo este-oeste y fallas transcurrentes de dirección este-oeste y noroeste-sureste. Las estructuras han sido desplazadas dextralmente en varias áreas por otro sistema de fallas transcurrentes transversales. Los movimientos orogénicos del Caribe se iniciaron posiblemente en el Cretácico y se desarrollaron desde el Eoceno medio. Manifiestan sus mayores efectos en el Eoceno superior con el levantamiento de una cordillera cuyo tramo más notable para el norte de Venezuela es el que corresponde a las cadenas de islas de Aruba, Curazao, Bonaire, Aves de Sotavento, Los Roques, La Orchila. Esa orogenia del Caribe había comenzado a levantar en el sur un sector de Los Andes y de Perijá (Almazar, 1998).

Desde el Eoceno medio la corteza Caribe comienza su interacción con la placa suramericana desplazando hacia el este una placa proto-caribe y originando fallamiento transcurrente. La colisión violenta del Eoceno corrió una serie de napas al sureste en la plataforma suramericana por el arrastre dextral de la placa del Caribe contra el continente, y fue seguida en el Oligoceno-Mioceno por una tectónica vertical en ambiente extensivo o transtensivo que abrió las cuencas del margen continental. Las cuencas de la plataforma continental del norte de Colombia y Venezuela (Bajo Magdalena, Guajira, Golfo de Venezuela, Falcón-Bonaire, Tuy-Cariaco, Carúpano-Norte de Trinidad) se desarrollaron sobre la pronunciada discordancia del Eoceno medio a superior. A partir del Mioceno inferior, el arrastre dextral de la placa Caribe se reanuda pero en forma más transpresiva y localmente transtensiva y de manera abrupta en Los Andes desde el Mioceno medio, y la sedimentación del Paleógeno en la parte norte de la plataforma continental venezolana, constituida predominantemente por turbiditas, sufrió, conjuntamente con las capas anteriores, una tectónica compresiva cuyas estructuras fueron severamente erosionadas bajo la discordancia que marca la base del Neógeno (Almazar, 1998).

Las cuencas, algunas de las cuales se iniciaron con carácter restringido desde el Eoceno como cuencas marginales de hundimiento fracturadas, forman una región de

subsistencia continua excepto al norte en cercanías de las islas neerlandesas y venezolanas que permanecían muy cerca del nivel del mar. La presente configuración de las cuencas fue adquirida a partir del Oligoceno y Mioceno hasta el Reciente mientras la corteza oceánica Caribe experimentaba el sub corrimiento hacia el sur por debajo del continente suramericano. La falla de Oca, que se considera el límite sur de la Cuenca del Golfo de Venezuela, transcurrente dextral con rumbo general este-oeste, refleja la interacción de la Placa Caribe y la de Suramérica. El límite de las placas estuvo ubicado en el sistema de fallas Oca-Chirinos en su zona de subducción hacia el sur, y se ha sugerido que esta acción ha dejado de funcionar como límite de placas hace 2 m.a., estableciéndose desde el Pleistoceno el borde principal a lo largo del fallamiento transformante que se extiende desde el Golfo de Guayaquil en el Ecuador hasta Venezuela y Trinidad en la alineación de fallamiento Boconó-San Sebastián-El Pilar (Almazar, 1998).

Cuando la placa de Suramérica fue comprimida por la placa Caribe se formó en el sector central de El Tablazo el alto estructural por el esfuerzo compresional, con fallas inversas que mueren en el Paleoceno, indicando que la estructura ya existía para ese tiempo, y posteriormente se incrementó la deformación durante el Eoceno como lo muestra la discordancia angular en la base del post-Eoceno. Resaltan dos estilos tectónicos. El más antiguo es compresivo y capas pre-cretácicas, cretácicas y paleocenas sufrieron fallamiento; las eocenas fueron plegadas sin fallamientos mayores. El estilo tectónico más reciente es tensional y pudo comenzar en el Mioceno, asociado esencialmente con la falla Ancón de Iturre, que originó un depocentro amplio cercado por fallas normales que alcanzan a veces la superficie (Almazar, 1998).

En el borde noroeste de la cuenca de Falcón se reconoce la Plataforma de Dabajuro substrato levantado de rocas eocenas contra la cual se acuñan formaciones Oligo-miocenas. Este levantamiento fue un elemento positivo durante el Oligoceno y parte del Mioceno inferior. Entre la Plataforma de Dabajuro al oeste y el Alto de Paraguaná al este se ha postulado la presencia de una depresión, el Surco de Urumaco, que

aparentemente comunicó el Canal Falconiano con el Golfo de Venezuela en el Oligomioceno (Almazar, 1998).

2.5 Síntesis estratigráfica

A nivel estratigráfico no se maneja mucha información dentro del Golfo de Venezuela, por lo tanto, la determinación de la misma se ha basado en la extrapolación de facies en las zonas circundantes y a través de estudios cronoestratigráficos regionales donde se han propuesto facies y ambientes sedimentarios posibles (Guevara *et al*, 1977).

En la parte oriental del golfo se reconocen dos ciclos de sedimentación con una discordancia intermedia descansado sobre un basamento metamórfico. Estos dos ciclos corresponden a dos grandes etapas separadas bien diferenciadas por la discordancia del Eoceno. La primera etapa está caracterizada por un margen tectónico divergente y la segunda etapa marcada a partir del Eoceno medio esta descrita en un marco tectónico convergente consecuencia de la interacciones de las Placas Caribe y Sudamérica. La parte occidental presenta una situación diferente, sobre la Plataforma de Dabajuro sólo se reconoce la primera etapa. Las capas sub horizontales del ciclo de sedimentación más somero, representativo de la Formación La Puerta y sus equivalentes, descansan en discordancia sobre un homoclinal de fuerte buzamiento hacia el este en el cual se localizaron reflexiones de calizas, que se pueden interpretar como de rocas cretácicas en facies similares a las conocidas en el Lago de Maracaibo. Esta unidad descansa sobre un basamento granítico. Las reflexiones de calizas cretácicas aparentemente terminan abruptamente en el centro del golfo contra una zona sorda, la cual ha sido identificada como unidades metamórficas similares a las existentes como basamento en el resto de la Plataforma del Caribe (González de Juana *et al*, 1980).

La cuenca del golfo de Venezuela se encuentra sobre un basamento metamórfico que se extiende hasta hacia el este por debajo de la cuenca de Falcón tierra adentro y la cuenca de Bonaire de nuevo costa afuera. Este cinturón metamórfico cretácico es

distinto del basamento paleozoico o precámbrico que encuentra en la cuenca de Maracaibo o distintito también del basamento de las islas de Sotavento. El basamento de esta cuenca no reposa sobre rocas ricas en materia orgánica ni unidades clásticas paleógenas que sirven como reservorio como sucede en la cuenca de Maracaibo si no que más bien se encuentran secciones de arenas, lutitas y sobre todo calizas del Eoceno tardío al Pleistoceno. Los campos de gas y petróleo del sur al sureste del golfo tanto en el surco de Urumaco como en la cuenca de Falcón son alimentados por materia orgánica marina proveniente de sucesiones ricas en arcilla del Oligoceno al Mioceno (Coronel, 1967) .

La porción Central-Este del Golfo posee secciones sedimentarias del Terciario que pudiesen ser rocas generadoras de hidrocarburos, en la llamada Formación Agua Clara que ha generado petróleo en la Cuenca de Falcón adyacente. Sin embargo esta roca no es muy prolífica, unos 800 barriles por hectárea en términos muy aproximados. Lo que se espera en la porción del golfo son grandes espesores de areniscas delgadas y de lutitas terciarias, muy parecidas a lo que existe en la Cuenca de Falcón, donde no hay areniscas espesas, como las que si existen en la cuenca de Maracaibo. Por lo demás, se pueden esperar suficientes estructuras y la historia geológica ha sido más tranquila que en la porción Oeste. Todo esto significa que la porción Central-Este del Golfo tiene mejores prospectos de contener hidrocarburos que la porción Oeste. Sin embargo, y esto es muy importante: esta zona del Golfo se parece más, geológicamente, a la Cuenca de Falcón que a la Cuenca de Maracaibo. Lamentablemente ello quiere decir que los volúmenes de hidrocarburos que pudiesen encontrarse serían de cuantía mucho más modesta. La Cuenca de Falcón se caracteriza por pequeños campos de petróleo o de gas, con altas producciones iniciales y rápida declinación. No se han encontrado allí campos gigantescos como los de la Cuenca de Maracaibo. La otra consideración que hay que hacer es que la gruesa sección sedimentaria del terciario en la porción Central y Este del Golfo sugiere que, en lugar de petróleo, lo que pudiera encontrarse en esta zona es gas

natural, debido a las condiciones de altas temperaturas y presión que deben haber existido allí (Coronel, 1967).

La adyacencia geográfica de las cuencas de Maracaibo y el Golfo de Venezuela no tiene significación especial para la existencia de depósitos de hidrocarburos, ya que sus desarrollos geológicos en el tiempo fueron diferentes y están perfectamente separadas por la falla de Oca. El uso de la nomenclatura estratigráfica de la cuenca de Falcón podría no ser la más apropiada para el golfo; es decir, llamar Formación Socorro alguna sección del Mioceno e identificar el Miembro Cauderalito pudiera no corresponder a las secuencias nuevas. El área geográfica del Golfo de Venezuela está comprendida en una provincia geológica totalmente distinta a cualquier otra, donde por métodos geofísicos se han ubicado muchas estructuras favorables a la acumulación de hidrocarburos, algunas de gran tamaño, lo que podría representar depósitos de alta significación comercial. La comprobación de su existencia sólo es posible con la terminación de pozos exploratorios, en los cuales se logren pruebas de producción inobjtables, conforme a las prácticas rutinarias de la industria petrolera internacional (Coronel, 1967). Estudios recientes (Borromeo et al, 2011), evidencian la presencia de un gran campo gasífero en la zona de estudio que se encuentra en un yacimiento carbonatico del Mioceno temprano. Actualmente todo el golfo se encuentra bajo un intenso estudio de evaluación geológica bajo el marco del proyecto Rafael Urdaneta.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Sísmica de exploración

La sísmica de exploración, particularmente la sísmica de reflexión, es ampliamente la técnica geofísica más conocida y usada en la actualidad. Esta técnica no solamente abarca la búsqueda de recursos minerales, sino también abarca estudios de geotecnia e incluso arqueología pasando por estudios de riesgo ambiental. Sin embargo, el actual estado de sofisticación de este método se debe en gran medida a la enorme inversión en su desarrollo hecha por la industria de los hidrocarburos, sumado al desarrollo paralelo de la electrónica y la computación (Keary *et al*, 2002).

Más allá del desarrollo instrumental y computacional del método, que es más un proceso de desarrollo tecnológico paralelo al método geofísico, el verdadero desarrollo del método está basado en la extensión de la dimensionalidad de los datos grabados. En una primera etapa la sísmica trabajaba en una sola dimensión donde la información geológica estaba fundamentada en la inversión sísmica desarrollada a partir de la sismología. La segunda etapa está comprendida entre el desarrollo en dos dimensiones hasta inicios de la sísmica en tres dimensiones donde el aspecto más resaltante y lo que marca la pauta de la sísmica moderna es el concepto de CDP o también conocido como CMP el cual es ampliamente usado tanto en la sísmica 2D como en la sísmica 3D y que fue introducido a finales de los años 50, lo que generó una gran mejora en la calidad de la imagen sísmica. La última etapa, comprendida desde la actualidad y que se proyecta en el futuro, viene dada por el desarrollo de metodologías 4D que no es más que un 3D repetido en el tiempo y las 5D que son simplemente estudios 3D con dos componentes horizontales (sísmica multi-componente), lo que completan los dos nuevas dimensiones y estado el cual está en pleno desarrollo (Meunier, 2011).

3.2 Sísmica 3D

La introducción de la sísmica 3D tuvo un fuerte impacto en la exploración y producción de hidrocarburos la cual tiene una contribución sustancial en las reservas probadas del mundo. Las compañías han sido capaces de explorar y producir en áreas donde en tiempos recientes se creía habían acumulaciones no comerciales de hidrocarburos las cuales ahora se han convertido en reservas de viable producción. Esto se debe al incremento en la información y precisión que generan las imágenes sísmica 3D. Este incremento es notorio no solamente en estructuras que son evidentemente tridimensionales como los domos salinos del Golfo de México, sino también la mejora es evidente en estructuras que tienen una predominante dirección de buzamiento, ya que en términos de reservas la tierra no es bidimensional. La sísmica 3D provee la información detallada acerca de las características de un yacimiento, como canales y pequeñas fallas, información que es crucial para una estrategia efectiva de monitoreo y producción.

A finales de los años 80 e inicios de los años 90 el uso de la sísmica 3D para la exploración de hidrocarburos creció significativamente hasta establecerse como la regla y no la excepción en la industria. El valor económico provisto por la calidad y la cantidad de este tipo de información es compensado por los costos relacionados a la adquisición y procesamiento de datos sísmicos 3D, sobre todo en áreas donde el costo de perforación es muy alto (Biondi, 2007).

Un proyecto de sísmica 3D comprende tres grandes etapas: planificación y diseño, adquisición, procesamiento, e interpretación. Cada etapa comprende una gran cantidad de conocimientos y prácticas que son realmente extensas de forma tal que son muy pocas las compañías que pueden abarcar todas las etapas. El éxito de un proyecto sólo puede evaluarse al finalizar la última etapa por lo que repetir un proyecto desde el inicio puede ser prohibitivamente costoso, lo que requiere que cada etapa sea llevada correctamente y siempre interactuando con las demás ya que una

etapa se ve afectada directamente por la inmediatamente anterior, es decir, todas las etapas que llevan a una interpretación satisfactoria recaen en un correcto procesamiento de los datos que a su vez dependen de una adecuada señal sísmica. Para ilustrarlo mejor, ni siquiera un excelente procesamiento puede obtener una aceptable imagen sísmica de datos mal adquiridos (Evans, 2007).

3.3 Generalidades de sísmica 3D costa afuera

3.3.1 Planificación, diseño y adquisición

Antes de realizar el primer disparo en adquisición sísmica, los diseñadores de este tipo de estudio deben determinar la mejor manera el objetivo en el subsuelo. Como elementos básicos, ellos consideran la localización y tipos de fuentes y receptores, así como también todos los aspectos de logística de la etapa de adquisición. Existen muchos factores que entran en juego y deben tomarse en cuenta en esta etapa, como por ejemplo la salud y seguridad laboral y las condiciones del ambiente de trabajo por mencionar las más importantes.

Los especialistas en procesamiento de datos sísmicos mencionan tres elementos vitales para un correcto procesamiento; buena relación señal-ruido, alta capacidad resolutive y una adecuada cobertura espacial del objetivo (Ashton *et al*, 1993).

Una buena relación señal ruido corresponde a que en las trazas las altas amplitudes correspondan a las reflexiones y que las bajas amplitudes donde no haya reflexión o en el mejor de los casos que no existan amplitudes en dicha zona. Esto se garantiza con una fuente sísmica de suficiente poder y direccionabilidad. El ruido puede ser ocasionado por la fuente, como por ejemplo en el contexto de sísmica costa afuera el arreglo de los cañones de aire generan los llamados fantasmas. Una geometría apropiada evita el *aliasing* espacial de los datos, atenúa el ruido y mejora la calidad de la señal de interés. Uno de los ruidos coherentes que resultan problemáticos en estudios terrestres son producidos por las ondas superficiales y ningún diseño evita que este tipo de señal contamine la grabación por lo que es preferible tener bien muestreada esta señal para que pueda correctamente removida en procesamiento. Sin

embargo, este tipo de onda no se propaga en medios líquidos por lo que no aparece en los registros marinos que son adquiridos con buques. Existen otros métodos para suprimir el ruido pero son usados en la etapa de procesamiento y dependen en gran medida a la cobertura de los datos donde teóricamente la relación señal ruido incrementa entre mayor sea la cobertura, pero en la práctica se ha demostrado que existe una cobertura optima en la cual a partir de esta no existe realmente una mejora en esta relación. Este tipo de situaciones son realmente comunes en la sísmica y son evidentes en la literatura, es decir, la mayoría de las reglas que permiten definir parámetros claves están asociadas al conocimiento obtenido en la práctica, es decir reglas de oro o reglas empíricas (en ingles “*aliasing*”) que carecen de fundamentación teórica pero que han generado buenos resultados. Un ruido que es especialmente problemático son los múltiples y se originan dentro de zonas de baja velocidad, como por ejemplo entre la superficie del agua y el fondo oceánico o zonas con capas de roca poco consolidada. Este tipo de ruido es muy común en sísmica marina y son fáciles de confundir con reflexiones, como se puede observar en la figura 3. También son realmente difíciles de suprimir ya que contienen frecuencias y velocidades similares a la reflexiones por lo que el filtrado y el apilamiento no son efectivas; existen técnicas especiales para tratar con múltiples pero los investigadores siguen desarrollando metodologías para lidiar mejor con ellos (Ashton *et al*, 1993).

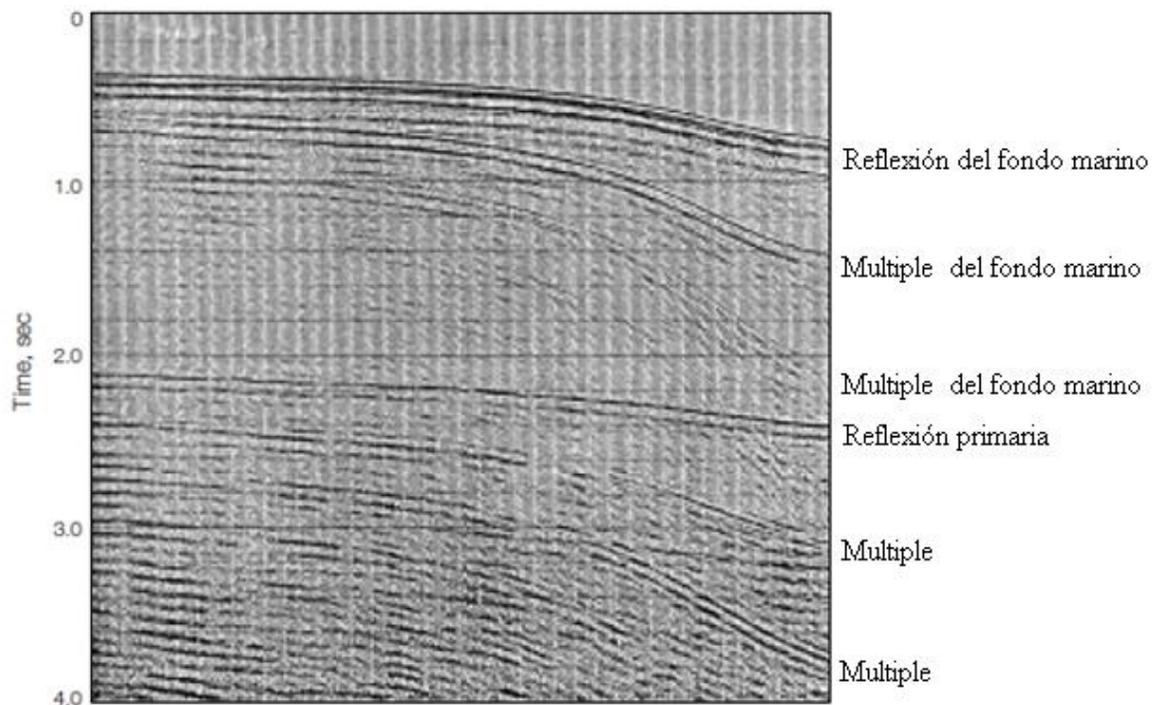


Figura 3. Sección sísmica de datos marinos con fuerte ruido ocasionado por múltiples.

La segunda característica es alta resolución o poder resolutivo, la cual se traduce en la capacidad de detectar reflectores. Esto es viable siempre y cuando se grabe un gran ancho de banda de frecuencias, entre más ancha sea mayor será el poder resolutivo de las ondas sísmicas. Algunas fuentes o arreglos de fuentes están diseñados para emitir energía en una banda específica de frecuencia, mientras que los receptores operan en una banda más ancha. Otro parámetro que afecta el contenido de frecuencias es la profundidad de la fuente y los receptores, como regla general entre más profundos se encuentren estos elementos mayor contenido de altas frecuencias se graban y por lo tanto se obtiene una mayor capacidad resolutiva.

La cobertura espacial, el cual es el tercer parámetro importante para asegurar una buena señal sísmica se asocia directamente con la geometría de adquisición, donde se calculan los tamaño de bin óptimos, espaciamiento de entre fuentes y receptores, etc. lo cual es muy importante para evitar *aliasing* espacial de los datos.

Existen básicamente dos métodos distintos para adquirir datos sísmicos en ambientes marinos. El primero y más convencional consiste en arreglos de hidrófonos dispuestos en cables llamados *streamers* que son remolcados por un buque a una profundidad de unos pocos metros, mientras el barco se mueve a una velocidad promedio de 4 a 5 nudos. La fuente sísmica puede estar unida al barco o también puede ser remolcada por la embarcación; actualmente existen variaciones de esta técnica donde dos o más barcos pueden grabar/disparar para generar distintos atributos en la sísmica. La longitud de los *streamers* puede llegar a ser de 8 kilómetros. La otra técnica consiste en que los receptores se posicionan en el fondo oceánico y pueden estar conectados a una embarcación estacionaria o a una plataforma. Este tipo de sistemas son llamados OBC o sísmica de fondo marino, pueden usar geófonos, hidrófonos o ambos y pueden grabar más componentes que el método convencional aunque son estudios mucho más costosos. En la figura 4 se puede observar un esquema de las distintas metodologías de adquisición de datos sísmicos marinos que permite ilustrar mejor lo anteriormente mencionado (Brown, 2004).

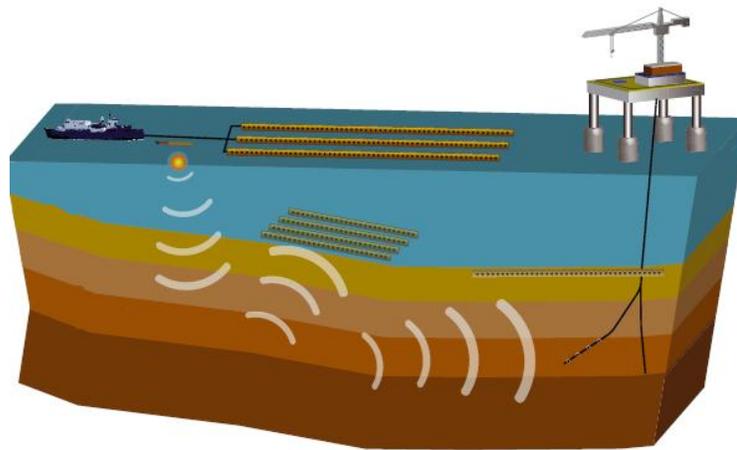


Figura 4. Esquema de las distintas metodologías de adquisición de datos sísmicos marinos.

La dirección de navegación es considerada la dirección *inline* del levantamiento sísmico y es a su vez la dirección de disparo. Esta dirección está asociada la mayoría de las veces a una decisión que depende del rumbo o buzamiento del objetivo a

iluminar así como también del objetivo del levantamiento (Egan *et al.*, 1991). Sin embargo, existen otros factores que también influyen en esta decisión como lo puede ser la proximidad de la línea de costa, dirección de las corrientes marinas u obstáculos en la zona. Existen técnicas para tener cobertura en zonas de obstáculos, sobre todo en zonas de producción donde existen muchas plataformas, la más común es llamada *undershooting* y consiste en que dos embarcaciones viajan a cada lado del obstáculo donde una embarcación dispara y la otra registra o ambas realizan las dos acciones estando el obstáculo sobre el CMP, como se puede observar en la figura 5, no obstante Egan *et al.* (1991) mencionan que esta técnica genera diferencias en el rango de azimut cuando se cambia la configuración de los buques lo cual puede producir artefactos en los datos.

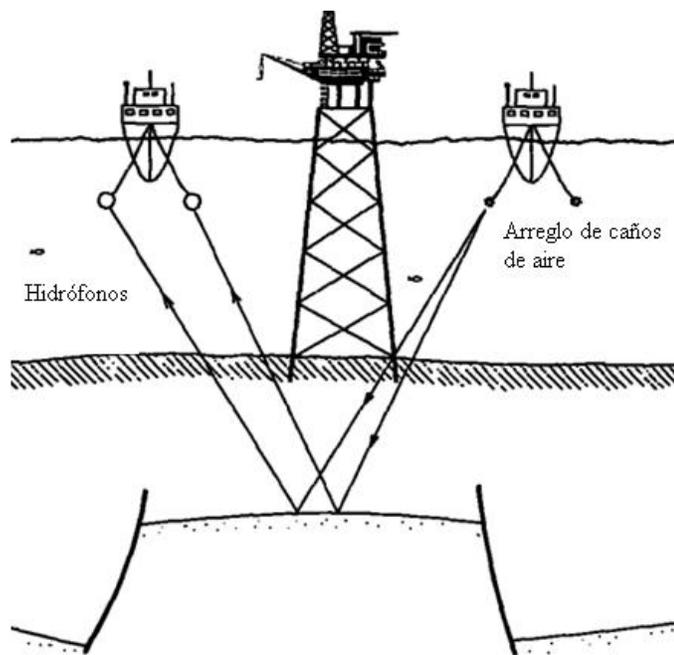


Figura 5. Técnica de undershooting

Los cañones de aire son la fuente tradicional y la más ampliamente usada para la gran mayoría de estudios de sísmica marina. En procesamiento se debe eliminar los efectos de ondícula de la fuente, por lo general se estudia la firma de la fuente para diseñar un

filtro inverso para remover su efecto. Existen algunos experimentos con fuentes marinas vibratorias que han generado resultados muy alentadores (Ziolkowski *et al*, 1982).

Hay otras consideraciones que se deben tomar en cuenta en la adquisición de datos marinos; entre ellas Stone (1994) menciona que el oleaje puede ser variable en amplitud, dirección y periodo generan ruido ambiental, como principio general el ruido es mucho menor cuando la dirección de navegación es perpendicular a la dirección del oleaje. Las corrientes marinas también generan problemas en la adquisición y se relaciona directamente con los movimientos transversales de los *streamer*, lo que ocasiona que el cable no siga la trayectoria de navegación del barco que tiene como consecuencia grabar CMPs distintos a los que estaban planeados afectando directamente las especificaciones de cobertura como se puede observar en la figura 6.

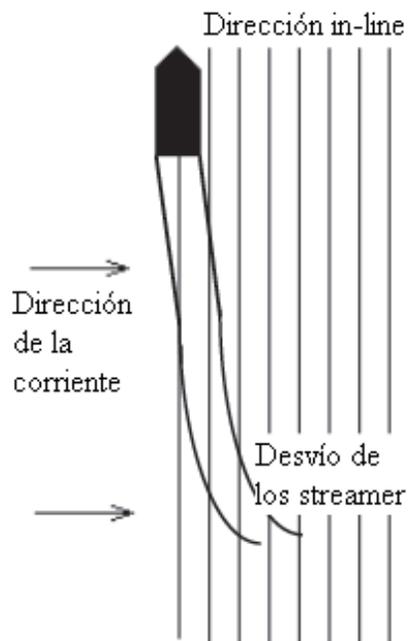


Figura 6. El desvío del streamer ocasiona que puntos medios se desplacen lateralmente.

3.3.2 Geometrías convencionales de adquisición con streamers

Las restricciones geométricas impuestas por este tipo de adquisición sólo permiten pocos tipos de diseños que son prácticos. Los levantamientos de sísmica marina 3D adquiridos por buques remolcando *streamers* están diseñados como una secuencia de líneas 2D estrechamente espaciadas, entre 50 y 150 metros entre ellas. La alta densidad de datos provee una cobertura de CMPs que luego de procesamiento permite obtener imágenes 3-D del subsuelo. Existen muchos patrones de navegación posibles para cubrir el área de estudio, en la figura 7 se puede observar un ejemplo de un circuito en el cual la dirección de disparo varía. Generalmente se selecciona un patrón que minimice el tiempo de moverse entre las líneas. En términos prácticos, sólo existe un sólo tipo de geometría para levantamientos sísmicos remolcando *streamers* y es un arreglo paralelo, donde tanto los receptores como la fuentes están alineadas paralelas a la dirección de navegación (Evans, 1997).

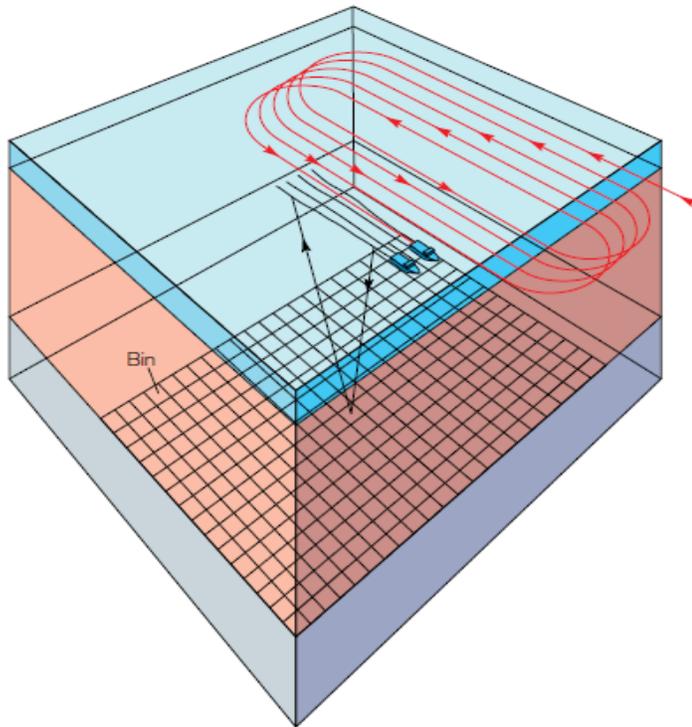


Figura 7. Técnica de navegación para grabación de datos sísmicos marinos 3D

3.3.3 Técnicas de adquisición y distribución azimutal

La geometría convencional de adquisición de sísmica marina 3D es la llamada sísmica de azimut reducido o *Narrow Azimuth* en inglés. Este nombre se debe justamente a la relación de aspecto del patch, que es el cociente entre la longitud *crossline* entre la longitud *inline*. Teniendo en cuenta que una embarcación convencional promedio actual tenga seis *streamers* espaciados 100 metros entre sí con una longitud de 8 km, esta relación de aspecto es realmente baja. Aunque la distribución de offsets es más regular para un mismo azimut, la distribución de azimut es muy reducida. Este tipo de geometrías son mejores para estudios de AVO y DMO (Lansley, 1994).

Este tipo de adquisiciones realizadas por una sola embarcación con múltiples *streamers*, a parte de los primeros bin, todos los demás tienen relativamente un azimut común por lo que la imagen sísmica ilumina una dirección en particular. La figura 9 muestra un esquema de la adquisición convencional donde en la esquina inferior derecha se observa un diagrama de rosas que muestra la distribución azimutal y el rango de offsets. El centro del diagrama representa cero offset mientras que la circunferencia representa el offset máximo. Como se puede observar y se mencionó con anterioridad existe mayor distribución de azimuts para los offsets cercanos mientras que para los lejanos la distribución de azimuts es más reducida (Long, 2010).

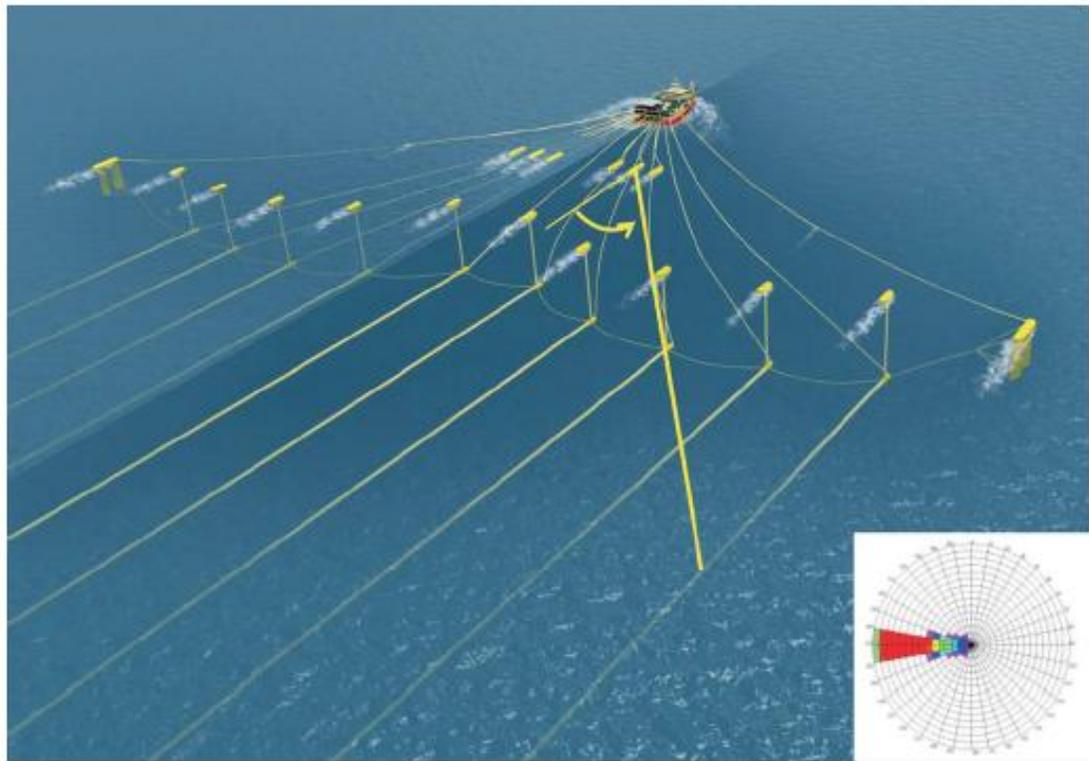


Figura 9. Esquema de adquisición con un único barco y diagrama de distribución de azimuts.

Se supone que mucho del ruido coherente puede ser removido en procesamiento, y que la iluminación es aceptablemente uniforme y puede generar imágenes sísmicas bien definidas. Muchas veces estas suposiciones están dentro de la realidad y permite cumplir con los objetivos de exploración o evaluación. Otras veces no son realistas y es realmente difícil procesar el ruido coherente generando también imágenes irregulares y distorsionadas donde en el peor de los casos lleva a proponer pozos en lugares equivocados o pasar por alto buenos yacimientos lo que ocasiona grandes pérdidas de dinero. Esto ha llevado a desarrollar nuevas metodologías para resolver estos problemas de donde han salido metodologías como Multi-Azimuth (MAZ), Wide-Azimuth (WAZ) y Rich-Azimuth (RAZ). El catalizador para el desarrollo de estas técnicas han sido los pocos fracasados, sobre todo en el Golfo de México y en el Mar del Norte donde existe una alta complejidad geológica (Barley y Summers, 2007).

Intuitivamente se puede entender que tener sólo una dirección preferencial es un estudio sísmico tiene influencia en la iluminación del objetivo, por lo que es natural pensar también que si se tienen más direcciones para un mismo objetivo esto proveerá una mejor iluminación del objetivo, hecho que es evidente en la figura 10. De hecho en los datos Narrow-Azimuth (NAZ) la iluminación es prácticamente en la dirección *inline* por lo que en la dirección *crossline* es relativamente pobre y el operador de migración es más propenso a adicionar ruido o a no generar una imagen clara.

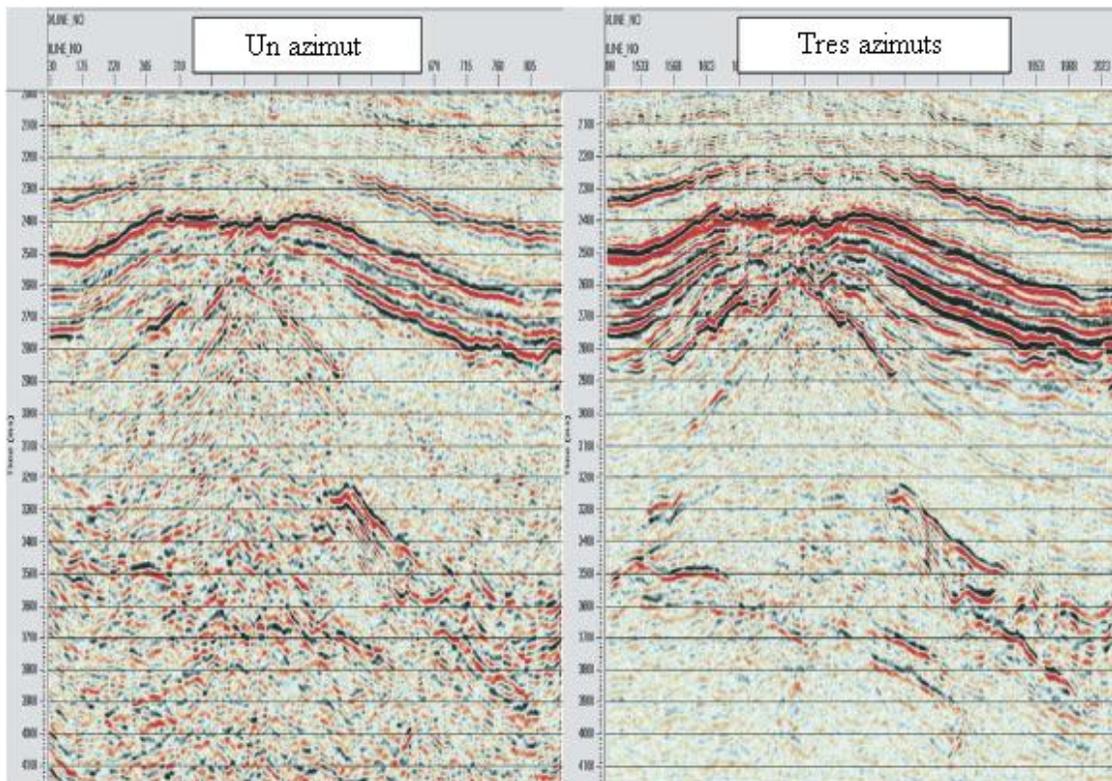


Figura 10. Comparación en la calidad de imagen Narrow vs Multi Azimuth

Las barreras comunes para obtener una imagen sísmica exitosa son las intrusiones salinas, volcánicas y los carbonatos. La industria de exploración costa afuera se mueve hacia ambientes desafiantes ya que la mayor parte de los yacimientos “fáciles” ya se encontraron. Muchos de los yacimientos que se han descubierto en estructuras complejas se han desarrollado muy poco o en el peor de los casos se han

subdesarrollado siendo la principal causa de esto los desafíos de la misma sísmica, los altos costos de perforación y producción en ambientes marinos profundos.

La calidad de datos sísmicos NAZ en zona complejas sirven únicamente como estudios de exploración pero en la gran mayoría de los casos no sirven como soporte para generar modelos precisos para el desarrollo adecuado de yacimientos inclusive en zonas de de relativa baja complejidad geológica debido a la incompleta iluminación del yacimiento, la baja relación señal-ruido y la baja resolución (Moldoveanu y Egan, 2006). También se ha mencionado que este tipo de adquisición es más propensa a generar huellas de adquisición en los datos (Bangrang *et al*, 2008). La industria a través de las compañías y las universidades se han dedicado a resolver los problemas pero enfocándose en mejorar los algoritmos y metodologías de procesamiento y herramientas de interpretación sin embargo esto no ha llevado a una mejora considerable de la imagen sísmica que se puede obtener de datos NAZ. Pafhenholz (2002) resume lo siguiente: la sísmica marina 3D convencional (NAZ) produce grandes zonas no iluminadas debajo de estructuras complejas, domos de sal por ejemplo, mientras que metodologías como Wide-Azimuth reducen significativamente estas zonas de baja o nula iluminación. La implementación y desarrollo de estas nuevas metodologías (Wide-azimuth WAZ, Multi-azimuth MAZ, Rich-azimuth RAZ y Full-azimuth FAZ) comenzaron en los primeros años del siglo XXI cuando la industria aceptó que incluso la mejor adquisición y el mejor procesamiento de datos NAZ no resolvía los problemas que el negocio presentaba. Un informe de la compañía BP evidencia que incluso para yacimientos convencionales la imagen generada por este tipo de datos difícilmente permitía tomar decisiones para el desarrollo y producción de yacimientos. Mientras que para zonas complejas la imagen generada por dichos datos se encuentran en el límite de lo aceptable y lo insuficiente incluso para tomar decisiones en la evaluación de yacimientos. La tendencia actual y hacia donde apunta el desarrollo de la industria es a usar los datos NAZ simplemente para exploración y delineación de posibles yacimientos, mientras

que las demás metodologías se harán sobre zonas de alto potencial de contenido de hidrocarburo para su evaluación, desarrollo y producción.

Las nuevas estrategias de adquisición consisten en lo siguiente: El Multi azimuth o MAZ consiste en múltiples levantamientos de NAZ pero con distintos azimuts para un mismo objetivo. El Wide Azimuth o WAZ consiste en dos o más embarcaciones usadas simultáneamente lo cual incrementa el rango de azimuts y offsets. El Rich Azimuth o RAZ vendría a ser la combinación de WAZ y MAZ. Por último se encuentra el Full Azimuth donde existe una perfecta distribución de offsets y azimuts (Long, 2010). Estas descripciones se pueden apreciar gráficamente en la figura 11 para cada metodología; como se ha descrito los datos adquiridos con una configuración NAZ podrían verse como un arreglo de levantamientos 2D muy juntos entre si, por lo que se le conoce en la industria como sísmica 2.5 D.

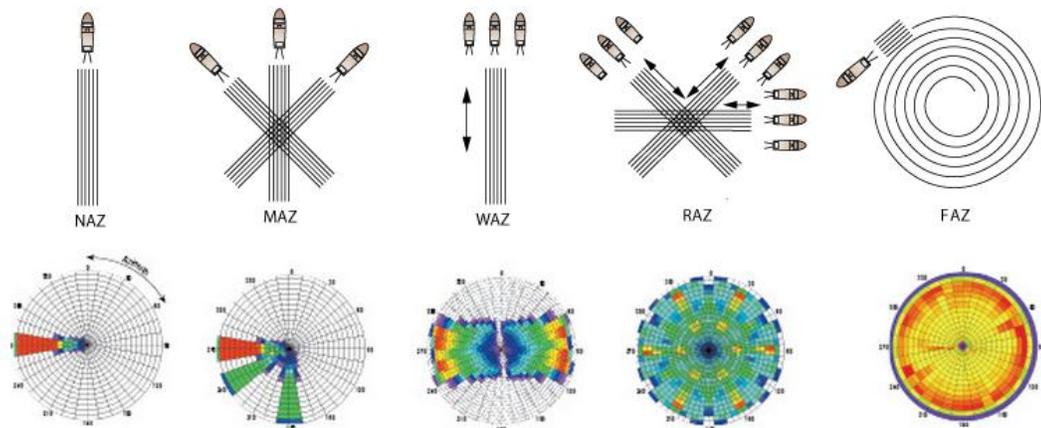


Figura 11. Esquema de las distintas estrategias de adquisición y su distribución azimutal.

Los beneficios de estas metodologías son descritos por diversos autores (Howard, 2007; Ling *et al*, 2006; Long *et al*, 2006 y Manning *et al*, 2007). En primer lugar mejoran la relación señal-ruido ya que tienes mayor cobertura e información de tiempos de llegadas para distintos azimuts, lo que se traduce en una mejor procesamiento de múltiples y una mejor resolución; mejor iluminación sobre todo en la dirección *crossline*; mejores modelos de velocidad y estimación de anisotropía que puede ser incorporada a dichos modelos. La eficiencia y los costos son las mayores desventajas que presentan estas metodologías mientras que el mayor beneficio es la reducción de riesgos para los primeros pozos lo que acorta el tiempo entre la exploración y la producción.

3.4 Generalidades del procesamiento de datos sísmicos 3D marinos

Los datos de sísmica de reflexión adquiridos en campo tienen que pasar por diversos procesos para que puedan ser interpretados en términos estratigráficos o estructurales. La señal que viaja desde la fuente al objetivo y es grabada por los receptores es modificada por muchos factores; el objetivo del procesamiento es justamente corregir los efectos producidos por dichos factores para generar una imagen que sólo responda a los efectos estructurales/estratigráficos que pueden ser interpretados; en resumen el procesamiento es la etapa que manipula los datos adquiridos en campo para obtener imágenes interpretables del subsuelo (Sheriff y Geldart, 1995)

Es imperativo que el intérprete esté al tanto de los problemas encontrados tanto en adquisición como en el procesamiento de los datos e incluso participar en estas etapas de un proyecto de sísmica de exploración ya que cada configuración geológica presenta problemas específicos en procesamiento (Gadallah y Fisher, 2009).

Existen diferencias en el procesamiento entre datos marinos y datos terrestres. En primer lugar no existen correcciones estáticas, ni por elevación ni por capa meteorizada; no existen estáticas de elevación porque todos los receptores se encuentran a una misma profundidad y no existen por capa meteorizada ya que los sedimentos al estar bajo una gran columna de agua no sufren meteorización. Por

supuesto hay excepciones a la regla, pero siguen siendo excepciones. Existen casos donde cambios en las propiedades del agua (temperatura, salinidad) o grandes arrecifes modernos que producen diferencias considerables en el tiempo de viaje de las ondas y producen anomalías estáticas que requieren de procesamiento avanzado (Lacombe *et al*, 2009). También pueden existir proyectos en zonas de transición como por ejemplo un gran delta donde pueden existir grandes capas de sedimento muy poco consolidado que requieran aplicar correcciones estáticas. Sin embargo este tipo de casos particulares sólo afecta alrededor del 10% de los datos costa afuera, lo que ahorra la etapa de seleccionar las primeras llegadas en las refracciones y el cálculo de las mismas al igual que el cálculo de estáticas residuales en la gran mayoría de los proyectos de sísmica marina (Cox, 1999).

Otro elemento que no se encuentra en el procesamiento de sísmica marina 3D para proyectos con *streamers* es la atenuación de las ondas superficiales o *ground roll* ya que estas no se propagan en el agua aunque existen ondas de carácter dispersivo llamadas “*mud roll*” que se originan en levantamiento de agua muy someras (Brittan y Starr, 2003) .

3.4.1 Secuencia de procesamiento de datos sísmicos 3D marinos

En la actualidad existen paquetes comerciales que contienen cientos de algoritmos ya que existen diversas formas de abordar cada problema de procesamiento donde el analista puede usar distintas técnicas y parámetros que lo lleven a un resultado satisfactorio. La secuencia básica de procesamiento estaría estructurada como lo muestra la figura 12.

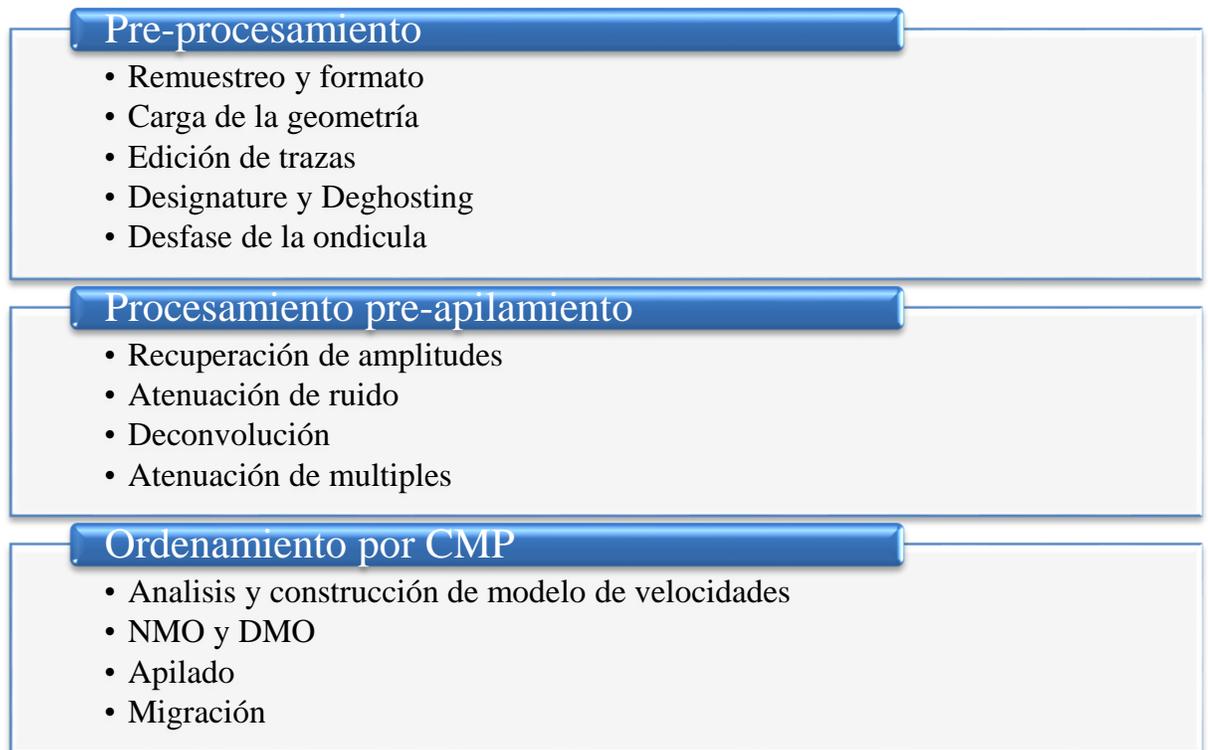


Figura 12. Esquema de flujo de procesamiento de datos marinos 3D

3.4.2 Remuestreo y formato

Esta etapa consiste en convertir los datos que tienen un formato estándar para la grabación en campo a un formato que es determinado por el tipo de paquete de procesamiento de cierta compañía. El remuestreo que por lo general consiste en pasar de un intervalo de muestreo de 2 ms a 4 ms. Un intervalo de muestreo de 2 ms es suficiente para grabar frecuencias de hasta 250 Hz, frecuencia mucho mayor a las que realmente son registradas del subsuelo, particularmente en objetivos profundos donde el rango de frecuencias oscila entre los 30 y 50 Hz por lo que se hace un remuestreo a 4 ms que permite observar frecuencias de hasta 125 Hz. Se usa un filtro antialias para asegurar que las altas frecuencias en zonas someras no entren en *aliasing* con las bajas frecuencias; este proceso reduce el volumen de los datos en un 50 % lo que se traduce en menos cómputo para procesos posteriores (Bacon *et al*, 2003).

