

**APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE APILADO CRS (COMMON REFLECTION
SURFACE) Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL EN SÍSMICA MARINA.**

**ELABORADO POR
MARIA TERESA DUARTE CASTRO
ANA MILENA RANGEL GALVIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2008**

**APILACION DE LA TÉCNICA DE APILADO CRS (COMMON REFLECTION
SURFACE) Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL EN SÍSMICA MARINA.**

**ELABORADO POR
MARIA TERESA DUARTE CASTRO
ANA MILENA RANGEL GALVIS**

**Proyecto de grado presentado como requisito
para optar al título de Geólogo.
Modalidad Tesis de Investigación**

Director

**Germán Yuri Ojeda Bueno
Geólogo Ph.D Geofísica**

Codirector

**Andrés Eduardo Calle Ochoa
Ing. Químico M.Sc. Ciencias del Petróleo**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2008**

DEDICATORIA

A ti DIOS que me diste la oportunidad de vivir y de regalarme una familia maravillosa, gracias por ser tu consentida y facilitarme todas las cosas que te he pedido y por la buena suerte que siempre me acompaña.

A mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias por todo mamita y papito por darme una carrera para mi futuro, creer en mí, apoyarme y brindarme todo su amor, por todo esto les agradezco de todo corazón el que estén a mi lado.

A mis hermanos Henry, Alex y Diego gracias por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

Al amor de mi vida, por el apoyo sentimental, tan necesario para lograr la estabilidad emocional y el equilibrio entre la mente y el corazón, con quien comparto muchos sueños, ilusiones y realidades del mañana y de hoy.

A mi mejor amiga por ser la hermanita que nunca tuve por su apoyo y colaboración desinteresada y por estar siempre a mi lado y ser la persona con quien siempre pude contar, gracias por los momentos chéveres y divertidos..

A mis directores de proyecto Germán y Andrés, por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para la realización de este trabajo.

La formulación de un problema, es más importante que su solución. Albert Einstein.

MARIA TERESA

DEDICATORIA

Sí primero te doy gracias a ti Padre por darme el don preciado de la Vida y la gracia de disfrutarla por medio del conocimiento.
A mis padres, que aunque suene muy trillado, son las personas que no me dejaron flaquear y estuvieron allí en las buenas y en las malas, por ser como son, por su inmenso amor y por darme los valores que han formado al ser humano que soy.
A mis tías Lolita y Yaxis porque siempre me dieron su apoyo incondicional en cada momento de vida, a mi tío Alfredo porque sin sus sabios consejos no estaría aquí, a mis grandes hermanos Martuchita y Toto porque a pesar de la distancia siempre han estado muy cerca acompañándome, y a toda mi familia Rangel Navas y Galvis Jiménez y González Carvajal.

A mi querida Universidad Industrial de Santander por ser el ente que ayudó a cincelar y esculpir la profesional que soy ahora, A todos los profesores de la Escuela de Geología en especial al Profe Ríos, al profesor Mantilla, al profesor Juan Diego, Carlos García, Diego García, Luis Miguel, Jorgito, Chucho, Néstor Moreno, “El Profe” y Saúl, a todos y cada uno de ellos mi especial gratitud y respeto.

A mis amigos del alma: Sasita siempre lista para ayudar, a los chicos del MPFC, Polito, a Luchito G., Dieguito y Mamena, a mi grupo de primer semestre “La paisa, Sanmiguel, Dani, Fabián”, a Ale, Nadia, Julieta, Foncho, Fabiany, Rolo, Angy, Llãnes, Mevis, Sol, Ruth, Tico, Oli, Heric, Tatis, Adri y Patri, Gersón, Dany, Alexa, Zafra, Catata, Jas, Mailen, Arley, El Feo, Casadiego María T, Martha E., bueno a todos los que me acompañaron a lo largo de mi carrera muchas gracias por sus enseñanzas y sincera amistad.

A AECO y GYO un especial agradecimiento por todos sus conocimientos, paciencia, especial dedicación y fines de semana invertidos en nosotras, gracias sobre todo por su sincera e incondicional amistad.

Para finalizar tomaré prestadas unas frases célebres de Ángel González de su poema para que yo me llame: Para que yo me llame geóloga, para que mi ser pese sobre el suelo, fue necesario un ancho espacio y un largo tiempo.... GRACIAS DE TODO CORAZÓN... Ana Milena

AGRADECIMIENTOS

A nuestros Directores de Tesis Andrés Eduardo Calle y Germán Yuri Ojeda por su valioso tiempo y por colaborar con nuestra formación académica. Por sus enseñanzas y consejos. Nada de esto hubiera sido posible sin ellos.

Al Instituto Colombiano de Petróleo por los datos sísmicos, las instalaciones y personal de apoyo.

Al grupo de Geofísica quienes colaboraron en la formación académica de este proyecto; Andrés Calle, Germán Ojeda, José Gamboa, Clara M, William A, Jorge M, Zayra P, Alfredo T, Néstor Q, Carlos P, Saúl G, Frank, Yaqueline F, Gloria Jaimes.

A Numérica Ltda por el préstamo y la facilitación de la licencia del programa CRS.

A los profesores de la Escuela de Geología quienes estuvieron a nuestro lado en la formación académica y profesional.