3.4.3 Carga de la geometría y edición de trazas

La edición de trazas consiste en remover registros dañados, registros mal disparados, canales abiertos, trazas ruidosas entre otros elementos que no contienen información útil. Luego la geometría de adquisición es cargada a los datos basado en los datos de navegación, coordenadas de disparos y receptores son asociadas a los encabezados de cada traza; establecer mal la geometría se traduce en asignar información a CMPs errados lo que genera secciones apiladas altamente degradadas (Yilmaz, 2001).

3.4.4 Procesamiento de la ondícula

El procesamiento de la ondícula busca manipularla de manera tal de obtener una forma simétrica en un rango compacto, ya que una ondícula con dicha forma permite resolver los eventos en tiempo mucho mejor. Todos los procesos que se realizan en esta etapa están basados en el principio de deconvolución en general pero este punto específico será tratado más adelante.

La señal producida por los cañones de aire tiene un impulso principal seguido de un segundo impulso con menor amplitud producido por la re expansión de la burbuja de aire. Esto ocasiona una señal no deseable puesto que cada reflexión tendrá una o más pequeñas repeticiones de ella misma. El proceso conocido como supresión de la firma de la fuente, en ingles *signature*, remueve los impulsos generados por la re expansión de la burbuja de aire lo que resulta en una ondícula más compacta. Este proceso considera que la firma de la fuente es conocida y consiste en la deconvolución determinística (Dragoset *et al*, 1987; Johnson, 1994).

Los fantasmas son un tipo de reverberación o múltiple pero de las ondas que quedan atrapadas en la masa de agua que existe entre el aire y el fondo marino. Estas reverberaciones son de gran magnitud y pueden verse bien marcadas en los datos sísmicos puesto que las diferencias de propiedades acústicas entre el agua y el fondo marino son grandes, los coeficientes de reflexión de los fantasmas también lo son. La atenuación de fantasmas, conocida también como *deghosting*, es un tipo de

deconvolución determinística donde se supone que el fantasma es una réplica de la señal original reducida en amplitud por cierto factor y retrasada cierto tiempo. Muchas veces este proceso es realizado de forma recursiva (Sheriff y Geldart, 2004).

El tipo de fase de la ondícula es una decisión importante en esta etapa del procesamiento, ya sea fase mínima o fase cero. Una ondícula fase cero es simétrica respecto a su centro, mientras que la de fase mínima empieza en tiempo cero y concentra la mayor cantidad de energía posible en este punto. Existen argumentos distintos para elegir alguna u otra fase. Ciertamente una ondícula de fase cero es más deseable debido a que tiene una resolución superior, indica mejor los tiempos de las reflexiones, así como también el espaciamiento entre reflectores (Schoenberger, 1974).

3.4.5 Recuperación de amplitudes

Existen diversos factores que ocasionan la pérdida de amplitud de la señal a medida que esta viaja en el subsuelo. Esto amerita una corrección ya puede haber señal de interés que tenga una respuesta débil debido a este efecto y pueda ser pasada por alto. Es común aplicar una corrección por divergencia esférica y adicionalmente aplicar una corrección exponencial en el tiempo para compensar las pérdidas por transmisión y atenuación (Yilmaz, 2001).

3.4.6 Atenuación de ruido coherente y ambiental

En sismica de reflexión se llama señal a las reflexiones primarias, es decir, aquellas reflejadas una primera y única vez. Todo lo demás es considerado ruido, incluyendo múltiples, difracciones, refracciones, ondas superficiales, entre otros, y cada ruido en particular se atenúa con una estrategia distinta.

En sismica marina existen mucho menos módulos para atenuar el ruido que en sismica terrestre, donde pueden haber muchas más fuentes de ruido. En levantamientos costa afuera un mar agitado es la principal fuente de ruido; este tipo de ruido es llamado ruido por oleaje o *swell noise* y tiene como principal

característica que es de baja frecuencia y de gran amplitud, donde por lo general es atenuado con un filtro pasa alto que sacrifica parte de la señal contenida en las bajas frecuencias como se puede observar en la figura 13. Existe también ruido por cambios de presión debido a cambios en la columna de agua que se encuentra sobre los hidrófonos pero este también es de baja frecuencia (de 0 a 2 Hz) por lo que puede ser eliminado junto con el ruido por oleaje. Existe un tercer ruido que es atenuado en este mismo proceso que es el ruido por remolque el cual es producido por movimientos bruscos de la embarcación, al igual que los anteriores es de baja frecuencia y alta amplitud (Larner *et al*, 1983).

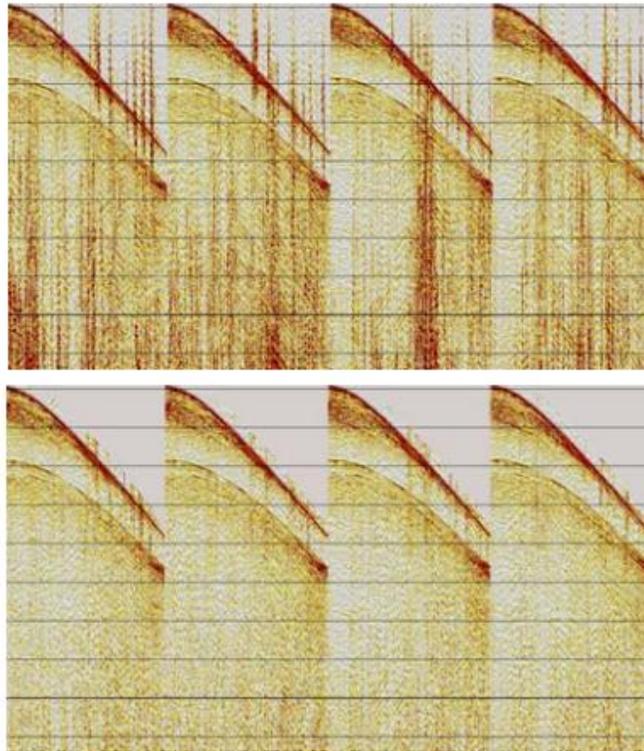


Figura 13. Atenuación de ruido de baja frecuencia y alta amplitud en datos sísmicos marinos.

Existen también otros tipos de ruido como el producido por las hélices propulsoras de la embarcación, vibraciones mecánicas producidas por el barco y vibraciones por perforaciones si se adquiere en una zona de producción; son por lo general ruidos intermitentes y ocupa una banda ancha de frecuencias. Por último puede existir ruido

de otra embarcación operando en la misma área; el ruido está presente en una banda ancha de frecuencias y tiene amplitudes más grandes en comparación con la información de reflexión de interés. Un abordaje común para remover este ruido es que al llevarlo a otro dominio tienden a caer en un área donde pueden ser eliminados (Elboth y Hermansen, 2009).

3.4.7 Deconvolución

Los registros sísmicos pueden ser vistos como la convolución de un impulso u ondícula con la serie de reflectividad del subsuelo. El proceso inverso es conocido como deconvolución, la cual busca extraer la función de reflectividad del subsuelo lo cual comprime aun más la ondícula y mejora la resolución vertical de la sísmica, atenúa reverberaciones y múltiples de corto periodo lo que conduce a una sísmica más interpretable. Se supone de forma estandarizada que la ondícula tiene una forma de fase mínima y/o que tiene un espectro plano. La deconvolución puede verse también como un filtro inverso (Robinson y Treitel, 2008).

Existen distintas metodologías para realizar la deconvolución; la deconvolución *spiking* acorta la ondícula e intenta hacerla lo más parecida posible a un impulso e intenta obtener un espectro plano. El contenido de frecuencias limita que esto sea posible y genera resultados ruidosos, especialmente en las altas frecuencias. La deconvolución predictiva usa la auto correlación para eliminar algunos múltiples. El nombre de predictiva está asociado a que un evento puede estar asociado a un evento anterior. Por último se encuentra la deconvolución determinística donde la ondícula es conocida y se elimina el efecto instrumental (Sheriff, 2004).

3.4.8 Ordenamiento por CMP

Es el proceso donde a cada traza se le asigna un punto medio entre un disparo y un receptor ya que el procesamiento de datos sísmicos se realiza en estas coordenadas. En el caso de sísmica marina los *streamers* difícilmente se mantienen rectos por lo que la distribución de CMP no es regular, lo cual sería bastante deseable para el

procesamiento de los datos. Suele suceder que para un CMP existen trazas con offsets similares mientras que en otros puntos no cae ninguna traza; para evitar este efecto se suele realizar un proceso llamado regularización, que tiene como finalidad mover las trazas a los puntos medios estipulados y mantener así un muestreo espacial regular lo cual es importante ya que esta característica la suponen la mayoría de los algoritmos de migración y al ser violada genera ruido y *aliasing* (Yilmaz, 2001).

3.4.9 Análisis de velocidad

La velocidad juega distintos roles importantes en la sísmica, entre ellos están eliminar el efecto del offset y es el factor más determinante para generar una imagen sísmica satisfactoria. Tradicionalmente, el modelo de velocidades ha sido descrito como insumo para el apilamiento (eliminar el efecto del offset) y la migración post apilamiento en tiempo, donde de cierta forma los datos geológicos recolectados aportan muy poco a la selección cuantitativa de los valores de velocidad; la velocidad se describe en este contexto como un parámetro de procesamiento que varía en tiempo y espacio donde para propósitos de apilamiento la distribución de velocidades es visto como un campo de números, el campo de velocidades. Luego en etapas posteriores, como lo son la migración en profundidad o la conversión tiempo a profundidad, la precisión con que se estima el modelo de velocidades debe ser realmente alta. El campo de velocidades usado para el apilamiento evoluciona a un modelo de velocidades donde se requiere interpretación geológica y datos de pozos para alcanzar dicha precisión requerida (Schultz, 1998).

La diferencias de llegadas con el offset y/o azimut son la base de todas las distintas metodologías para estimar velocidades a partir de los datos sísmicos. Existen un gran número de velocidades que pueden ser estimadas: interválica, aparente, promedio, cuadrática media, instantánea, NMO, entre otras. Sin embargo, para una primera aproximación la velocidad más confiable es aquella que genera un mejor apilamiento de las trazas, es decir, aquella velocidad que mejor horizontalice las hipérbolas de reflexión. (Yilmaz, 2001).

Existen diversos métodos para estimar velocidades, entre los más comunes se encuentran el análisis t^2-x^2 , análisis de velocidad constante y el análisis por espectro de velocidades. En el primer método mencionado el tiempo cuadrado de las reflexiones es graficado contra el cuadrado de la distancia offset de las trazas. Basado en una relación simple entre estas variables, la grafica debería estar aproximada a una línea recta. Las estáticas residuales y el ruido tienden a causar desviaciones de los tiempos de llegada. La pendiente de la línea es la inversa de la velocidad NMO. Esta técnica es usada para determinar la velocidad de reflectores significantes y estima valores muy confiables para el apilamiento.

El metodo de analisis de velocidad constante consiste en generar un rango de velocidades definidas por las maximas y minimas velocidades esperadas. Se usa un panel para cada velocidad donde se aplica la corrección para todo el registro con una misma velocidad constante. Se despliegan los paneles para las distintas velocidades y se tomas aquellas velocidades para ciertos tiempos donde existe la mayor coherencia y fuerza en las amplitudes. Este proceso es de naturaleza cualitativa por lo que se usa por lo general para control de calidad ya que resulta dificil establecer un criterio que permita estimar valores precisos de velocidad (Gadallah y Fisher, 2009).

Por otra parte el análisis por espectro de velocidades está basado en la correlación de las trazas para un mismo CMP donde se utilizan distintas evaluaciones estadísticas que reflejan la coherencia para un rango de velocidades donde la medida de coherencia más frecuente es la semblanza ya que es robusta al ruido, *aliasing* espacial y variaciones laterales de amplitud. Existen distintos métodos para graficar el espectro de velocidades pero el más común están basados en colores donde el azul representa baja semblanza o similitud mientras que el rojo representa el máximo valor de este donde el intérprete selecciona la velocidades interactivamente (Taner y Koehler, 1969).

3.4.10 Corrección dinámica o normal moveout

Se entiende por normal moveout (NMO) el efecto que tiene la distancia entre una fuente sísmica y un receptor (offset) en el tiempo de llegada de una reflexión, que se evidencia como el incremento en el tiempo con el offset. Esta relación es hiperbólica siempre y cuando se trate de offset cercanos y no exista la presencia de anisotropía lateral. Este efecto depende también de la velocidad y el azimut (Yilmaz, 2001).

La ecuación de la hipérbola para un reflector plano está bien descrita por lo que al tener un buen modelo de velocidad se puede realizar la corrección dinámica y corregir dicho efecto lo que resulta trazas de cero offset, es decir, la fuente y el receptor se encuentran sobre el mismo punto y el rayo de la onda realiza una trayectoria vertical en el subsuelo, cualidad que es muy difícil de obtener desde la grabación en campo y que simplifica procesos posteriores. Esto visualmente horizontaliza las hipérbolas de las reflexiones para un mismo CMP como se puede observar en la figura 14 (Liner, 1999).

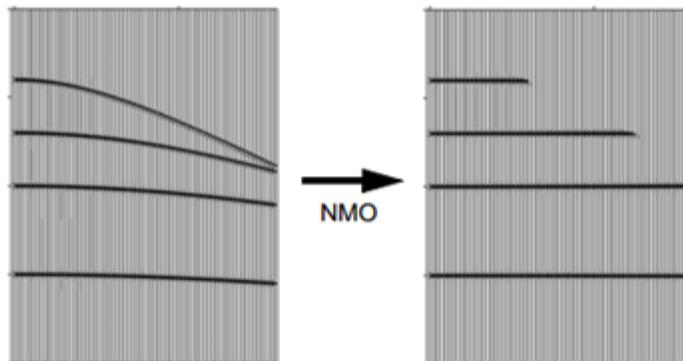


Figura 14. Conjunto de trazas para un mismo CMP luego de la corrección dinámica

3.4.11 Dip moveout (DMO)

El *dip moveout* comienza cuando no se cumple una asunción de la corrección dinámica, que es justamente que supone capas planas. Luego del NMO la traza es

efectivamente movida hacia el punto medio pero si el buzamiento de la capa es significativo las reflexiones no se encuentran ni en el lugar correcto ni en el tiempo correcto. En la figura 15 se puede observar gráficamente este efecto, donde la reflexión para una capa buzante no es el punto medio del arreglo de receptores y fuentes. Este proceso mueve la traza al lugar de cero offset en superficie, aunque este lugar en superficie no es necesariamente donde ocurre la reflexión en profundidad por lo menos cumple con la asunción de cero offset. Luego en migración los eventos se mueven a su correcta posición en tiempo y lugar; por esta razón a este proceso se le conoce como migración parcial pre-apilamiento (Hale, 1991).

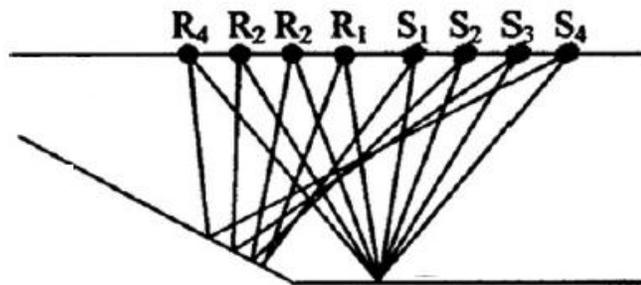


Figura 15. Diferencia en trayectoria, tiempo y posición de reflexión entre una capa buzante y plana

3.4.12 Apilamiento

Se conoce como apilamiento a la suma de trazas para un mismo CMP luego de la corrección por NMO y DMO para obtener una sola traza por CMP. Los múltiples no se alinean muy bien en el NMO ya que llegan luego de su reflexión y tienen velocidades similares por lo que atenúa severamente los múltiples. El apilamiento supone que todas las trazas tienen igual peso por lo que la amplitud de salida es dividida por el número de trazas sumadas, en ocasiones esto no necesariamente se cumple por lo que asignan diferentes pesos a las trazas. A las secciones apiladas se les conoce como secciones de offset cero y los algoritmos de migración post-apilamiento están basados en esta asunción. Otro resultado del apilamiento es que reduce notablemente el ruido aleatorio debido a su naturaleza no se alinea en la

corrección dinámica por lo cual al realizar la suma de las trazas se ve severamente atenuado mejorando la relación señal-ruido. También debe notarse que el apilamiento reduce el volumen de los datos en un factor que es dado por la cobertura (Lindseth, 1968).

3.4.13 Atenuación de múltiples

La supresión de múltiples es un antiguo y conocido problema en la sísmica de exploración. Existen diversos métodos para atenuar los múltiples y pueden ser clasificados en dos grandes categorías: Aquellos que sacan ventaja de la diferencia en la velocidad entre un evento primario y los múltiples, y aquellos métodos que sacan provecho de la periodicidad y predictibilidad de los múltiples (Weglein, 1999).

En la primera categoría, la corrección por NMO suele atenuar múltiples como se mencionó pero sólo si existen diferencias considerables en la velocidad de los eventos. El filtrado en el dominio F-K también permite explotar las diferencias en la velocidad al igual que la transformada de Radon pero permite discriminar esta diferencia de velocidades. El éxito de esta metodología dependerá de la diferencia que exista en las velocidades. La segunda categoría se aprovecha de la periodicidad de los múltiples ya que ocurren en intervalos regulares para offsets cercanos. Esta categoría es una alternativa cuando las diferencias de velocidad no son notorias o son demasiado complejas y las metodologías anteriormente mencionadas no son efectivas para atenuar múltiples. Dentro de esta categoría la deconvolución predictiva tiende a atenuar muy bien los múltiples. Existen distintos métodos que predicen el campo de onda y a partir de esta predicción se sustraen los múltiples de los datos (Weglein, 1999).

3.5 Migración

La migración es el proceso que se encarga de mover las reflexiones buzantes a su verdadera posición y de colapsar las difracciones, aumentando así la resolución espacial de los datos y generando una imagen sísmica que se aproxime lo más posible a la configuración geológica del subsuelo. Esto ocurre debido a lo que se supone en

procesamiento, capas con interfaces planas homogéneas e isotrópicas, sin embargo, la realidad del subsuelo está alejada de estas afirmaciones, lo que tiene como resultado que las reflexiones no se encuentren ni en su verdadera posición ni en su verdadero tiempo aun en esta etapa del procesamiento (Jones *et al*, 2008)

En la actualidad la migración ocupa una posición central en el flujo de procesamiento moderno de datos sísmicos. Representa prácticamente la culminación del procesamiento estándar y sirve como insumo para post-procesos que no son estándar dentro del flujo de trabajo. Anteriormente, en zona de geología simple las asunciones permitían que la migración fuese opcional y era usado cuando ciertas difracciones distorsionaban un objetivo. En la actualidad la migración es un proceso que se aplica a todos los registros sísmicos, usualmente en pre apilamiento y cuyos resultados se usan para el análisis de amplitudes y otros atributos a partir de inversión o AVO (Gray *et al*, 2001).

La migración para corregir localización requiere conocimiento de la distribución de velocidades. Sin embargo, la migración es tolerante en modelos de velocidades con errores verticales lo que produce imágenes bastante aceptables del subsuelo aun cuando los eventos no están correctamente localizados, en cambio es más sensible a los cambios laterales de velocidad (Yilmaz, 2001).

Existen una gran cantidad de técnicas y metodologías para realizar la migración y donde algunos son más adecuados para cierto contexto que otros. Existen dos criterios distintos para clasificar las estrategias de migración; en función a como se aplica el modelo de velocidades (migración en tiempo o en profundidad) o en función al dominio que se realiza la migración (migración pre o post apilamiento).

Estos criterios están desligados uno del otro lo que permite la combinación de ellos, lo que conduce a cuatro posibles estrategias de migración que serán adecuadas para distintas situaciones. En términos generales la migración post-apilamiento o migración cero offset como su nombre lo indica es la migración que se realiza luego del apilamiento donde se supone que la señal está compuesta por difracciones y

reflexiones primarias, que la sección apilada representa la respuesta del subsuelo con un viaje de rayos con incidencia normal y poca variación lateral de la velocidad, características que se suponen al realizar la corrección por NMO; cuando estas premisas son violadas ya sea por la presencia de múltiples buzamientos pronunciados y fuertes cambios laterales de velocidad la migración postapilamiento no genera resultados satisfactorios. Lo anterior sucede en zonas estructuralmente complejas y es allí donde la migración pre apilamiento genera los mejores resultados, sin embargo, esta estrategia de migración tiene explícitamente el modelado directo del modelo de velocidad y es altamente sensible a la precisión de este modelo (Bancroft, 2008).

En el otro dominio tiende a pensarse que la migración en profundidad tiene ese nombre porque el resultado de la migración se muestra en ese dominio en vez de tiempo, lo cual es un entendimiento errado de este criterio de migración (Gray *et al*, 2001). La verdadera diferencia entre migración en tiempo o en profundidad es como usan la velocidad. La migración en tiempo simplifica los modelos de velocidad en velocidades constantes o en modelos unidimensionales de velocidad que varían linealmente con la profundidad para cada punto en profundidad sin tomar en cuenta la información del resto del campo de velocidad; esta forma de manejar la velocidad es inconsistente desde el punto de vista físico pero genera imágenes sísmicas satisfactorias para modelos simples de velocidad. Por otro lado, la migración en profundidad usa un modelo de velocidades del subsuelo, lo que permite modelar el comportamientos de las ondas sísmicas mucho mejor que la migración en tiempo, además que se ha desarrollado como técnica de estimación de velocidades. Sin embargo, este último método requiere que el modelo de velocidad sea bastante preciso ya que los resultados son bastante sensibles a este hecho por lo que generalmente trabaja bajo un esquema iterativo de actualización del modelo de velocidad (Etgen y Kumar, 2012).

Teniendo en cuenta que existen cuatro posibles combinaciones entre las clases de migración, cuando escoger alguna en detrimento de las otras puede llegar a ser un problema para quien no es experto en migración. Básicamente se tiene el siguiente

criterio, que está basado en los fundamentos de cada combinación que mejores resultados genera en la imagen sísmica y que pueden entenderse gráficamente en la figura 16; para zonas simples en velocidad y en estructura una migración post apilamiento en tiempo genera imágenes de alta calidad, si en cambio los modelos de velocidad no simples pero estructuralmente no lo es la migración pre apilamiento en tiempo es la más adecuada. Si estructuralmente es simple pero los modelos de velocidad no lo son, sería recomendable realizar una migración post apilamiento en profundidad. Bajo el contexto más complejo, velocidades y estructuras complejas como lo puede ser una intrusión salina, la migración pre-apilamiento en profundidad es la que mejor resultados genera. Se tiene que tener en cuenta que entre más complejo es el problemas mayor costo computacional requiere (Albertin *et al*, 2002).

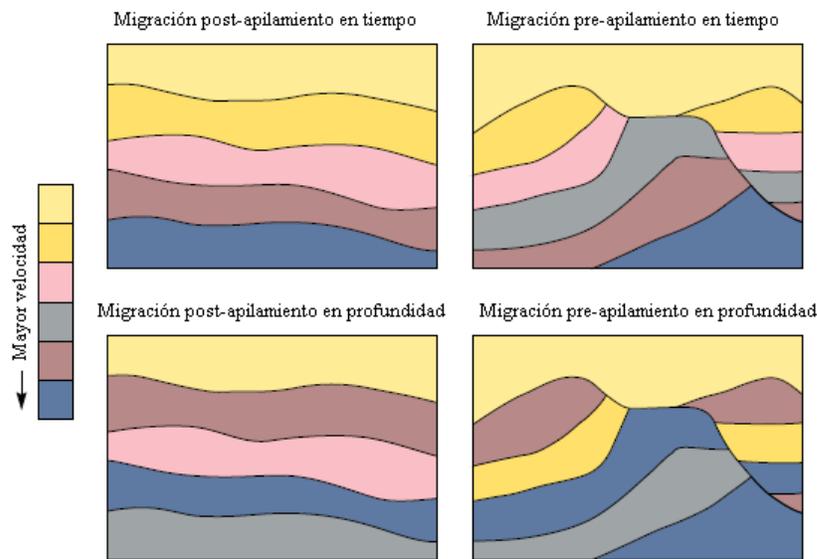


Figura 16. Estrategias adecuadas de migración según contexto geológico de aplicación

3.6 Algoritmos de migración

Existe un tercer tipo de clase, y es el tipo de algoritmo de migración. En este aspecto existen muchas metodologías y cada algoritmo tiene sus propias ventajas y desventajas. La selección de un algoritmo es un acto de balanceo donde influyen factores como la complejidad estructural, capacidad de computo, relación señal-ruido, tiempo disponible, certeza del modelo de velocidad, entre otros. Un algoritmo ideal

debería manejar todos los rangos de buzamiento, pronunciadas variaciones de velocidad en cualquier dirección, preserva amplitudes y fases, no genera artefactos y es computacionalmente barato y rápido. Ningún algoritmo tiene todas esas cualidades, algunos tienen una o más cualidades de las anteriormente mencionadas. Los distintos algoritmos de migración están basados en la ecuación de onda escalar de una dirección y su solución. Los algoritmos pueden ser clasificados en como obtienen dicha solución; aquellos basados en una solución integral, basados en aproximaciones por diferencias finitas y finalmente aquellos basados en implementaciones en el dominio F-K (Yilmaz, 2001).

3.6.1 Migración por Diferencias finitas

Este algoritmo extrapola los datos iniciales usando incrementos finitos de profundidad y predice como se verían los datos si los geófonos estuviesen en una nueva profundidad. El proceso es iterativo y este para cuando el proceso llega a la profundidad en la cual la energía justo se refleja en el reflector, por lo cual en tiempo el campo de ondas tiene la verdadera forma del reflector. La figura 17 muestra el fundamento de este algoritmo gráficamente donde en la primera ventana a la izquierda para un punto difractor se puede observar su hipérbola de difracción, a medida que se realizan aumentos finitos en la profundidad, cuando los geófonos se encuentran sobre el punto (última sección a la derecha) se obtiene justamente el punto difractor (Sheriff y Geldart, 1995).

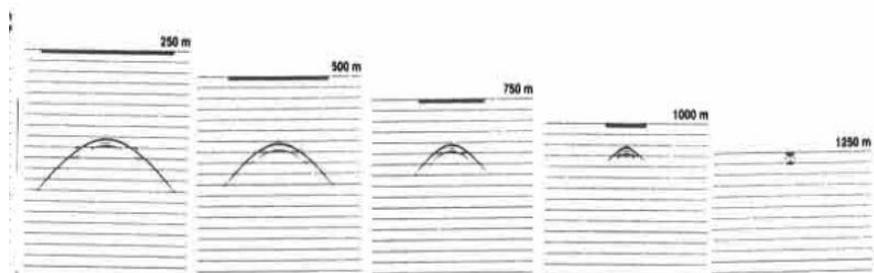


Figura 17. Esquema de trabajo de migración por Diferencias Finitas

Una de las principales ventajas del método es que genera resultados bastante precisos en modelos de velocidad con variación laterales de velocidad moderados y generan muy poco ruido. Las principales desventajas consisten en que los buzamientos son limitados y responden directamente al tipo de ecuación usada, además que puede ser relativamente costoso computacionalmente ya que es un proceso iterativo.

3.6.2 Migración en el dominio F-K

Los algoritmos anteriormente descritos trabajan bajo el dominio t-x pero también existen algoritmos que operan en el dominio f-k. Estas implementaciones no pueden ser explicadas tan fácilmente como las anteriores bajo un punto de vista físico. Stolt (1978) y Gazdag (1978) introducen cada uno un algoritmo de migración en este dominio donde los datos son transformados a este dominio a partir de la Transformada de Fourier 2D donde la ecuación de onda para velocidad constante se vuelve realmente simple. La migración se logra reposicionando la energía en este dominio a partir de diferencias finitas de la solución de la ecuación de onda y luego se realiza una transformada inversa para volver al dominio f-x. Son capaces de migrar buzamientos pronunciados, no generan muy poco ruido y son realmente rápidos, aunque por otro lado no son algoritmos ampliamente disponibles y son poco flexibles (Gray *et al*, 2001).

3.7 Migración de Kirchhoff

La migración de Kirchhoff es conceptualmente la más simple de las aproximaciones de migración. Puede operar en el dominio espacio-tiempo, puede ser un algoritmo en tiempo o en profundidad, en 2D y 3D, en pre o post apilamiento y puede operar dentro de una ventana específica de tiempo. Como se puede notar es probablemente el método más versátil pero esto no significa que sea el más preciso ni el más rápido (Gray, 2001).

Un reflector puede visualizarse como un conjunto de puntos difractores estrechamente espaciados. La respuesta de un punto de difracción en el subsuelo es una hipérbola cuya apertura es función de la velocidad. Por lo tanto, sumar sobre la

hipérbola apropiada para cada tiempo muestreado colapsa las difracciones y genera la imagen del reflector. El campo de velocidades es usado para determinar las curvas hiperbólicas donde se realiza la suma de energía y viene dada por la siguiente fórmula:

$$T^2(x) = T_0^2 + \frac{4x^2}{V^2(T_0)} \quad (1)$$

Donde x es la distancia entre la traza de entrada y la traza migrada, T_0 es el tiempo doble a cero offset donde ocurre la difracción y V es la velocidad definida en T_0 (Bancroft, 2008). El operador de suma esta ponderado para resolver la ecuación de onda. El método está basado en el teorema de Kirchhoff para la solución integral de la ecuación de onda para un punto fuente. Este teorema no es más que el principio de Huygens cuantificado y formulado. Afirma que si el valor de un campo de onda es conocido en una superficie cercana junto con la normal y el tiempo derivado de dicha superficie, el campo de onda en cualquier punto de la superficie puede ser calculado por la integración de los datos conocidos sobre la superficie (Johnson y French, 1982).

La migración de Kirchhoff está basada en la teoría de la función de Green que lleva a una solución integral de la ecuación de onda. El resultado realmente simple y le forma general viene dada por la siguiente expresión integral:

$$I(\xi) = \int_{\Omega_\xi} W(\xi, \mathbf{m}, \mathbf{h}) D[t = t_D(\xi, \mathbf{m}, \mathbf{h}), \mathbf{m}, \mathbf{h}] d\mathbf{m} d\mathbf{h}. \quad (2)$$

La solución está definida en un espacio tridimensional $\xi = (z_\xi, x_\xi, y_\xi)$ que es igual a la integral de superficie de los valores de los datos $D(t, \mathbf{m}, \mathbf{h})$ evaluados en un tiempo $t_D(\xi, \mathbf{m}, \mathbf{h})$ y ponderado por el factor $W(\xi, \mathbf{m}, \mathbf{h})$ (Schneider, 1978).

El algoritmo construye la imagen punto por punto, calculando para cada valor de entrada a que tiempo una difracción de un hipotético punto de dispersión localizado en cierto lugar hubiese llegado. La muestra con ese tiempo de llegada es sumada lo que resulta en la imagen de salida que es localizada sobre el ápice de la hipotética hipérbola de difracción (Bancroft, 2008).

La migración de Kirchhoff ha demostrado ser altamente precisa en variedad de aplicaciones, a pesar de sus limitaciones teóricas, las cuales se proceden a describir: la primera, es que se usa una aproximación asintótica de teoría de rayos para obtener tiempos de llegadas y amplitudes la cual es válida para tiempos considerables, lo que afecta directamente la precisión de la migración de eventos en profundidades someras. En la práctica, incluso en esta zona somera se obtienen imágenes razonablemente aceptables aunque con degradación en la amplitud y en la fase.

La segunda debilidad de este algoritmo, que se intensifica en modelos de velocidad complejos, deriva directamente de la primera. Las distancias de propagación entre fuentes y receptores están limitadas a ser grandes. Existen distintas trayectorias posibles para el viaje de las ondas especialmente para largas distancias. Todas las variaciones de este algoritmo suponen que la energía se propaga a lo largo de unas pocos o prácticamente una única trayectoria. Esta restricción también genera una fortaleza en el algoritmo, maneja las variaciones laterales de velocidad con relativa eficiencia pero con relativa baja precisión, donde otras metodologías no trabajan tan eficientemente pero generan resultados más precisos (Gray *et al*, 2001).

Aparte de estas limitaciones teóricas, también existen dos desventajas prácticas en relación a otros métodos. En primer lugar, la falta de precisión en modelos complejos de velocidad, y el segundo es la susceptibilidad del operador a generar *aliasing*. El primer problema es atacado por variantes el algoritmo, en especial la Migración de Rayo Gaussiano, la cual descompone el campo de ondas en rayos lo cual permite manejar de mejor manera el problema de múltiples caminos. El segundo problema viene dado por la naturaleza del algoritmo, ya que realiza una suma sin tomar en

cuenta el contenido de frecuencias. En resumen las ventajas del método son que trabaja bastante bien con buzamientos pronunciados y permite migrar ventanas de tiempo mientras que las desventajas radican en la susceptibilidad a generar *aliasing* y poca precisión ante variaciones laterales de velocidad (Gray *et al*, 2001).

3.7.1 Apertura de migración

En la sección anterior se estable que la migración de Kirchhoff involucra la suma de amplitudes a lo largo de hipérbolas de difracción gobernadas por la velocidad. En teoría, la hipérbola se extiende infinitamente en el tiempo y el espacio por lo que la apertura debería ser igualmente infinita. En la práctica, la apertura siempre está limitada porque la región sobre la cual existen datos es finita por lo que se tiene que lidiar con hipérbolas truncadas (Schleicher *et al*, 2007). Este hecho tiene consecuencias tanto positivas como negativas; Hertweck *et al* (2003) mencionan tres elementos positivos de esta restricción espacial, en primer lugar que el proceso entero de migración puede ser acelerado al controlar el número de trazas a migrar, la apertura como tal funciona como un filtro de buzamientos lo que evita el *aliasing* para buzamientos pronunciados, y por último, sumar menos trazas reduce la cantidad de ruido que se introduce en la suma. Por otro lado tiene aspectos negativos causados por efectos de borde, como lo son las sonrisas o eventos falsos como se puede observar en la figura 18, que muestra los efectos de borde para datos sintéticos presentado por Hertweck *et al* (2003), donde además mencionan que para evitar estos efectos es recomendable aplicar una función ventana para que la apertura no termine bruscamente, sin embargo, esto puede ocasionar la destrucción de las verdaderas amplitudes.

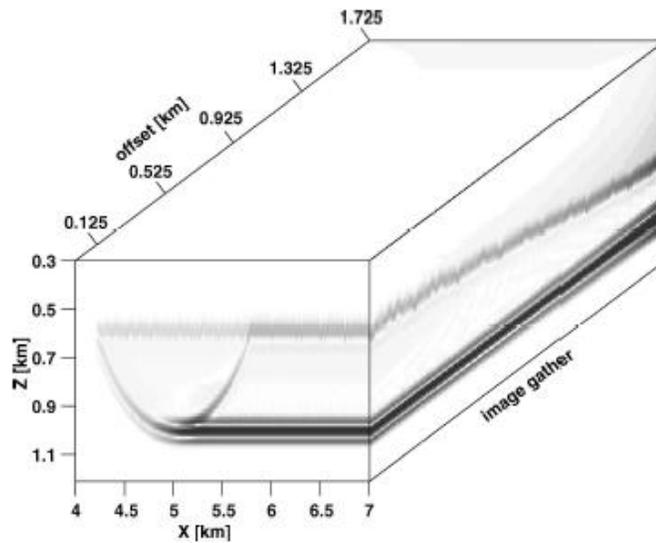


Figura 18. Efectos de borde producto de la limitación de la apertura del operador de Kirchhoff

Sun (1998) cuantifica los efectos de borde y menciona que si la apertura de migración es correctamente diseñada no es necesario aplicar una función ventana para minimizar estos efectos.

La extensión espacial hasta donde actúa el operador de suma se conoce como apertura de migración y es medido en función al número de trazas máximas que abarca o en función al ángulo de apertura como se puede observar en la figura 19 donde para cada criterio distinto las familias de hipérbolas son truncadas de forma igualmente distinta (Bancroft, 2008).

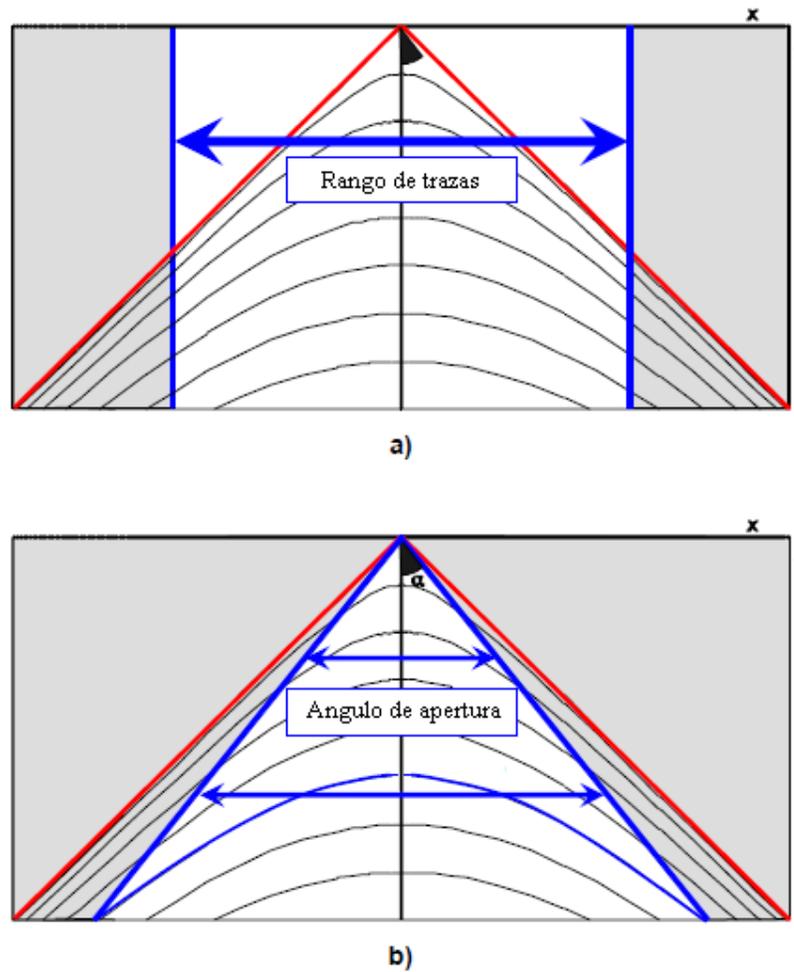


Figura 19. Distintas formas de escoger la apertura de migración. (a) por rango de trazas o (b) por ángulo de apertura.

La apertura de migración por lo general es un concepto que siempre viene asociado particularmente a la migración de Kirchhoff pero en realidad este parámetro es igualmente válido para todo los tipos de migración con la diferencia que en el método de Kirchhoff se trata este parámetro de forma implícita, mientras que para el resto este parámetro está implícito en otros (Bancroft, 2008).

La curvatura de la hipérbola de difracción es gobernada por el campo de velocidades. Entre menor sea la velocidad más angosta será la hipérbola comparada con una hipérbola de mayor velocidad que tiende a ser mucho más ancha. En la práctica, la velocidad varía al menos verticalmente por lo que la hipérbola de difracción debe variar con la profundidad para cada muestra en tiempo como se puede observar en la figura 20.

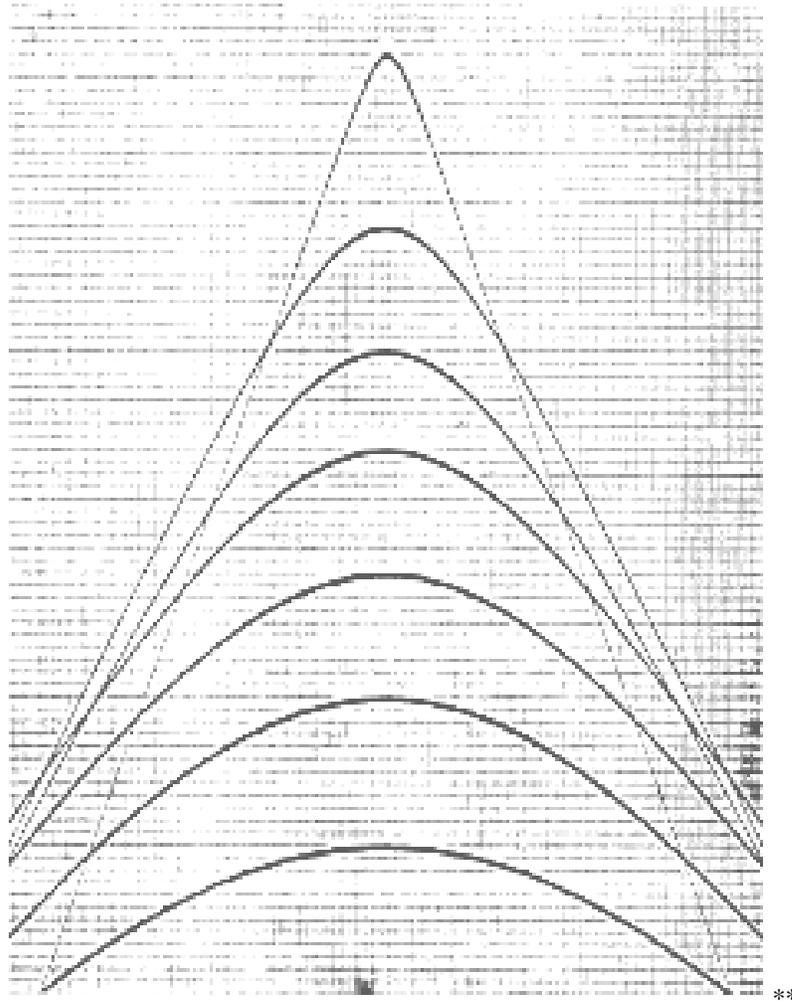


Figura 20. Familia de hipérbolas de difracción donde aumenta la velocidad con la profundidad

Teniendo en cuenta esto, la apertura de migración debería ser variante en el tiempo y debería ser función de la velocidad. En el caso más común, donde la velocidad aumenta con la profundidad, la migración de eventos someros requiere una apertura

estrecha mientras que para un evento profundo la apertura debe ser más ancha; esto implica que para un mismo buzamiento los eventos migran más lejos que para eventos someros, lo cual intuitivamente es coherente, otro aspecto que es igualmente intuitivo es que entre mayor sea la apertura mayor será el número de trazas a sumar por lo tanto mayor será el tiempo de cómputo. Teniendo en cuenta esto la apertura de migración también debería ser una función de la velocidad (Yilmaz, 2001).

En modo de resumen, los resultados obtenidos por Rastogi y Phadke (2002) en cuanto a los criterios de selección de la apertura de migración reflejan lo siguiente; pequeñas amplitudes destruyen eventos con buzamientos moderados a pronunciados, genera eventos horizontales espurios y genera ruido aleatoria en las partes profunda de los registros. Por otro lado, aperturas excesivamente grandes generan gran tiempo de cómputo, disminuyen la relación señal-ruido y generan ruido en la zona somera.

Determinar la apertura de migración adecuada es siempre difícil y por lo general termina siendo resultado de una gran cantidad de pruebas para distintas aperturas y se selecciona aquella en la cual la apertura deje de generar un mejora notable en los datos. Diversos autores (Yilmaz, 2001; Sheriff y Geldart, 1995); comentan que la apertura debería ser al menos dos veces la distancia horizontal migrada por el buzamiento más pronunciado, esta distancia horizontal viene dada por la siguiente expresión obtenida por Chun y Jacewitz (1981):

$$d_x = \frac{v^2 t}{4} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (3)$$

Donde $\Delta t / \Delta x$ es la tangente del ángulo aparente en tiempo.

Esta aproximación ha demostrado ser regular y muchas veces ineficiente. Diversos autores han trabajado en hallar una apertura óptima la cual está basada en la mejor imagen sísmica con el menor esfuerzo computacional posible. Schleicher *et al* 1997, Spinner y Mann, 2007, Sun y Bancroft, 2001, Sun 1998, 2000 han demostrado que

una apertura del tamaño de la zona de Fresnel cumple con la premisa anterior. El radio de la zona de Fresnel tiene la siguiente expresión (Sheriff, 1980):

$$x_f = \frac{v}{2} \sqrt{t_0 \tau} \quad (4)$$

Donde v es la velocidad intervállica evaluada en el punto reflector, τ es el periodo de la ondícula y t_0 es el tiempo doble de la reflexión. Esta zona varia con el offset pero este efecto es realmente difícil de cuantificar, aunque se ha demostrado con experimentos sintéticos que la variación es muy pequeña. Para asegurar que la apertura cubra toda la zona de Fresnel estimada esta se incrementa en 15% o 20% (Sun y Bancroft, 2001).

La zona de Fresnel es el área donde la energía es reflejada dentro de la mitad del ancho de onda a un receptor donde la energía interfiere constructivamente. Distintos rayos de propagación de onda que caen dentro de esta área no pueden ser distinguidos en superficie (Lindsey, 1989).

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

El esquema de la figura 21 representa los distintos procesos desarrollados en el presente trabajo especial de grado.

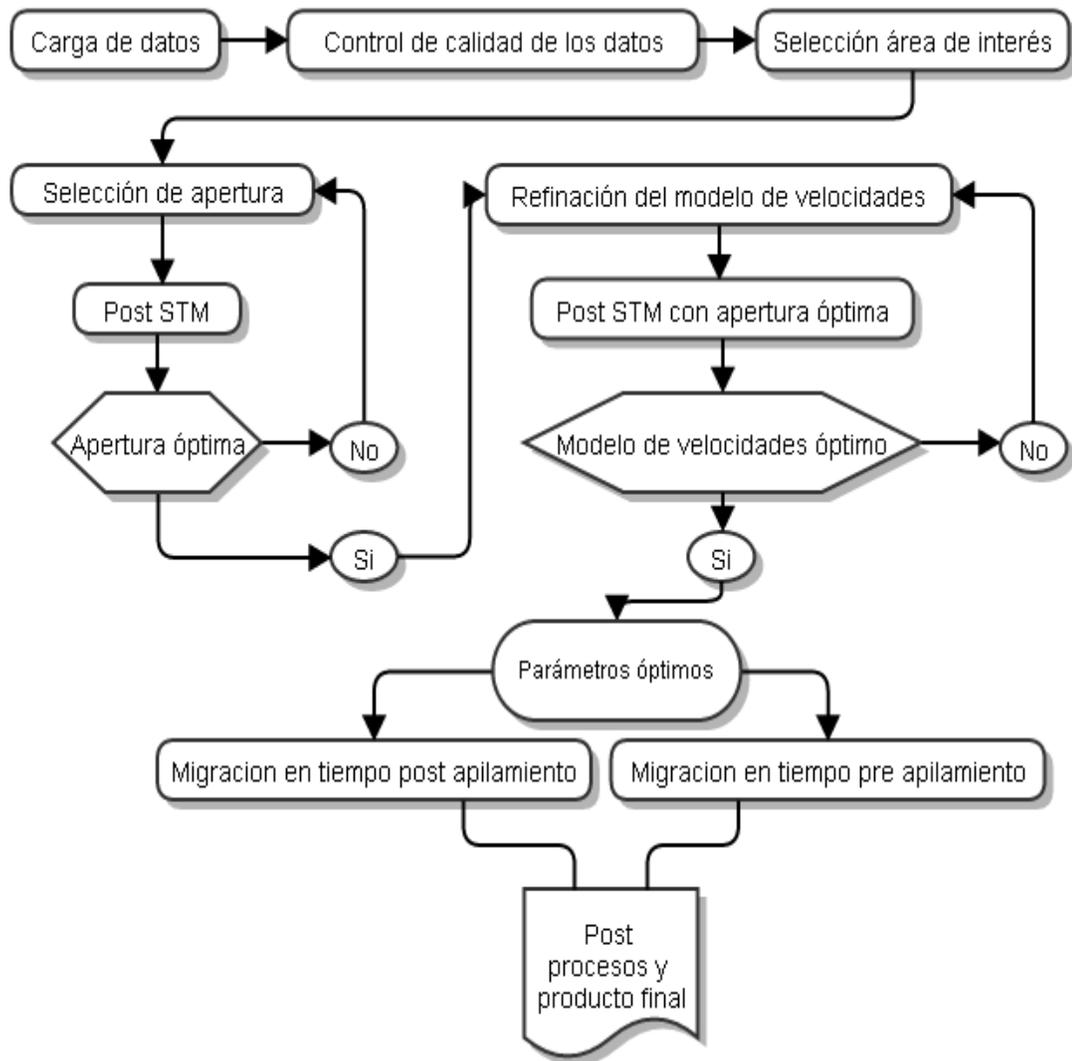


Figura 21. Esquema general de la metodología empleada en la investigación

4.1 Inventario de datos y validación de la información

Los datos disponibles del proyecto Robalo 10L 3D fueron procesados y facilitados por la filial de la compañía de servicios CGG en Caracas, Exgeo C.A. El inventario de datos facilitados es el siguiente:

- Volumen sísmico apilado sin post procesos en formato SEG Y.
- CDP GATHER del área central del proyecto con aproximadamente 25 km² en formato SEG Y.
- Volumen migrado sin post procesos en formato SEG Y.
- Volumen de velocidades RMS tanto en formato SEG Y como en ASCII.

La validación consistió en que la información contenida en el encabezado textual de cada SEG Y fuese coherente con la información de los encabezados de las trazas del archivo.

En el encabezado textual se define que el rango *inline* es 992-1930 y el rango *crossline* es 1132-5390, los bytes de carga para las coordenadas X son los 181-184 y para las coordenadas Y son el 185-188, los bytes de carga para los *inlines* son los 189-192 y para los *crosslines* son el 193-196, la tasa de muestreo es de 2 ms y la longitud del registro es de 6 s, cobertura de 60, 3001 muestras por trazas y un total de 3 259 469 trazas.

En este encabezado también se define la geometría del proyecto, que se expresa en la siguiente tabla:

Tabla 1. Vértices del proyecto, Proyección UTM 19 N

| Puntos | X | Y | INLINE | X-LINE |
|--------|-----------|------------|--------|--------|
| P1 | 342425.09 | 1317416.20 | 992 | 1132 |
| P2 | 342425.09 | 1344028.72 | 992 | 5390 |
| P3 | 365875.11 | 1344028.72 | 1930 | 5390 |
| P4 | 365875.11 | 1317416.20 | 1930 | 1132 |

La geometría evidencia que el proyecto tiene una rotación de 90° y que es rectangular, sin embargo no es realmente rectangular sino más bien una suerte trapecio rectángulo, como se puede observar en la figura 22, esto se debe a que el proyecto se encuentra muy cerca de la costa occidental de la Península de Paraguaná, por lo que el numero de trazas (3 259 469) es menor al número de *inlines* por el numero de *crosslines*, que es de 3 999 201. El tamaño del *bin* en la dirección *inline* y *crossline* es de 25 m y 6.25 m respectivamente.

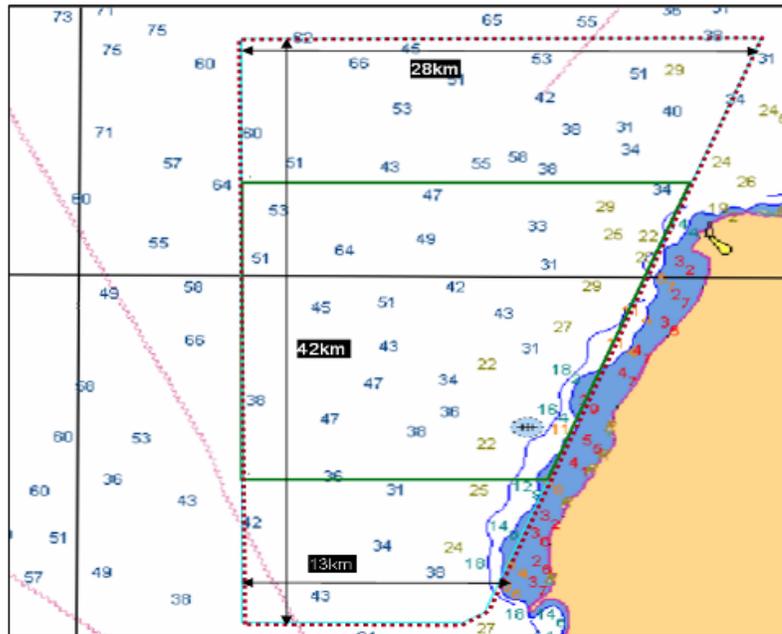


Figura 22. Diagrama de la geometría de adquisición

En el encabezado también se evidencia la secuencia de procesamiento seguida por la empresa hasta generar el volumen apilado, esta secuencia se puede observar en la figura 23.

```

C26 IDENTIFICACION DEL ESFEROIDE: WGS 1984
C27 HUSO:19
C28 COMENTARIOS: APILAMIENTO DMO EN TIEMPO SIN POST-PROCESOS
C29 SECUENCIA PROCESAMIENTO: LECTURA DE SEG D Y CAMBIO A FORMATO INTERNO
C30 ASIGNACION DE GEOMETRIA / FILTRO PASABANDA 3H @6dB,0ct-200H @370dB,0ct /
C31 ATENUACION DE RUIDO POR OLEAJE E IMPULSIVO / ANALISIS DE VELOCIDAD 3D /
C32 ATENUACION DEL RUIDO LINEAL I / ANALISIS DE VELOCIDAD 3D PASO 2 /
C33 ATENUACION DE RUIDO LINEAL II / ATENUACION DE MULTIPLE 1ER PASO /
C34 ANALISIS DE VELOCIDADES 3D PASO 3 / ATENUACION DE MULTIPLE 2DO PASO /
C35 ATENUACION DE RUIDO REMANENTE / COMPENSACION DE AMPLITUD/MAREAS /
C36 CONTROL DE AMPLITUDES / REGULARIZACION E INTERPOLACION DEL BIN /
C37 DMO / ANALISIS DE VELOCIDAD 3D DMO / ATENUACION DE RUIDO POST-APILAMIENTO /
C38 SEGY REFORMATO /
C39 *****
C40

```

Figura 23. Secuencia de procesamiento aplicada a los datos apilados disponibles.

Al hacer el mapeo de los encabezados de las trazas, los bytes de carga están bien definidos, al igual que el rango de *inlines* y *crosslines* además de las coordenadas y número total de trazas, como se evidencia en la figura 24.

| - Number of Traces: 3259469 | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|------|--------|--------|---|-----|---------|---|-----|---------|---|
| HDRNAM | TYPE | OFFSET | FORMAT | I | TR# | 1 | I | TR# | 2 | I |
| RSTATRC1 | I | 173 | 16INT | I | | 0 | | | 0 | |
| RSTATRCN | I | 175 | 16INT | I | | 0 | | | 0 | |
| GAPSIZE | I | 177 | 16INT | I | | 0 | | | 0 | |
| OVERTRVL | I | 179 | 16INT | I | | 0 | | | 0 | |
| CDP-X | F | 181 | 32INT | I | | 342425 | | | 342425 | |
| CDP-Y | F | 185 | 32INT | I | | 1317416 | | | 1317422 | |
| CDPLBLS | I | 189 | 32INT | I | | 992 | | | 992 | |
| CDPLBLX | I | 193 | 32INT | I | | 1132 | | | 1133 | |
| SHOT | I | 197 | 32INT | I | | 0 | | | 0 | |

Figura 24, Mapeo de los encabezados de las trazas de los datos apilados.

La información en el encabezado textual tanto para el modelo de velocidades como para el volumen migrado es idéntica al del volumen apilado, y el resultado del mapeo de los encabezados de las trazas no evidencio ningún error en los archivos. Sin embargo, el encabezado textual del CDP GATHER presentó inconsistencias. En la figura 25 se evidencia que el rango de *inlines* es de 1360-1561 y *crosslines* 2850-3651 pero cuando definen la geometría, el rango de *inlines* es de 986-1932 y

crosslines 1103-5402. Al realizar el mapeo de los encabezados de las trazas se confirma que el primer rango es el correcto y que el área es exactamente 25 km².

```

C01 CLIENTE; PDVSA                                COMPANIA; EXGEO
C02 NOMBRE DEL PROYECTO; G0-R0-10L-3D-1          AREA; GOLFO DE VENEZUELA
C03 INLINE;1360-1561    X-LINE;2850-3651        TIPO DE INFORMACION; CDP GAT
C04 REEL NO.;0000004A    FECHA PROCESAMIENTO; DIC 2012    FORMATO; SEG-Y
C05 INPUT REEL; N/A      OUTPUT REEL; N/A          RECORDING;N/A
C06 CONTRATISTA DE COPIADO; N/A                  FECHA DE COPIADO; N/A
C07 DATUM; 0 m          VELOCIDAD DE REEMPLAZO; 1500 m/s
C08 TIEMPO PRIMERA MUESTRA; 0 ms
C09      X      Y      INLINE  X-LINE
C10 P1 342275.09 1317234.95   986   1103
C11 P2 342275.09 1344103.72   986   5402
C12 P3 365925.11 1344103.72  1932   5402
C13 P4 365925.11 1317234.95  1932   1103

```

Figura 25. Encabezado textual del CDP GATHER.

4.2 Definición y carga de la geometría con Paradigm Focus 5.4

Antes de cargar los datos en el programa de procesamiento Focus de la compañía Paradigm, se debe definir la geometría del proyecto, que ya está definida en la etapa anterior con las coordenadas y etiquetas de *los crosslines* e *inlines* para las cuatro esquinas del proyecto. Es necesario crear un *job* para cargar la geometría en la base de datos del proyecto. La figura 26 muestra el *job* para dicha geometría, en primer lugar el *job* necesita algún tipo de entrada siempre, así realmente no necesite ningún tipo de entrada, en este caso el DSIN se encuentra como comentario porque no existe ningún tipo de dato cargado al proyecto que pueda servir como entrada, por lo que se usa el DUMIN que simplemente crea una traza muerta como entrada. Luego se llama al modulo LINE3D que sirve para definir la geometría para proyectos 3D, lo que realmente hace es establecer la correspondencia entre los CDPs y la grilla de referencia basada en coordenadas geográficas. Se establece que se definen CDPs en el parámetro LOCNTYP. El origen o CDP número 1 siempre se debe definir manualmente con LOCN, donde se define sus coordenadas X y Y además de la etiqueta del primer *inline* y del primer *crossline*. Luego se puede definir la geometría de distintas maneras; por distancia y ángulos, con tres esquinas, por área o por incremento de posiciones.

Todo depende de que datos se dispongan, en este caso se dispone de las esquinas del proyecto por lo que se define la geometría a partir de tres esquinas con el comando CORNERS, aunque realmente se definen dos esquinas más, porque el origen ya se definió con el LOCN; se definen las coordenadas finales del primer *inline* y del primer *crossline*, el numero de *crosslines* e *inlines* y el incremento de las etiquetas de cada *inlines* y *crossline*, se corre el *job* y se define la geometría en la base de datos.

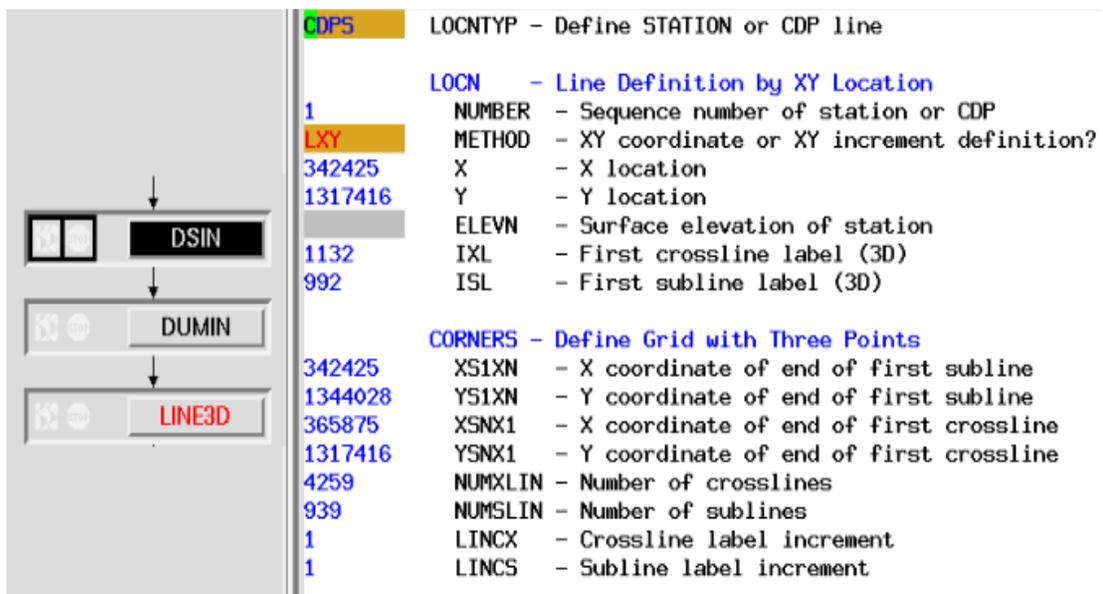


Figura 26. Job para definir geometría usando tres esquinas del proyecto.

Una vez cargada la geometría, el proyecto muestra que hay geometría definida como se puede observar en la figura 27. Donde muestra un esquema del área, tamaño del *bin*, etiquetas de los *inlines* y *crosslines* tanto iniciales como finales, ángulo de rotación, entre otros parámetros geométricos del proyecto. Si no se define con anterioridad la geometría, cuando se carga un volumen el sistema arroja un error que indica que no existe una geometría a la cual asignar los datos cargados.

3D Geometry Information From Database

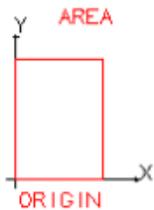
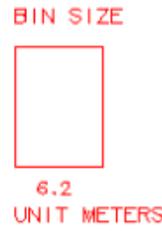
| | | | | |
|--|--------------------|------------------------------------|------------------|--|
| First Station Value (IFRSTA) | : <u>1</u> | Initial Subline Label (ISL) | : <u>992</u> | |
| Last Station Value (ILASTA) | : <u>3999201</u> | Final Subline Label | : <u>1930</u> |  |
| X Axis Origin (XORI) | : <u>342425.0</u> | Subline Label Inc. (LINCX) | : <u>1</u> | |
| Y Axis Origin (YORI) | : <u>1317416.0</u> | Initial Crossline Label (IXL) | : <u>1132</u> | |
| Counterclockwise Angle Of Survey Rotation (ANGLE) | : <u>90.0</u> | Final Crossline Label | : <u>5390</u> | |
| Dist. Between Crossline (DXLINE) | : <u>6.2</u> | Crossline Label Inc. (LINCX) | : <u>1</u> |  |
| Dist. Between Subline (DSLINE) | : <u>-25.0</u> | First CDP Number (IFSTCDP) | : <u>1</u> | |
| NO. CDP Along Subline (NTRS) | : <u>4259</u> | Last CDP Number (IENDCDP) | : <u>3999201</u> | |

Figura 27. Información de la geometría cargada en la base de datos.

4.3 Carga de datos con Paradigm Focus 5.4

Para la carga de datos con Focus el *job* es mucho más complejo (figura 28), el primer modulo del job es el GIN, que se encarga de leer cualquier tipo de formato que almacene trazas de forma secuencial, aquí se define la longitud de grabación, la tasa de muestreo, la forma con que se lee el archivo y en que bytes se encuentra determinada información. Luego se aplica el PROTAPPE que simplemente hace la conexión entre lo que se está leyendo y la geometría definida en la bases de datos.

El RESAMPLE se utiliza para remuestrear los datos de 2 ms a 6 ms, esto reduce el espacio que ocupa el dato en el sistema y el tiempo de cómputo para cada migración, se aplica un filtro anti-alias antes del remuestreo.

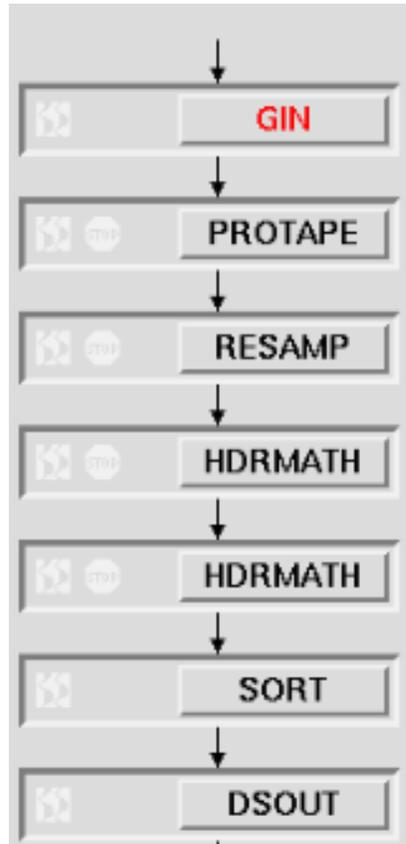


Figura 28. Job para cargar datos en Focus.

Los HDRMATH que siguen en el job realizan operaciones matemáticas en los encabezados, esto no sería necesario si los valores de los encabezados estuviesen correctamente definidos; al intentar cargar los datos por primera vez sólo cargaba el primer *inline* y todos los *crosslines*, luego de varias pruebas se encontró que los valores de CDP se repetían cada vez que se cambia de *inline* por lo que sólo se grababa información en el primer *inline* una y otra vez cada vez que se repetía la numeración como se puede ver en la figura 29 remarcado en rojo, donde al pasar del *inline* 992 al 993, la numeración del CDP no sólo se repite si no que tiene el mismo valor que el *crossline*. El HDRMATH manipula los valores de las trazas para que

esto no suceda sino que la numeración no se repita cada *inline* y se puedan cargar los datos sin errores.

| HDRNAM | TYPE | OFFSET | FORMAT | TR# | 4258 | TR# | 4259 | TR# | 4260 | TR# | 4261 | I |
|---------|------|--------|--------|-----|---------|---------|---------|-----|------|-----|---------|---|
| CDP | I | 21 | 32INT | I | 5389 | 5390 | 1132 | | | | 1133 | |
| SEQNO | I | 25 | 32INT | I | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | |
| TRACEID | I | 29 | 16INT | I | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | |
| VSTACK | I | 31 | 16INT | I | 0 | 0 | 0 | | | | 0 | |
| FOLD | I | 33 | 16INT | I | 60 | 60 | 60 | | | | 60 | |
| CDP-X | F | 181 | 32INT | I | 342425 | 342425 | 342450 | | | | 342450 | |
| CDP-Y | F | 185 | 32INT | I | 1344022 | 1344028 | 1317416 | | | | 1317422 | |
| CDPLBLS | I | 189 | 32INT | I | 992 | 992 | 993 | | | | 993 | |
| CDPLBLX | I | 193 | 32INT | I | 5389 | 5390 | 1132 | | | | 1133 | |

| HDRNAM | TYPE | OFFSET | FORMAT | TR# | 1 | TR# | 2 | TR# | 3 | TR# | 4 | I |
|---------|------|--------|--------|-----|---------|---------|---------|-----|---|-----|---------|---|
| CDP | I | 21 | 32INT | I | 1132 | 1133 | 1134 | | | | 1135 | |
| SEQNO | I | 25 | 32INT | I | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | |
| TRACEID | I | 29 | 16INT | I | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | |
| VSTACK | I | 31 | 16INT | I | 0 | 0 | 0 | | | | 0 | |
| FOLD | I | 33 | 16INT | I | 60 | 60 | 60 | | | | 60 | |
| CDP-X | F | 181 | 32INT | I | 342425 | 342425 | 342425 | | | | 342425 | |
| CDP-Y | F | 185 | 32INT | I | 1317416 | 1317422 | 1317428 | | | | 1317435 | |
| CDPLBLS | I | 189 | 32INT | I | 992 | 992 | 992 | | | | 992 | |
| CDPLBLX | I | 193 | 32INT | I | 1132 | 1133 | 1134 | | | | 1135 | |

Figura 29, Mapeo del encabezado donde se evidencia el error en la numeración de los CDP.

Una vez solucionado este problema se procede a sortear los datos cargados por CDP con el modulo SORT ya que la salida fue forzada como volumen en el DSOUT, donde también se define la etiqueta del volumen y la extensión en área del volumen. Este *job* es válido tanto para el volumen apilado y migrado como para el SEG Y de velocidades que se carga como un cubo sísmico que contiene amplitudes.

Para la carga del CDP GATHER se realiza un *job* distinto, ya que se encontró un problema también en la numeración de los CDP; estos estaban enumerados al igual que los valores de los *inlines*, por lo que también se repetían pero como no son datos apilados la manipulación matemática de los valores de las trazas no se puede realizar con el HDRMATH; en este caso se utilizó el PROTAPE para que calculara y enumerara los CDP a partir de la geometría definida en la base de datos del proyecto en lugar de leer los valores del encabezado directamente. El *job* es mucho más simple

de esta manera como se puede observar en la figura 30, donde se actualizan los valores del encabezado de las trazas reescribiendo los valores anteriores en vez de manipularlos matemáticamente.

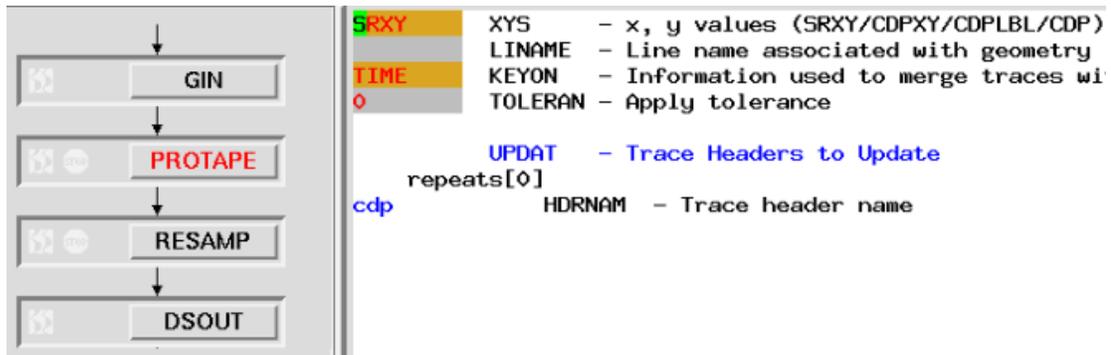


Figura 30, Job para cargar CDP GATHER.

4.4 Modelo de velocidad a la base de datos

Como se mencionó con anterioridad, el modelo de velocidad fue cargado como un volumen sísmico, por lo que Focus lo visualiza como un volumen con valores de amplitudes en vez de valores de velocidad RMS. En teoría, el modelo de velocidad se define en el programa a partir del análisis de velocidades, por lo que se debe definir el modelo de velocidad de otra forma. La figura 31 muestra el job para definir el modelo de velocidades en la base de datos del proyecto. En primer lugar se carga en memoria el volumen de velocidades cargado que Focus lee como valores de amplitud, se hace un remuestreo a 20 ms ya que no se necesita tanto muestreo para un modelo de velocidades. Se sorteo por CDP y con el modulo VELTR se define el modelo de velocidad a partir de los valores de las trazas del volumen cargado, la opción TR2DB significa *Trace to Database*, es decir, los valores de las trazas cargadas en memoria pasaran a la base de datos, con el VTYPE se indica que se está definiendo un modelo de velocidades, con el VDEFTYP se define que tipo de velocidades se define, en este caso TVRMS que significa *Time Velocity RMS* (velocidad en tiempo RMS). El IF presente en el *job* funciona como un filtro para tomar valores de las trazas cada ciertos *inlines*, porque no es necesario tomar valores para cada CDP.

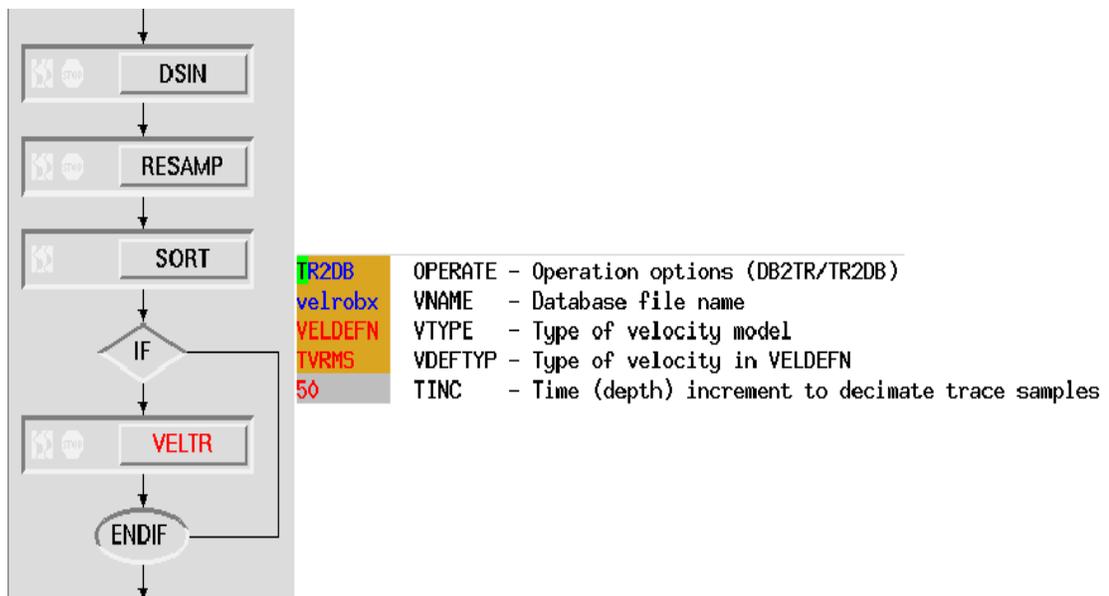


Figura 31. Job para definir el modelo de velocidades en la base de datos.

4.5 Visualización y control de calidad de los datos cargados

Una vez cargados los datos se procede a la visualización y control de calidad. El control de calidad de los datos está basado en que la geometría esté correctamente asignada a los datos, es decir, que para los datos apilados cada traza tenga asignado un valor de CDP distinto y secuencial en cada *inline*, que cada traza contenga valores de amplitudes, coordenadas X y Y dentro de los rangos de la geometría, el mismo número de secuencia para cada traza ya que se trata de datos apilados y valores adecuados de *inline* y *crossline* como se observa en la figura 32.

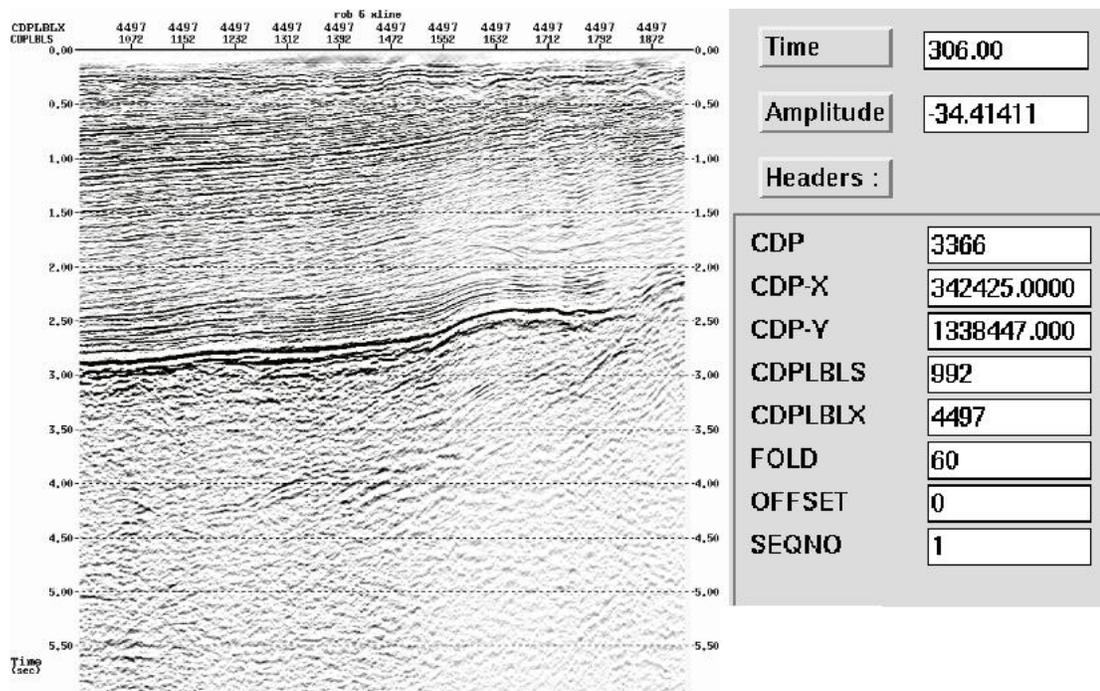


Figura 32. Visualización y control de calidad de una sección apilada.

Lo mismo aplica para el GATHER con la salvedad que en este tipo de datos se verifican más elementos, como lo son el offset mínimo, offset máximo, incremento de offset y cobertura para cada CDP, además que las trazas estén sorteadas adecuadamente, la figura 33 representa un CDP GATHER correctamente cargado con las trazas sorteadas por offset.

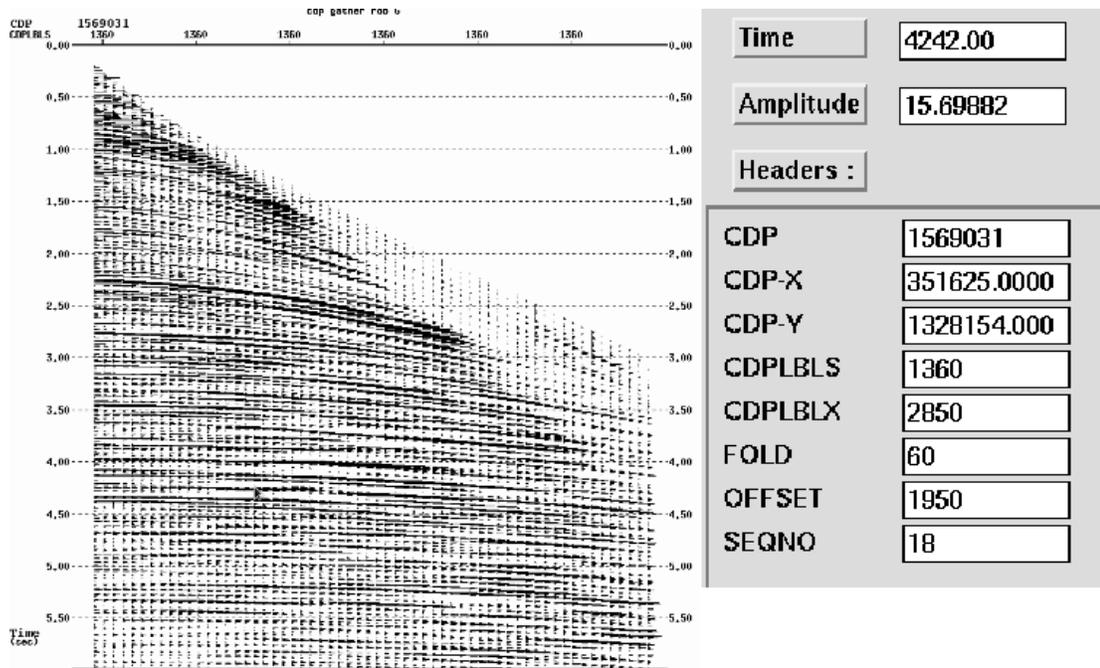


Figura 33. Visualización y control de calidad del CDP GATHER.

En cuanto al modelo de velocidades, se verifica que los valores de velocidad estén en un rango de magnitud y tiempo coherentes, que no existan problemas de interpolación laterales y que no existan picos o cambios laterales muy abruptos en el modelo que no estén evidenciados en la sísmica.

4.6 Selección de área de interés

La selección del área de interés depende de tres factores en este proyecto, el criterio de los intérpretes, el control de calidad de los datos, y tiempo de cómputo. En el primer factor los intérpretes escogen el área central del proyecto, justamente el área del CDP GATHER por lo que el área de interés está enfocada en dicho lugar.

En la visualización de los datos se observaron ciertas características que son relevantes para la selección del área de interés. Estas características se deben a la geometría de adquisición de los datos, que no es un cuadrado sino más bien un trapecio rectángulo, donde las bases del trapecio están orientadas en la dirección *inline* y la altura del trapecio en la orientación *crossline*. A partir del *inline* 1600 las

secciones en esta dirección empiezan a acortarse bruscamente desde el *crossline* 1132 paulatinamente hacia *crosslines* mayores, característica que se puede observar en las figuras 35 para los inlines 1600 y 1700 respectivamente, claramente para *inlines* mayores el acortamiento es más severo.

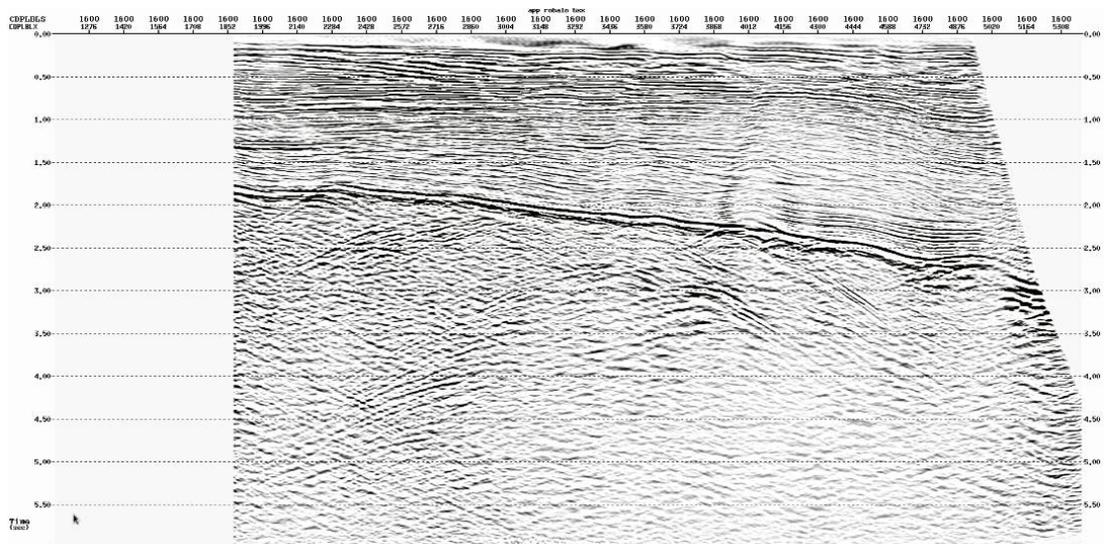


Figura 34. Inline 1600, acortamiento de los inlines debido a la geometría de adquisición.

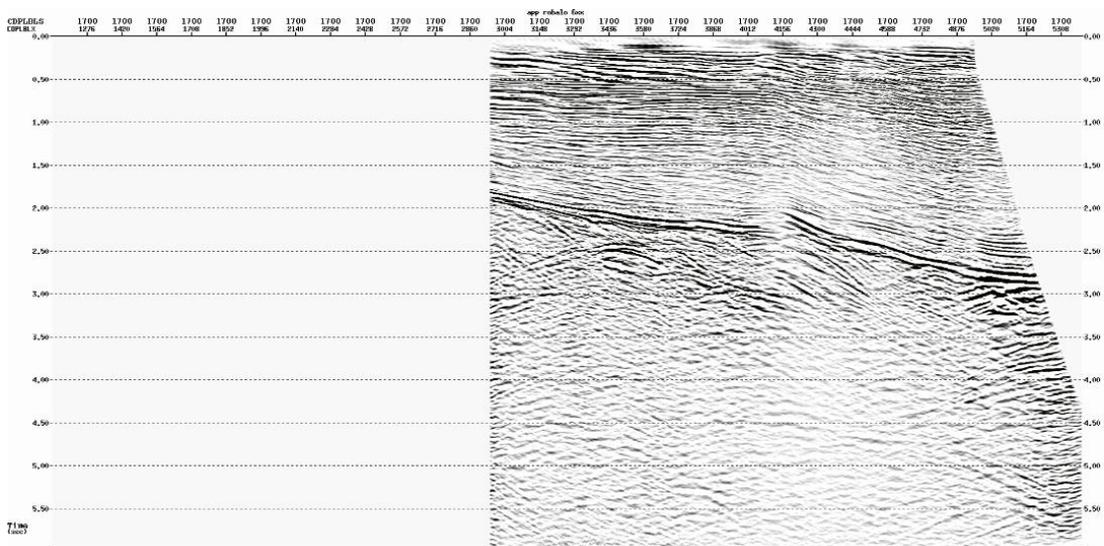


Figura 35. Inline 1700, acortamiento de los inlines debido a la geometría de adquisición.

También hay dos áreas donde existe la pendiente en la sísmica debido a la pérdida de cobertura, en determinados extremos del proyecto, como lo son en las coordenadas iniciales del proyecto, en el *inline* 992 y *crossline* 1132 como se puede observar en la figura 36.

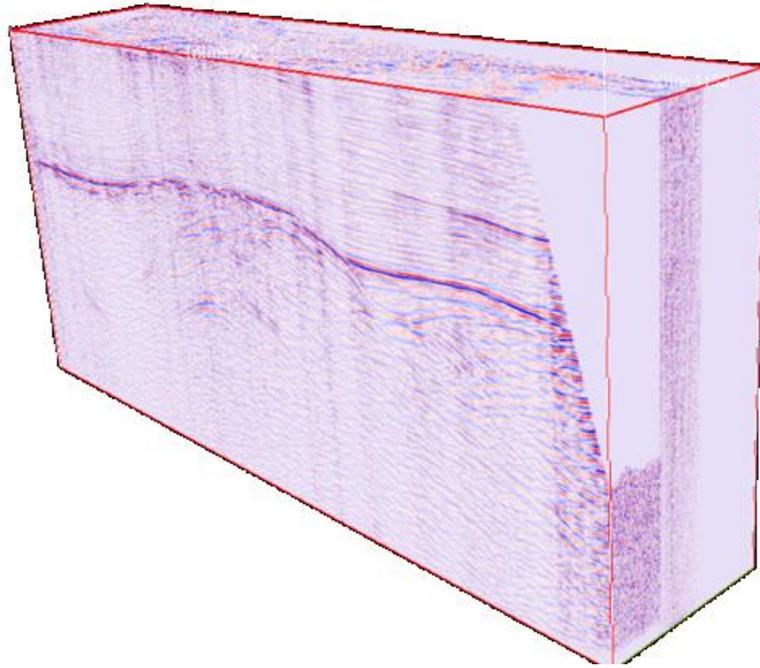


Figura 36. Falta de información en las coordenadas origen del proyecto por pérdida de cobertura.

Existe otra pérdida de cobertura en los *inlines* centrales y *crosslines* finales, como se puede observar en la figura 37. Todas estas características se observan claramente desde un corte en tiempo, tanto la pérdida de cobertura en dos áreas como la forma de la geometría de adquisición, figura 38.

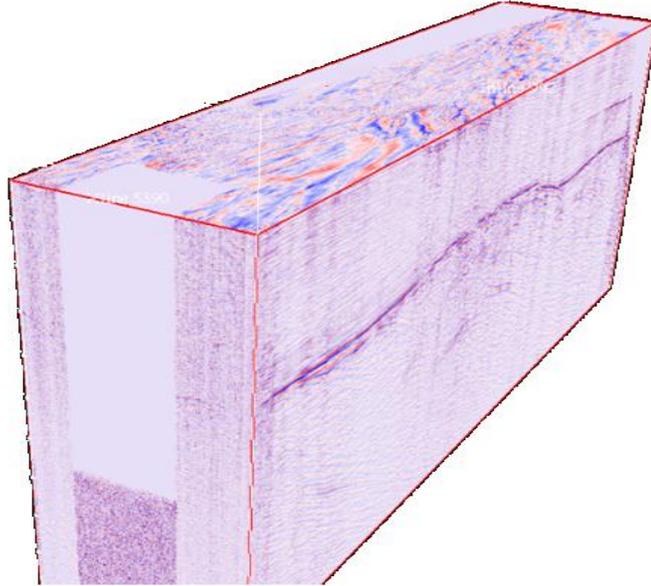


Figura 37. Falta de información en las coordenadas nor-centrales del proyecto por pérdida de cobertura.

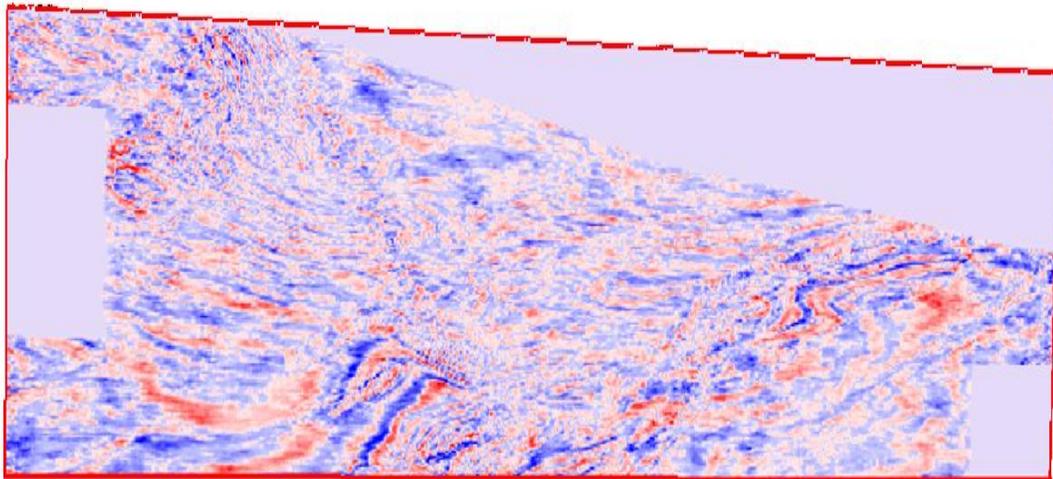


Figura 38. Corte en tiempo del proyecto donde se observan las áreas con falta de información.

Estas zonas ocupan trazas muertas, que ocupan espacio innecesario y no aportan información al operador de migración por lo que son excluidas a la hora de seleccionar el área de interés.

El área de interés queda constituida por un área central que abarca desde el *inline* 1000 hasta el 1600 y el *crossline* 1900 hasta el 4800, un área de aproximadamente de poco más de 270 km² en el centro del proyecto donde la cobertura es máxima en toda su extensión y todas las trazas contienen información del subsuelo, como se evidencia en la figura 39.

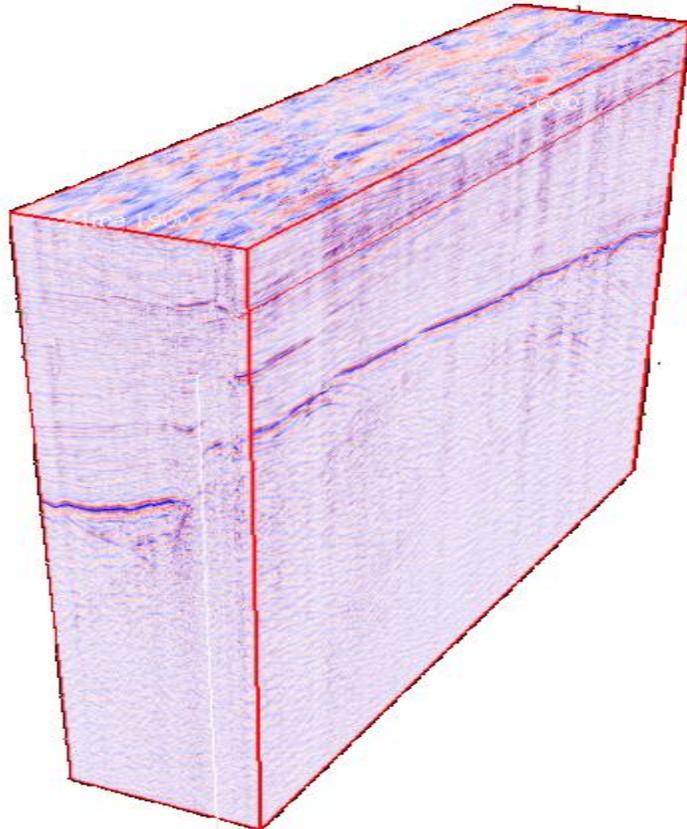


Figura 39. Área de interés seleccionada para ser migrada.

4.7 Acondicionamiento de los datos para la migración

Una vez seleccionada el área de interés, se procede a realizar la migración post apilamiento en tiempo. El programa que corre las migraciones es Tsunami v 12 de los desarrolladores Tsunami Development. Antes de correr las migraciones es necesario realizar ciertas modificaciones a los datos para que sean leídos correctamente por Tsunami. La figura 40 muestra el *job* que genera la salida que servirá como entrada para Tsunami. En primer lugar, además de cargar los datos en memoria y asignar la

geometría, se eliminan los encabezados que contienen la información de las coordenadas de los puntos de disparo y los receptores con el modulo HEADDEL, luego con el HDRMATH, se vuelven a definir estos encabezados pero no tienen ningún valor, ni siquiera el valores cero, y se cambia el valor del offset por cuestiones del formato interno de Tsunami.

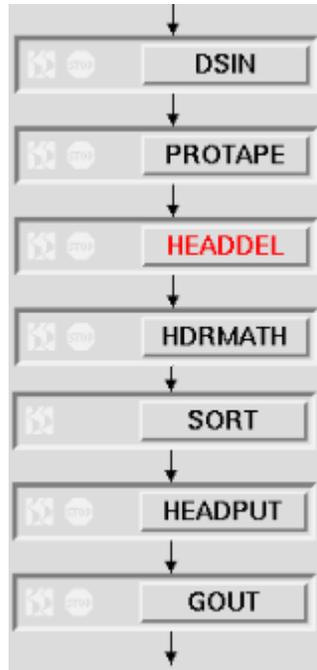


Figura 40. Job para generar el archivo de salida de los datos apilados para Tsunami.

Otro detalle importante es que los datos deben estar sorteados por CDP, ya que por defecto Focus los ordena por *inline* o *crossline*, para esto se utiliza el SORT y finalmente se genera el archivo de salida con el GOUT, donde lo más importante es el terminal del archivo que debe ser .SGY ya que así lo requiere el Tsunami y el formato de salida debe ser SEG Y.

Para generar la salida del modelo de velocidad no se requiere cambiar mucho el archivo original siempre y cuando no se modifique el modelo de velocidades. Sin embargo, si se modifica/actualiza el modelo de velocidad en la base de datos y se requiere realizar una migración con el nuevo modelo de velocidad se debe proceder con una metodología distinta, la figura 41 muestra el *job* para esta metodología. En

primer lugar se debe cargar un volumen apilado del tamaño del volumen de velocidades con DSIN, luego con el VELTR simplemente se opera de manera inversa, en vez de definir un modelo de velocidades a partir de valores de trazas, se asignan valores de velocidad a trazas a partir de un modelo de velocidad anteriormente definido en la base de datos con la opción DB2TR o *Database to Trace*. En esta etapa no es importante eliminar los encabezados, aunque eliminarlos reduce el volumen de información que ocupa el archivo de salida. Tampoco es necesario que la tasa de muestreo sea igual al de la sísmica así que se utiliza el RESAMP para remuestrear a 20 ms. Finalmente se genera la salida en disco con el GOUT y el terminal .SGY de igual manera que el apilado.

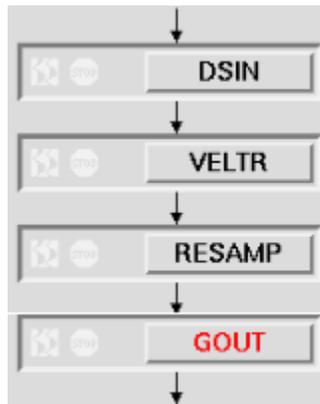


Figura 41. Job para generar el archivo de velocidad para Tsunami.

Para generar la salida del GATHER es mejor no manipular los encabezados, ya que al manipular los encabezados de este tipo de datos, el Tsunami genera mucho errores en la migración, así que por lo general simplemente se genera el archivo .SGY con un GOUT.

4.8 Migración con Tsunami

Una vez generados todos los datos que servirán como insumo para migrar los datos, se procede a realizar la migración como tal. Se utiliza el paquete Tsunami Imaging Suite de Tsunami Development, este paquete permite realizar una variedad de operaciones, entre ellas esta PSTM (*Post/Pre Stack Time Migration*), PSDM

(*Post/Pre Stack Depth Migration*), *Reverse Time Migration*, Trazado de Rayos, Tomografía entre otros.

El mayor volumen de trabajo se realiza en el dominio de la migración de Kirchhoff post apilamiento en tiempo, debido a que es el que menor tiempo de computo requiere y genera imágenes precisas del subsuelo ya que tanto el modelo de velocidades como la geología estructural del área no son complejas.

En primer lugar se debe definir el modelo de velocidad, el volumen con los datos sísmicos, y el nombre del archivo de salida en la pestaña de FILES. Se define el directorio de trabajo que por lo general es donde se encuentran todos los elementos anteriormente mencionados y se define que se trabaja en tres dimensiones.

En la pestaña de procesamiento se define el método para calcular los tiempos de llegadas, en este caso se utilizan rayos curvos. Se selecciona la apertura de migración que es el parámetro crítico en los objetivos de este proyecto. La apertura es medida en realidad como media apertura, si se ve como un cilindro, la apertura definida en este apartado sería el radio del cilindro medido en metros. También se puede definir un *taper* angular pero este es usado para simular una apertura angular pura o cilíndrica pura, lo cual se explicará con detalle más adelante. En esta pestaña también se define si es una migración en post o pre apilamiento, ver figura 42.

Figura 42. Definición de la apertura de migración y otros parámetros de migración.

En la pestaña INPUT se define los rangos para los *inline* y *crossline* así como su incremento, el tipo de formato del archivo de entrada y el intervalo de muestreo del archivo que contiene las velocidades. En la pestaña OUTPUT, se define el rango de *inlines* y *crosslines* del archivo de salida, así como también el sorteo de los datos y el formato de dicho archivo. Un aspecto que es distinto para pre apilamiento son los offsets, donde debe ser definido el offset mínimo, el número de offsets y el incremento de los offsets. Se debe definir la geometría en la pestaña de GEOMETRY, simplemente manualmente se definen 3 vértices del área y automáticamente calcula el espaciamiento entre *inlines* y entre *crosslines*.

4.9 Migración con distintas aperturas

Una vez definidos todos los parámetros anteriores, se crea la base de datos para la migración y luego comienza la migración propiamente dicha. Los tiempos de

computo para las distintas aperturas varían entre los 250 a más de 3000 minutos, entre mayor es la apertura y la cantidad de trazas (pre apilamiento), mayor es el tiempo de computo. Se realizaron migraciones con aperturas constantes de 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 y 7000 metros, migraciones con aperturas angulares de 15, 30, 45 y 60 grados, tres migraciones con apertura hibrida para tres modelos de velocidad distintos y una migración pre apilamiento. Los tiempos de cómputo para cada migración se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 2. Tiempos de cómputo de las migraciones

| Dominio | Apertura | Tiempo de computo (minutos) | Modelo de Velocidad |
|------------------|------------|-----------------------------|---------------------|
| Post apilamiento | 500 m | 251 | Inicial |
| Post apilamiento | 1000 m | 503 | Inicial |
| Post apilamiento | 2000 m | 927 | Inicial |
| Post apilamiento | 3000 m | 823 | Inicial |
| Post apilamiento | 4000 m | 1176 | Inicial |
| Post apilamiento | 5000 m | 1642 | Inicial |
| Post apilamiento | 6000 m | 1936 | Inicial |
| Post apilamiento | 7000 m | 1884 | Inicial |
| Post apilamiento | 15° | 949 | Inicial |
| Post apilamiento | 30° | 961 | Inicial |
| Post apilamiento | 45° | 1338 | Inicial |
| Post apilamiento | 60° | 1900 | Inicial |
| Post apilamiento | 60° 4000 m | 935 | Inicial |
| Post apilamiento | 60° 4000 m | 977 | Refinado I |
| Post apilamiento | 60° 4000 m | 1044 | Refinado II |
| Pre apilamiento | 60° 4000 m | 3068 | Inicial |

Como se mencionó anteriormente el programa trabaja únicamente con apertura híbrida, es decir, una apertura constante con un *taper* angular cuyo ángulo es medido desde la vertical, así que para simular una apertura constante pura basta con colocar el ángulo completamente horizontal (90°), de manera tal que el *taper* imaginario que crea el ángulo con la vertical no limite lateralmente la apertura. Para simular una apertura angular pura, se requiere una apertura constante lo suficientemente grande para que cubra el arco completo para la mayor apertura angular a utilizar, de lo contrario se creará una apertura híbrida como la que se puede observar en la figura 43.

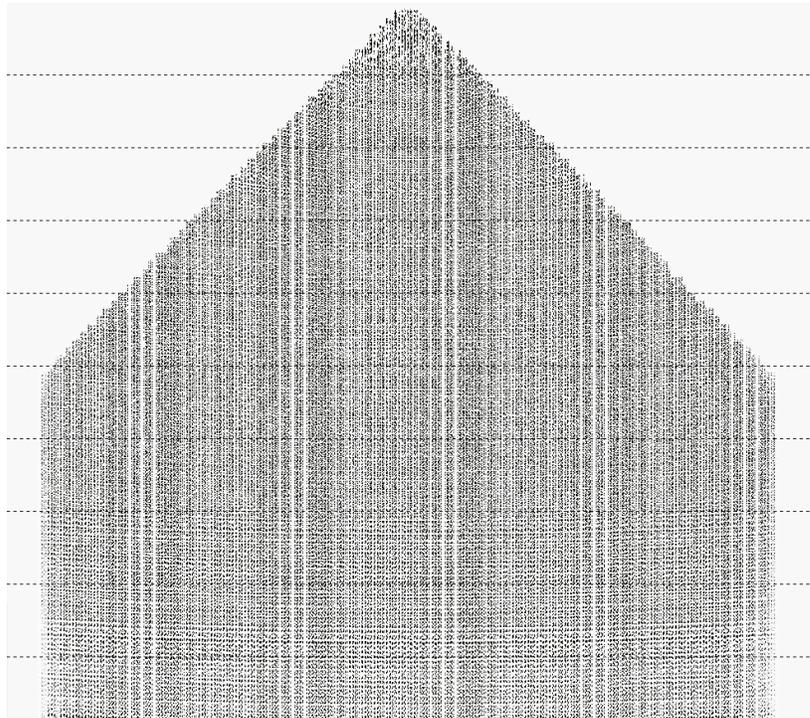


Figura 43. Prueba de apertura, apertura constante de 3000 m y taper angular de 45° .

Una apertura netamente constante emularía un cilindro, en este caso el *taper* angular debe ser de 90 grados, de esta forma se simula una apertura constante pura (figura 44).

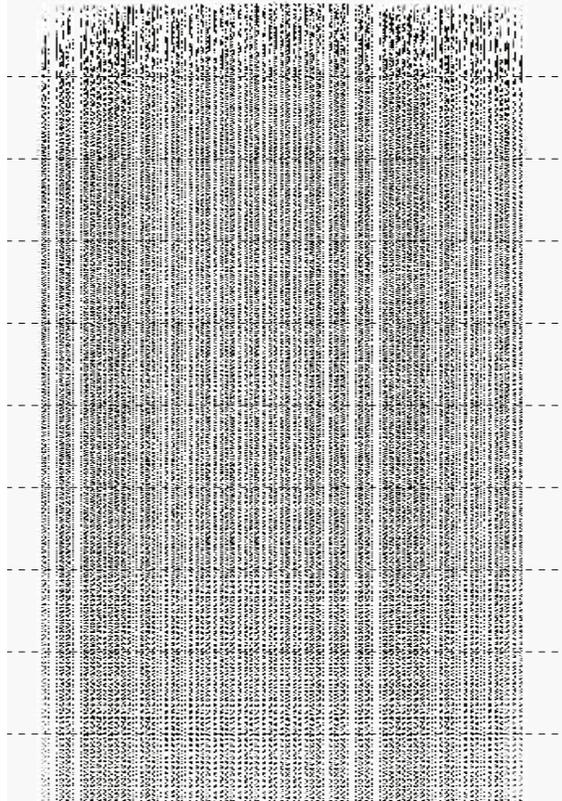


Figura 44. Prueba de apertura. Apertura constante 2000 m y taper angular de 90°.

Para simular una apertura netamente angular se tienen dos opciones, partiendo de la apertura híbrida mencionada anteriormente, la primera sería reducir el ángulo del *taper* sin modificar la apertura constante pero esto limitaría severamente el intervalo de ángulos para una apertura constante determinada, por ejemplo, en la figura 43 el ángulo de 45° no sería una apertura netamente angular para una apertura constante de 3000 m por lo que la segunda opción es definir una apertura constante lo suficientemente grande que permita definir aperturas angulares puras en un intervalo considerable de ángulos. Se realizaron pruebas con trazas sintéticas para definir cuál era la apertura constante apropiada para definir aperturas angulares puras hasta al

menos 70° y dicha apertura constante es de 8000 m, definiendo así aperturas completamente angulares como la que se muestra en la figura 45.

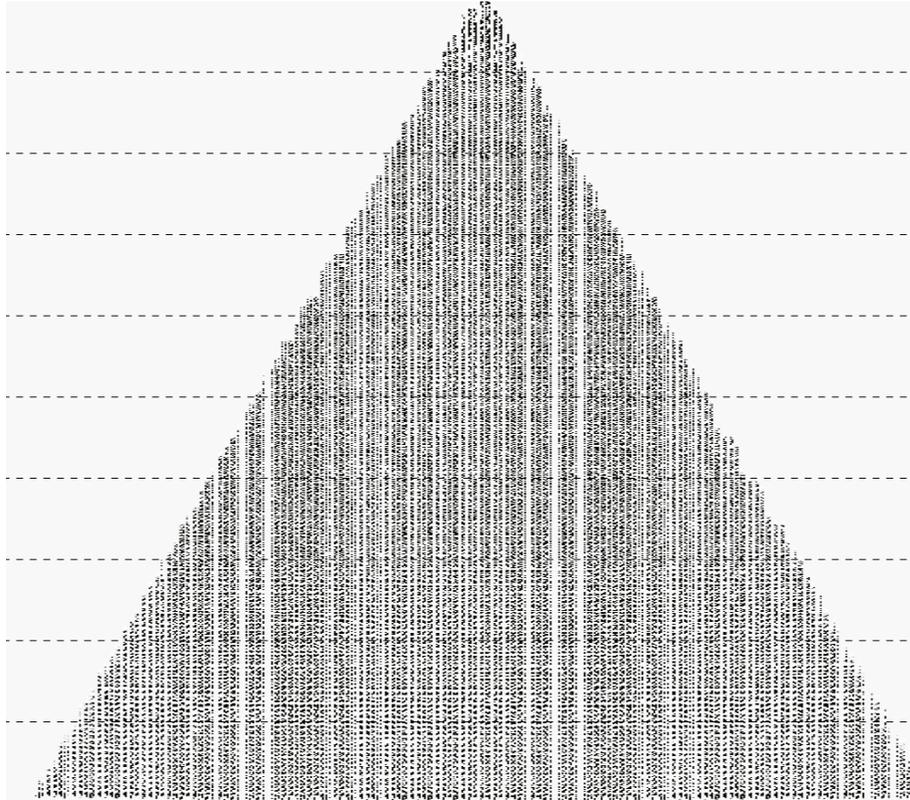


Figura 45. Prueba de apertura. Apertura constante 6000 m y taper angular de 30° .

4.10 Comparación de migraciones para las distintas aperturas de migración y selección de apertura óptima

Una vez realizadas todas las migraciones se realiza un análisis de los resultados bajo distintos criterios y de esta forma seleccionar la apertura óptima.

4.10.1 Análisis cualitativo

Este es el análisis que tiene mayor peso en la toma de decisiones, se realiza en conjunto con el gerente de procesamiento, un consultor especialista en migración y un intérprete del cliente PDVSA. Este análisis consiste en una inspección visual de la

sísmica, donde se evalúa la continuidad de los reflectores, el colapso de las difracciones, el sentido geológico de las estructuras visibles, los efectos del operador de migración, la relación señal-ruido y la resolución de los eventos.

4.10.2 Análisis cuantitativo

Este análisis se realiza a partir del contenido de frecuencia y amplitudes que se evidencia en los espectros de potencia y en los gráficos tiempo-frecuencia de las secciones sísmicas para las migraciones con distintas aperturas.

4.11 Refinación del modelo de velocidad

La refinación del modelo de velocidad consiste en el suavizado y re-escalado del campo de velocidades. Normalmente la función de velocidad inicial usada para la migración nunca es precisa en la práctica, por lo general un suavizado de un modelo de velocidades erróneo mejora notablemente la imagen sísmica y generalmente este modelo inicial presenta velocidades muy altas en las zonas intermedias profundas, lo que genera sobre migraciones en la sección sísmica (Larner y Pacheco, 2005).

En este caso, el modelo de velocidades original fue refinado con un operador de suavizado leve, de tal forma que el modelo no se vea afectado bruscamente, ver figura 46. Posteriormente se hace un re-escalado de la velocidad a 90 y 80 por ciento de la magnitud original.

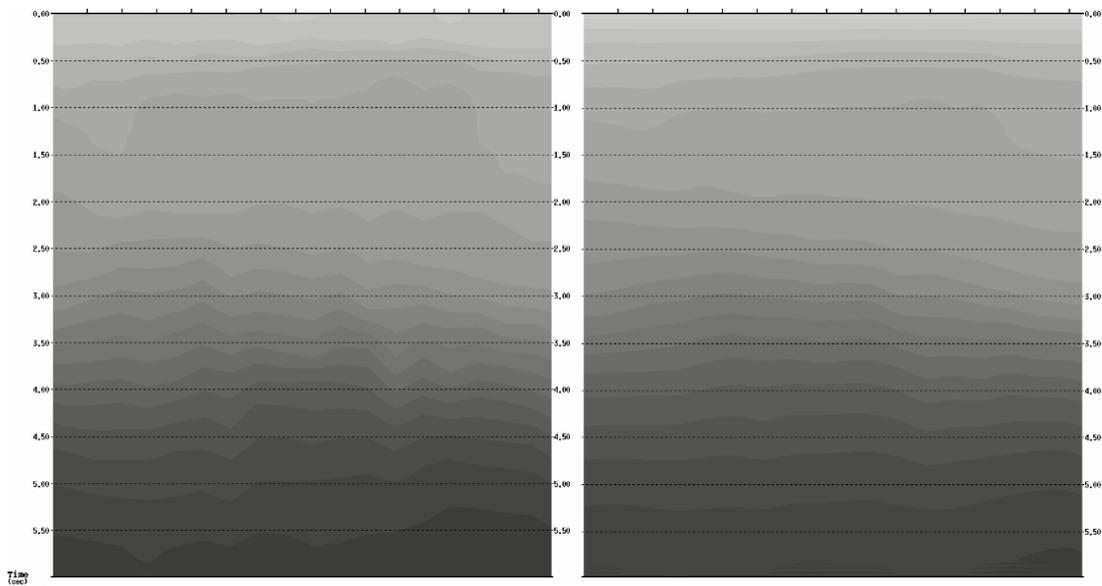


Figura 46. Comparación del modelo de velocidad original con el refinado.

4.12 Migración con apertura óptima y modelo de velocidad refinado

Luego del análisis de las migraciones se realizó una migración híbrida, combinando la apertura óptima constante con el *taper* angular óptimo utilizando tres modelos distintos de velocidad; el original, el suavizado con re-escalamiento de 90% y suavizado re-escalado a 80% de la velocidad original. Se realiza un análisis de las secciones migradas con distintos modelos de velocidades y se elige el modelo que genera la imagen sísmica óptima.

4.13 Comparación de migraciones de diferentes dominios

Toda la metodología anteriormente mencionada transcurre en el dominio del post apilado. En esta etapa ya se tiene definida tanto la apertura óptima como el modelo de velocidad óptimo con su respectiva sísmica migrada en post apilamiento con estos parámetros óptimos. Luego se migran los datos pero en pre apilamiento para realizar un análisis comparativo entre estos dos dominios y definir cual genera la mejor imagen sísmica.

La migración en pre apilamiento se realiza a partir del CDP *gather* y genera como salida igualmente un CDP *gather* por lo que se debe aplicar NMO para horizontalizar las trazas por efecto del offset y aplicar un *mute* para eliminar el *stretching* generado en el proceso anterior (figura 47), para posteriormente apilar los datos y obtener un volumen apilado migrado.

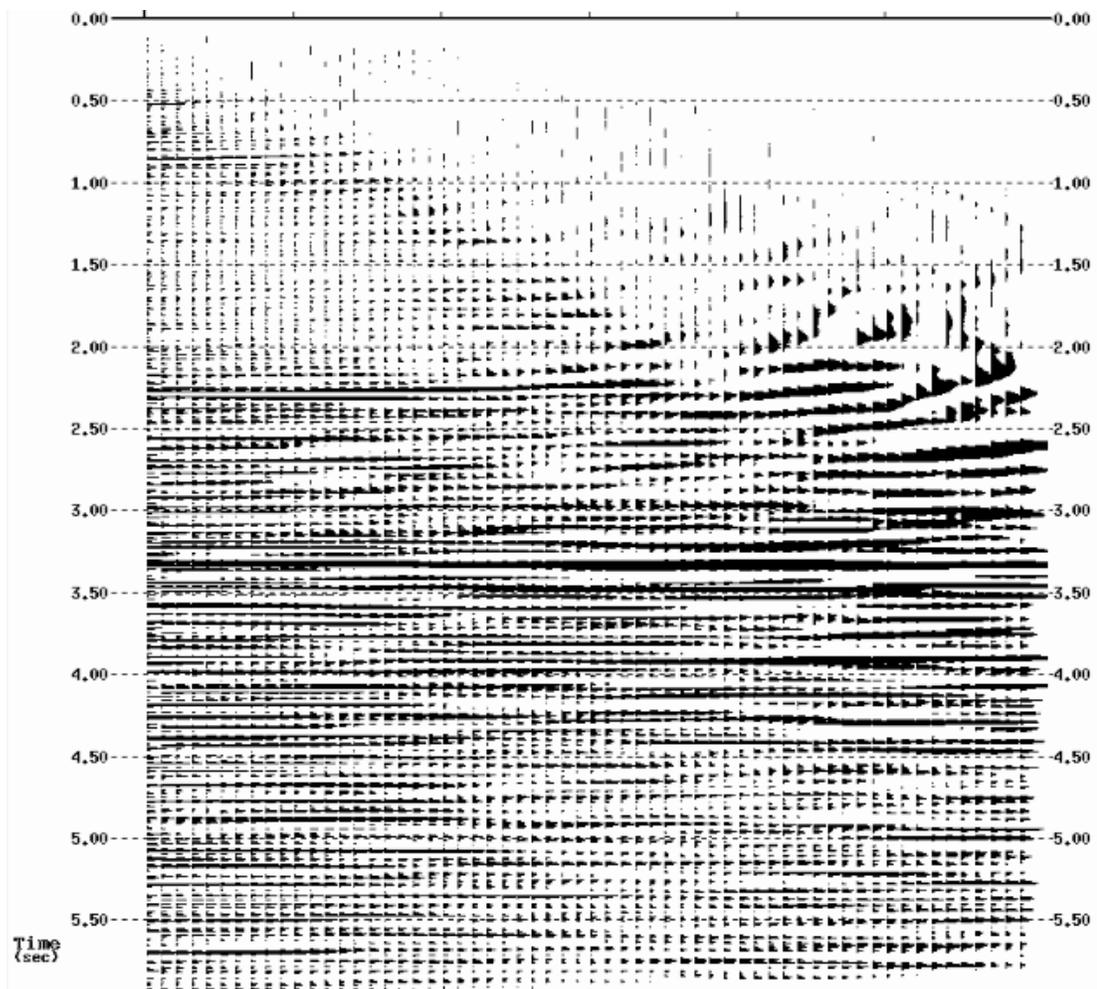


Figura 47. CDP gather migrado con NMO y stretching.

4.14 Post procesos para generar una imagen final del subsuelo

Finalmente se realizan post procesos al volumen final para generar una imagen aun más precisa del subsuelo. En primer lugar se elimina el ruido aleatorio con una metodología de proyección en el dominio f-x de la trazas, a cada serie compleja es

autocorrelacionada y se le aplica un filtro predictivo tipo Wiener complejo que atenúa la parte aleatoria de la señal y realiza la parte predecible de la señal; se supone que el ruido coherente fue atenuado en el procesamiento convencional (Chase, 1992). Para atenuar los efectos del operador de migración se realiza un filtrado convencional en el dominio $f-k$. Posteriormente se realiza una deconvolución predictiva para aumentar el ancho de banda de las frecuencias ganando resolución y atenuando aun más los múltiples en la señal (Bancroft *et al*, 2012). Se aplica balanceo espectral para mejorar la forma del espectro y aumentar aun más la banda de frecuencias con el objetivo de mejorar al máximo el aspecto de la sísmica.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

A partir de la metodología detallada en el capítulo anterior se generan resultados que son analizados con el fin de responder a los objetivos planteados en el presente proyecto de investigación y que se presentan a continuación.

5.1 Migración con apertura constante

Para evaluar el efecto de la apertura constante se generan ocho cubos migrados con aperturas constantes de 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 y 7000 metros. Para esta implementación de la apertura en particular se espera que en los eventos someros la migración genere secciones más ruidosas si se define una apertura lo suficientemente grande para migrar eventos profundos o con pendiente pronunciada; esto quiere decir que para un evento somero con una apertura constante considerable se va a realizar una sumatoria sobre la hipérbola más allá de la zona de máxima dispersión de la energía, por lo cual mayor será la cantidad de ruido sumado para estos eventos someros que para los eventos profundos para esta apertura fija. En el esquema de la figura 48 se puede observar como para una familia de hipérbolas de difracción definidas en un modelo de velocidad constante, el operador de migración realiza la suma sobre las hipérbolas hasta una apertura fija donde para un evento somero la trayectoria de dicha sumatoria es incluso mayor que para un evento profundo. Se debe tener en cuenta además que la cobertura es menor en los eventos someros por lo que relativamente a los eventos profundos, los eventos someros tienen peor relación señal-ruido.

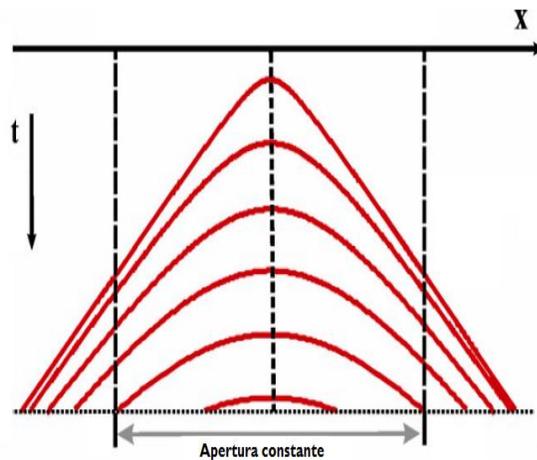


Figura 48. Esquema de suma del operador de migración para una apertura constante.

Teniendo todos estos hechos en cuenta se debe aceptar la suma de ruido en los eventos someros si se quiere migrar eventos profundos o con fuerte pendiente. Por otro lado si el objetivo de un proyecto es de carácter somero, no se requiere de una gran apertura para migrar y colapsar las difracciones de los eventos en dicha zona incluso si presentan pendientes moderadas pero se debe aceptar entonces que los eventos profundos no te estén correctamente migrados. Lo anteriormente desarrollado es teórico, a nivel práctico depende de cada proyecto en particular y en este proyecto se analiza este aspecto a continuación.

La figura 49 está representada por tres secciones del *inline* 1120, el primero en el extremo izquierdo representado por la sección apilada sin migrar donde se observa fallamiento y plegamiento de los eventos por lo que se pueden observar pequeñas difracciones sobre todo en las zonas falladas. En la sección siguiente (centro de la figura) se presenta la misma sección pero migrada con una apertura constante de 500 m; es una apertura realmente reducida por lo que se espera que esta migración no colapse las difracciones y mueva los eventos a su verdadera posición del todo, si no que más bien guarde mucha relación con la sección apilada; al ver esta sección se confirma lo esperado, las migraciones no colapsan completamente y la sección migrada es muy similar a la sección apilada por lo que se requiere una apertura mayor para colapsar completamente las difracción y mover los eventos a su verdadera

posición. Se aumenta paulatinamente la apertura hasta que las difracciones colapsan de tal manera que las zonas de fallas y los plegamientos estén perfectamente definidos en la sección. La tercera y última sección de la figura está representada por una migración con apertura de 2000 m donde se puede observar que las zonas de fallas están perfectamente definidas al igual que los plegamientos por lo que las difracciones están colapsadas y los eventos migrados a sus verdaderas posiciones. En esta sección es notoria la diferencia entre la sección migrada y la sección apilada.

A partir de esta apertura se espera que la sección no mejore, ya que todos los eventos están en sus verdaderas posiciones y las difracciones producidas por el fallamiento están colapsadas, por lo que se espera que las siguientes aperturas generen migraciones más ruidosas. En la figura 50 se evidencia la anterior suposición aunque no en la magnitud esperada. La primera sección de esta figura está representada por la migración con apertura constante de 3000 m, no presenta ninguna mejora de la sección con respecto a la apertura de 2000 m pero tampoco presenta una sección visualmente más ruidosa, apenas y se empieza a distinguir los efectos de borde del operador de migración que apenas son perceptibles en la zona inferior izquierda de la sección con un artefacto en forma de señal alineada en una recta con una alta pendiente positiva. Se espera que para una apertura mucho mayor la sección sea notablemente más ruidosa. La siguiente sección de la figura (sección central) está representada por una sección migrada con una apertura del más del doble que la sección anterior (7000 m), sin embargo, la diferencia entre una y otra sección es completamente imperceptible; la sección final de dicha figura es la resta entre estas dos secciones y se puede observar que la diferencia es mínima, el barrido del operador apenas es perceptible. Se esperaba una sección mucho más ruidosa para una apertura considerablemente extensa, posiblemente esto no sucede porque la relación señal-ruido es muy buena, es decir, hay poco ruido aleatorio y el ruido coherente ha sido atenuado considerablemente en las etapas previas del procesamiento. Esta hipótesis será corroborada en procesos posteriores.

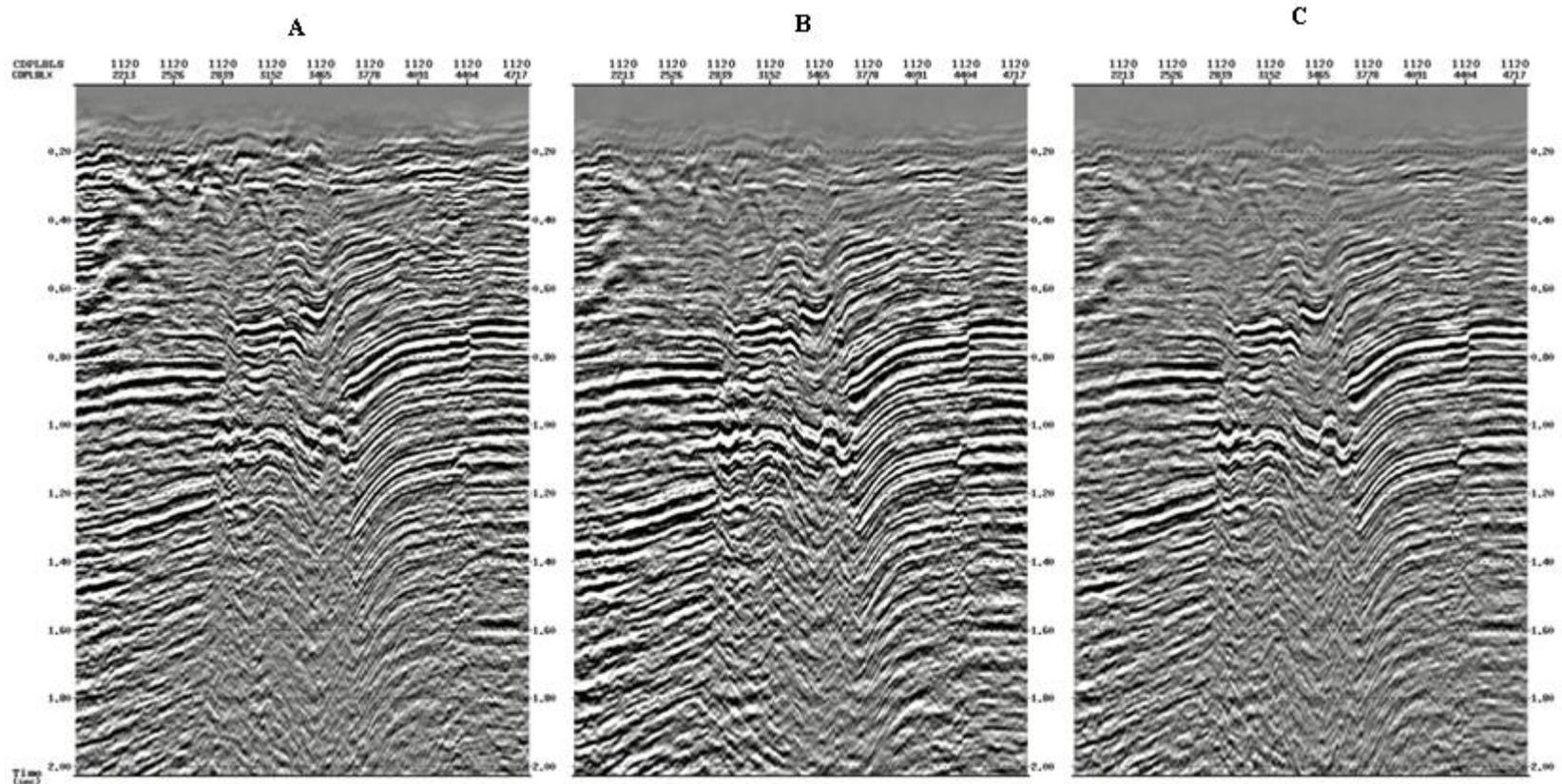


Figura 49. Inline 1120, sección apilada (A), migración con apertura de 500 m (B) y 2000 m (C), zona somera.

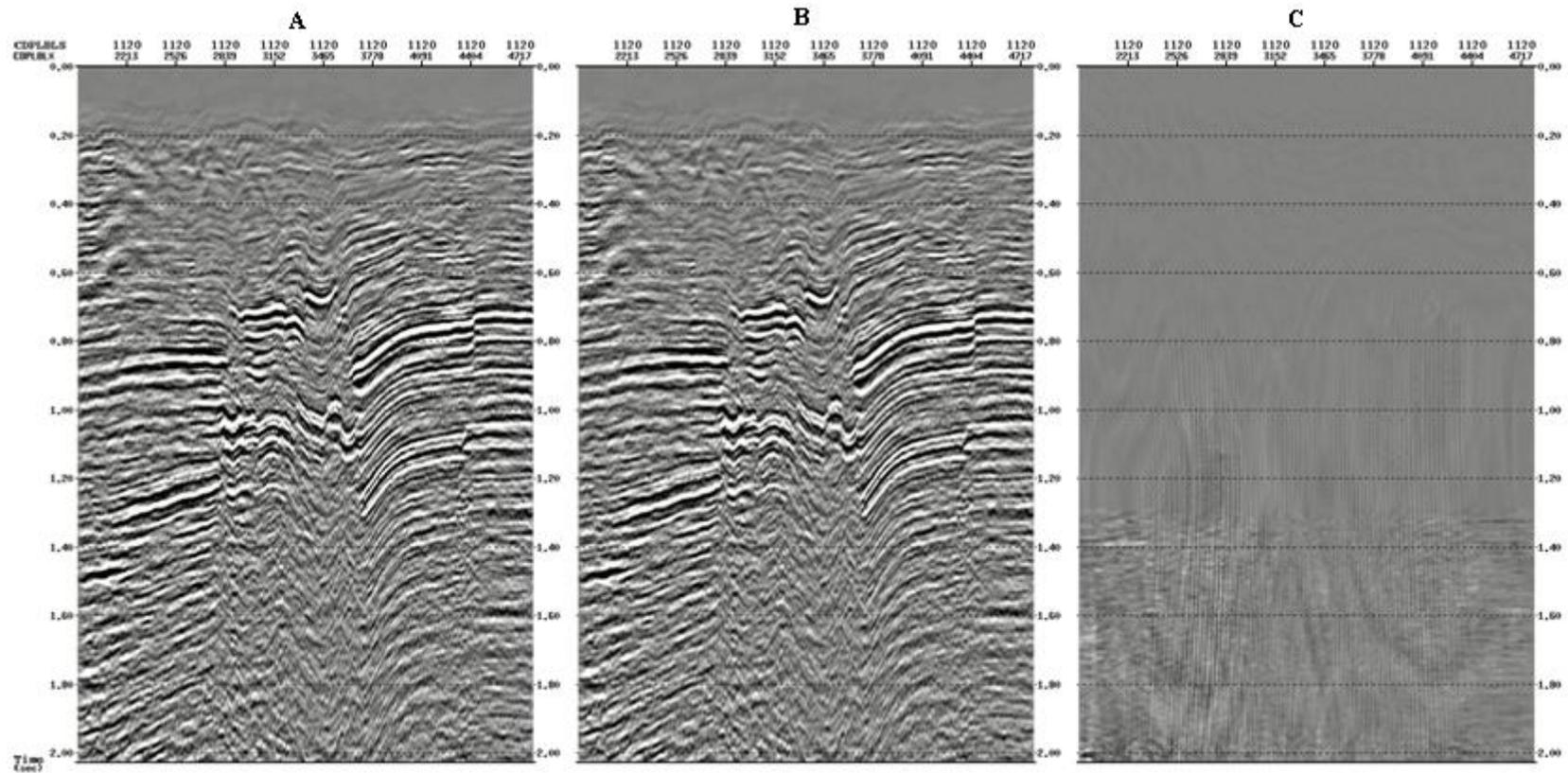


Figura 50. Inline 1120, migración con apertura de 3000 m (A), migración con apertura de 7000 (B) y resta de ambas secciones (C), zona somera.

La figura 51 sirve para comparar la sección migrada (A) con la sección migrada con apertura de 3000 m (B). Como se mencionó anteriormente, para esta apertura se empiezan a ver los efectos del operador, lo cual es visible en la sección. Aunque en teoría para aperturas excesivamente amplias se generan secciones más ruidosas, son secciones más ruidosas con respecto a migraciones con aperturas de menor magnitud no más ruidosas con respecto a la sección apilada, esto debe aclararse puesto que en líneas generales, la migración mejora notablemente la relación señal-ruido y este hecho es evidente en esta figura, donde la sección migrada es una sección mucho más limpia que la sección apilada. El colapso de las difracciones no sólo define mejor las zonas de fallas si no que también mejora la continuidad de los reflectores. Se puede notar que la sección migrada tiene mucho más sentido geológico, sobre todo por la mejor definición de las zonas de falla, eventos plegados o con pendiente pronunciada. Por otro lado, aunque mejora la resolución horizontal, lo que no parece mejorar es la resolución vertical de los eventos, algo que es de esperarse ya que la resolución vertical responde básicamente a la manipulación de la ondícula y al contenido de frecuencias y no a la migración (Freeland y Hogg, 1990).

Los *inlines* someros son las únicas secciones que son mostradas con una escala de grises para mejorar la visualización en esta zona en particular, el resto de las secciones incluyendo los *crosslines* someros son mostrados en una escala clásica de rojo y azul, rojo para amplitudes negativas y azul para amplitudes positivas.

Con respecto a los *crosslines* en la zona somera, la figura 52 representa la sección apilada (A) y migrada con apertura de 500 m para el *crossline* 3400. Es importante acotar que a diferencia de los *inlines*, la sección migrada con una apertura de 500 m colapsa considerablemente las difracciones como se puede observar en los recuadros de la figura, esto ocasiona que la sección apilada sea notablemente mejorada para una migración tan limitada. Esto quiere decir que para los *crosslines* se requiere menos apertura para migrar correctamente los eventos y colapsar las difracciones. Este hecho se debe a la iluminación limitada hacia una orientación preferencial (*inline*) de este tipo de datos con estrecha distribución de *azimuts*.

Ahora, si esto es cierto, se debería esperar también secciones más ruidosas para una misma apertura excesiva con respecto a los *inlines*, ya que los *crosslines* deben tener una peor relación señal-ruido y estar peor iluminados.

A medida que se aumenta la apertura (figura 53), la migración mejora un poco la relación señal ruido para la apertura de 1000 m y define un poco mejor las zonas de fallas, los pliegues y la continuidad de los eventos pero la mejora es ligeramente perceptible. Para la apertura de 2000 m, el único cambio perceptible es la relación señal ruido, donde puede notarse que la sección para la apertura de 2000 m está mucho más limpia que la de 1000 m pero exceptuando este hecho, no hay cambio alguno. Un hecho que llama la atención, es que para una apertura de 2000 m en el *inline* ya empieza a notarse los efectos del operador de migración, pero en los *crossline* difícilmente se puede apreciar este efecto para la misma apertura. Incluso para apertura mucho mayores (figura 54) este efecto no es tan notable como para los *inline*. En la figura anteriormente mencionada se observa que no hay cambios notables a partir de una apertura de 3000 m, y que incluso para una apertura de 7000 m los cambios son mínimos, demostrado por la resta de estas últimas migraciones se puede notar que realmente la diferencia es imperceptible en general y que la única diferencia se encuentra en los efectos de borde en el extremo derecho de la sección. Estas características de las migraciones en esta dirección se deben a que en líneas generales la sección apilada tiene una mejor relación señal-ruido que la dirección *inline* por lo que el operador no es tan susceptible a generar efectos tan pronunciados sobre todas las sumatorias a lo largo de las secciones en la dirección *crossline*.

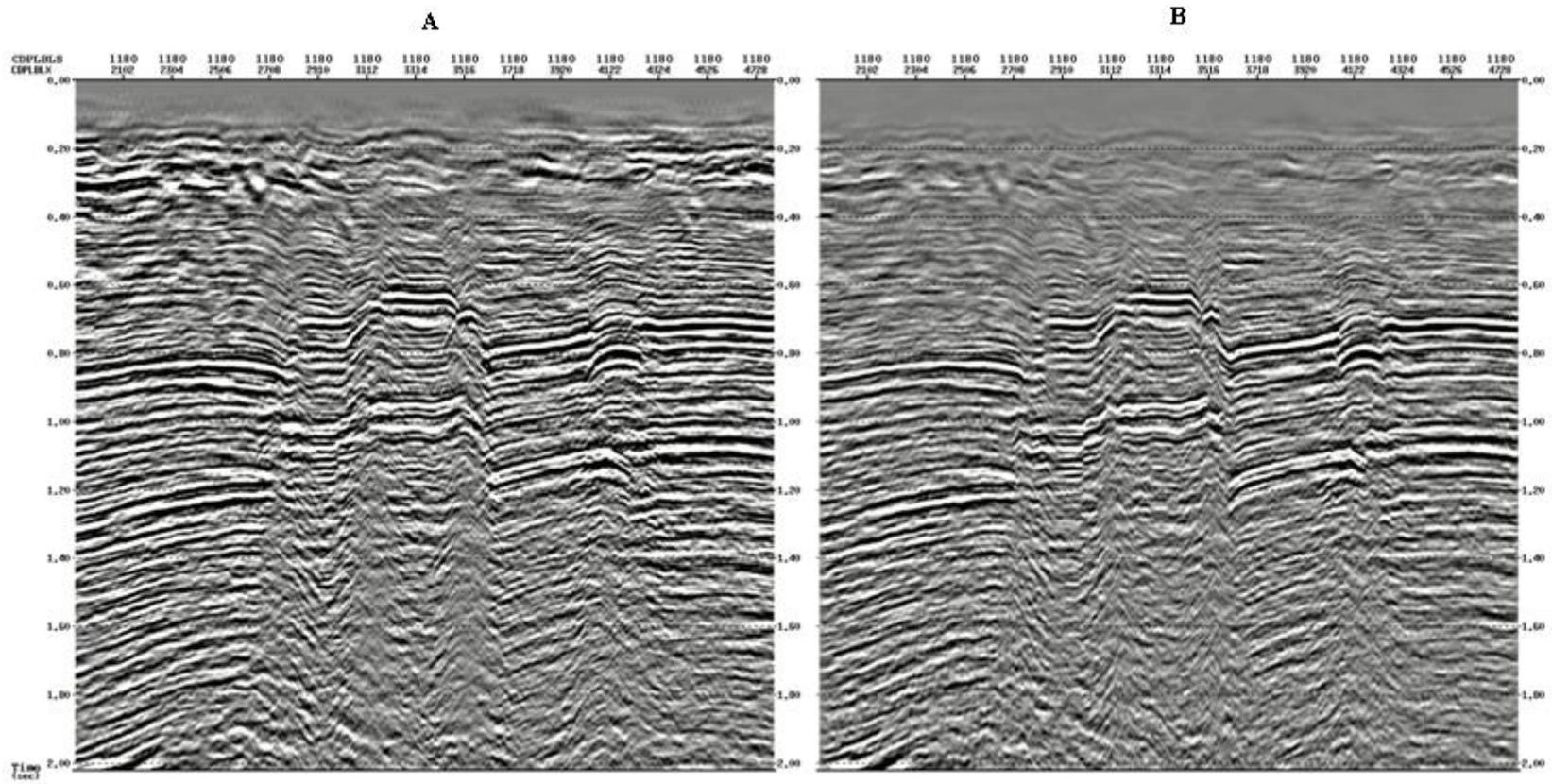


Figura 51. Inline 1180, sección apilada (A) y migración con apertura de 3000 m (B), zona somera.

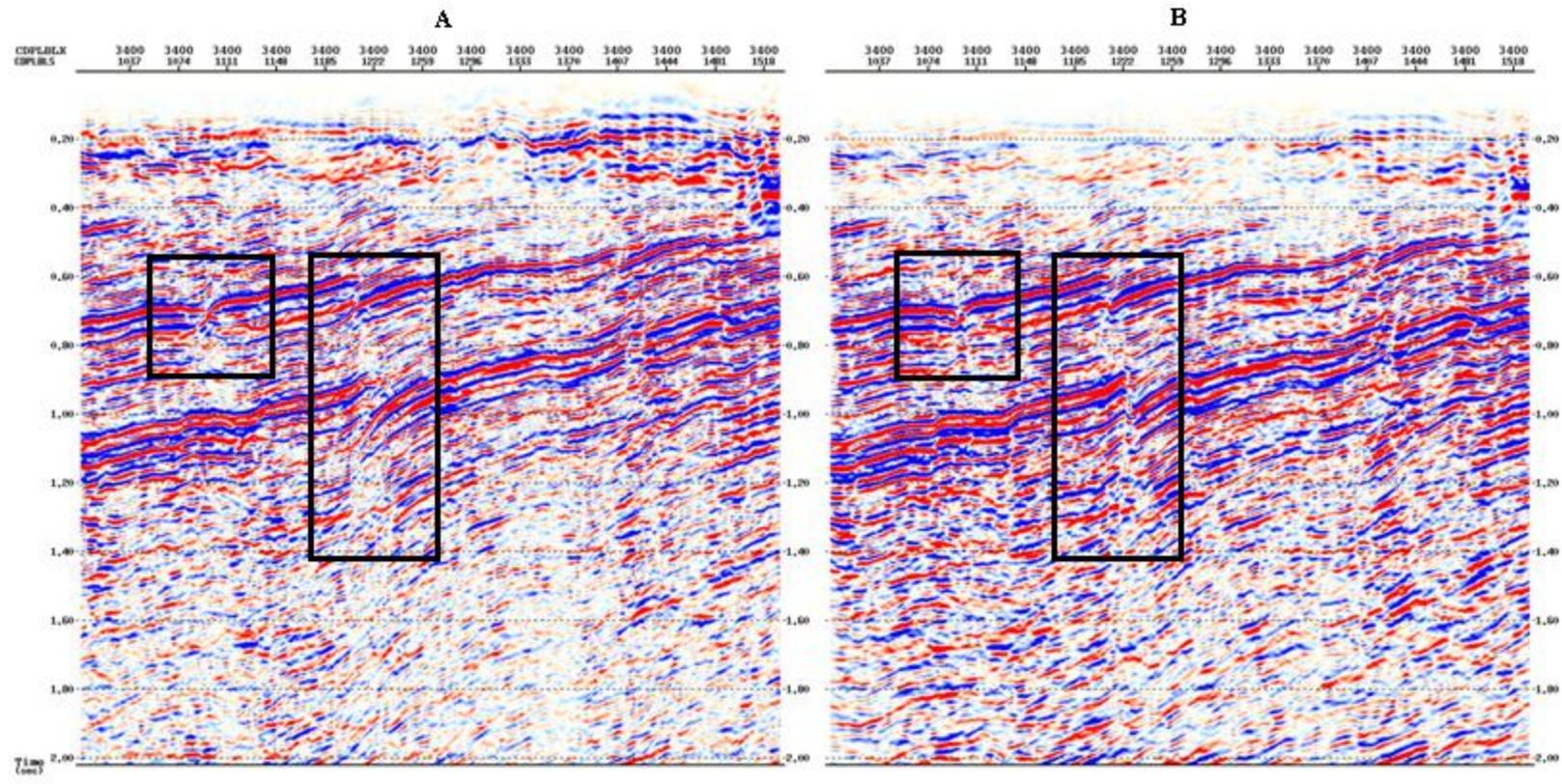


Figura 52. Crossline 3400, sección apilada (A) y migración con apertura 500 m (B), zona somera.

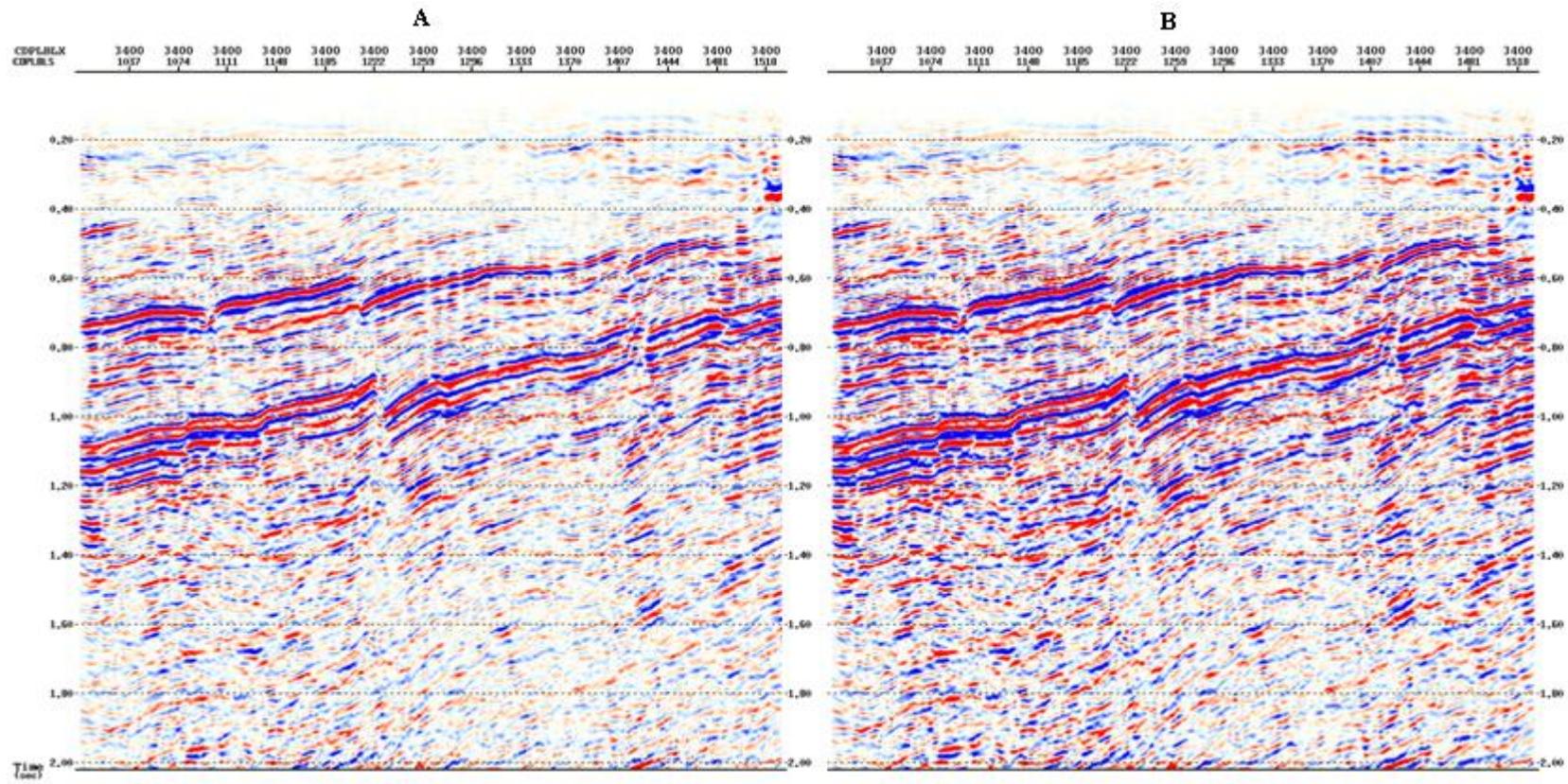


Figura 53. Crossline 3400, migración con apertura 2000 (A) y 1000 m (B), zona somera.

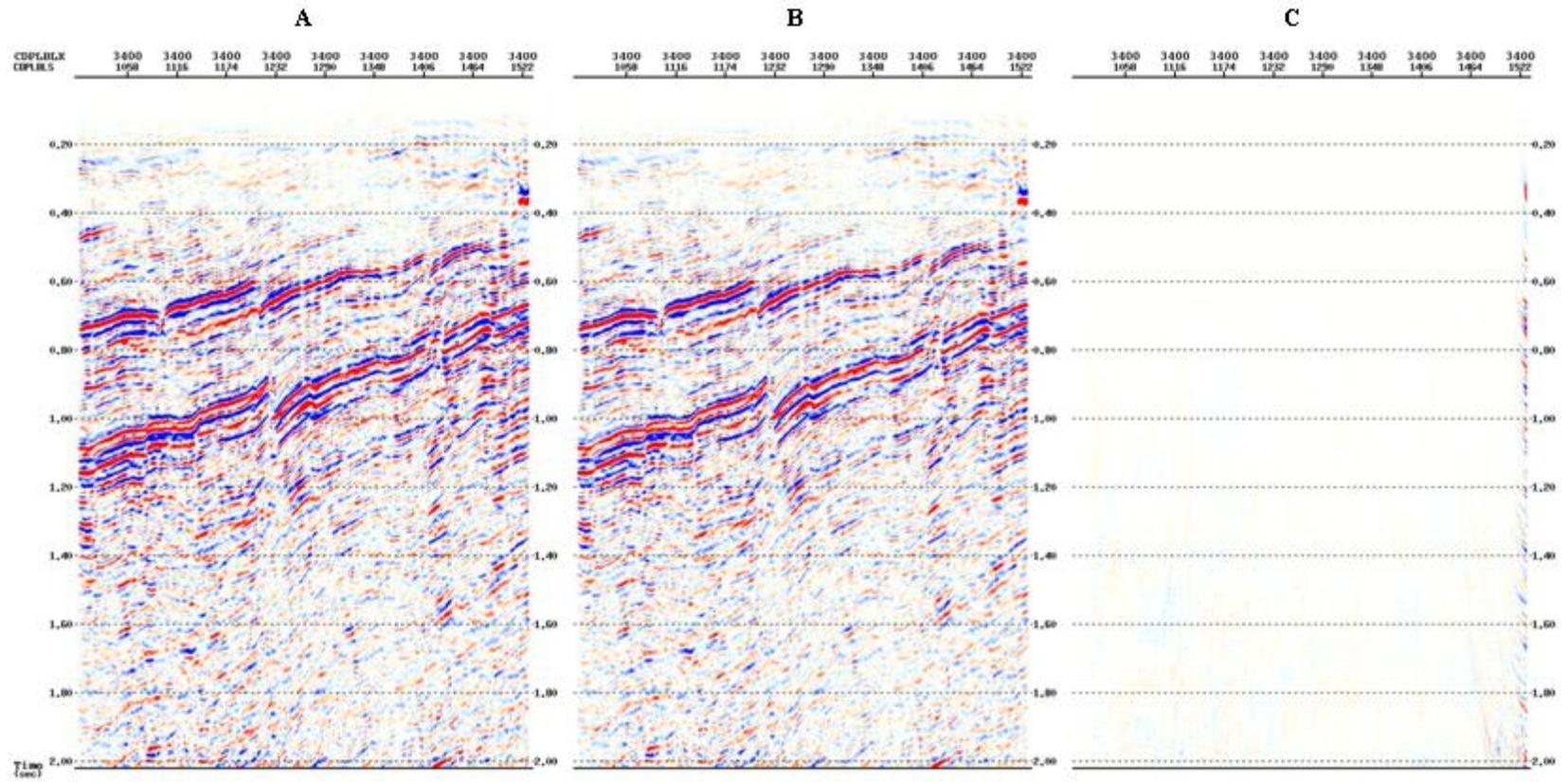


Figura 54. Crossline 3400, migración con apertura de 3000 m (A), migración con apertura de 7000 (B) y resta de ambas secciones (C), zona somera.

En la zona intermedia (2 a 4 segundos) se encuentran los eventos de interés del proyecto por lo que el análisis de la apertura en esta zona se realiza con mucho detalle. La figura 55, representada por la sección apilada (A) y migrada con una apertura reducida de 500 m. En la sección apilada se pueden ver difracciones y poca definición de los eventos en la zona central. Es notable la presencia del reflector de interés entre los 2.4 y 3 segundos, que se caracteriza por la gran magnitud relativa de su amplitud, así como también porque su espesor es considerablemente mayor que el de otros eventos. Por debajo de este evento la relación señal-ruido es muy pobre, de hecho es difícil distinguir un reflector con una continuidad aceptable, aunque se observa la presencia de algunas difracciones puntuales. Al migrar la sección con una apertura tan limitada se espera que los eventos sean bastante horizontales ya que el operador de migración actúa como un filtro de pendientes, entre menor sea la apertura menos pendientes se puede resolver en cambio, entre mayor sea la apertura mayor pendiente se puede resolver. Este hecho es bastante notorio en esta figura para la migración con una apertura de 500 metros, donde a pesar que los eventos están mejor definidos y existe una mejora considerable en la continuidad de los eventos y en el colapso de las difracciones, los eventos aparecen excesivamente horizontalizados, sobre todo en la zona central donde se encuentra la menor relación señal-ruido.

Al aumentar la apertura de migración, figura 56, a una apertura de 1000 m la diferencia es notoria con respecto a la apertura de 500 m; se resuelven mejor los eventos lateralmente permitiendo la aparición de los eventos con mayor pendiente. En la zona de baja relación señal ruido existe una mayor continuidad en los eventos pero estos no se definen completamente y en general aunque mejore, sigue siendo bastante ruidosa. Hacia la parte más profunda de la sección, rondando los 4 s, los pocos eventos que se pueden distinguir aparecen todavía muy horizontalizados, y esto tiene sentido debido a que entre mayor sea la profundidad de un evento, mayor es la apertura que se necesita para colapsar completamente las difracciones y migrar correctamente los eventos. Es importante acotar que para esta apertura, los efectos del operador empiezan a ser ligeramente visibles en los bordes del proyecto. Los

artefactos generados por el operador de migración de Kirchhoff, ya sean tanto los efectos de borde como los efectos en capas planas es una característica con la que se tiene que lidiar para este algoritmo de migración. Existen metodologías que atenúan este efecto pero comprometiendo las verdaderas amplitudes y las amplitudes relativas de la sísmica.

En la figura 56 también se muestra la sección migrada para una apertura de 2000 m, donde se definen aun mejor los eventos con una pendiente pronunciada, por ejemplo, en la zona del recuadro donde existe un fuerte plegamiento se ve mejorada notoriamente. La continuidad de los eventos en general se ve bastante mejorada pero los efectos de borde se pronuncian bastante como se puede observar en el extremo izquierdo de la sección. Los eventos de la zona cercana a los 4 s no se ven horizontalizados pero se ven notoriamente degradados ya que hay más ruido que señal, por lo que el ruido empieza a ser distribuido a lo largo del operador. Este hecho no es realmente de importancia ya que en esta zona no se resuelve ningún evento de interés, mientras que el evento de interés si se ve mejorado. Para la apertura de 3000 m (figura 57), existe todavía una mejora muy leve pero perceptible con respecto a la migración de 2000 m. La mejora es en la continuidad de los eventos de manera general. En este punto dejan de aparecer eventos de mayor pendiente pero mejora la relación señal ruido en la zona del evento de interés y en los tiempos más someros a este evento. En la zona cercana a los 4 s, se define mucho mejor el evento que se encuentra enmarcado en la figura aunque para cada apertura es mayor la cantidad de ruido alineado con el operador. Para una apertura de 4000 m, ya la mejora es casi imperceptible, como se puede ver en la figura por lo que esta apertura puede ser la ideal para migrar el cubo, ya que a partir de esta apertura el evento de interés no presenta ninguna mejora.

Al aumentar la apertura a casi el doble (7000 m, figura 58), lo que realmente cambia es el efecto del operador en la zona profunda, sobre todo en la zona inferior izquierda de la sección como se puede observar en la sección C de la figura mencionada. El resto de la sección, permanece relativamente invariable.

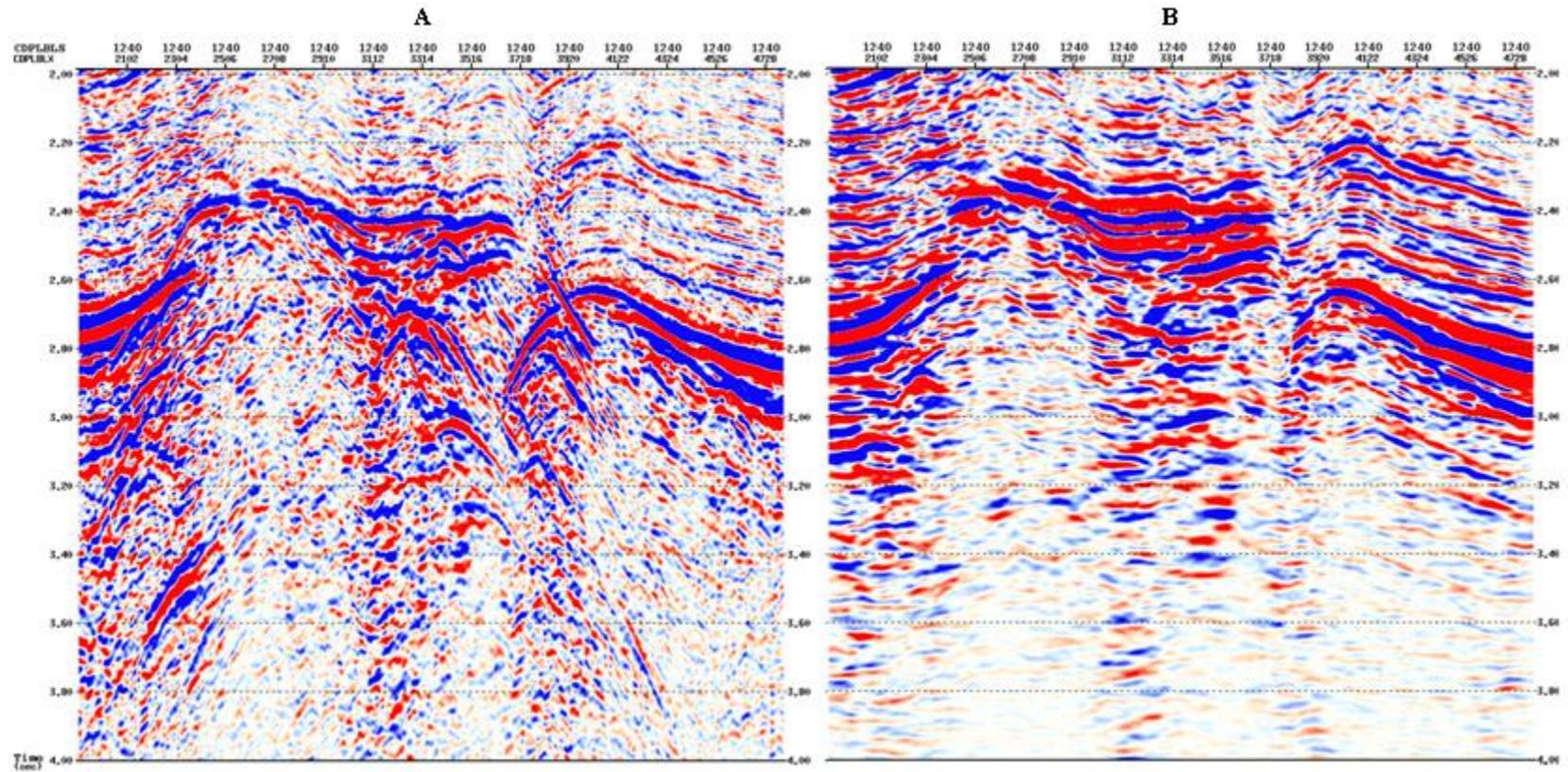


Figura 55. Inline 1240, sección apilada (A) y migrada con apertura de 500 m (B), zona intermedia.

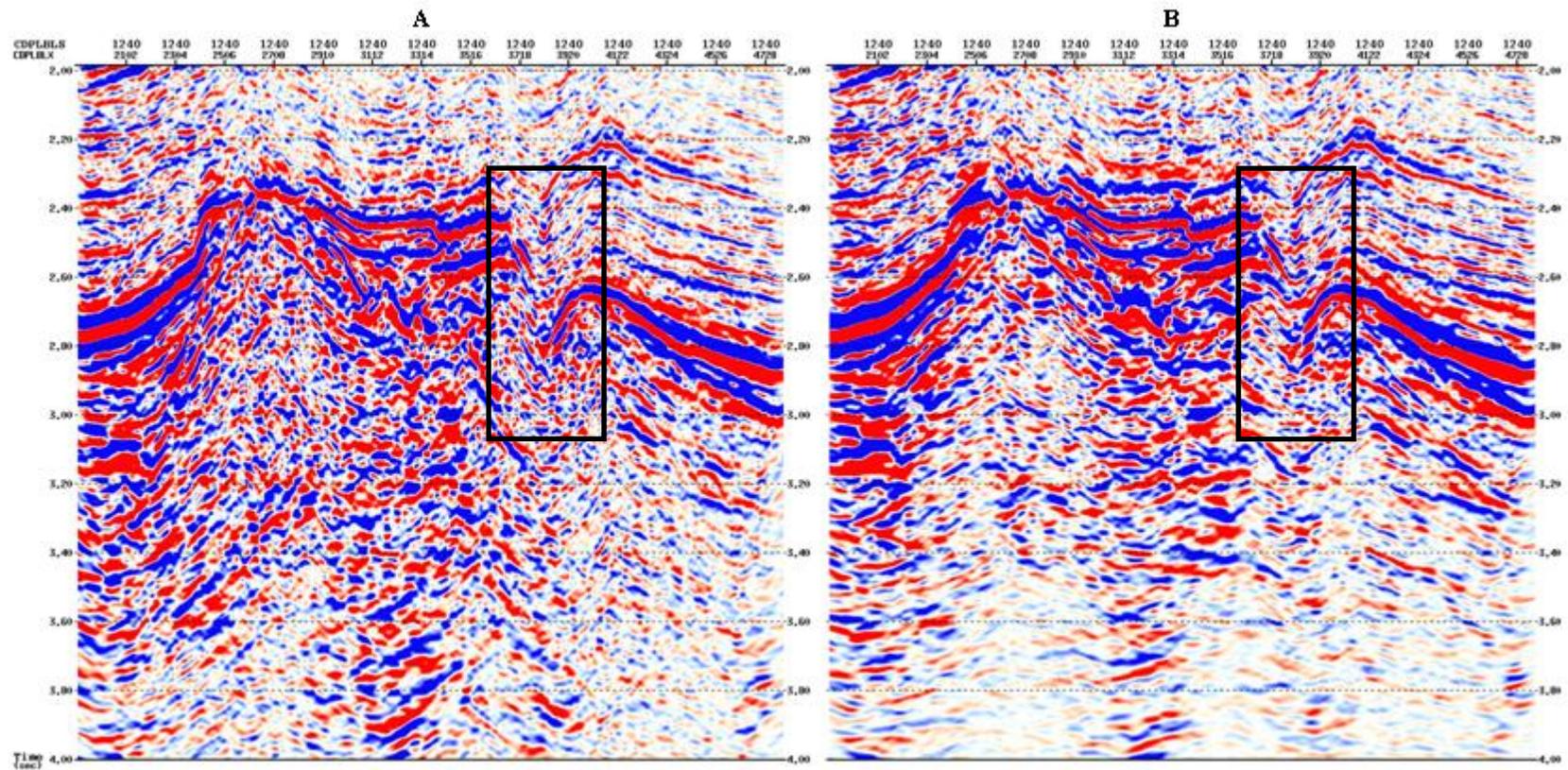


Figura 56. Inline 1240, sección migrada con apertura de 2000 m (A) y 1000 m (B), zona intermedia.

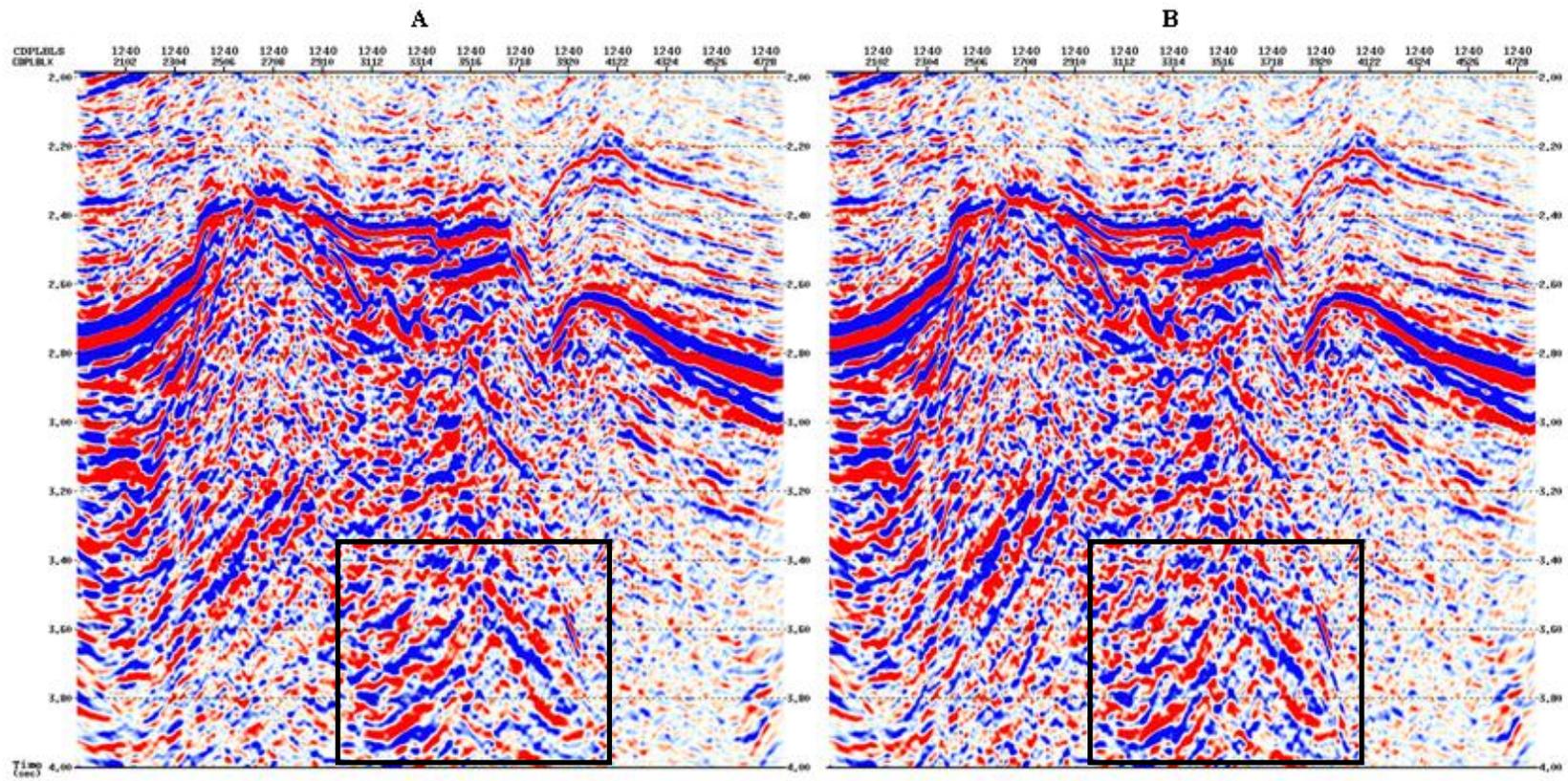


Figura 57. Inline 1240, sección migrada con apertura de 3000 m (A) y 4000 m (B), zona intermedia.

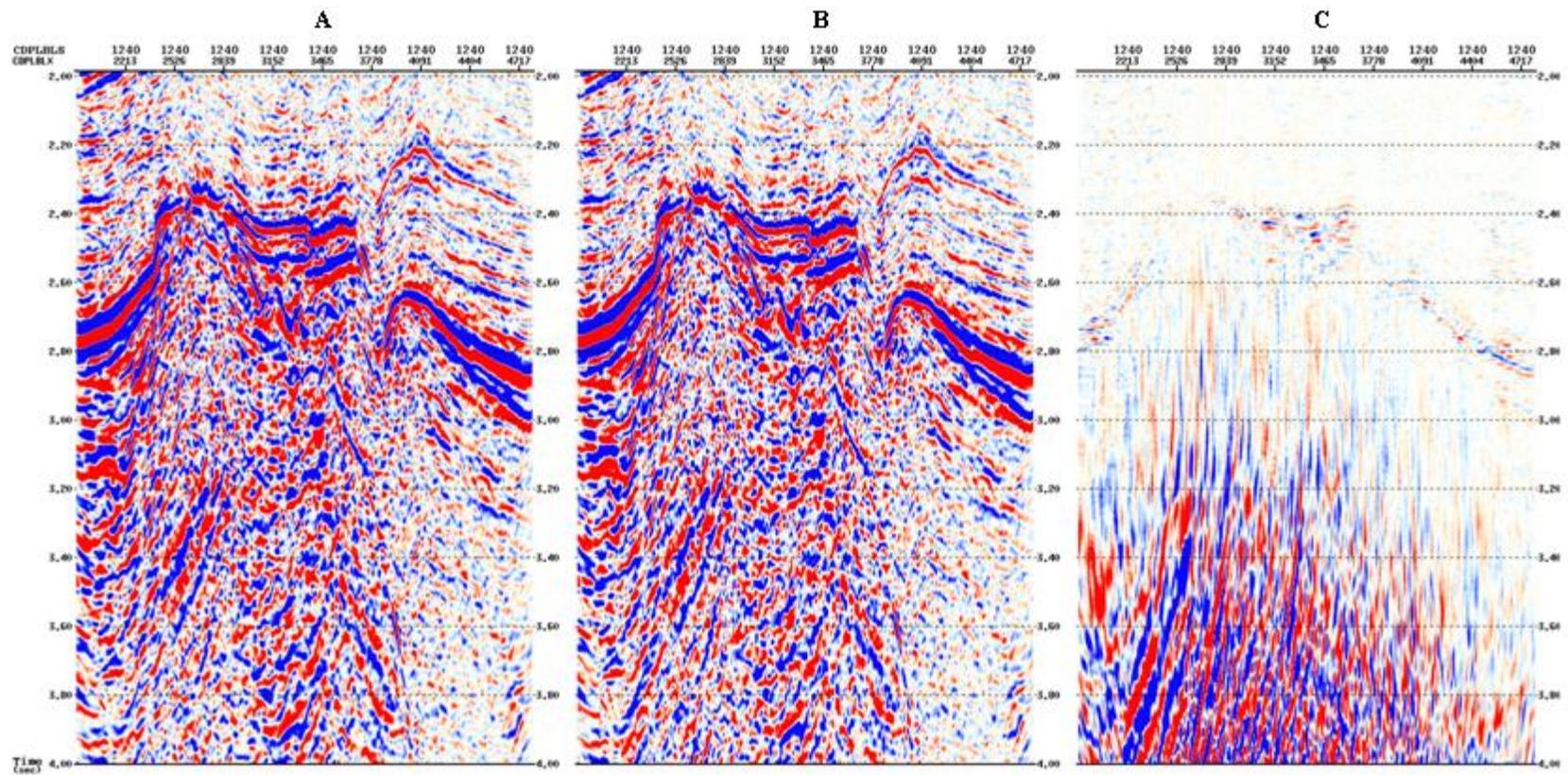


Figura 58. Inline 1240, sección migrada con apertura de 3000 m (A), 7000 m (B) y la resta de ambas migraciones (C), zona intermedia.

Respecto a los *crossline* el análisis es bastante similar. La figura 59 está representada por la sección apilada y la migración con apertura de 500 m. En la sección apilada se pueden observar claramente el reflector de interés que también se observa en el *inline* característico por su gran amplitud y baja frecuencia que se encuentra entre los 2 y 3 s de grabación. Al igual que el *inline*, por debajo de este reflector la relación señal-ruido también es pobre, sobre todo en la zona este del proyecto, que es la zona más cercana a la costa donde la señal es deteriorada por que existe mayor cantidad de ruido aleatorio, mientras que para la zona oeste se aleja más de la costa y existe mejor relación señal-ruido con respecto a la zona este, pero de igual manera difícilmente un reflector presenta continuidad en esta zona. En los eventos que se encuentran por encima del reflector tienen una buena relación señal-ruido en general, aunque esta relación disminuye hacia el extremo este incluso para esta zona, como se observa en la sección apilada donde incluso donde hay sectores donde se pierde la continuidad de los reflectores para la sección.

La migración con 500 m (figura 59) a diferencia que para los *inline*, no presenta una sección tan horizontalizada. La continuidad de los eventos por encima del reflector de interés mejora considerablemente, incluso pueden llegar a distinguirse en la zona este de baja relación señal-ruido. Para el reflector de interés no sucede lo mismo, la continuidad no mejora en la zona donde el evento es pseudo-horizontal y empeora en la zona donde existe más pendiente, debido a que la apertura es muy reducida para colapsar por completo las difracciones. Por debajo de este reflector, la zona de baja relación señal-ruido, se ve bastante horizontalizada lo cual es típico para eventos profundos con baja relación señal-ruido y reducida apertura de migración. En la zona este profunda de esta sección, apenas y aparecen eventos, la relación señal-ruido es tan baja que el operador al sumar poco sobre las hipérbolas prácticamente limpia la sección, apareciendo bastante blanqueada. Para una apertura mayor de 1000 m, figura 60, los eventos en esta zona no aparecen tan horizontalizados, ya empiezan a tener una mejor continuidad y por consiguiente, mayor sentido geológico, sin embargo en la zona profunda en el extremo oeste sigue apareciendo bastante blanqueado.

Para esta apertura, el evento de interés presenta eventos con mayor pendiente en la zona este, mientras que para el resto del reflector la magnitud y espesor del evento se ven notoriamente amplificadas por lo que es difícil distinguir cambios laterales sobre el reflector; se espera que para migraciones con mayor apertura la resolución lateral mejore. Por otro lado, para los eventos someros la continuidad de los eventos mejora pero ya la mejora empieza a ser ligera, lo que sí es notorio es la mejor relación señal-ruido y mucho menos perceptible para una apertura de 2000 m. Para esta apertura las zonas que realmente presentan una mejora están enmarcadas en los recuadros. La primera zona es la zona compleja del reflector de interés, que no sólo presenta una fuerte pendiente, sino que además presenta un fuerte plegamiento. Esto mejora notablemente el sentido geológico de la sección en general, incluso el reflector no presenta una magnitud y espesor tan exagerados por lo que se pueden distinguir cambios laterales en el mismo reflector. Por otro lado, en la zona por debajo del reflector de interés, se definen mejor los reflectores, aunque pierden su continuidad en la zona este de baja relación señal-ruido, donde ya no aparece tan blanqueada aunque sí muy ruidosa para realmente distinguir algún reflector. Ya para una apertura de 3000 m (figura 61) sólo mejoran las dos zonas anteriormente mencionadas pero ya la mejora empieza a ser leve aunque perceptibles; en general la sección muestra una mayor continuidad y mejor definición de los reflectores en la zona compleja del reflector de interés y en la zona profunda que tiene una relación señal-ruido aceptable. A partir de esta apertura empieza a ser evidente los efectos del operador en los bordes del proyecto que empezaron a ser levemente evidente en la apertura de 2000 m. Ya para una apertura de 4000 metros no se ve una mejora perceptible en la sección. Para una apertura de 7000 m, figura 62, la diferencia entre las dos últimas migraciones, es prácticamente nula en la zona donde existe una buena relación señal ruido, en cambio para la zona este y profunda al este, se ve claramente que el operador alinea el ruido y los efectos de borde son notorios en la resta, aunque no tan evidente en la sección migrada como tal.

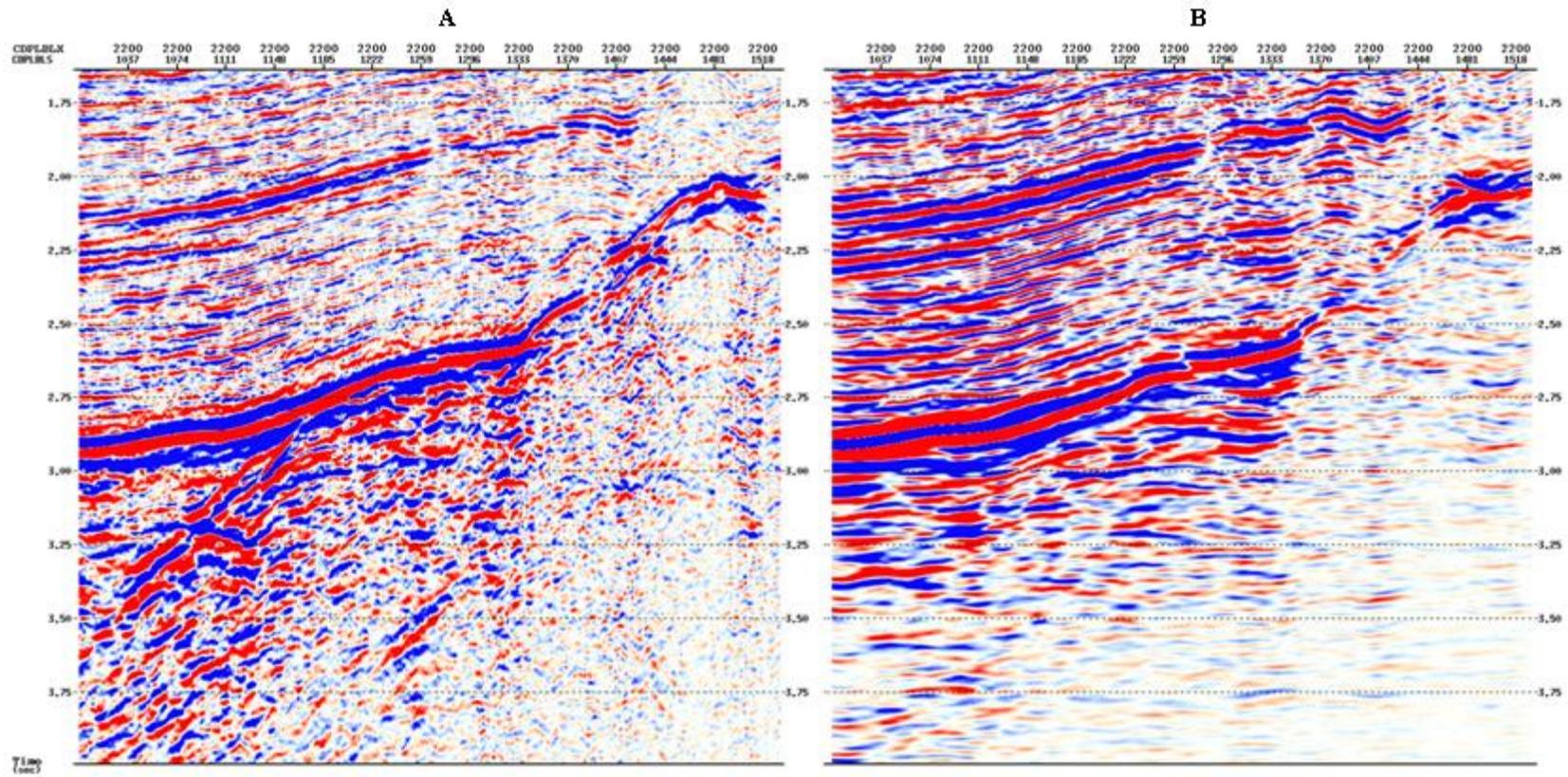


Figura 59. Crossline 2200, sección apilada (A) y migrada con apertura de 500 m (B), zona intermedia.

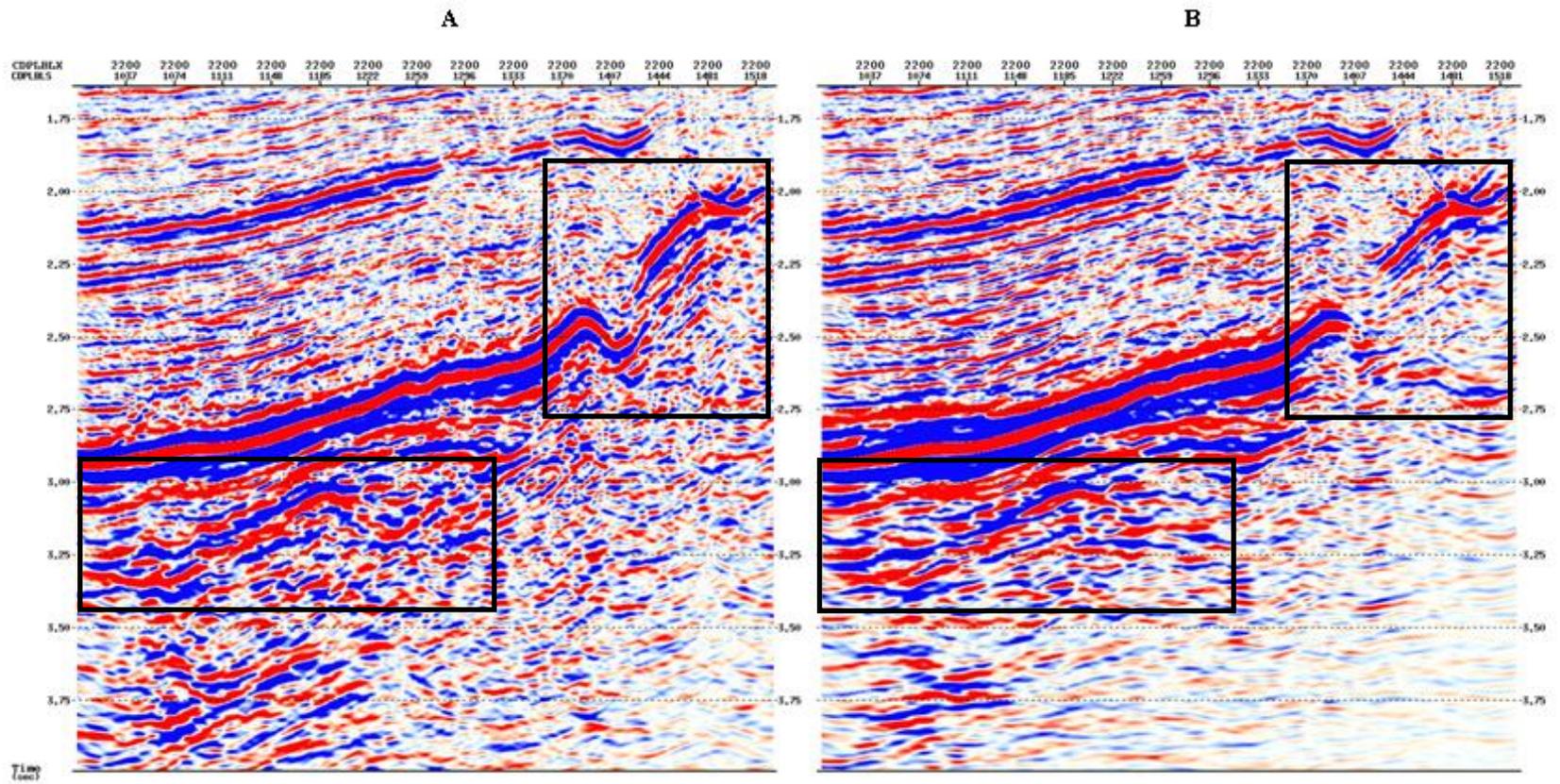


Figura 60. Crossline 2200, sección migrada con apertura de 2000 m (A) y 1000 m (B), zona intermedia.

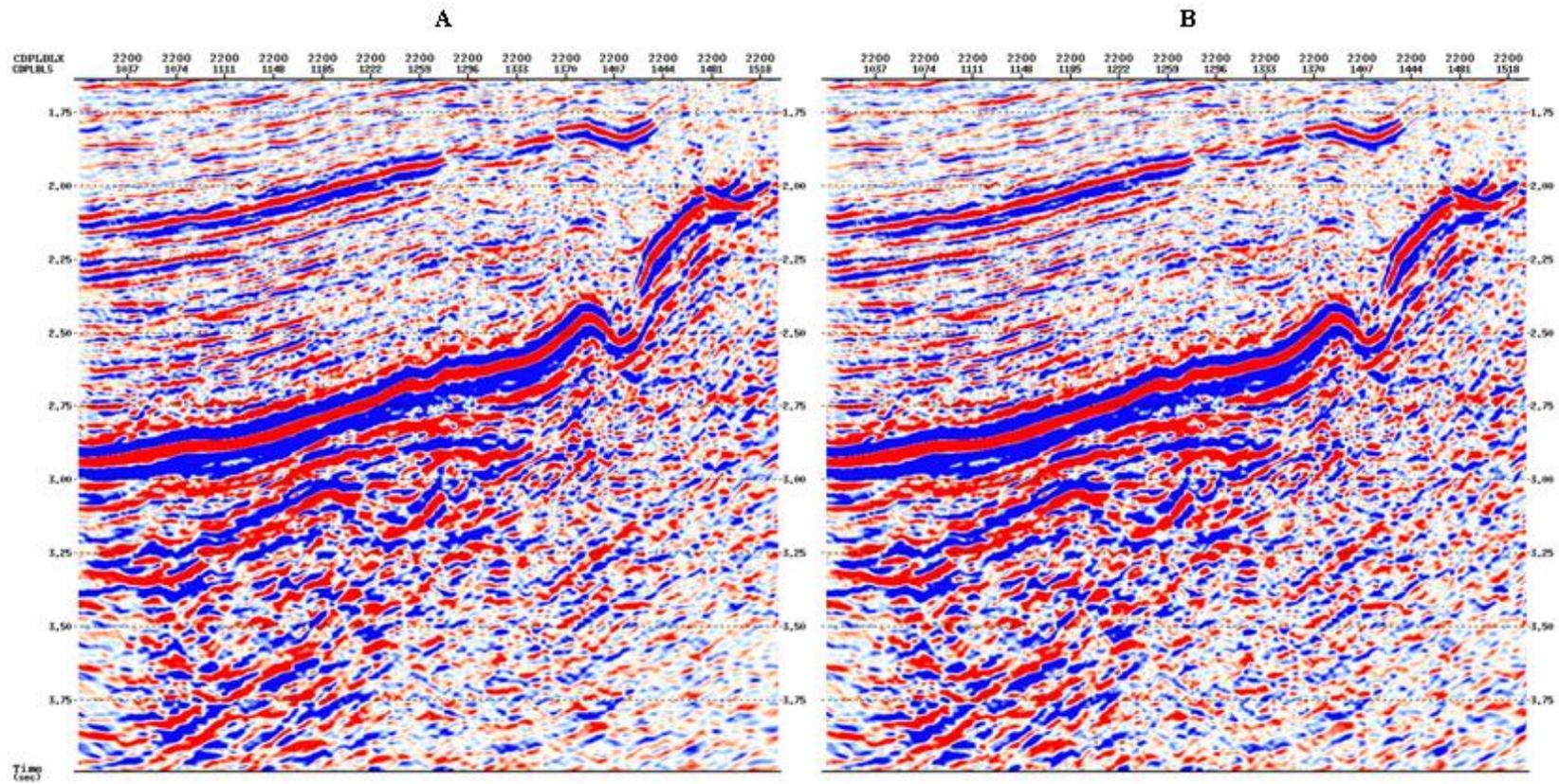


Figura 61. Crossline 2200, sección migrada con apertura de 3000 m (A) y 4000 m (B), zona intermedia.

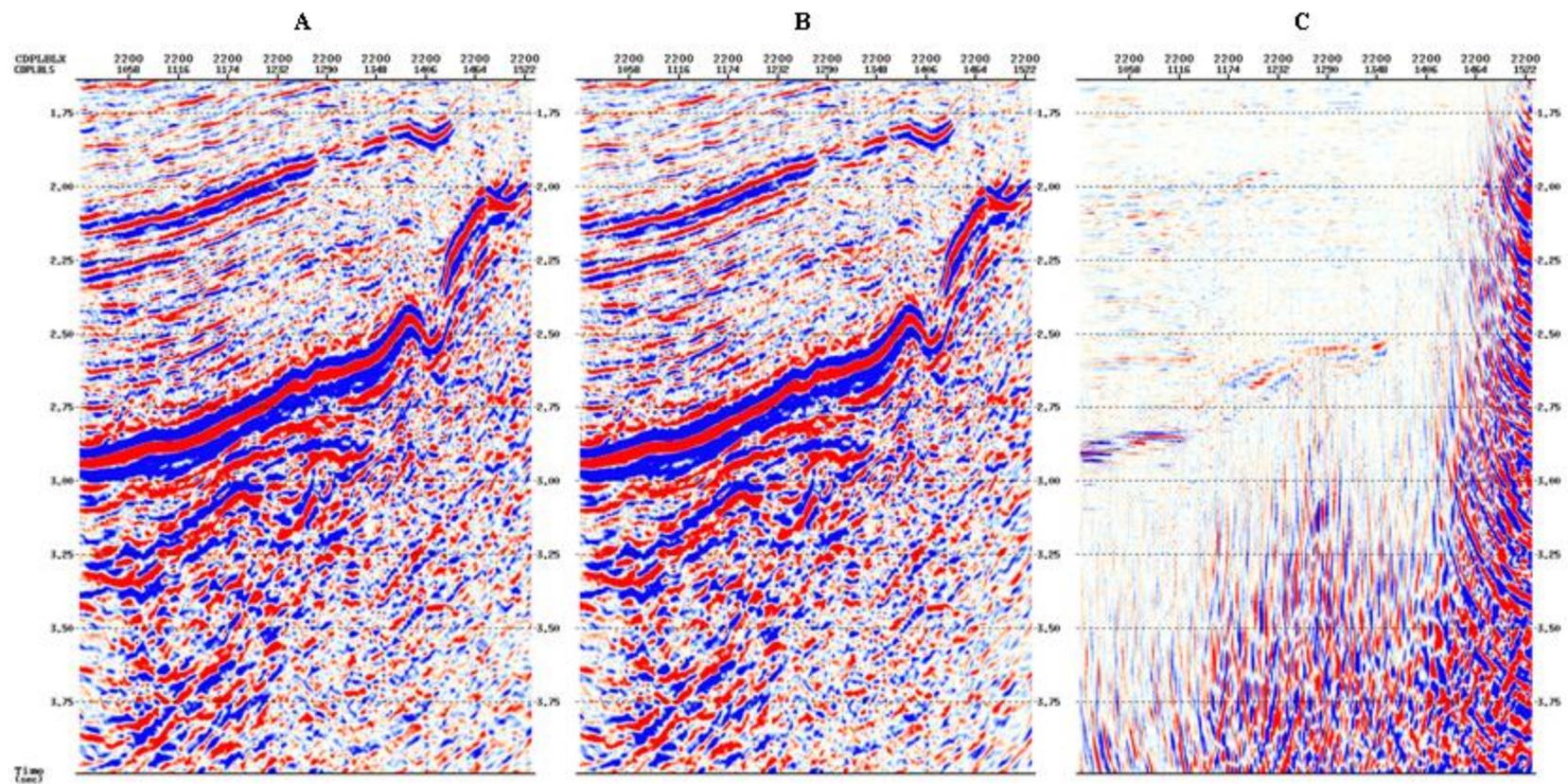


Figura 62. Crossline 2200, sección migrada con apertura de 4000 m (A), 7000 m (B), y resta de ambas migraciones (C), zona intermedia.

En la zona profunda del proyecto (4 a 6 s) la sección apilada es por lo general muy ruidosa como se puede observar en la figura 63, que representa al *inline* 1000. La relación señal ruido es realmente pobre y apenas se puede distinguir una hipérbola de difracción y un evento en la zona central y sur cercana a los 4 segundos. En esta zona realmente no se espera resolver ningún evento. Para la migración de 500 m se puede observar que la difracción colapsó un poco pero en líneas generales todos los eventos aparecen horizontalizados y la sección aparece casi completamente blanca por la poca relación señal ruido.

Para una apertura de 1000 m aunque la zona la zona central y sur cercana a los 4 segundos se definen mejor los únicos dos eventos que se pueden distinguir en esta zona, pero se pueden apreciar localmente, es decir, su continuidad lateral es prácticamente nula, además que el resto de la sección sigue bastante horizontalizada y blanqueada (figura 64). Para una apertura de 2000 m la sección no aparece tan blanqueada, pero los eventos que aparecen carecen de continuidad lateral por lo que en términos generales la sección carece de sentido geológico. La zona somera es la que presenta los dos eventos que se han venido mencionando pero aunque mejora la definición de estos eventos, lateralmente no es posible seguirlos. En esta apertura ya empieza a ser notorio el efecto de borde generado por el operador de migración.

Para una apertura de 3000 m (figura 65), la baja relación señal-ruido de la sección ocasiona que el efecto del operador sea mucho más fuerte que en el resto de la sección y sin presentar mejora alguna de los pocos eventos que pueden ser resueltos en este intervalo de tiempo de grabación. Para una apertura de 7000 m el efecto del operador es bastante severo, alineando mucho ruido. Es notoria la sensibilidad del operador de Kirchhoff a zonas con bajas relación señal-ruido. Si el objetivo de un proyecto presenta una baja relación señal ruido-ruido, sería recomendable usar otro tipo de algoritmo de migración que no sea tan sensible a este hecho, sin embargo, hay que tomar en cuenta que este algoritmo maneja bastante bien pendientes pronunciadas, *aliasing* espacial y cambios laterales de la velocidad.

En cuanto a los *crosslines* para esta zona profunda los efectos de la apertura son similares. La sección apilada para el *crossline* 2000, figura 66, evidencia una sección bastante ruidosa, donde no se distingue ningún evento que tenga continuidad lateral por lo que el efecto del operador debe ser bastante severo para aperturas excesivas. Para una apertura reducida de 500 m la sección muestra el clásico efecto de horizontalización de los eventos, en este caso la relación señal- ruido es tan pobre que realmente el operador está alineando es el ruido, este fenómeno es conocido como *smearing* y como se ha demostrado en los resultados de este proyecto tiende a ocurrir en las zonas profundas de las secciones sísmicas aunque realmente está ligado a que en las zonas profundas están definidas por velocidades relativamente altas. Las hipérbolas de difracción son calculadas a partir del modelo de velocidad con la ecuación (1) descrita en la teoría, donde para mayores velocidades y mayores tiempos la hipérbola es más ancha y amplia, por lo que el área cercana a su ápice es aproximadamente horizontal, por lo que al sumar prácticamente sobre esta zona se genera el efecto conocido como *smearing*, lo que visualmente se traduce como eventos horizontales espurios.

Ya para aperturas mayores de 3000 y 4000 m, figura 67, este efecto empieza a desaparecer y aparece una estructura con la relativa continuidad lateral en el extremo superior izquierdo de la sección, mientras que el resto de la sección se muestra ruidoso y el efecto del operador es evidente; no existe ningún evento que tenga continuidad lateral por lo que este sector de la sección, al igual que los *inlines*, carece de sentido geológico. Para una apertura de 7000 m, el operador alinea el ruido aleatorio, como se puede observar en la figura 68. En esta resta de las dos migraciones, se puede observar con mayor claridad un hecho que se comentó en el análisis de los *crosslines* intermedios, la zona este se ve considerablemente más afectada por el operador que la zona oeste, debido a que la zona este tiene mucha mayor cantidad de ruido aleatorio por su cercanía a la costa occidental de la Península de Paraguaná.

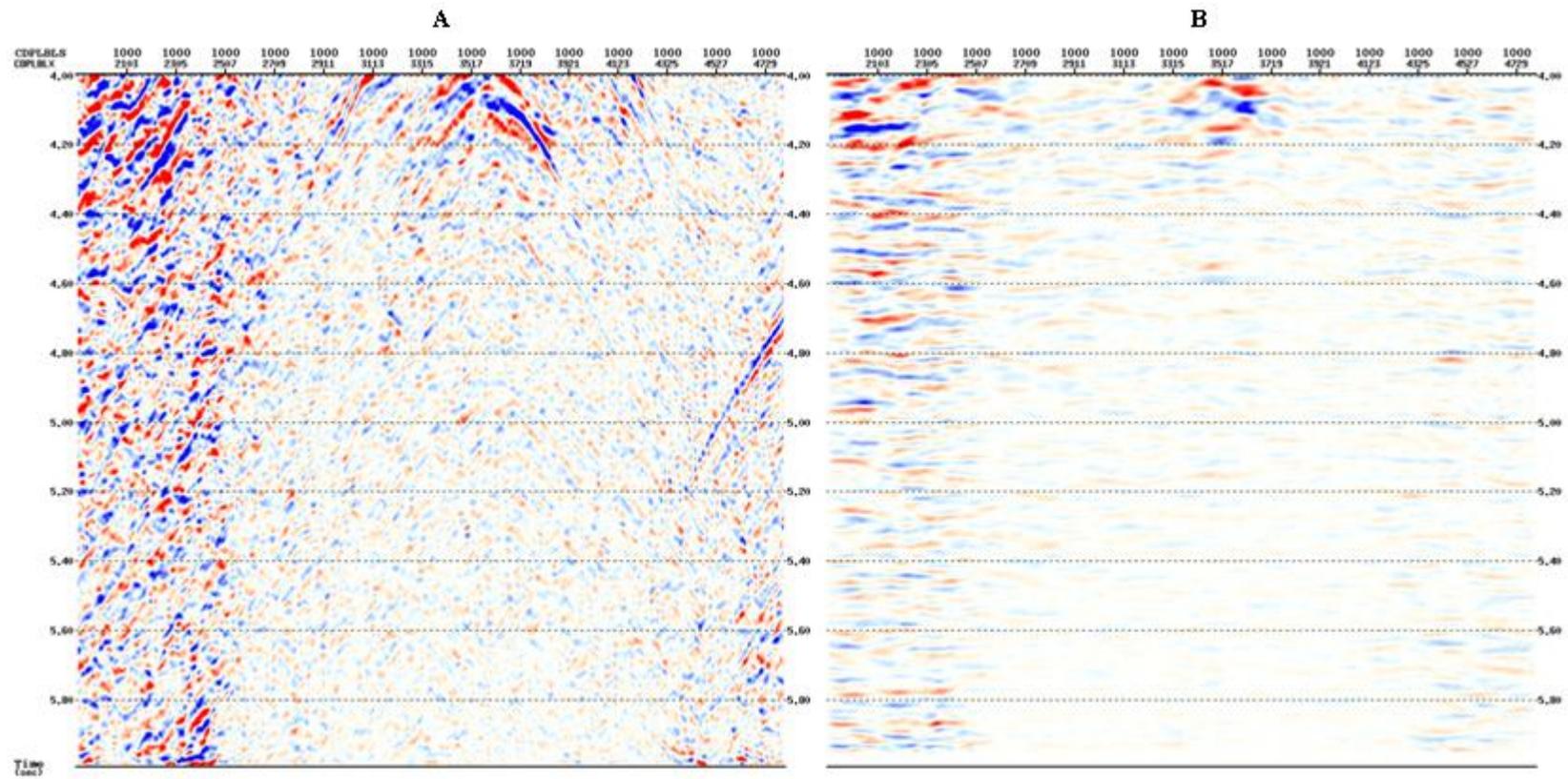


Figura 63. Inline 1000, sección apilada (A) y migrada con apertura de 500 m (B), zona profunda.

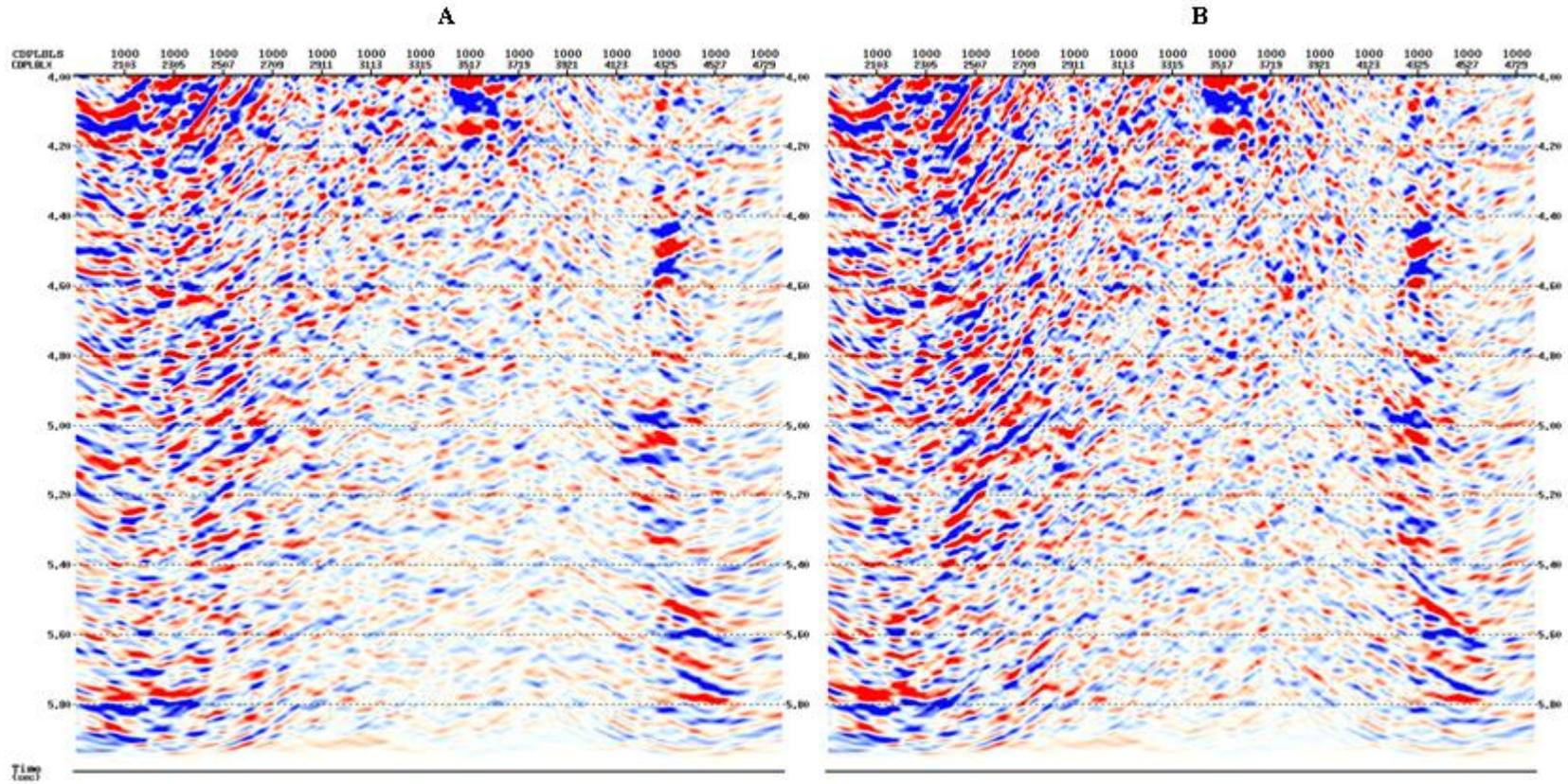


Figura 64. Inline 1000, sección migrada con apertura de 3000 m (A) y 4000 m (B), zona profunda.

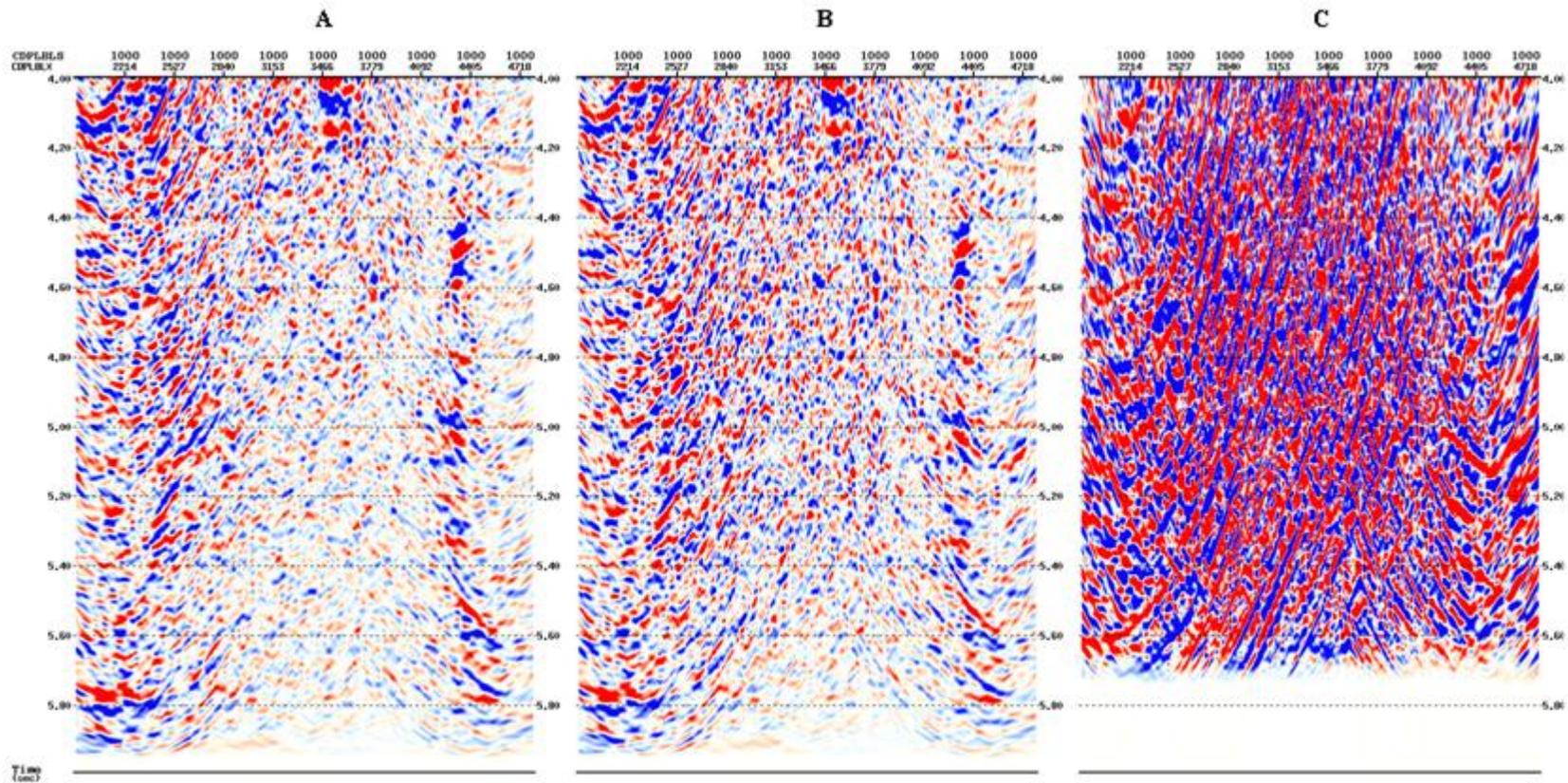


Figura 65. Inline 1000, sección migrada con apertura de 4000 m (A), 7000 m (B), y resta de ambas migraciones (C), zona profunda.

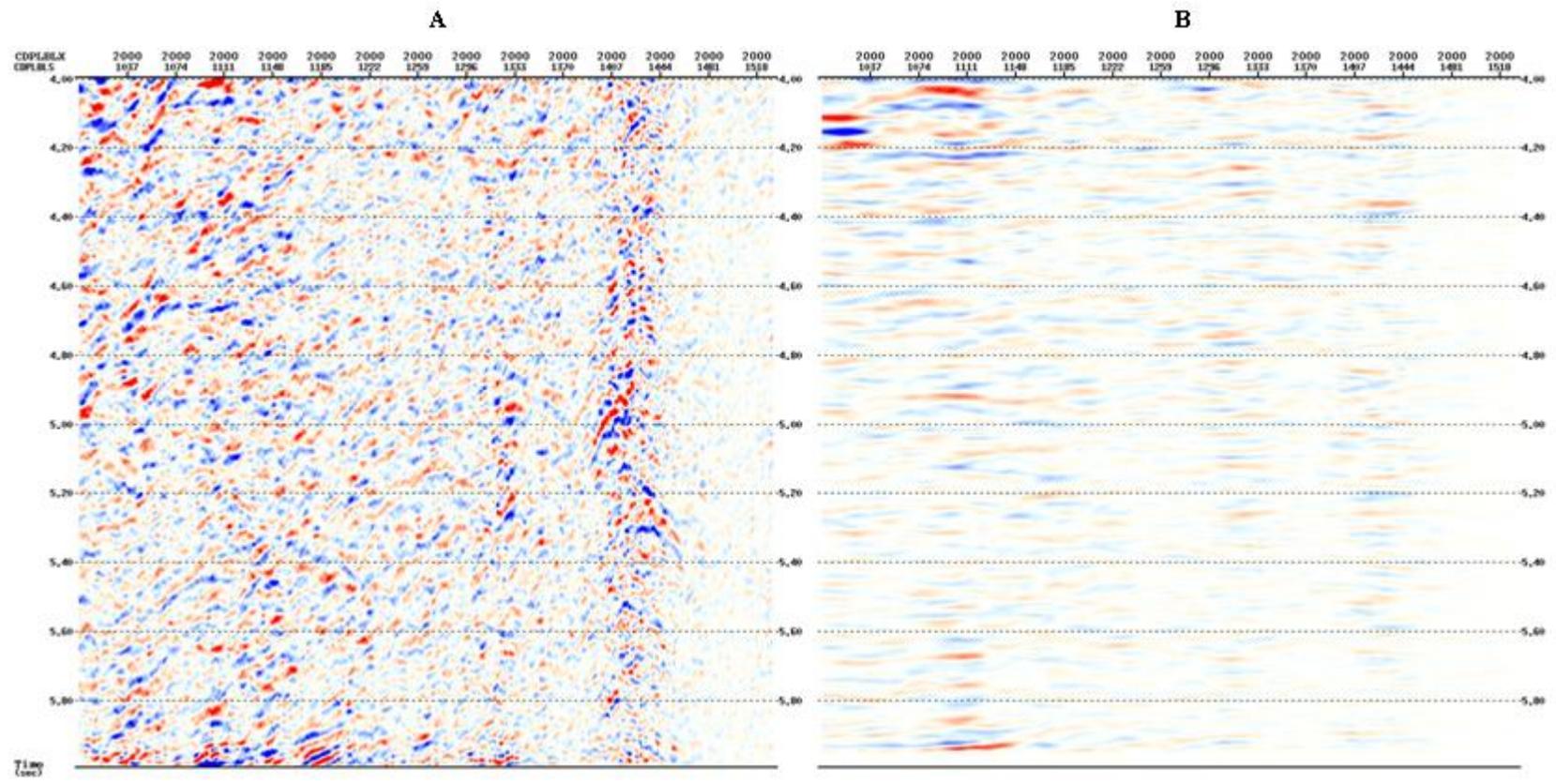


Figura 66. Crossline 2000, sección apilada (A) y migrada con apertura de 500 m (B), zona profunda.

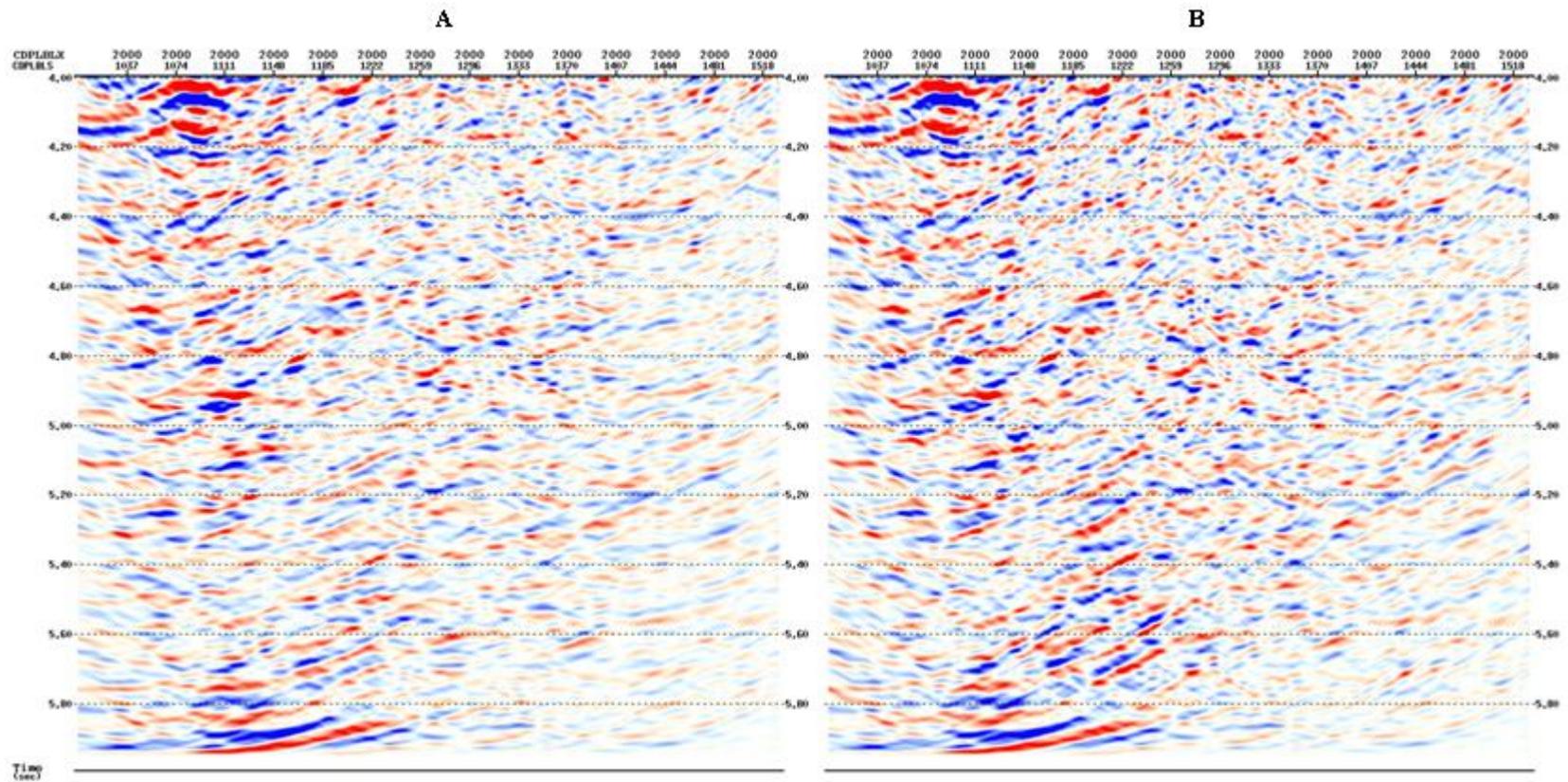


Figura 67. Crossline 2000, sección migrada con apertura de 3000 m (A) y 4000 m (B), zona profunda.

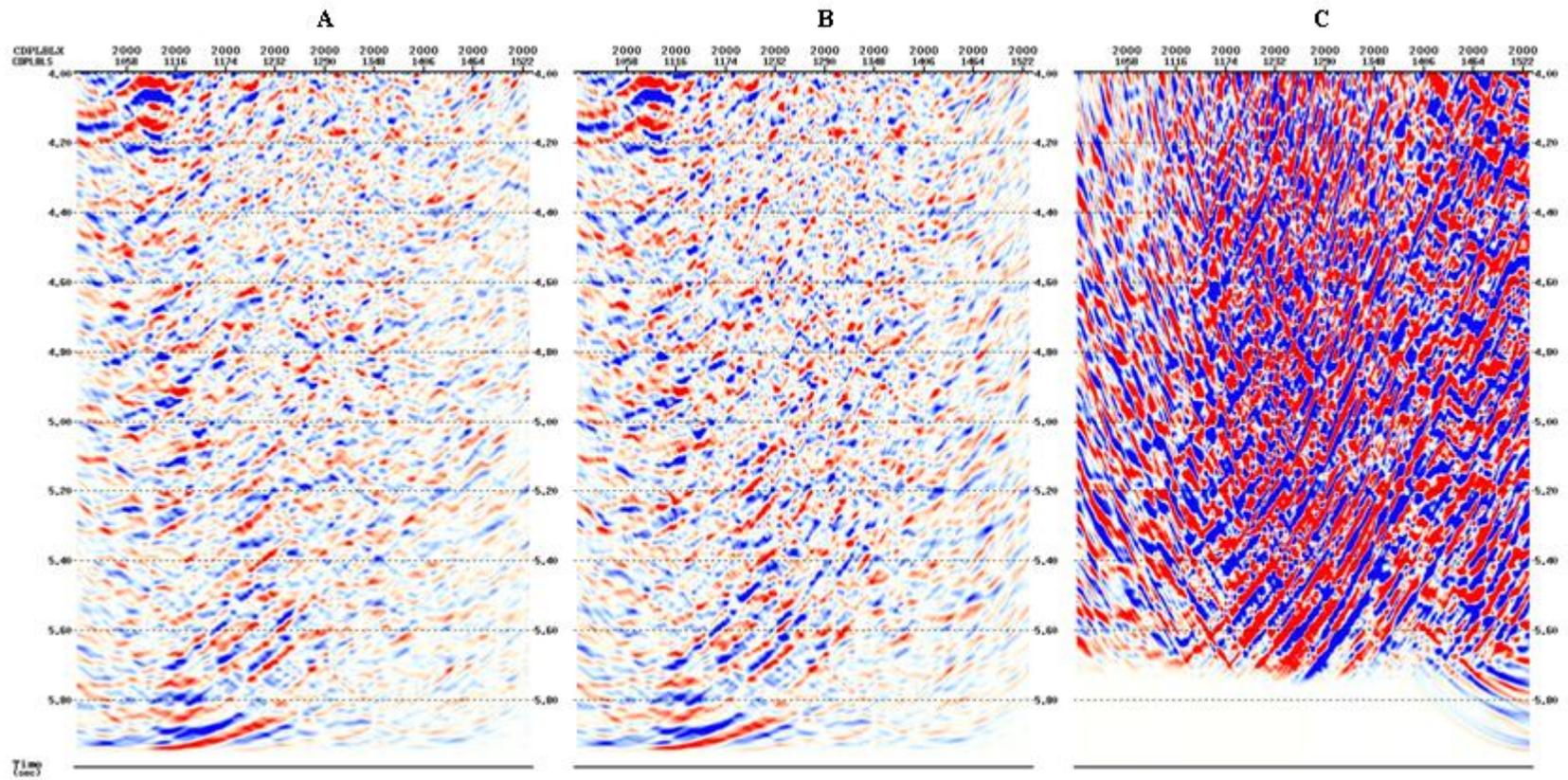


Figura 68. Crossline 2000, sección migrada con apertura de 4000 m (A), 7000 m (B), y resta de ambas migraciones (C), zona profunda.

En cuanto al contenido de frecuencias se refiere, la figura 69 muestra el espectro de amplitud, de la sección apilada y de secciones migradas con sucesivas aperturas constantes. Se puede apreciar que el espectro cambia tan poco que las diferencias apenas son perceptibles. En líneas generales las amplitudes a partir de los 25 Hz presentan una fuerte atenuación, mientras que las bajas frecuencias presentan una mayor amplitud. La migración, como se mencionó en el análisis de las secciones, no mejora la resolución vertical y esto es evidente en los espectros, donde se ve que el contenido de frecuencias permanece invariable, incluso la amplitud de las bajas frecuencias se ven ligeramente reducidas en las migraciones. Este espectro es bastante mejorable con post procesos, se tratará este aspecto más adelante.

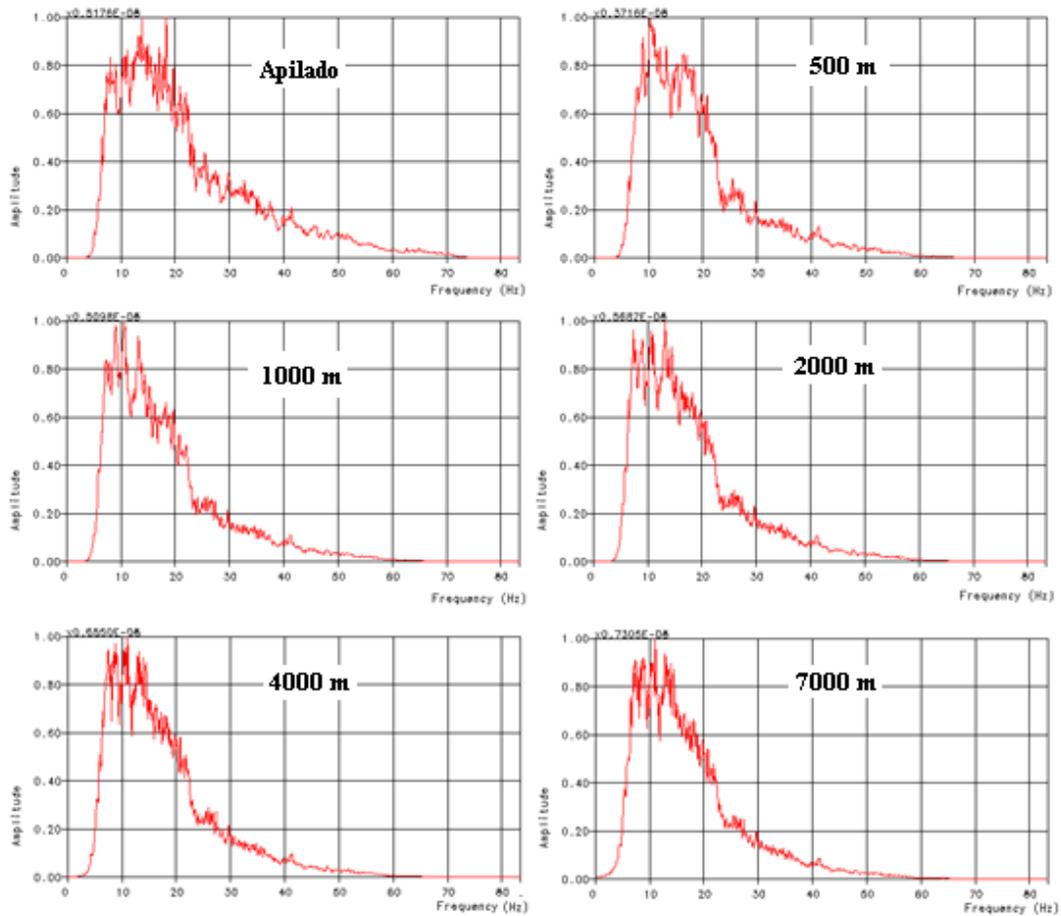


Figura 69. Comparación de los espectros de amplitud para migraciones con apertura constante.

5.2 Migración con apertura angular

Las limitaciones impuestas por una apertura de migración fija, pueden ser salvadas a partir de la definición una apertura angular; este tipo de implementación permite definir una apertura variable en el tiempo que es limitada para la zona somera y que va creciendo con el tiempo en función de un ángulo con respecto a la vertical. Se generaron cubos para aperturas angulares de 15, 30, 45, y 60 grados con respecto a la vertical. Para esta implementación de la apertura en particular se espera que en los eventos someros la migración genere secciones menos ruidosas si se define una apertura lo suficientemente grande para migrar eventos profundos o con pendiente pronunciada, ya que al aumentar la apertura en función del ángulo, el número de trazas que entran dentro de la trayectoria de la sumatoria es mucho menor en la zona somera que en la zona profunda, como se puede observar en la figura 70, lo que permite migrar los eventos y colapsar las difracciones correctamente en las zonas profundas o intermedias, sin necesidad de sumar muchas trazas en la zona somera. Este hecho no sólo mejora la calidad visual de los datos, sino que también reduce el tiempo de cómputo para las migraciones, que se traduce en reducción de costos para la empresa que ofrece el servicio.

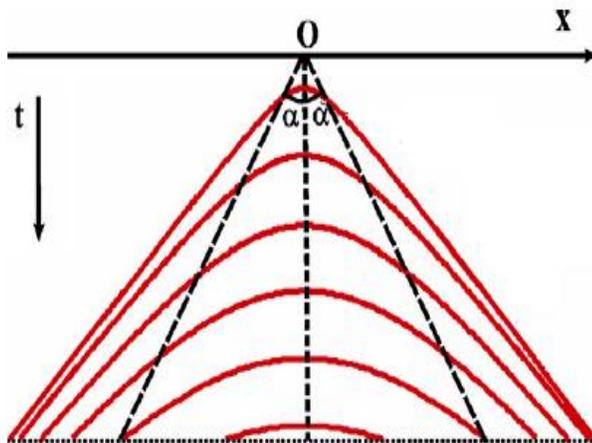


Figura 70. Esquema de suma del operador de migración para una apertura angular.

La apertura de migración en términos de un ángulo también funciona como un filtro de pendiente, de hecho la apertura constante también funciona como un filtro de pendiente como se puso observar en el análisis de dicha apertura, donde aparecían eventos con mayor pendiente a medida que se aumentaba la apertura. Sin embargo, esta relación es más clara cuando se define la apertura en función de un ángulo. Liu y Bancroft (2003) demostraron que la “ecuación del migrador” (5) descrita por Robinson (1983) guarda relación con la apertura angular del operador de Kirchhoff y la pendiente de los eventos migrados.

$$\tan(\alpha)=\sin(\beta) \quad (5)$$

Donde α es la apertura angular de Kirchhoff y β es el límite angular de la pendiente máxima de los eventos migrados, cualquier evento con una pendiente mayor a este valor no será correctamente migrado.

Para una apertura de 15° , que es la apertura mínima definida en este dominio, la sección migrada ya se muestra bastante mejorada con respecto a la sección apilada para el *inline* 1120 (figura 71), hecho que no es similar con la apertura constante, donde para la mínima apertura constante la sección migrada todavía conservaba muchos aspectos de la sección apilada. Para esta apertura angular las difracciones colapsan, se definen mucho mejor los eventos, y aumenta la resolución lateral permitiendo definir claramente las zonas falladas y los pequeños pliegues, sin embargo la relación señal-ruido podría mejorar. Los efectos de borde ya se aprecian en esta sección.

Para las aperturas de 30° y 45° lo que realmente mejora es la relación señal-ruido, generando secciones más limpias que la sección generada con una apertura de 15° , visualmente los eventos se ven mejor definidos pero realmente a partir de la apertura de 30° no existe una mejora perceptible de los datos. Para las aperturas de 30° y 45° en particular aparecen un par de artefactos como se puede observar en la figura 72 enmarcados en los recuadros. Estos artefactos se traducen es zonas con mayor donde

se realzan las altas frecuencias localmente o zonas donde el operador suma un poco más de ruido relativamente a otras zonas.

Estos artefactos desaparecen para una apertura de 60° (figura 73), probablemente porque al sumar más señal se genera una sección más coherente, eliminando los artefactos. Esto sucede porque la relación señal-ruido en esta zona somera es alta. La sección migrada para una apertura de 60° se muestra con una alta relación señal-ruido, los eventos tienen continuidad lateral, la resolución vertical permanece invariable como se espera, y en general tiene sentido geológico. El único defecto de esta sección es el efecto de borde, que es bastante severo en la zona izquierda del *inline* pero con lo que se debe lidiar porque estos son generados por la naturaleza del algoritmo. Al restar las secciones migradas con 45° y 60° es evidente que las mayores diferencias se encuentran en las zonas enmarcadas en la figura anterior, donde se reflejan los artefactos como zonas manchadas, también es posible ver los efectos del operador en esta visualización. En el sentido *crossline* el análisis es idéntico que en el sentido *inline*, incluyendo los artefactos que se generan en las secciones migradas con aperturas de 30° y 45° , hecho que se trata más adelante al comparar la sección completa para la dirección *crossline*.

En un contexto distinto donde la relación señal-ruido sea baja, habría que evaluar realmente que tanto se degrada la imagen al aumentar la apertura, pero por lo general se prefiere una apertura amplia a una reducida, porque resuelve correctamente los eventos, en particular para zonas complejas o con pendientes pronunciadas y luego se atenúan los artefactos o el ruido aleatorio con los post procesos. Es decir, es preferible trabajar con una sección migrada que represente lo más posible a la realidad del subsuelo aunque sea ruidosa, que trabajar con una sección que no esté correctamente migrada pero que visualmente este limpia, ya que esto puede implicar grandes gastos sin ningún tipo de ganancia, donde la industria tiene experiencias con pozos secos propuestos a partir de una sísmica mal migrada.

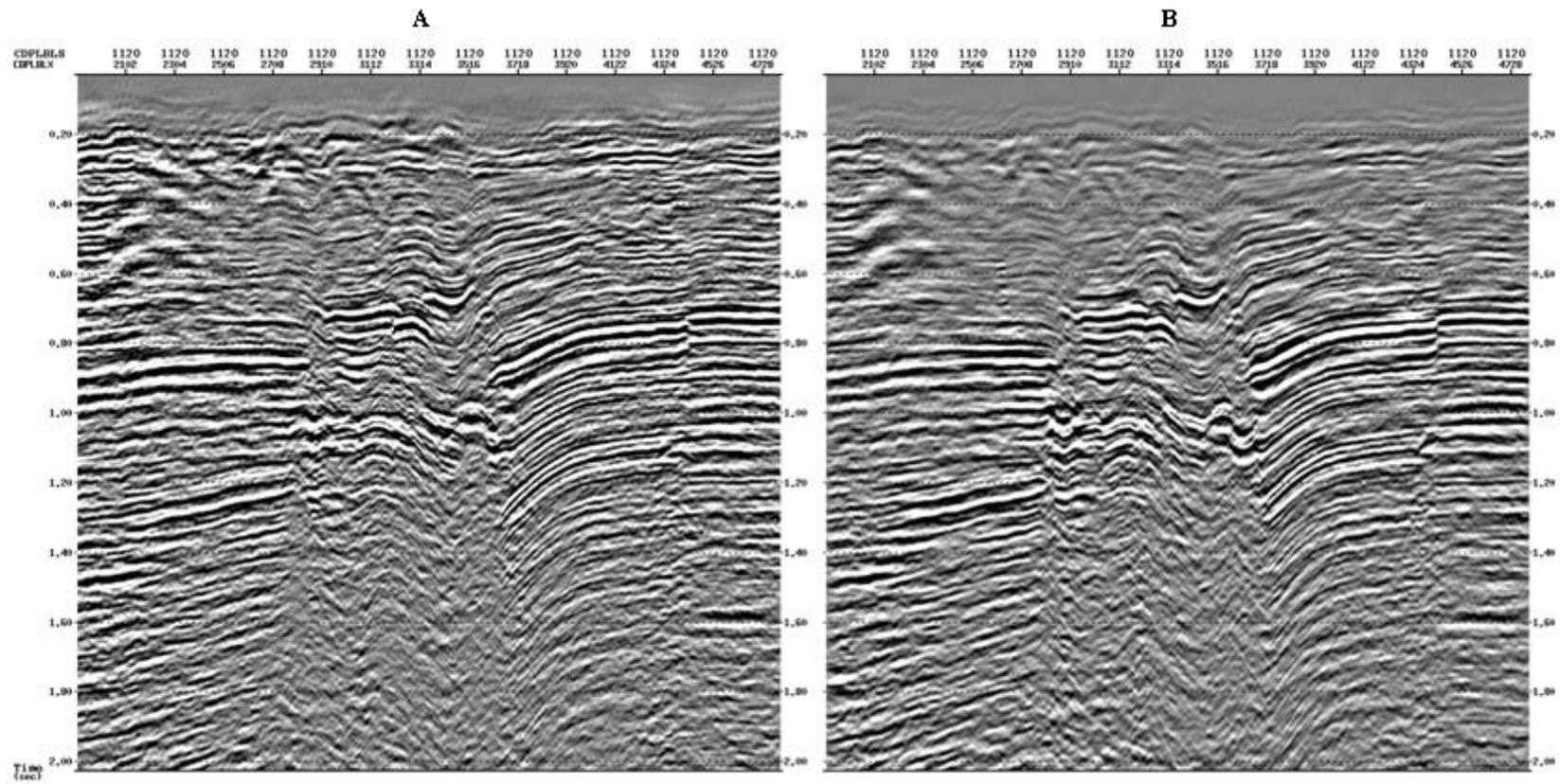


Figura 71. Inline 1120, sección apilada (A) y migrada con apertura 15° (B), zona somera.

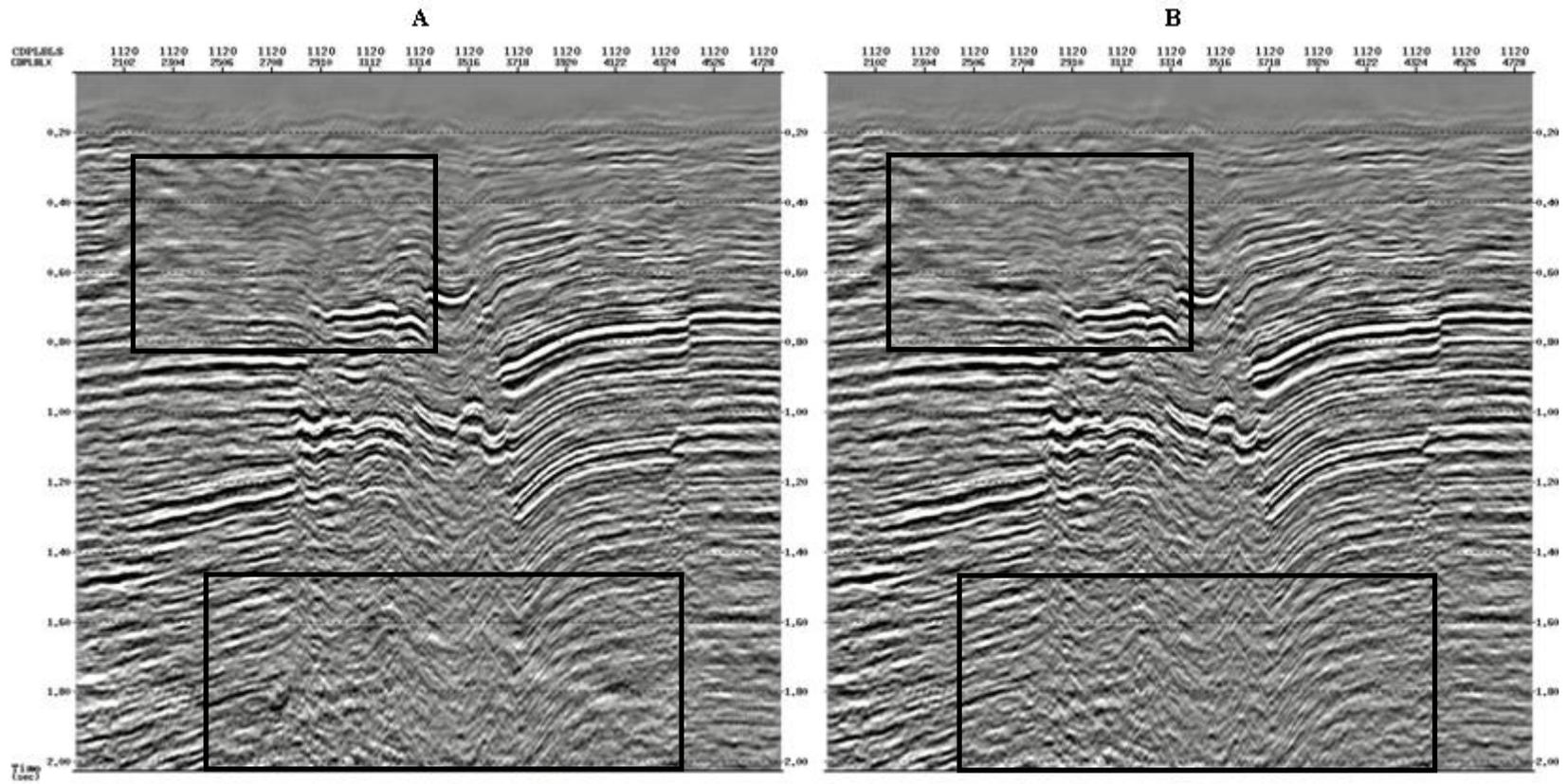


Figura 72. Inline 1120, sección migrada con apertura 45° (A) y 30° (B), zona somera.

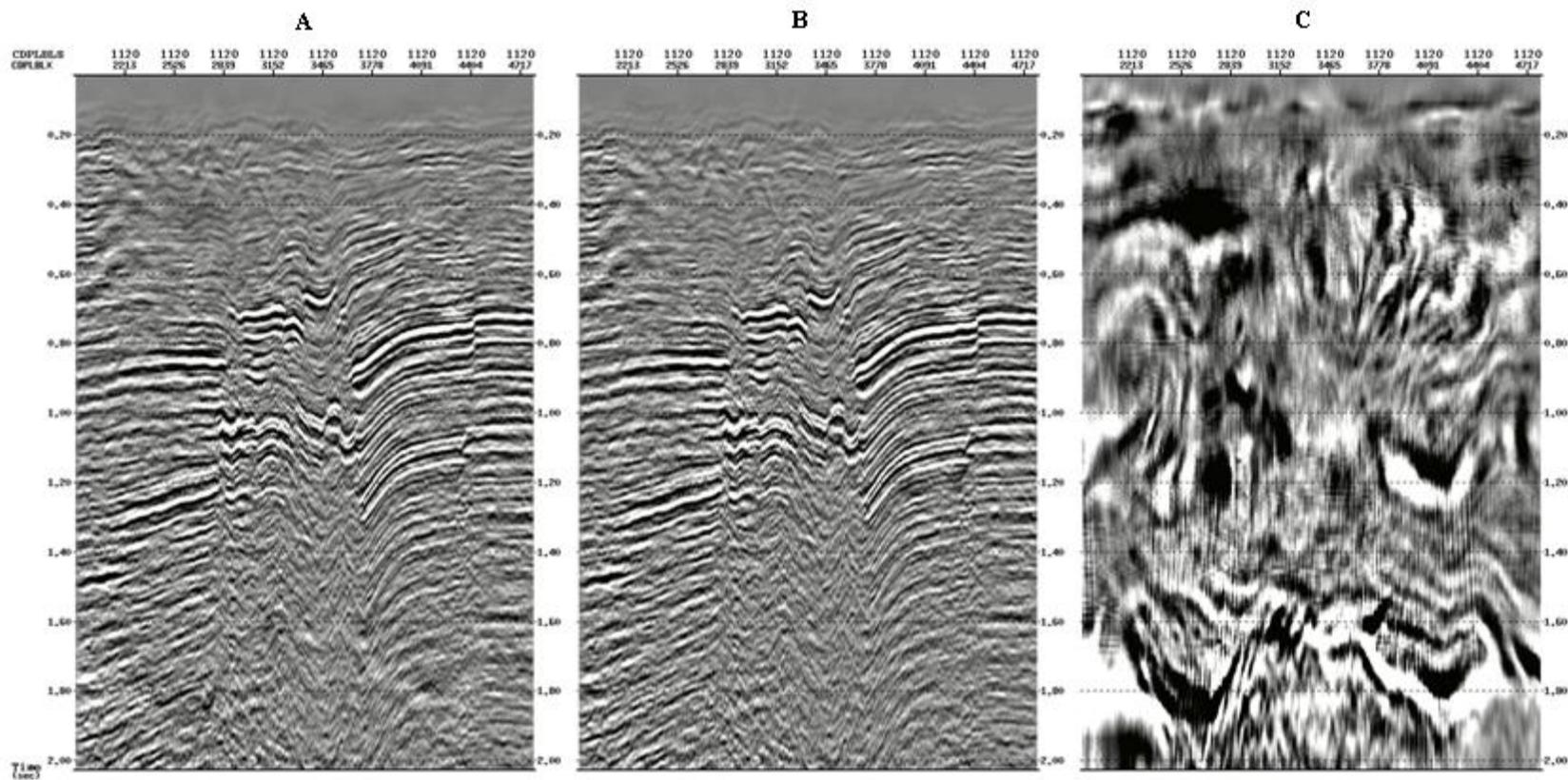


Figura 73. Inline 1120, sección migrada con apertura 45° (A), 60° (B) y resta entre ambas migraciones (C), zona somera.

En la zona del evento de interés para la dirección *inline*, una apertura de 15° (figura 74) colapsa las difracciones y mejora notablemente la resolución lateral de los eventos, sin embargo no resuelve completamente eventos con pendiente pronunciada. Esta apertura también genera un ligero *smearing* en la zona cercana a los 4 s. Para una apertura de 30° los eventos con pendiente pronunciada se resuelven perfectamente (figura 75), la relación señal-ruido mejora notablemente, los eventos en la zona profunda ya no se presentan horizontalizados, es posible observar alguna estructura pero en general esta zona es bastante ruidosa y la continuidad lateral de los eventos es pobre. Los efectos de borde producidos por el operador empiezan a ser evidentes.

Al aumentar la apertura a 45° y comparar la sección con la apertura de 30° es difícil distinguir alguna mejora por lo que una apertura de 45° sería la apertura adecuada para migrar correctamente el evento de interés. En la migración de 30° se puede observar que existen zonas donde las bajas frecuencias están amplificadas con respecto a la apertura de 45° , este artefacto también se evidenció en la zona somera pero para ambas migraciones (30° y 45°), en este caso para la migración de 45° no se observa este efecto sobre las bajas frecuencias pero en la zona que se encuentra por debajo del evento de interés la relación señal-ruido se ve deteriorada sobre todo para los tiempos cercanos a 4 s. Este hecho se ve acentuado para una migración con apertura de 60° , figura 76, donde la migración no mejora en absoluto la sección, de hecho la resta entre las secciones de 45° y 60° muestra que la única diferencia entre las secciones es el efecto del operador donde la relación señal ruido es pobre. En esta zona intermedia la sección migrada con apertura angular de 45° no genera el artefacto sobre las bajas frecuencias que se observa en la zona somera.

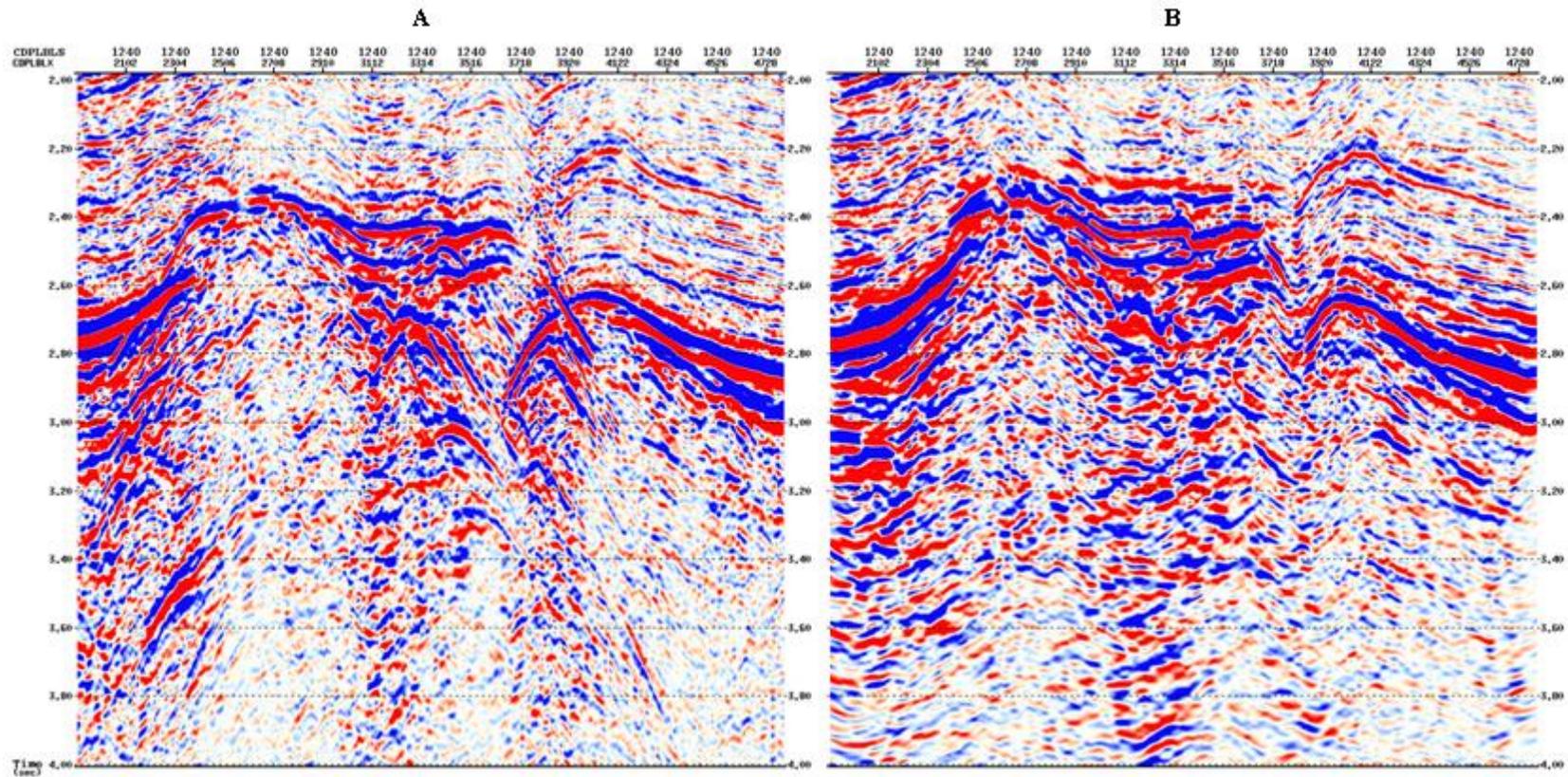


Figura 74. Inline 1240, sección apilada (A) y migrada con apertura angular de 15° (B), zona intermedia.

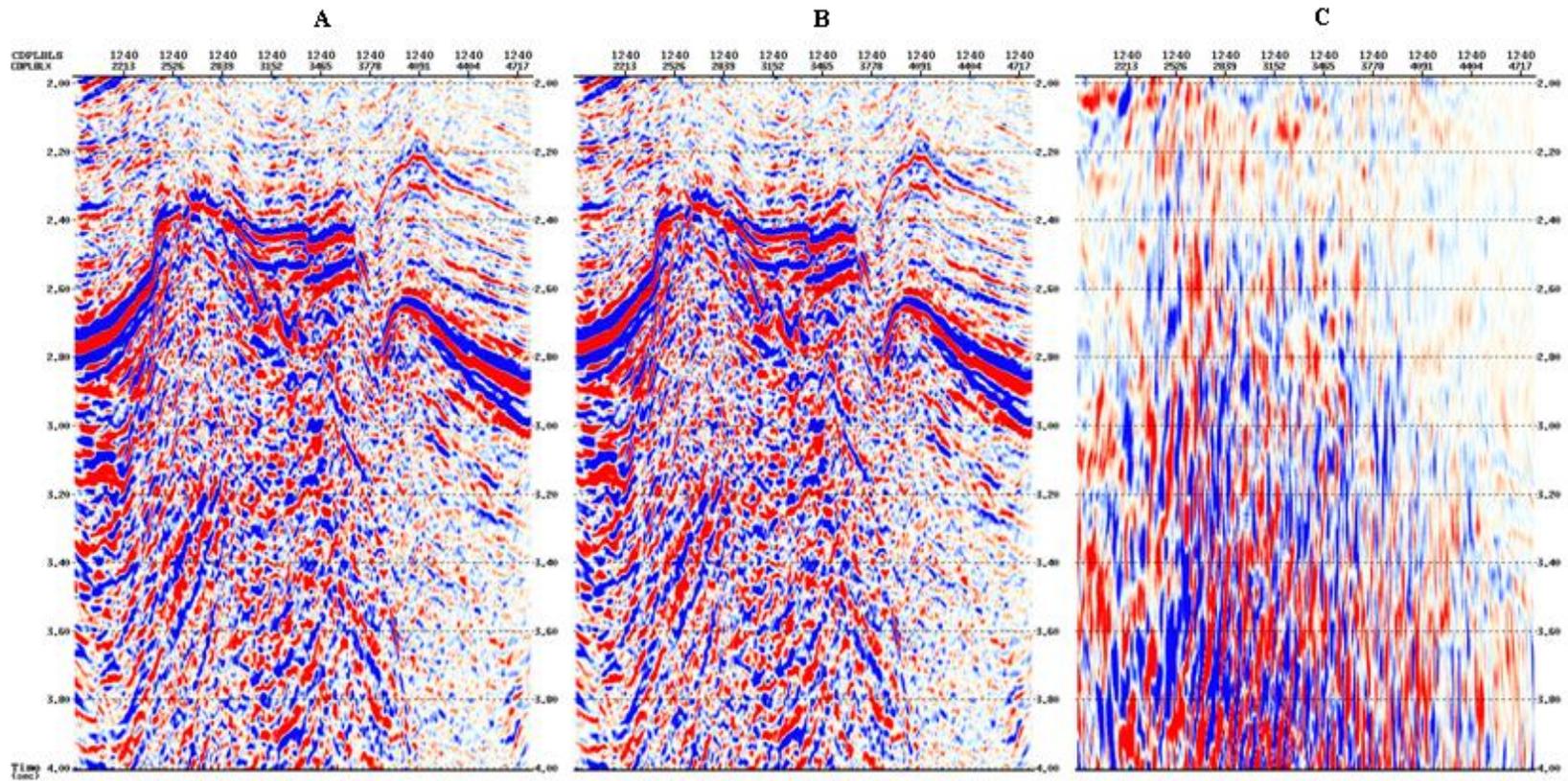


Figura 76. Inline 1240, sección migrada con apertura angular de 45° (A), 60° (B) y resta de ambas migraciones, zona intermedia.

En el evento de interés para la dirección *crossline* se espera que sea necesaria una apertura menor relativa a la dirección *inline* por la condición impuesta en adquisición sobre la iluminación preferencial en la dirección *inline* debido a que los azimut están distribuidos estrechamente sobre esta dirección, por lo que no debe ser necesaria la misma apertura que en la dirección iluminada ya que de por sí la iluminación debe ser pobre en esta dirección.

Para una apertura de 15° , figura 77, en el *crossline* 2200 se puede observar que las difracciones colapsan en el evento de interés, y se resuelven eventos por debajo de este. La sección muestra una mejora considerable con respecto a la sección apilada. Para la zona cercana a los 4 s los eventos se muestran casi horizontales por el efecto de *smearing* debido a que la apertura es reducida. Para una apertura 30° la mejora es notable con respecto a la de 15° , sobre todo en el extremo superior derecho de la sección donde se encuentra una estructura compleja que presenta fuerte pendiente y plegamiento, esta estructura se resuelve a partir de esta apertura ya que en la apertura de 15° no era observable. Los efectos de borde empiezan a ser notorios para la apertura de 30° y para esta apertura en particular también aparecen amplitudes anómalas producto de amplificación de la amplitud para las bajas frecuencias en zonas específicas de la sección, como se puede observar en el recuadro de la figura 78. Al igual que para la dirección *inline*, la apertura de 45° no presenta dicho artefacto pero a diferencia sí muestra una mejora ligeramente perceptible en la resolución lateral y la continuidad de la reflexión del evento de interés en la zona donde la estructura es compleja. La migración con apertura de 60° no presenta mejora perceptible con respecto a la de 45° , donde la única diferencia al igual que la dirección *inline* es el efecto del operador en el sector este de la sección donde la relación señal-ruido es pobre, figura 79. Al contrario de lo esperado, para migrar correctamente los eventos en el sentido *crossline* es necesaria una apertura de igual magnitud que la de dirección *inline*; esto sucede por la complejidad de ciertas estructuras que necesitan una apertura moderada en ambas direcciones para que sean correctamente resueltas en la sísmica.

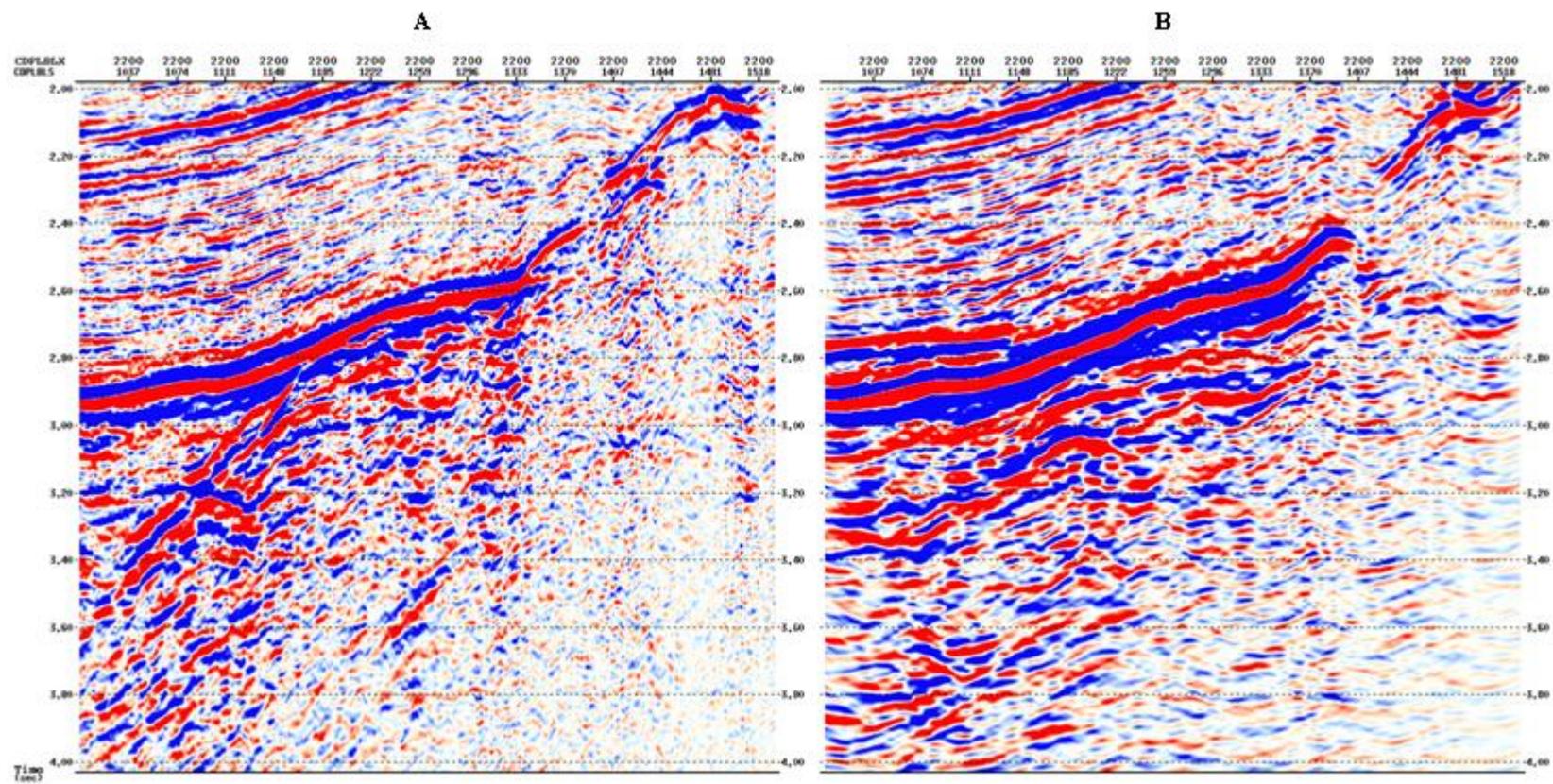


Figura 77. Crossline 2200, sección apilada (A) y migrada con apertura angular de 15° (B), zona intermedia.

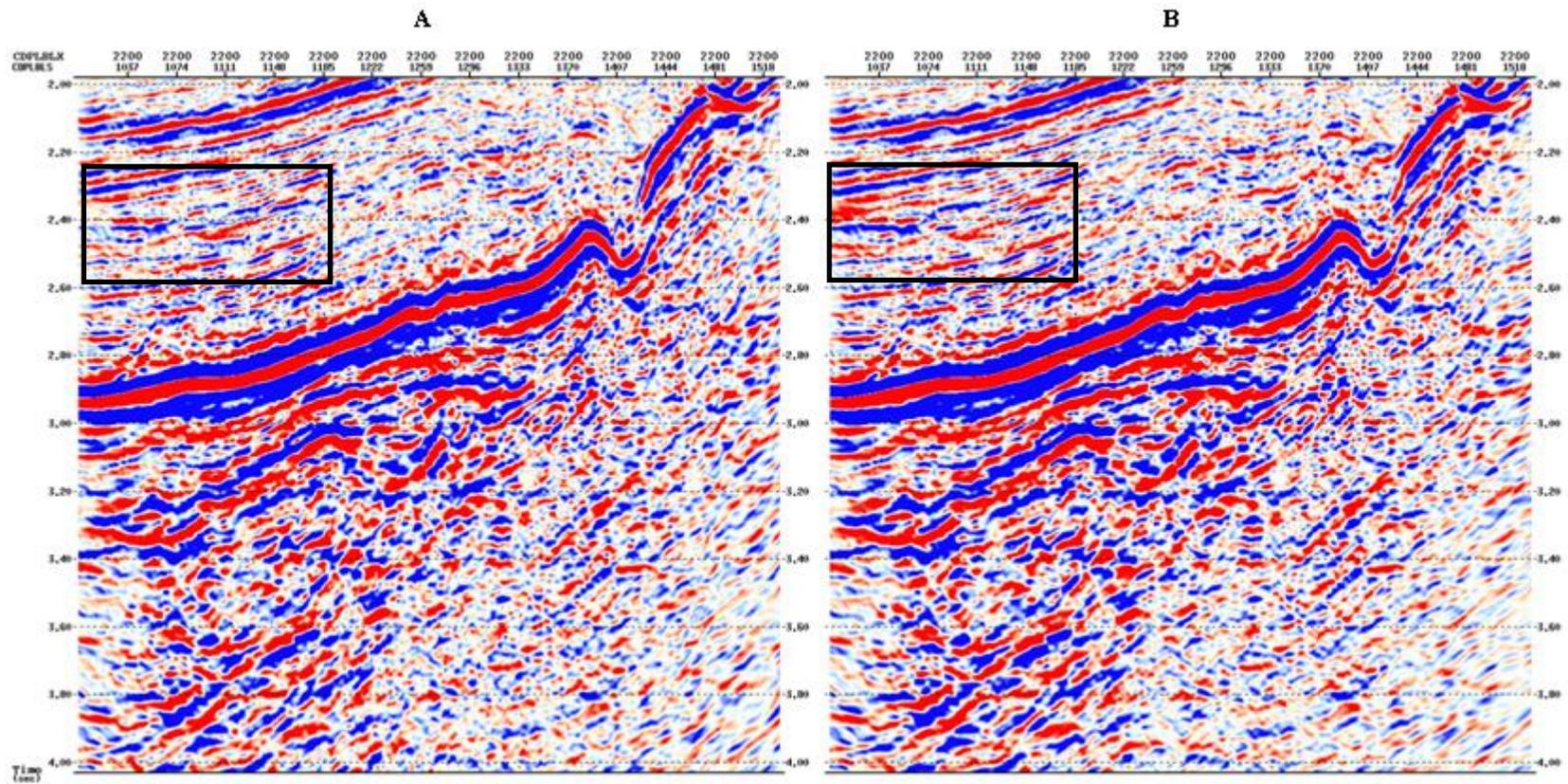


Figura 78. Crossline 2200, sección migrada con apertura angular de 45° (A) y 30° (B), zona intermedia.

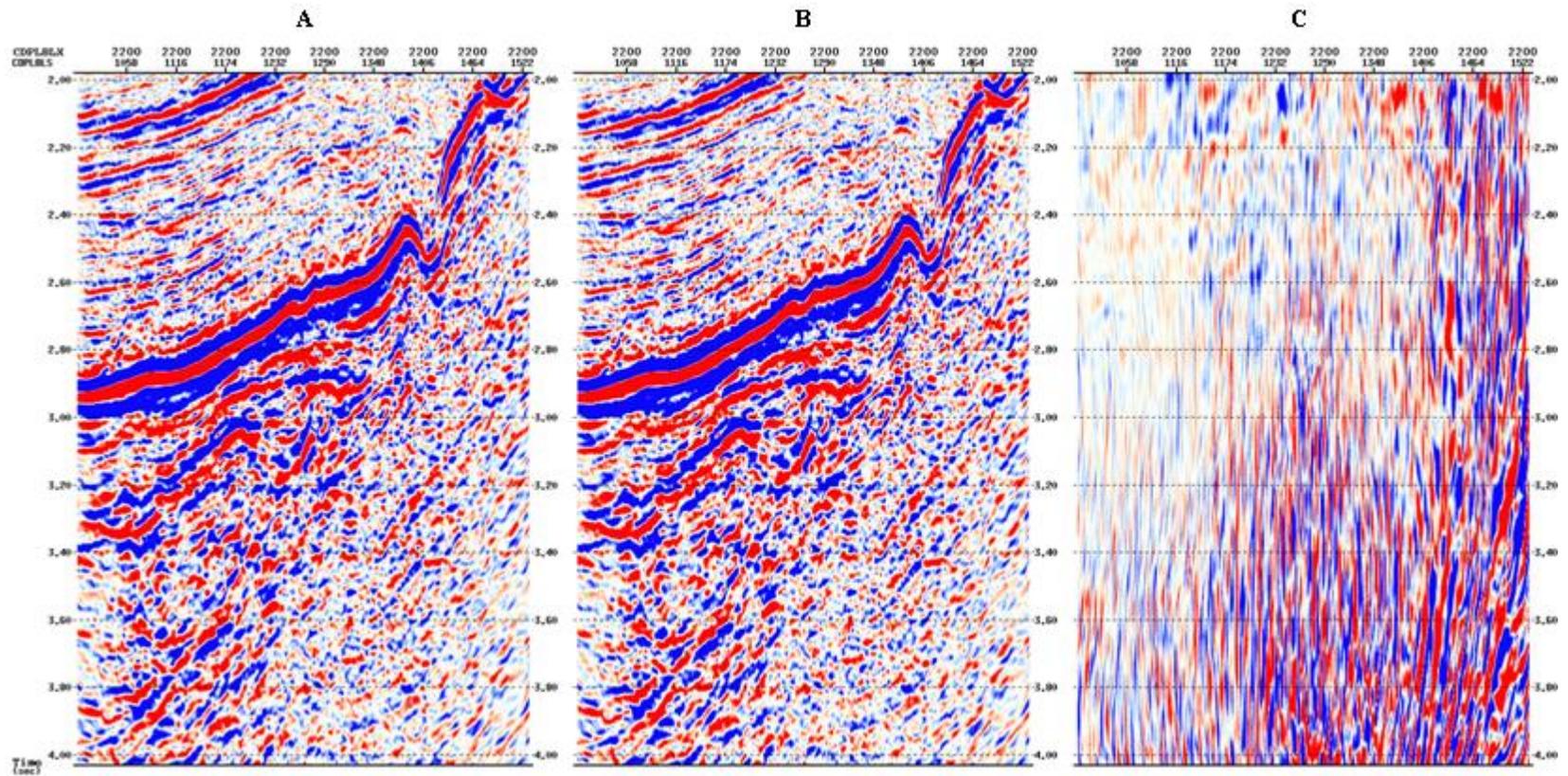


Figura 79. Crossline 2200, sección migrada con apertura angular de 45° (A), 60° (B) y la resta entre ambas migraciones, zona intermedia.

La sección apilada para la zona profunda presenta una relación señal-ruido tan baja que realmente no se distingue ningún reflector, este hecho se mencionó con anterioridad. Para una apertura de 15° la sección migrada muestra aun los efectos del *smearing* que se genera para sectores con alta velocidad y una apertura de migración reducida, figura 80. Para aperturas mayores el efecto del operador es tan severo que realmente no se observa diferencia entre las distintas aperturas a partir de la apertura de 30° . Una característica interesante de definir el operador en función de un ángulo es que existe un tiempo T donde la apertura de migración es máxima sobre la trayectoria de sumatoria de las curvas de difracción calculadas para cada punto, donde a partir de dicho tiempo T la trayectoria no depende de la apertura de migración. Esta característica también es válida para la apertura constante con la salvedad que para ese tipo de implementación de la apertura ese tiempo T está muy cercano a la longitud de la grabación por lo que en general el efecto es poco perceptible. Al restar las secciones migradas con aperturas de 45° y 60° para la zona profunda es notoria una sección donde la resta es cero, es decir, ambas migraciones son exactamente iguales, y esto sólo sucede donde la trayectoria de la migración deja de ser dependiente de la apertura, en este caso en particular esto sucede a los 5 s, ver figura 81.

El análisis de los efectos de la apertura angular para las secciones migrada arroja que una apertura de 45° es suficiente para colapsar las difracciones, mejorar la relación señal-ruido y la resolución lateral de los eventos. Migraciones con una apertura superior a 45° no generan mejoras en la sección y alinean más ruido sobre el operador en tiempos superiores a 4 s. Sin embargo, la apertura 45° grados presenta un artefacto entre 1.5 y 2 segundos que se presenta en la amplificación en el espesor y magnitud de los eventos dentro del recuadro de la figura 82. Para la apertura de 60° no aparece este artefacto y aunque la continuidad de los eventos no mejora, tampoco desmejora la sección como tal, incluso para lo zona profunda donde igualmente no existe reflector de interés alguno, por lo que se toma la apertura de 60° como la apertura angular óptima para la migración.

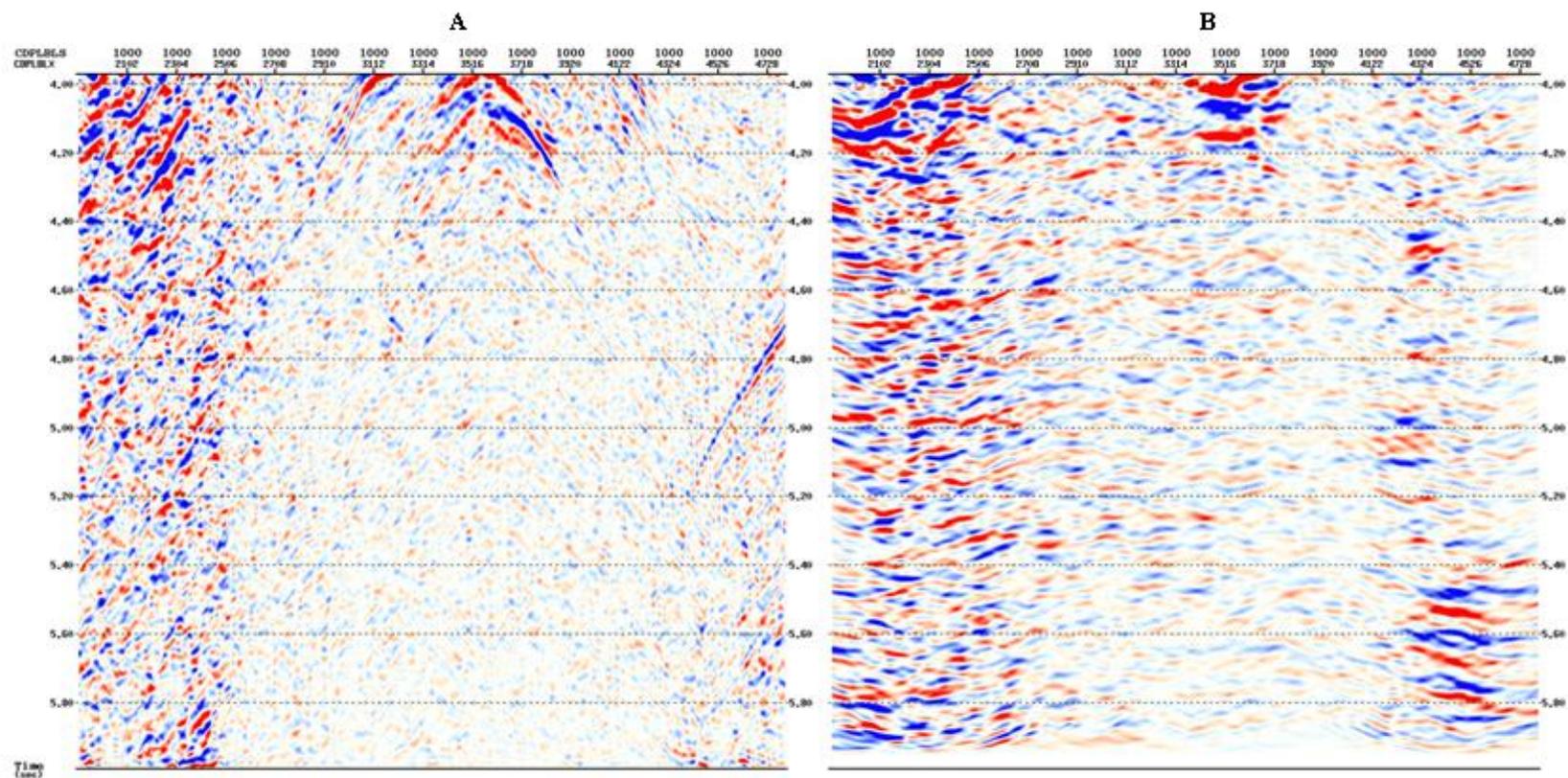


Figura 80. Inline 1000, sección apilada (A) y migrada con apertura angular de 15° (B), zona profunda.

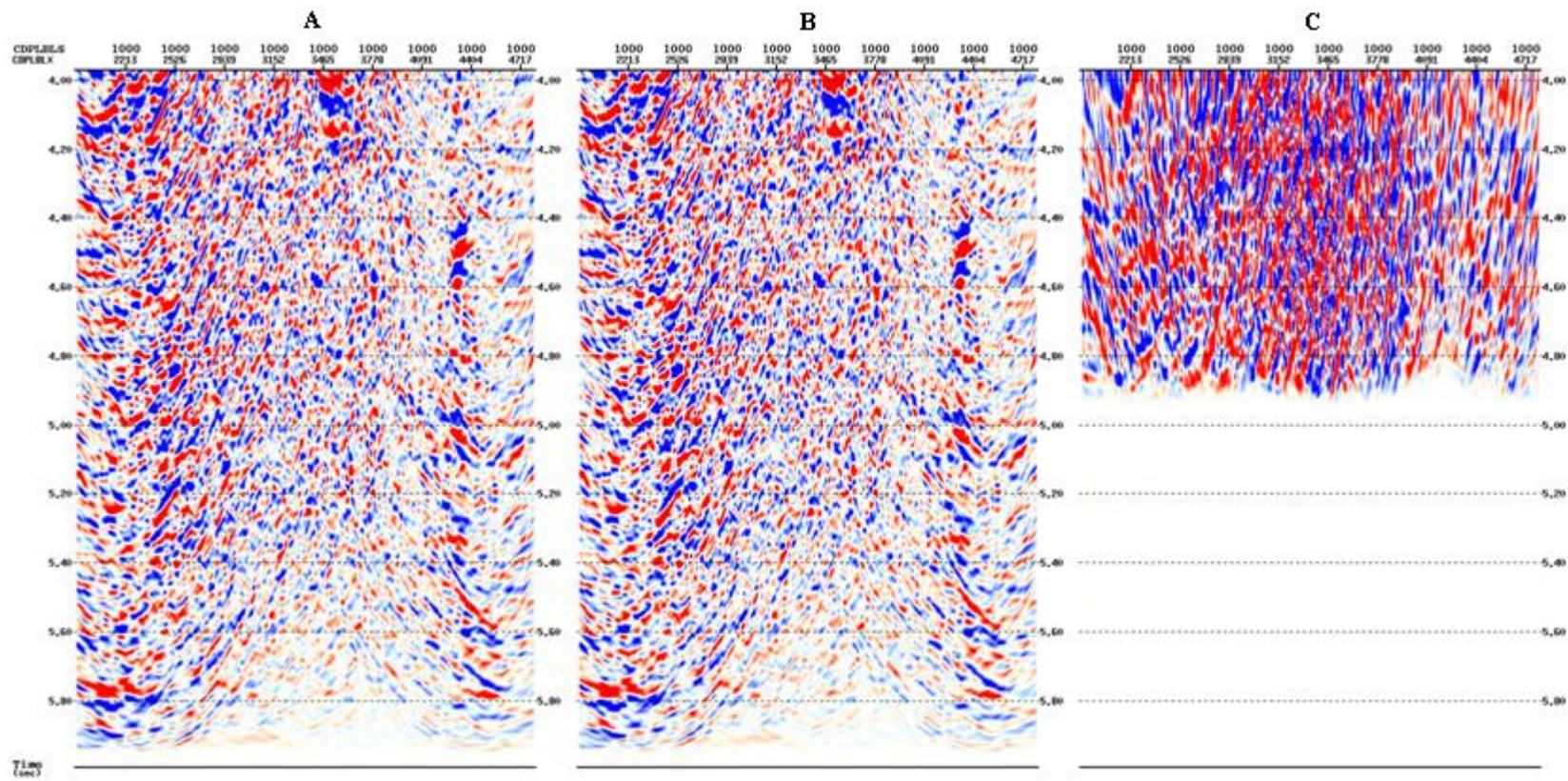


Figura 81. Inline 1000, sección migrada con apertura angular de 45° (A), 60° (B) y la resta entre ambas migraciones, zona profunda.

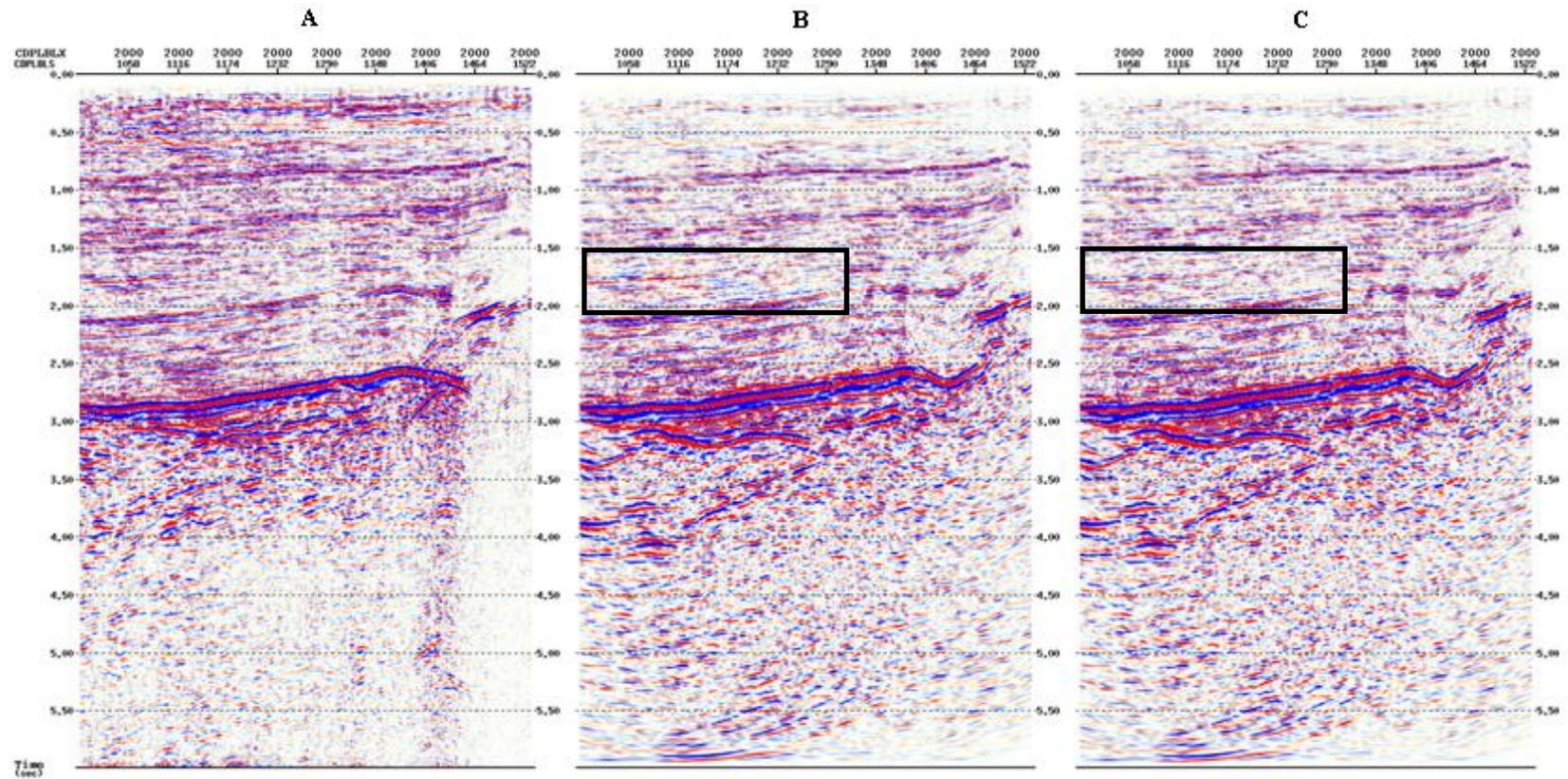


Figura 82. Crossline 2000, sección completa apilada (A), migrada con apertura angular de 45° (B) y 60° (C).

El artefacto que se genera en la apertura de 45° es también evidente en el espectro de amplitud para el intervalo de tiempo donde aparece. La figura 83 muestra el espectro de amplitud para las secciones migradas con apertura de 45° y 60° en el intervalo de 1.5 a 2 segundos y se puede observar la diferencia en el espectro para las amplitudes de 0 a 10 Hz (bajas frecuencias) donde para la apertura de 45° las amplitudes están relativamente magnificadas con respecto al espectro de 60°, el resto del espectro es idéntico.

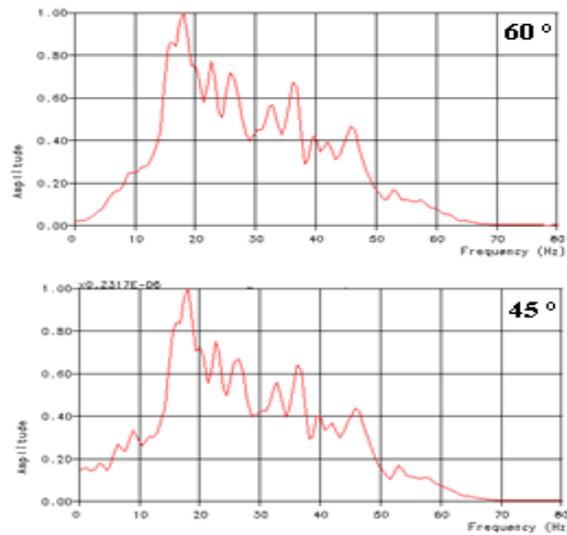


Figura 83. Análisis espectral de la zona somera del crossline 2000, migraciones con aperturas de 60° y 45°

La resolución vertical permanece invariable en todo momento como es de esperarse, las razones por las cuales esto sucede fueron expuestas con anterioridad y se confirma a partir de análisis espectral de toda la sección para cada una de las secciones migradas con apertura angular y al compararlas con el espectro de amplitud de la sección apilada, se demuestra que el contenido de frecuencia permanece invariable y que la forma del espectro como tal no varía de manera perceptible entre cada una de las migraciones. La diferencia que existe entre el espectro apilado y el migrado es que al migrar las amplitudes cercanas a 25 Hz se ven atenuadas y las cercanas a 10 Hz se ven magnificadas (figura 84).

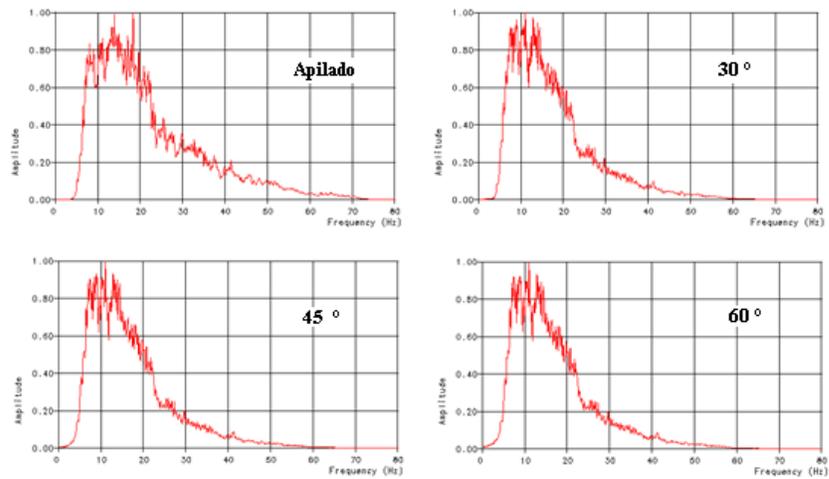


Figura 84. Análisis espectral de la sección completa apilada, migrada con apertura de 30°, 45° y 60°

5.3 Migración con apertura híbrida óptima

La apertura angular tiene la ventaja de no sumar tantas trazas en los eventos someros evitando de esta manera secciones ruidosas en dicha zona, además de ahorrar tiempo de cómputo. Sin embargo, los datos tienen una buena relación señal-ruido en la zona somera, por lo que no se generan secciones particularmente ruidosas para apertura grandes. En este caso la apertura angular tiene la característica que cuando más profundo sea el evento, mayor será la trayectoria de la suma siempre y cuando no existan inversiones de velocidad, este hecho es particular genera mejores imágenes de los eventos en profundidad sin afectar a los someros pero en este caso la relación señal-ruido es tan baja en esta zona que el operador en lugar de generar una imagen sísmica con sentido geológico, genera una sección donde el ruido aleatorio es alineado sobre la trayectoria del operador, por lo que sería recomendable limitar la apertura en esta zona. El software de migración permite combinar ambas implementaciones de la apertura por lo que se realiza una migración híbrida combinando una apertura de 60° con una apertura fija de 4000 m, la figura 85 representa la sección migrada con apertura híbrida y la diferencia de dicha sección con la de apertura pura de 60°, donde se observa que la única diferencia es el ruido alineado por el operador justo debajo del reflector de interés.

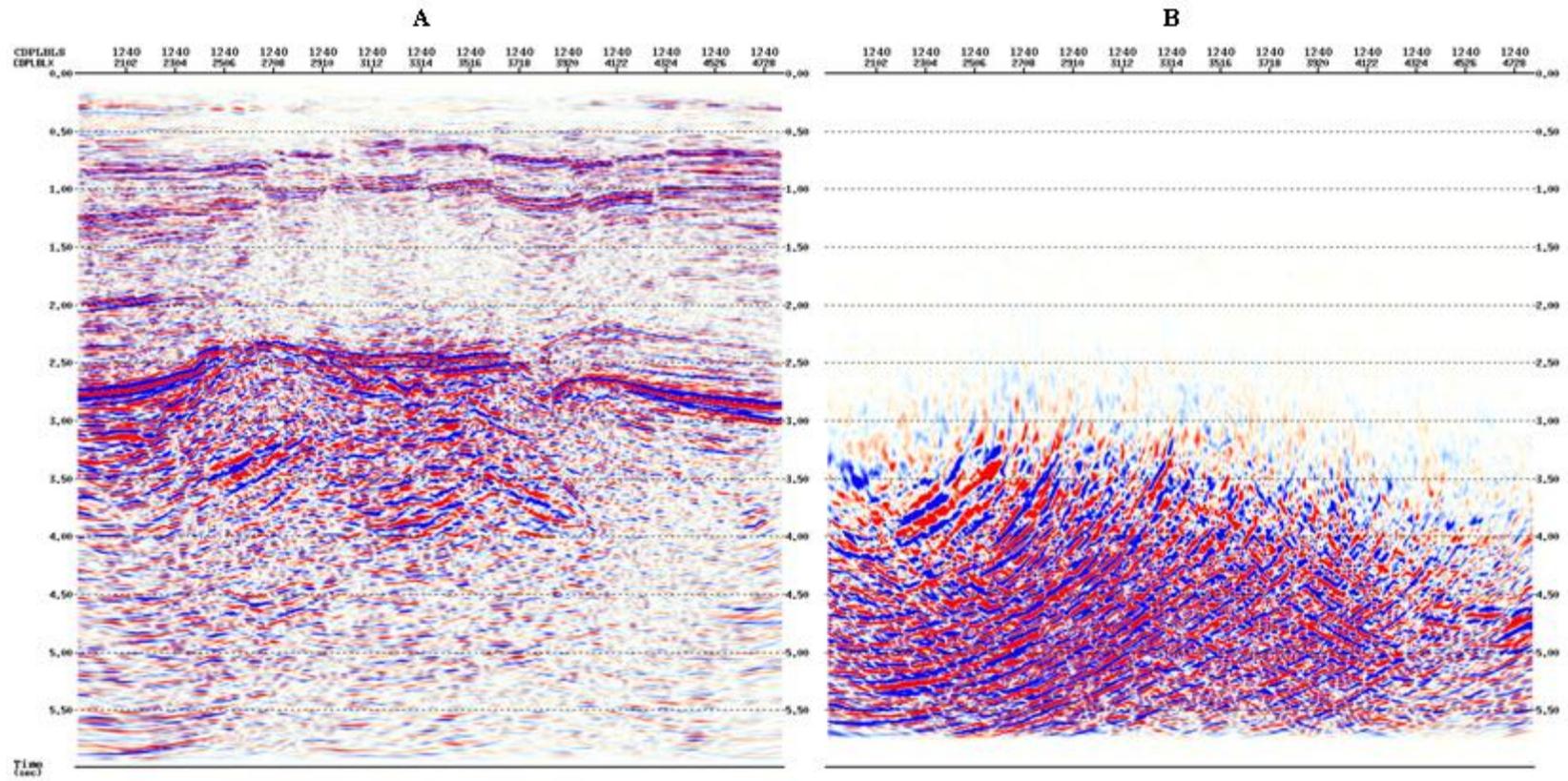


Figura 85. Migración híbrida con apertura híbrida 60° y 4000 m (A) y resta con sección migrada con apertura de 60° (B).

5.4 Migración con modelos de velocidad refinados

Una vez definida la migración híbrida con los parámetros óptimos, se generan dos modelos refinados de velocidad. La refinación del modelo de velocidad consiste en el suavizado para evitar los cambios laterales bruscos y re-escalado del campo de velocidades al 90 y 80 % de la velocidad original, figura 86. Normalmente la función de velocidad inicial usada para la migración nunca es precisa en la práctica, por lo general un suavizado de un modelo de velocidades erróneo mejora notablemente la imagen sísmica y generalmente este modelo inicial presenta velocidades muy altas en las zonas intermedias profundas, lo que genera sobre migraciones en la sección sísmica (Larner y Pacheco, 2005). Los efectos de grandes errores en el modelo de velocidad para la migración de Kirchhoff se traducen como eventos sobre-migrados o “sonrisas” si la velocidad es superior, y de eventos que no migran del todo por lo que las difracciones no colapsan del todo. Si los errores del modelo de velocidad no son severos, los efectos no son sutiles, por lo que definir si un modelo se encuentra por encima o por debajo de un valor esperado es realmente difícil.

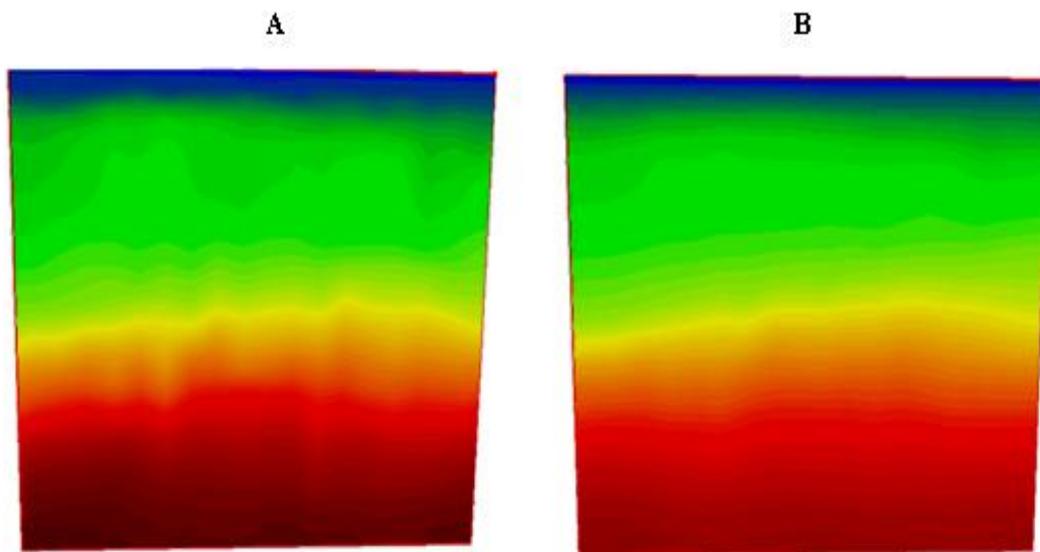


Figura 86. Modelo de velocidad sin modificar (A). Modelo de velocidad suavizado y reescalado al 90% del original

En el volumen migrado con apertura híbrida no se distinguen los artefactos comunes asociados a errores considerables del modelo de velocidad, por lo que se supone que el modelo de velocidad original debe estar próximo a la realidad del subsuelo. Si esto es cierto, los cambios en las secciones migradas debido a la modificación del modelo de velocidad deben ser sutiles, por lo que tomar una decisión sobre tomar uno u otro modelo pasa por pequeños detalles en las secciones.

La figura 87 representa al *inline* 1240 para los tres modelos de velocidad distintos, en una inspección general pareciese no haber cambio alguno entre las secciones, sin embargo al observar con más detalle hay cambios sutiles. La característica más resaltante está enmarcada en el recuadro, donde se puede observar como el anticlinal en el extremo derecho se mueve hacia el centro de la sección sin que el centro de la sección se mueva, pero lo que realmente llama la atención es el sinclinal que se encuentra entre los donde elementos anteriormente mencionados que cambia de polaridad al modificar el modelo de velocidad, característica que no tiene sentido geológico. La continuidad lateral del reflector de interés también se ve ligeramente deteriorada con los modelos refinados, lo que sugiere que la hipótesis de que el modelo inicial es bastante aproximado a la realidad del subsuelo tiene cada vez más sentido.

La figura 88 representa al *inline* 1180 para los tres modelos de velocidad distintos, a diferencia de la sección interior, mejora la continuidad lateral y la definición del reflector de interés en su zona central aunque muy levemente. De resto, los cambios no son perceptibles. Esta mejora en esta sección no compensa la incoherencia en el sentido geológico de la figura anterior.

Estas características se repiten continuamente en todas las secciones en esta dirección, para áreas poco complejas las reflexiones se definen ligeramente mejor, pero en zonas más complejas sobre todo en zonas plegadas las secciones pierden sentido geológico.

Con respecto a la dirección *crossline*, la figura 89 representa el *crossline* 2200 enfocado en el reflector de interés que tiene una complejidad moderada, una pendiente pronunciada y plegada para los tres modelos distintos de velocidad. Con el modelo de velocidad original se puede observar que el pliegue y la pendiente se definen bastante bien, mientras que para el modelo a medida que se modifica, el pliegue va desapareciendo y el mismo reflector se cruza por lo que pierde por completo el sentido geológico la sección, la continuidad lateral también desmejora en el reflector en general.

Para el *crossline* 3800, figura 90, el reflector de interés presenta un fuerte plegamiento en la zona central de la sección. A medida que se modifica el modelo de velocidad, el extremo izquierdo del pliegue se sub horizontaliza y el extremo derecho pierde continuidad lateral mientras que al mismo tiempo el pliegue se hace más estrecho, lo que ocasiona que la sección pierda sentido geológico por completo. En el resto de la sección la continuidad lateral de las reflexiones desmejora notablemente tanto para el reflector de interés como para los eventos que se definen por debajo de este último.

En líneas generales, al suavizar y reescalar el modelo de velocidad las migración, al contrario de mejorar empeoran, siendo este hecho esto más severo en las estructuras más complejas y no tan notorio en los reflectores menos complejos. En algunos casos la sección mejora, especialmente en la dirección *inline* aunque esta mejora es muy leve en relación a la pérdida de sentido geológico en las zonas complejas por lo que se toma el modelo inicial de velocidad como el modelo definitivo ya que este modelo está bastante próximo a la realidad del subsuelo.

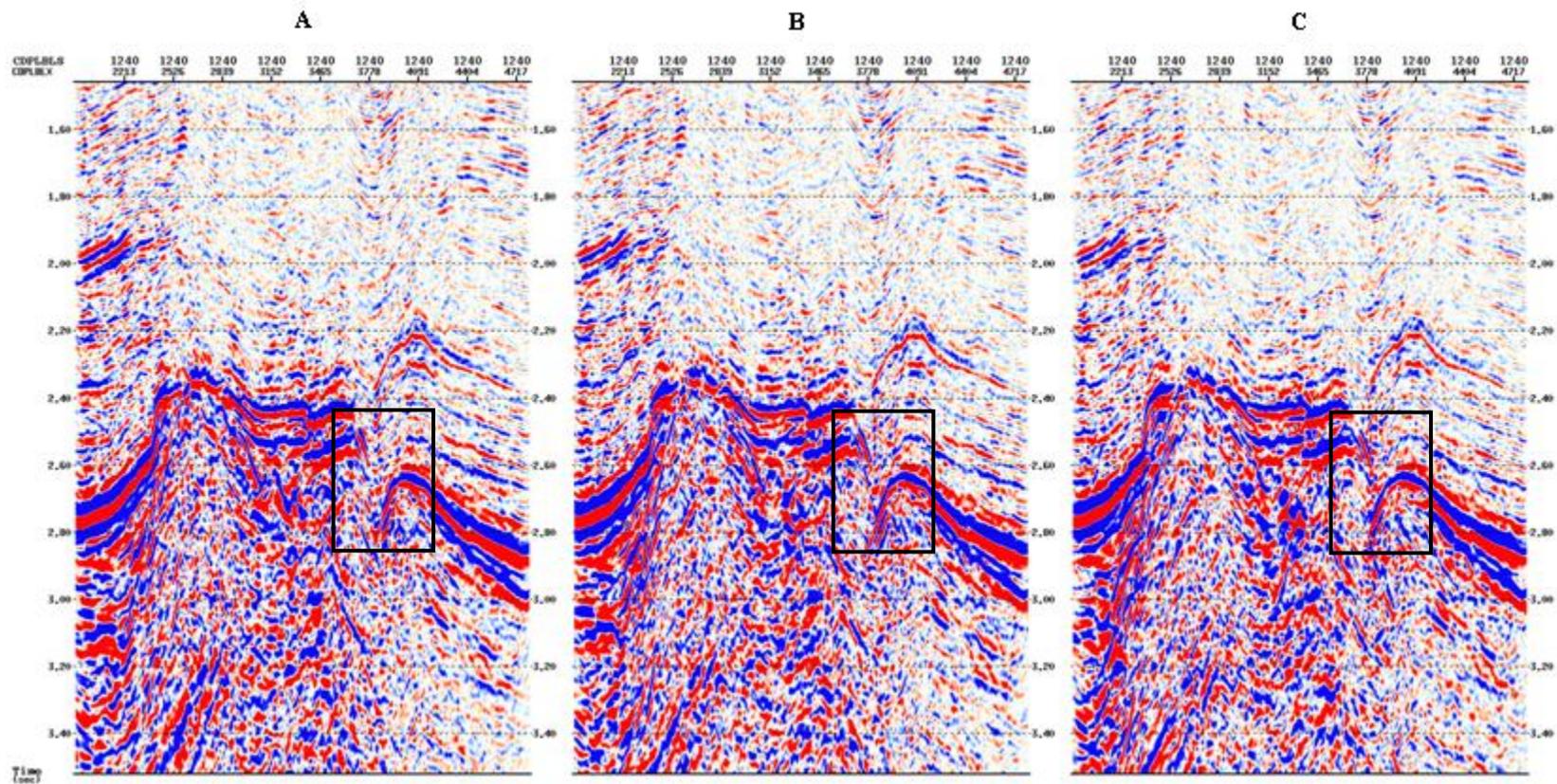


Figura 87. Inline 1240. Sección migrada con apertura óptima con modelo de velocidad original (A), con modelo suavizado y re-escalado al 90% (B) y al 80% (C)

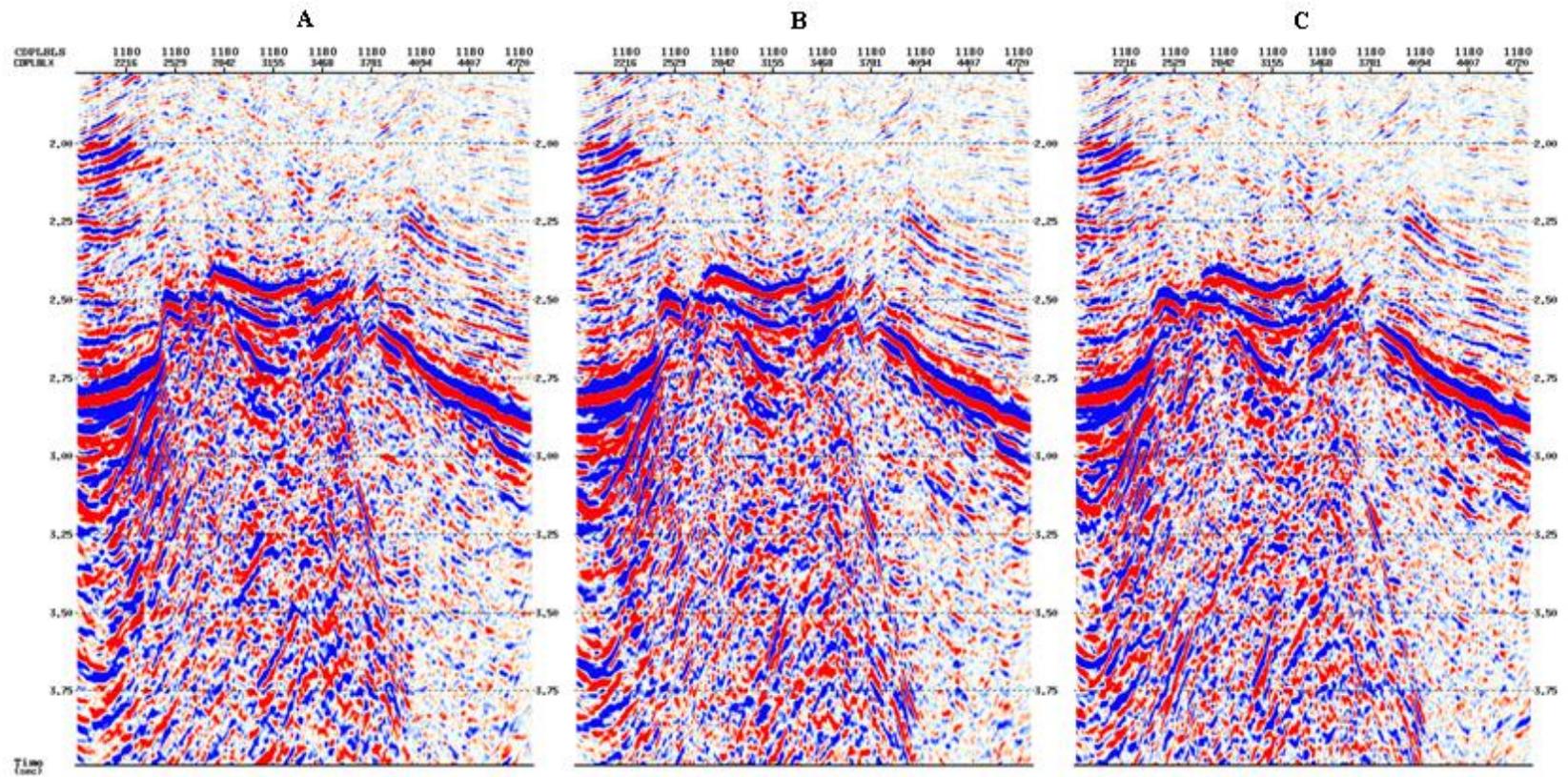


Figura 88. Inline 1180. Sección migrada con apertura óptima con modelo de velocidad original (A), con modelo suavizado y re-escalado al 90% (B) y al 80 % (C)

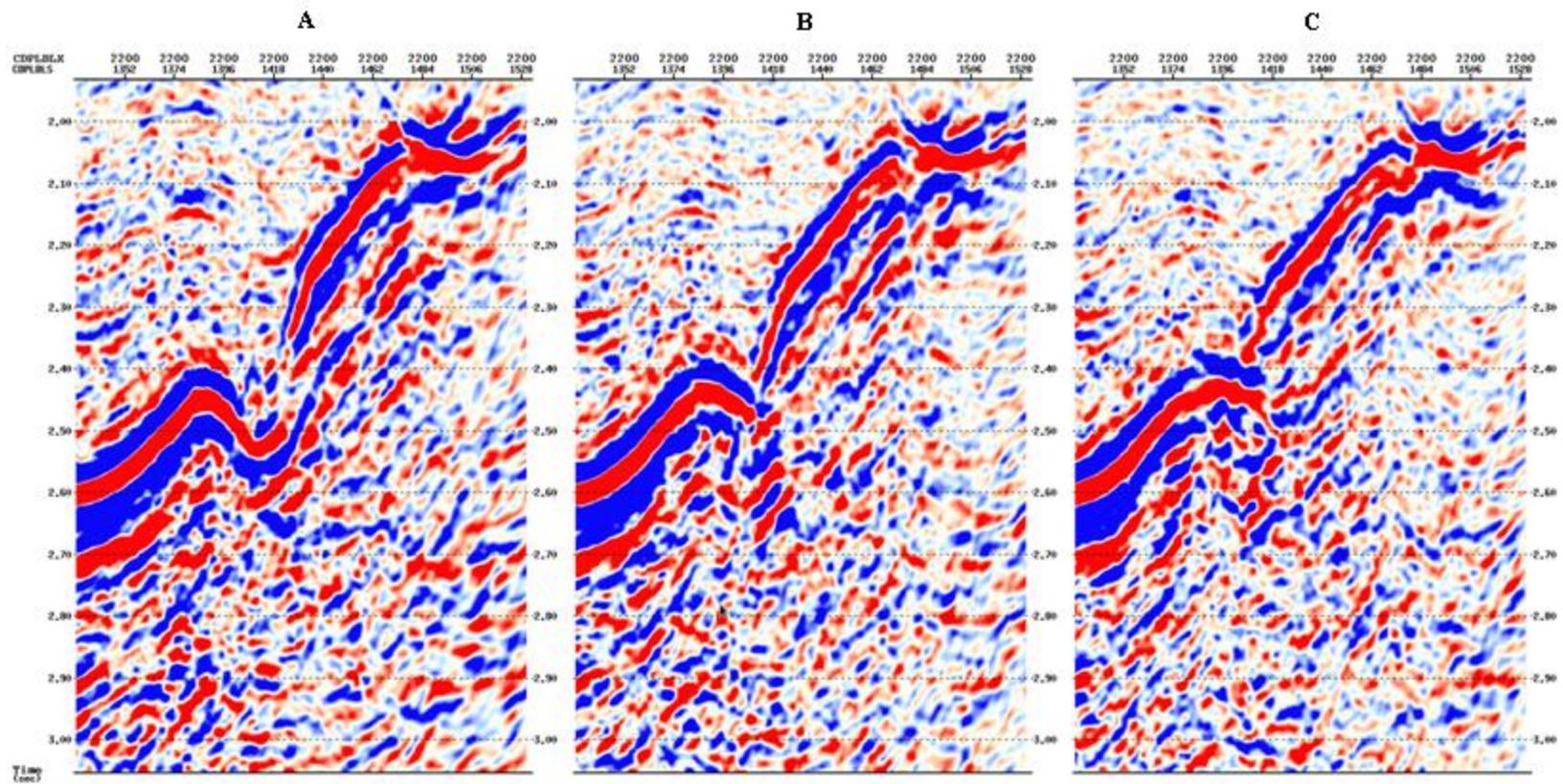


Figura 89. Crossline 2200. Sección migrada con apertura óptima con modelo de velocidad original (A), con modelo suavizado y re-escalado al 90% (B) y al 80% (C)

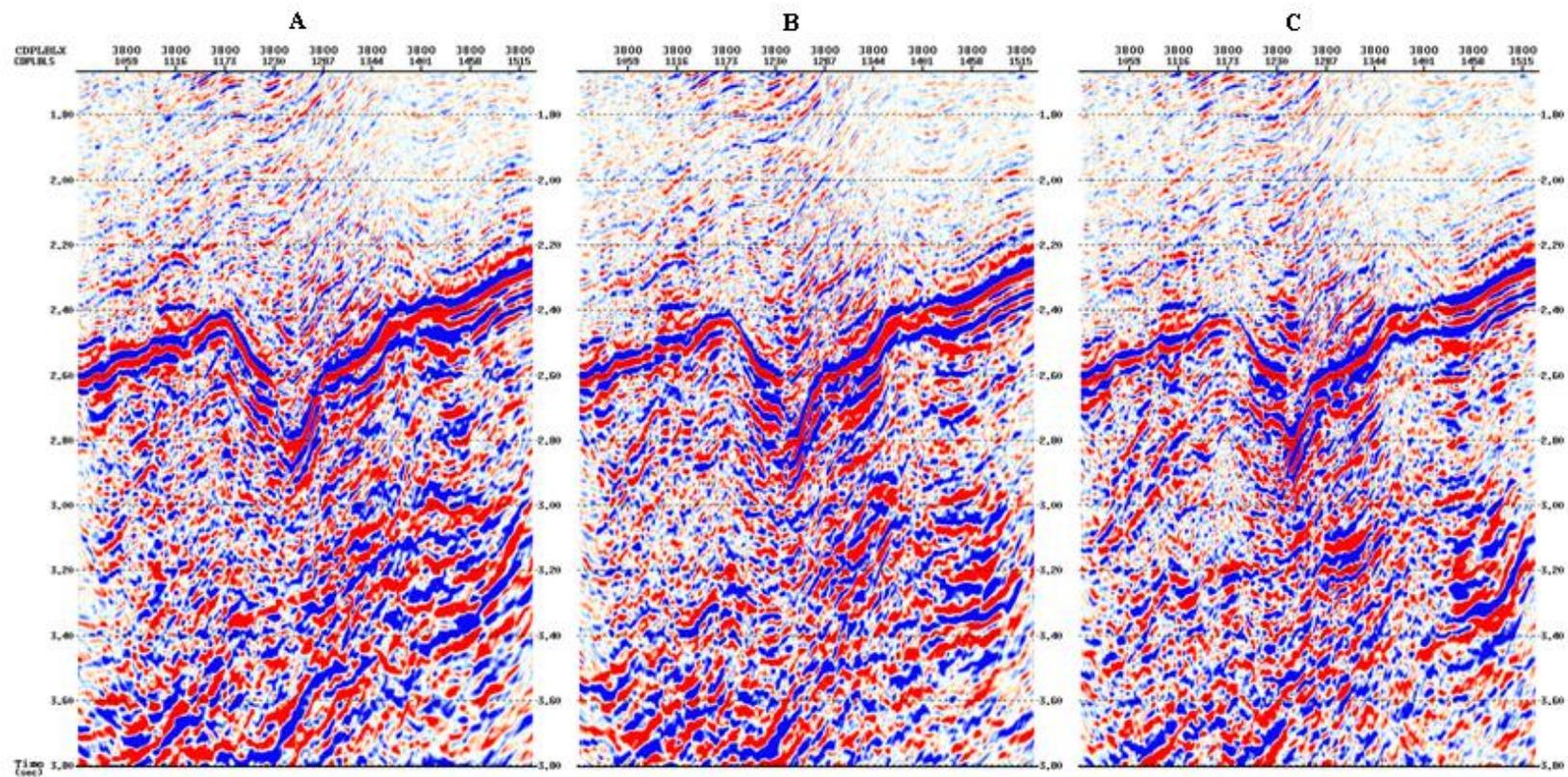


Figura 90. Crossline 3800. Sección migrada con apertura óptima con modelo de velocidad original (A), con modelo suavizado y re-escalado al 90% (B) y al 80 % (C)

5.4 Migración de Kirchhoff en post apilamiento vs pre apilamiento

Se realiza la migración de Kirchhoff en pre apilamiento para un sub cubo central del volumen total del proyecto usando la misma apertura óptima usada en post apilamiento. La migración en este dominio debe generar mejores resultados para estructuras complejas, sin embargo, el sub volumen no se encuentra en una zona compleja por lo que no se espera una mejora notable para eventos de baja complejidad estructural.

La figura 91 representa el *inline* 1380 migrado tanto en post como en pre apilamiento, a primera vista es notable que las altas frecuencias están mucho más atenuadas en la sección migrada en pre apilamiento que en post apilamiento por lo que visualmente pareciese que la sección en pre apilamiento fuese una sección con mayor relación señal-ruido que la sección migrada en post apilamiento. En la zona somera difícilmente se resuelve algún evento por esta misma razón. El reflector de interés se encuentra bien definido y con alta continuidad lateral para la migración en ambos dominios. Para los eventos por debajo del reflector de interés la migración en pre apilamiento resuelve mucho mejor los eventos que la migración en post apilamiento.

Para la dirección *crossline*, figura 92, la sección migrada en pre apilamiento de igual manera tiene las altas frecuencias muy atenuadas en comparación con la migración en post apilamiento por lo que parece que tuviese mejor relación señal ruido. En la zona somera los eventos no tienen continuidad lateral y difícilmente se define algún evento. El reflector de interés no tiene la misma resolución lateral en la migración en pre apilamiento que en la migración post apilamiento aunque tiene una buena continuidad lateral, ente sentido la migración post apilamiento permite diferenciar mucho mejor los cambios laterales para un mismo reflector. Para los eventos subyacentes al reflector de interés, en la migración pre apilamiento se definen mucho mejor y tienen mayor continuidad lateral pero de igual manera los eventos se presentan muy suavizados y apenas se observan cambios laterales a lo largo de los eventos.

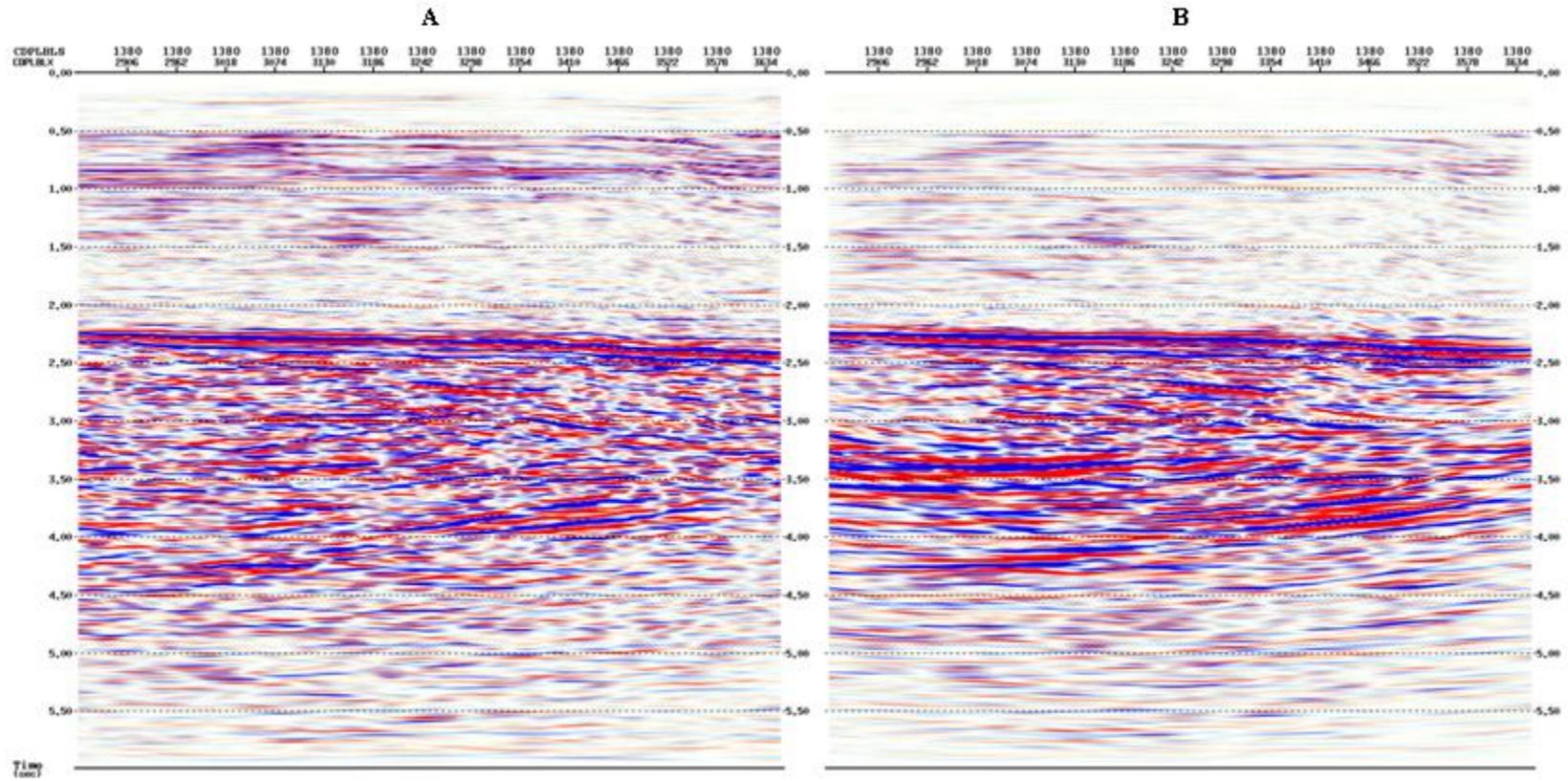


Figura 91. Inline 1380. Migración con parámetros óptimos en post apilamiento (A) y en pre apilamiento (B).

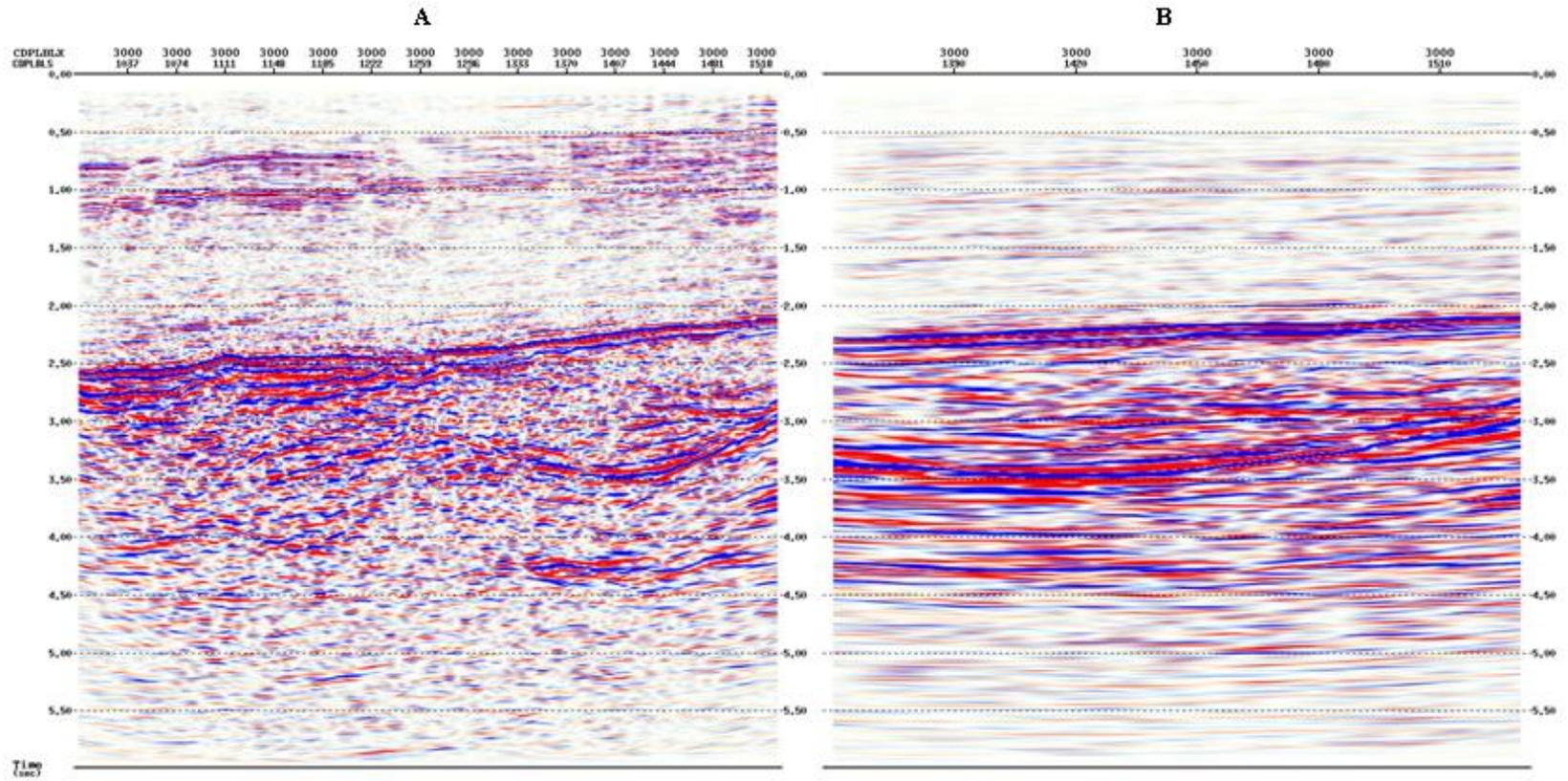


Figura 92. Crossline 3000. Migración con parámetros óptimos en post apilamiento (A) y en pre apilamiento (B).

Como se mencionó con anterioridad, los datos migrados en pre apilamiento tienen más atenuadas las altas frecuencias que la migración en post apilamiento, esto es confirmado por el espectro de amplitud para la migración en ambos dominios, figura 93, donde las amplitudes en pre apilamiento aparecen mayores alrededor de los 10 Hz y se atenúan a partir de este valor para frecuencias mayores. Por otro lado, el espectro de amplitud en post apilamiento evidencia un espectro más homogéneo donde las amplitudes son grandes hasta los 20 Hz y se atenúan levemente para mayores frecuencias.

En términos generales, aunque la migración en pre apilamiento define mejor los eventos por debajo del reflector de interés, los eventos tienen baja resolución lateral en la dirección *crossline*. Sería recomendable generar una migración en pre apilamiento para el cubo completo para analizar como mejora las secciones para las estructuras complejas del proyecto porque para el sub cubo disponible, la complejidad geológica no hace de la migración pre apilamiento una opción rentable, ya que los tiempos de cómputo son ocho veces mayores que para la migración post apilamiento.

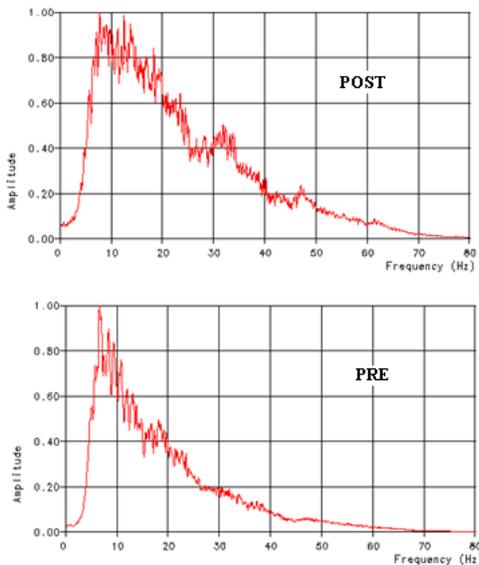


Figura 93. Espectro de amplitud para las secciones migradas en pre y post apilamiento.

5.6 Procesamiento post migración

Los post procesos aplicados en la migración son detallados en la metodología, en términos generales se reduce el ruido aleatorio, se realza la señal y se mejora la resolución del volumen sísmico. En la sección migrada en post apilamiento con post procesos para el *inline* 1240 (figura 94), la definición de los eventos someros que son dominados por las altas frecuencias se definen mucho mejor, los eventos tienen una notable continuidad lateral y resolución tanto vertical como horizontal, las zonas de falla se definen con mucho mayor claridad, la sección en esta zona tiene mucho mayor sentido geológico en general y la relación señal-ruido mejora notablemente. Los efectos de borde y del operador en general, sobre todo en la zona profunda, fueron bastante atenuados, sin embargo la relación señal-ruido para la zona subyacente al reflector de interés no mejora. El reflector de interés mejora notablemente, mejorando la resolución lateral y vertical, así como también la continuidad lateral de los eventos. Para la migración en pre apilamiento las mejoras también son notables, en la zona somera se resuelven eventos que antes no se resolvían por la fuerte atenuación de las altas frecuencias, figura 95. En esta zona aparecen eventos con una aceptable continuidad y resolución lateral, una alta resolución vertical y relación señal-ruido. Los efectos del operador en los bordes se ven bastante atenuados en esta sección. La resolución vertical también mejora tanto para el reflector de interés como para los eventos subyacentes a este, siendo más notoria la mejora para los eventos profundos.

Al analizar el espectro de amplitud antes y después de los post proceso es evidente que es el espectro mejora notablemente tanto para pre apilamiento como para post apilamiento, figura 96. Es evidente para ambos dominios como mejoran las amplitudes para frecuencias superiores a los 20 Hz, la forma general del espectro se ve mucho más homogénea y balanceada. La característica más importante de estos post procesos es que no se aplica ningún proceso para normalizar las amplitudes, por lo que las amplitudes relativas se mantienen, característica que se pierde con la aplicación de AGC.

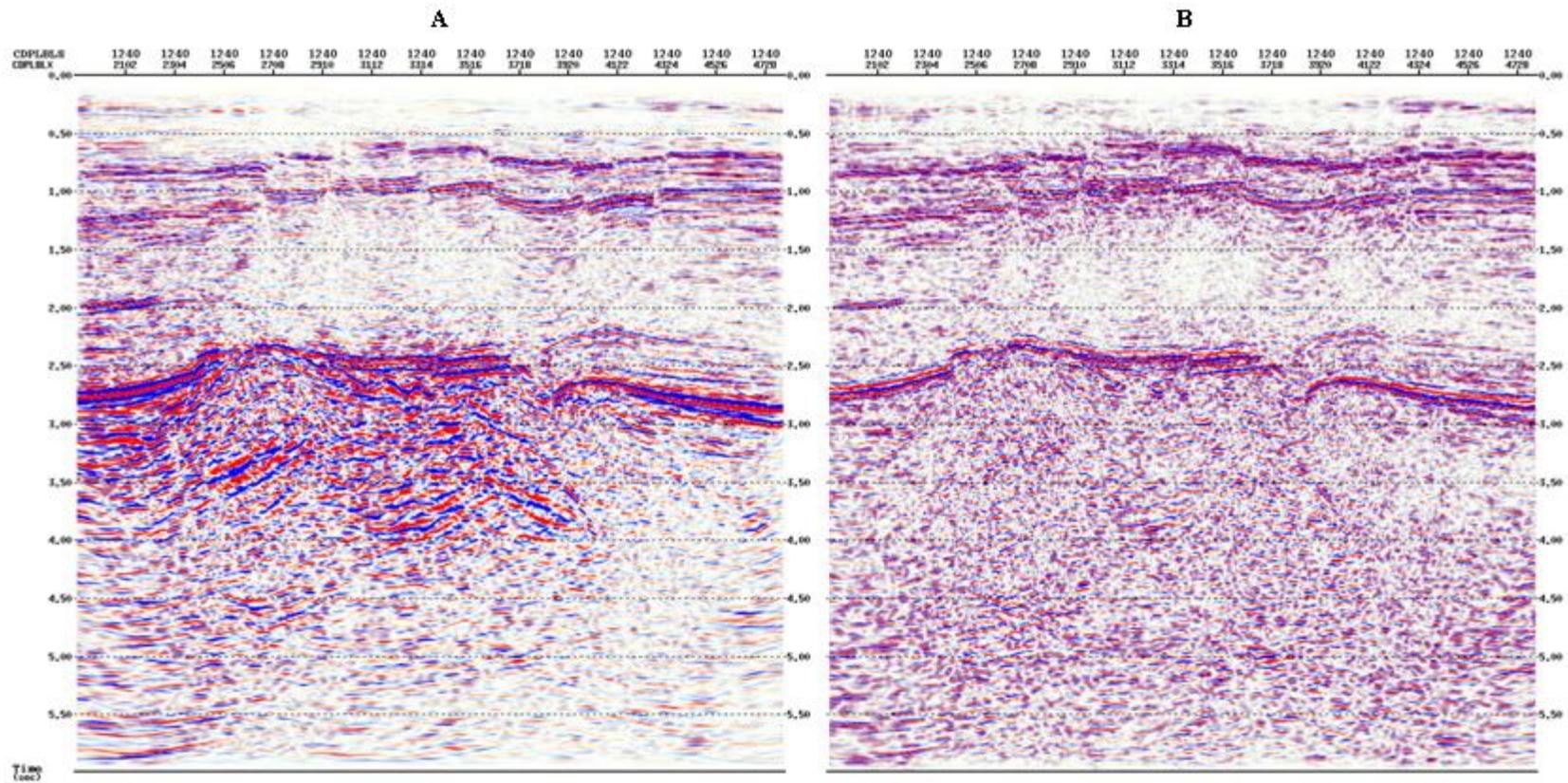


Figura 94. Inline 1240. Migración post apilamiento con parámetros óptimos sin post procesos (A) y con post procesos (B).

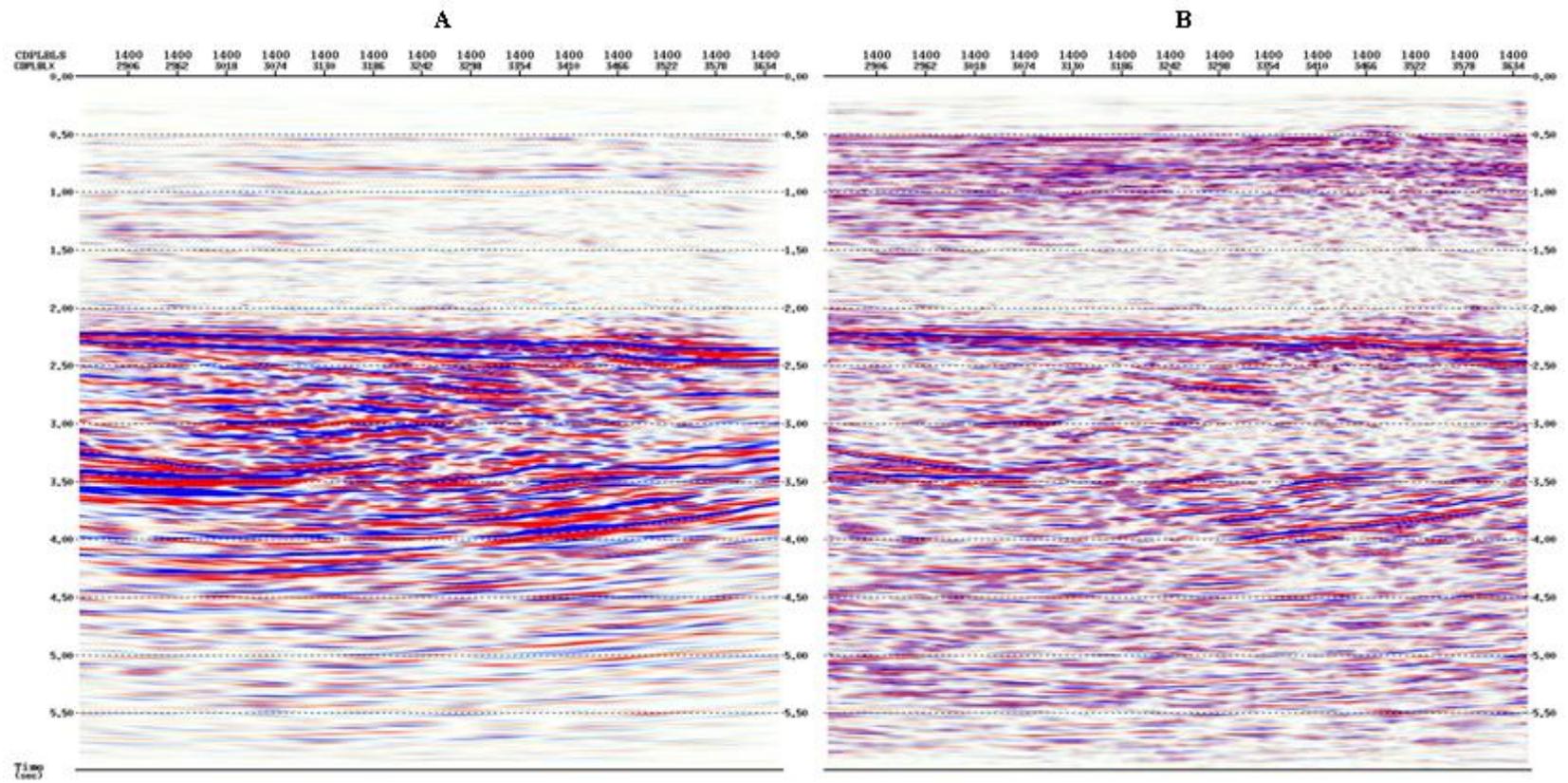


Figura 95. Inline 1400. Migración pre apilamiento con parámetros óptimos sin post procesos (A) y con post procesos (B).

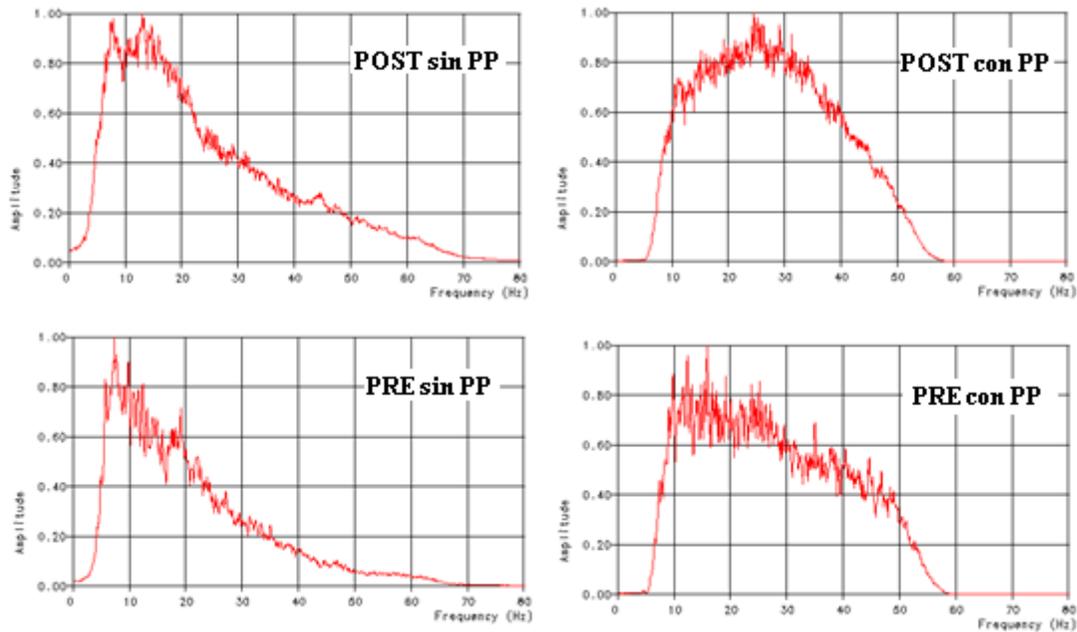


Figura 96. Análisis espectral para las migraciones en pre y post apilamiento con y sin post procesos.

Por lo general, en la industria de la exploración, la apertura de migración es definida a partir de una metodología análoga a la empleada en este proyecto de investigación, que se resume como un proceso empírico donde se aumenta paulatinamente la apertura hasta aquella apertura donde las secciones no muestran una mejoría perceptible, criterio que es meramente subjetivo y debe llevarse a cabo de la mano con interpretes. De hecho, en zonas donde la actividad exploratoria es intensa, la apertura de migración ronda alrededor de un valor ya conocido debido a la cantidad de proyectos existentes en el área, por ejemplo, en el Golfo de México donde la complejidad estructural es alta debido a que los domos salinos presentes en el área presentan pendientes muy pronunciadas y producen inversión de velocidades, la apertura de migración ronda los 10000 m mientras que para proyectos en el Mar del Norte que presentan una complejidad estructural moderada la apertura de migración ronda los 5000 m. En el caso de este proyecto en particular una apertura de 4000 m es más que suficiente para generar secciones sísmicas correctamente migradas para un contexto geológico que presenta una complejidad baja a moderada a nivel estructural.

Existen básicamente tres aproximaciones teóricas para calcular la apertura de migración óptima, dos de ellas basadas en fundamentos geométricos y la tercera basada en la Zona de Fresnel que es el criterio que ha tomado más fuerza en los últimos años ya que en teoría es el criterio que mejor preserva la información contenida en la amplitud y la fase de la señal, lo cual es crítico para la interpretación cuantitativa de la sísmica. Las dos aproximaciones geométricas derivan en la misma ecuación aunque una aproximación es simplemente una solución específica de dicha ecuación. Para un arreglo genérico, tal como se muestra en la derecha de la figura 97, de una fuente y un receptor para un evento con buzamiento θ , la distancia horizontal A definida por la distancia horizontal entre el CMP y el CDP que no son coincidentes para eventos buzantes es definida por simple relación trigonométrica en la siguiente ecuación, y representa la apertura de migración necesaria para migrar correctamente dicho evento.

$$A=Z_0.Tan(\theta) \quad (6)$$

Se podría pensar que para eventos planos ($\theta=0$) la apertura de la migración es cero, es decir no se requiere migrar la sección, lo cual es cierto siempre y cuando no existan discontinuidades en los eventos planos que puedan generar difracciones que necesiten ser colapsadas, donde es útil el siguiente criterio geométrico. El segundo criterio geométrico está basado en la teoría expuesta por Claerbout (1985) donde menciona que el aproximadamente 95% de la energía dispersada por una difracción se encuentra dentro de los 30° donde ocurre la dispersión, como se ilustra en la izquierda de la figura 97. En algunos casos esta apertura puede ser excesiva por lo que colapsar el 85% de la energía dispersada por una difracción es suficiente para generar imágenes de excelente calidad, lo que equivale a un ángulo de 20° . A partir del esquema mencionado en la figura 97 se puede calcular la fórmula para determinar la apertura, que es la misma fórmula 6 pero para $\theta=30^\circ$

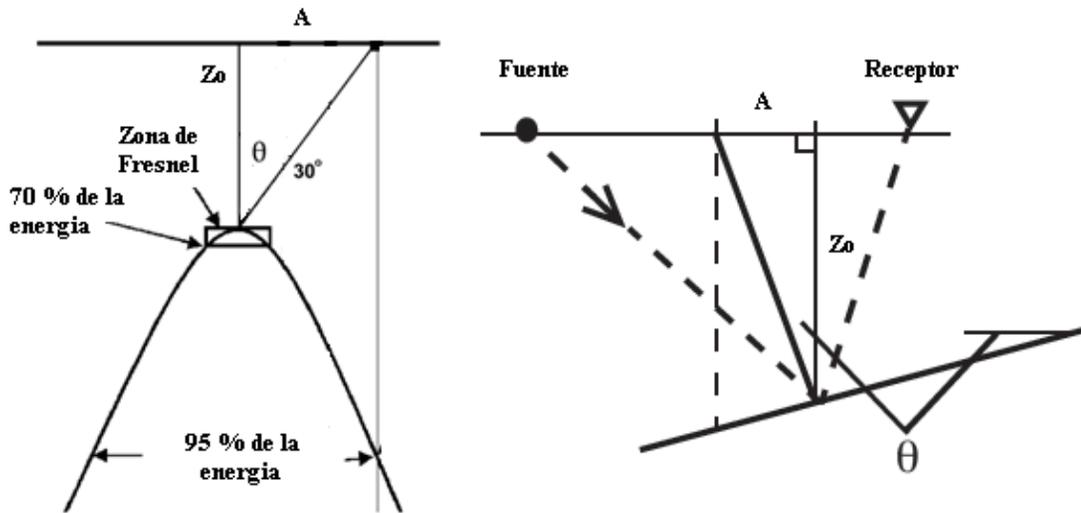


Figura 97. Esquemas geométricos para determinar la apertura de migración óptima.

El tercer esquema está basado en el criterio de la Zona de Fresnel, ya que dentro de este radio la señal interfiere constructivamente sumando energía hasta llegar a un valor máximo de energía para luego decrecer a medida que la señal interfiere destructivamente para zonas alejadas de este parámetro hasta un punto de energía mínimo donde no existe cambios en la energía sumada. La fórmula para determinar el radio de Fresnel está definida en la formula (4), donde se puede observar que este parámetro es directamente proporcional a la velocidad e inversamente proporcional a la frecuencia por lo que este parámetro incrementa rápidamente en las zonas profundidad, donde dominan las altas velocidades y las bajas frecuencias. Para una difracción, el 70% de la energía dispersada se encuentra dentro de la Zona de Fresnel (Claerbout, 1985).

Bajo estos criterios se calcularon las aperturas de migración para distintas profundidades y buzamientos, estos resultados se presentan en la tabla 3. La apertura de migración adecuada para cada criterio es aquel que toma en cuenta la máxima profundidad y buzamiento del evento de interés a iluminar, o la máxima velocidad y más baja frecuencia en el evento de interés. En el caso del criterio geométrico, la apertura para la profundidad del evento de interés del proyecto (aproximadamente 3000 m) y buzamiento de 50° la apertura ronda los 3500 metros, apertura bastante

aproximada a la apertura definida con la metodología empírica, al igual que los eventos someros la apertura calculada ronda los 2000 m, apertura también muy similar a la definida empíricamente. La apertura definida bajo el criterio de la Zona de Fresnel, la apertura es cercana a los 3000 metros, la cual es la apertura mínima que resuelve de manera aceptable las estructuras complejas, la apertura de 4000 m apenas mejora la sección y a partir de 4000 no existe mejora perceptible.

Tabla 3. Calculo de aperturas para distintos criterios y profundidades.

| Profundidad (m) | Difracción a 20° (m) | Difracción a 30° (m) | Evento buzante a 40° (m) | Evento buzante a 50° (m) | Evento buzante a 60° (m) | Zona de Fresnel (m) |
|-----------------|----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| 1000 | 364 | 577 | 839 | 1192 | 1732 | 474 |
| 2000 | 728 | 1155 | 1678 | 2384 | 3464 | 930 |
| 2500 | 910 | 1443 | 2098 | 2979 | 4330 | 1627 |
| 3000 | 1092 | 1732 | 2517 | 3575 | 5196 | 2840 |

Es importante aclarar que estos cálculos son aproximaciones a partir de ecuaciones demostradas a partir de modelos simplificados de la tierra. Otra limitante es que a *priori* no se conocen las profundidades de los eventos a menos que existan información de pozo, por lo que las profundidades también son aproximaciones

robustas. En términos generales estas aproximaciones son bastante robustas y se ajustan mejor para zonas con baja complejidad geológica. Para zonas de complejidad moderada estos cálculos sub estiman la apertura de migración. Para solventar esta limitante por lo general se realiza trazada de rayos a partir de modelos del subsuelo, lo cual estima de una manera mucho más precisa la apertura óptima requerida para la migración. Sin embargo, esto representa un dilema ya que un proyecto de sísmica de exploración se realiza justamente para estudiar la configuración geológica del subsuelo, entonces construir un modelo geológico si se desconoce esta información es un proceso que implica un alto grado de incertidumbre.

La apertura de migración definida para el algoritmo de migración de Kirchhoff se relaciona directamente con el parámetro conocido también como apertura de migración en el diseño de adquisición de la sísmica o en inglés conocida como “*migration apron*” o “*migration rim*”, que es el área extra que se debe agregar para grabar correctamente la información reflejada por eventos buzantes y difracciones que se encuentren fuera del área del objetivo de interés pero que es necesaria para migrar correctamente la sísmica. El cálculo de dicha extensión del área se hace con los mismos criterios mencionados anteriormente. Este parámetro depende exclusivamente de la complejidad geológica del subsuelo y no de la logística de un proyecto de adquisición. Sin embargo, se pueden comprometer ciertos aspectos para reducir el área total del proyecto y reducir costos. En la apertura de migración no es necesario incluir los offsets cercanos ya que los eventos buzantes y profundos son muestreados en los offsets lejanos. La apertura de migración con cobertura máxima no debe ser nunca menor que el radio de la zona de Fresnel. El trazado de rayos de modelos del subsuelo no sólo debe ser usado para estudiar la distribución adecuada de offsets y azimuts sino también para calcular la apertura de migración. Se debe tener en cuenta que la distribución de azimuts y distribución de disparos y receptores es muy rígida para la adquisición marina que para adquisiciones terrestres.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al realizar una síntesis de los resultados obtenidos y análisis realizados en el presente proyecto de investigación se puede concluir y recomendar lo siguiente:

- Una apertura implementada a partir de un número de trazas fijas o constantes tiende a generar secciones ruidosas en las zonas someras ya que la trayectoria de la sumatoria del operador es excesiva si la apertura es moderada, introduciendo mayor cantidad de ruido y destruyendo parte de la señal.
- La apertura actúa como un filtro de pendiente; una apertura reducida sólo permite migrar correctamente eventos horizontales o sub horizontales, mientras que mayores aperturas permiten migrar correctamente eventos con mayor pendiente.
- La calidad de la imagen migrada se ve comprometida en condiciones de pobre relación señal-ruido para grandes aperturas de migración, donde el operador tiende a alinear el ruido, generando artefactos.
- Es preferible implementar una apertura de migración en función al ángulo con respecto a la vertical/horizontal, reduciendo tiempo de cómputo, además de mejorar la calidad de la imagen sísmica para eventos someros y tener una relación definida con respecto al mayor ángulo que puede ser correctamente migrado.
- La apertura de migración no tiene que ser necesariamente igual de amplia en todas las direcciones. En proyectos con iluminación preferencial en una dirección, en la dirección opuesta a dicha dirección la iluminación debe ser pobre por lo que se requiere menos apertura para generar imágenes sísmicas aceptables en zonas pobremente iluminadas. Sin embargo, este hecho depende mucho de la complejidad geológica del área; si en ambas direcciones las

estructuras presentan fuerte buzamiento se requiere que la apertura sea amplia en ambas direcciones.

- La migración en general no mejora la resolución vertical ni aumenta el ancho de banda de contenido de frecuencias, sino que mejora la resolución lateral por el colapso de las difracciones en zonas falladas o plegadas.
- La magnitud de la apertura requerida para migrar correctamente los eventos de un proyecto de exploración sísmica dependen únicamente de la complejidad geológica del área de estudio, entre mayor sea la complejidad mayor será la apertura requerida.
- Para determinar la apertura que genera la imagen sísmica de mayor calidad se realizan pruebas para distintas aperturas crecientes y se toma aquella apertura a partir de la cual la imagen sísmica deje de mejorar o migrar los eventos de mayor complejidad.
- Existen aproximaciones teóricas para determinar la apertura necesaria para generar imágenes sísmicas de alta calidad, y aunque están basadas en modelos simplificados del subsuelo, suelen aproximar a valores muy próximos establecidos de manera empírica para zonas donde la geología es simple a moderada. Para el caso particular de los datos disponibles en esta investigación esta apertura ronda los 4 km tanto en dirección *inline* como en dirección *crossline*.
- Grandes errores en el modelo de velocidad generan evidentes artefactos en las secciones migradas, ya sea en sobre migraciones para valores muy altos de velocidades o difracciones sin colapsar para velocidades sub estimadas. Sin embargo si los errores en el modelo de velocidad son sutiles, es realmente difícil estimar si la velocidad se encuentra por encima o por debajo del valor esperado.
- La apertura de migración también es un parámetro importante en el diseño de un proyecto de adquisición sísmica, se calcula a partir de las aproximaciones teóricas que también son usadas para el parámetro en procesamiento y se

entiende como el área más allá de la estructura de interés que debe ser grabada para migrar correctamente los eventos en procesamiento.

RECOMENDACIONES

- La migración en pre apilamiento debe generar mejores imágenes sísmicas que la migración en post apilamiento en zonas estructuralmente complejas. Esta mejora no se aprecia en esta investigación debido a que los datos disponibles en pre apilamiento eran estructuralmente simples, sería recomendable comparar que tanto mejora la migración en pre apilamiento pero en las zonas de moderada complejidad estructural.
- Sería recomendable realizar pruebas con datos sintéticos y agregar ruido aleatorio en distintas medidas para cuantificar que tan susceptible es el algoritmo a la relación señal-ruido, sobre todo para zonas someras usando aperturas constantes de magnitudes moderadas.
- Utilizar trazado de rayos para modelos del subsuelo construidos a partir de datos sísmicos y geológicos existentes debe ser la metodología adecuada para definir la apertura de migración adecuada tanto en procesamiento como en el diseño de adquisición, en particular para zonas donde la geología presenta una complejidad moderada. Conviene comparar los resultados de esta propuesta con los resultados generados en esta investigación.
- Es apropiado que para estudios posteriores sobre alguna zona de interés particular, sobre todo en zonas que se encuentren en producción o se esperen producir, adquirir datos sísmicos con una mayor distribución de azimutal para mejorar la iluminación de los eventos y reducir la incertidumbre al interpretar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albertin, U., Kapoor, J., Randall, R., Smith, M., Brown, G., Soufleris, C., Whitfield, P., Dewey, F., Farnsworth, J. Grubitz, G. y Kemmer, M. (2002). The time for depth imaging. Oilfield Review. Vol. 14. Issue 1.

Almazar R. (1998). Campos Petrolíferos de Venezuela, Golfo de Venezuela. Código Geológico de Venezuela PDVSA-INTEVEP. (1997). Recuperado en abril 19, 2013. <http://www.pdvsa.com/lexico/camposp/cp060.htm>.

Ashton, C. P., Bacon, B., Mann, A., Moldoveanu, N., Déplanté, C., Aquitaine, E., Sinclair, D. T. and Redekop, G. (1993). 3D seismic survey design. The Leading Edge No. 12 p 1094-1117.

Bacon, M., Simm, R. y Redshaw, T. (2003). 3-D Seismic Interpretation. Cambridge University Press.

Bancroft, J. C. (2008). A practical understanding of pre- and poststack migrations. Course Notes Series. No.14 Volumen 1 y 2.

Bancroft, J., Guirigay, T., y Isaac, H. (2012). Enhancing a seismic image after migration using deconvolution. SEG Technical Program Expanded Abstracts, p. 1-5

Bangrang, D., Xiucang, X. y Jianxin, W. (2008). Wide/Narrow azimuth acquisition footprints and their effects on seismic imaging. Petroleum Science. Vol.5. Issue 4. p. 308-313.

Barley, B. y Summers, T. (2007). Multi-azimuth and wide-azimuth seismic: Shallow to deep water, exploration to production. The Leading Edge. Vol. 26. No 4. p. 450-458.

Biondi, B. L. (2007). Concepts and Applications in 3D Seismic Imaging. SEG Distinguished Instructor Series. No. 10.

- Biondi, B. L. (2004). 3D Seismic Imaging. Investigations in Geophysics. No. 14.
- Brittan, J., y Starr, J. (2003). Applications of adaptive noise attenuation to dual sensor seismic data. 73rd SEG meeting, Expanded Abstract ,p. 865-868
- Brown, A. R. (2004). Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data. 6th Ed. AAPG Memoir No. 42. SEG Investigations in Geophysics, No. 9.
- Borromeo, O., Miraglia, S., Satorio, D., Bolla, E., Andrea, O., Reali, S., Castellanos, C. y Villalobos, R. (2011). The perla World-Class giant gas field, gulf of Venezuela: depositional and diagenetic controls on reservoir quality in early Miocene carbonates. AAPG International Conference and Exhibition. Milan.
- Chase, M. (1992). Random noise reduction by fxy prediction. 54th Meeting and Technical Exhibition, EAGE, Expanded Abstracts, p. 164-165.
- Chun, J. H. y Jacewitz, C. (1981). Fundamentals of frequency-domain migration. Geophysics. Vol. 46, p. 717-732.
- Claerbout, J., F. (1985). Imaging the earth's interior. Blackwell Scientific Publications.
- Coronel, G. R. (1967). A Geological outline of the Gulf of Venezuela. 7th World Petroleum Congress. Mexico City.
- Cox, M. (1999). Static corrections for seismic reflection surveys. Geophysical References Series. No. 9
- Dragoset, B., Hargreaves, N. y Iarner, K. (1987). Air-gun source instabilities. Geophysics. Vol 52. No 9. p. 1229-1251
- Egan, M. S., Dingwall, K., and Kapoor, J. (1991). Shooting directions: a 3-D marine survey design issue. The leading edge. Vol 10. No 11. p. 37-41.
- Elboth, T. y Hermansen, D. (2009). Attenuation of noise in marine seismic data. SEG Technical Program Expanded Abstracts p. 3312-3316.

- Etgen, J. T. y Kumar, C. (2012). What really is the difference between Time and Depth migration? A tutorial. SEG Technical Program Expanded Abstracts.
- Evans, B. J. (1997). A handbook for seismic data acquisition in exploration. SEG Geophysical Monograph Series. No.7
- Freeland, J., M. y Hogg, J., F. (1990). What does migration do to seismic resolution?. CSEG Recorder. Vol 15, No. 8, p. 6-9
- Gadallah, M. y Fisher, R. (2009). Exploration Geophysics. Springer. Houston, Texas, USA.
- Gazdag, J. (1978). Wave equation migration with the phase-shift method. Geophysics. Vol.43. No. 7, p. 1342-1351.
- González de Juana, C., De Arozena, J. M. y Picard, J. (1980). Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas. Foninves, Caracas, Venezuela.
- Gray, H. S. (2001). Seismic imaging. Geophysics. Vol. 66. No.1, p. 15-17.
- Gray, H. S., Etgen, J., Dellinger, J. y Whitmore, D. (2001). Seismic migration problems and solutions. Geophysics. Vol. 66. No. 5, p. 1622-1640
- Guevara E, Nicklas L, Monsalve O y Ochoa R. (1977). Evaluación del Potencial de Hidrocarburos y Recomendaciones de Exploración en el Golfo de Venezuela. Petróleos de Venezuela S.A Grupos Interfiliales de Exploración, Caracas Venezuela.
- Hale, D. (1991). Dip Moveout Processing. SEG. Course Notes Series, Vol 4.
- Hertweck, T., Jager, C., Goertz, A. y Schleicher, J. (2003). Aperture effects in 2.5D Kirchhoff migration: A geometrical explanation. Geophysics. Vol. 68. No. 5, p. 1613-1684.

Howard, M. (2007). Marine seismic surveys with enhanced azimuth coverage: Lessons in survey design and acquisition. *The Leading Edge*. Vol. 26 Issue 4. p. 480-493

International Association of Oil & Gas Producer OGP. (2011). An overview of marine seismic operations. Report No. 448

Johnson, D. T. (1994). Understanding air-gun bubble behavior. *Geophysics*. Vol 59. No 11. p. 1729-1734.

Jonhson, J. D. y French, W. S. (1982). Migration-The inverse Method. Concepts and techniques in Oil and Gas Exploration. SEG General Series, p. 115-158.

Jones, I. F., Bloor. R. I., Biondi, B. L. y Etgen. J. T. (2008). Prestack Depth Migration and Velocity Model Building. SEG Geophysics Reprint Series No.25.

Keary, P., Brooks, M. and Hill, I. (2002). An Introduction to Geophysical Exploration. 3rd Ed. Blackwell Science. 281 p.

Lacombe, C., Butt, S., Mackenzie, G., Schons, M., y Bornard, R. (2009). Correcting for water-column variations. *The Leading Edge*, Vol. 28. Issue 2, p 198-201.

Lansley, R. M. (1994). The question of azimuths: Presented at the SEG Workshop.

Larner, K., Chambers, R., Yang, M., Lynn, W. y Wai, W. (1983). Coherent noise in marine seismic data. *Geophysics*. Vol 48, No 7, p. 854-886.

Larner, K. y Pacheco, C. (2005). Velocity smoothing before depth migration: does it help or hurt?. SEG Technical Program Expanded Abstracts, p. 19070-1973.

Liner, C. L. (1999). Concepts of normal and dip moveout. *Geophysics*. Vol. 64. No.5, p.1637-1647.

Ling, Y., Lin, J., Wu, L., Chen, B., Sun, D. y Gao, J. (2006). Wide and Narrow azimuth seismic surveys over fault zones and stratigraphic traps. *The Leading Edge*. vol. 24, no 11, p. 1418-1422.

Lindseth, R. O. (1968). Digital Processing of Geophysical Data - A Review. SEG Course Notes Series. Vol 1.

Lindsey, J. (1989). The Fresnel zone and its interpretive significance. The Leading Edge. Vol. 8. Issue 10, p. 33-39.

Liu, K. y Bancroft, J., C. (2003). The effects of dip-limited migration. SEG Technical Program Expanded Abstracts, p. 1075-1078.

Long, A. (2010). An overview of seismic azimuth for towed streamers. The Leading Edge. vol. 29, no 5, p. 512-523.

Long, A., Fromyr, E., Page, C., Pramik W. y Laurain R. Multi-Azimuth and Wide-Azimuth lessons for better seismic imaging in complex settings. ASEG Extended Abstracts.

Manning, T., Shane, N., Page, C. y Barley, B. (2007). Quantifying and increasing the value of multi-azimuth seismic. The Leading Edge. Vol. 25. Issue 4. p.510-520.

Meunier, J. (2011). Seismic Acquisition from Yesterday to Tomorrow. SEG Distinguished Instructor Series. No. 14.

Moldoveanu, N. y Egan. M. (2006). From narrow-azimuth to wide and rich azimuth acquisition in the Gulf of Mexico. First Break, Vol. 24. Issue 12. p.69-76.

Paffenholz, J., Keliher, J., Ergas, R., y McLain, B. (2002). Surface marine all azimuth recording technique. 64th. EAGE Conference and Exhibitions.

Rastogi, R. y Phadke, S. (2002). Optimal aperture width selection and parallel implementation of Kirchhoff migration algorithm. 4th SPG Conference & Exposition

Robinson, A., E. (1983). Migration of geophysical data. International Human Resources Development Corp.

Robinson, A., E. y Treitel, S. (2008). Digital Imaging and Deconvolution: The ABCs of Seismic Exploration and Processing. Geophysical References Series. No 15.

- Schleicher, J., Tygel, M. y Hubral, P. (2007). Seismic True-Amplitude Imaging. SEG Geophysical Develoments Series. No. 12
- Schleicher, J., Hubral, P., Tygel, M. y Jaya, M. (1997). Minimum apertures and Fresnel zones in migration and demigration. Geophysics. Vol. 62, p. 183-194.
- Schneider, W. A. (1978). Integral formulation for migration in two and three dimensions. Geophysics. Vol. 43, p. 49-76
- Schoenberger, M. (1974). Resolution comparison of minimum-phase and zero-phase signals. Geophysics. Vol. 39. No 6. p. 826-833.
- Schultz, P. (1998). The seismic velocity model as an interpretation asset. SEG. Distinguished Instructor Series. No. 2.
- Sheriff, R. E. (1980). Nomogram for Fresnel-zone calculation. Geophysics. Vol.45. No. 5, p. 968-972.
- Sheriff, R. E. (2004). A demystifying of deconvolution. Geophysical Corner. AAPG Explorer.
- Sheriff, R. E. y Geldart, L. P. (1995). Exploration seismology. 2nd Ed. Cambridge University Press.
- Sheriff, R. E. y Geldart, L. P. (2004). Problems in explorations seismology and their solutions. Geophysical references Series. No 14.
- Spinner, M. y Mann, J. (2007). CRS-based minimum-aperture time migration – A 2D land-data case study. SEG Technical Program Expanded Abstracts, p. 2354-2358
- Stone, D. G. (1994). Designing surveys in two and three dimensions. Geophysical References Series. Vol. 5
- Stolt, R. H. (1978). Migration by fourier transform. Geophysics. Vol. 43. No. 1, p 23-48

Sun, J. (1998). On the limited aperture migration in two dimensions. *Geophysics*. Vol. 63. No. 3, p. 984-994.

Sun, J. (2000). Limited-aperture migration. *Geophysics*. Vol. 65. No. 2, p. 584-595.

Sun, S. y Bancroft, J. C. (2001). How much does the migration apertura actually contribute to the migration result?. *CREWES Research Report*. Vol. 13, p. 573-581.

Taner, M. T. y F. Koehler. (1969). Velocity spectra – digital computer derivation and applications of velocity functions: *Geophysics*. Vol. 34, p. 859–881.

Vermeer, G. J. O. (2002). 3-D Seismic Survey Design. *Geophysical References Series*. Vol. 12

Weglein, A. B. (1999). Multiple attenuation: an overview of recent advances and the road ahead. *The leading Edge*. Vol. 18. No 1, p 40-44

Yilmaz, O. (2001). Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data. *Investigations in geophysics*. No 10.

Ziolkowski, A., Parkes, G., Hatton, L. and Haugland, T. (1982). The signature of an air gun array: Computation from near-field measurements including interactions: *Geophysics*. Vol 47 p. 1413-1421.