A nuestros compañeros del semillero de Petrosísmica y Amigos por su apoyo en ésta etapa.

A todos y aquellas personas que directa e indirectamente aportaron en la realización de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-----------|
| RESUMEN..... | I |
| ABSTRACT..... | II |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1. OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.1. OBJETIVO GENERAL..... | 3 |
| 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 3 |
| 2. ESTUDIOS PREVIOS CON CRS..... | 4 |
| 2.1. ÁREA DE ESTUDIO..... | 6 |
| 2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 7 |
| 3. MARCO TEÓRICO..... | 8 |
| 3.1. FUNDAMENTOS DEL TRAZADO DE RAYOS..... | 8 |
| 3.1.1. Teoría del Rayo Paraxial..... | 8 |
| 3.2. ADQUISICIÓN..... | 9 |
| 3.2.1. Adquisición Marina..... | 10 |
| 3.2.1.1. Elementos básicos para la adquisición marina..... | 10 |
| 3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS DE REFLEXIÓN..... | 13 |
| 3.3.1. Pre-Apilamiento..... | 14 |
| 3.3.1.1. Almacenamiento..... | 14 |
| 3.3.1.2 Geometría..... | 14 |
| 3.3.1.3 Edición..... | 15 |
| 3.3.1.4. Filtrado..... | 15 |
| 3.3.1.5. Recuperación de Amplitudes..... | 16 |
| 3.3.1.6. Deconvolución..... | 16 |
| 3.3.2. Apilamiento..... | 18 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3.2.1. Ordenamiento por CMP..... | 19 |
| 3.3.2.2. Análisis de velocidad..... | 20 |
| 3.3.2.3. Corrección NMO..... | 20 |
| 3.3.2.4. Corrección DMO..... | 23 |
| 3.3.2.5. Atenuación de múltiples..... | 25 |
| 3.3.2.6 Apilamiento..... | 28 |
| 3.3.3. Pos-Apilamiento (Figura 24)..... | 29 |
| 3.3.3.1 Etapas previas a la migración..... | 29 |
| 3.3.3.2. Migración..... | 30 |
| 3.4. APILADO EN CRS..... | 33 |
| 3.4.1. Teoría..... | 33 |
| 3.4.2. Apilado CRS..... | 36 |
| 4. GEOLOGÍA DEL NORTE DE COLOMBIA..... | 43 |
| 4.1. ESTRATIGRAFÍA..... | 43 |
| 4.1.1. Basamento..... | 43 |
| 4.1.2. Cretácico-Eoceno..... | 44 |
| 4.1.3. Oligoceno – Mioceno..... | 46 |
| 4.1.4. Plioceno - Pleistoceno..... | 47 |
| 4.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL..... | 47 |
| 4.2.1. Cuña Acrecionada del Sinú..... | 48 |
| 4.2.2. Estilo Estructural..... | 49 |
| 4.2.2.1 Sistema Imbricado Cabalgante..... | 49 |
| 4.2.3. Geometrías de las estructuras..... | 49 |
| 4.2.3.1. Pliegues de Flexión de Falla (Fault-Bend-Fold)..... | 50 |
| 4.2.3.2. Estratos de crecimiento..... | 51 |
| 4.3. TECTÓNICA..... | 53 |
| 4.4. MORFOLOGÍA DEL FONDO MARINO..... | 55 |
| 5. METODOLOGÍA..... | 57 |
| 5.1. GENERACIÓN DEL MODELO SINTÉTICO..... | 57 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1.1. Adquisición sísmica para modelo geofísico..... | 62 |
| 5.2. PROCESAMIENTO DE DATOS SINTÉTICOS | 66 |
| 5.2.1 Procesamiento de modelo sintético en ProMAX | 66 |
| 5.2.1.1. Leer SEG-Y..... | 66 |
| 5.2.1.2. Generar <i>Display</i> | 66 |
| 5.2.1.3. Renumerar..... | 66 |
| 5.2.1.4. Geometría..... | 67 |
| 5.2.1.5. Creación de Geometría..... | 67 |
| 5.2.1.6. Control de Calidad Geometría..... | 69 |
| 5.2.1.7. Análisis de velocidad (Figura 55)..... | 69 |
| 5.2.1.8. Corrección NMO/DMO..... | 70 |
| 5.2.1.9. Apilar..... | 70 |
| 5.2.2 Procesamiento de datos sintéticos por la técnica de apilado CRS..... | 73 |
| 5.3 PROCESAMIENTO DE DATOS REALES | 75 |
| 5.3.1 Procesamiento de datos reales con ProMAX | 75 |
| 5.3.1.1. Primeras etapas..... | 75 |
| 5.3.1.2. Atenuación de Múltiples..... | 76 |
| 5.3.1.3. Apilamiento..... | 76 |
| 5.3.1.4 Análisis Espectral..... | 77 |
| 5.3.1.5. Migración | 78 |
| 5.3.2 Procesamiento de datos reales por la técnica de apilado CRS..... | 79 |
| 6. INTERPRETACIÓN SÍSMICA..... | 82 |
| 6.1. METODOLOGÍA | 82 |
| 6.1.1. Análogos Mundiales: Delta del Níger | 82 |
| 6.1.1.1 Delta del Níger..... | 82 |
| 6.1.2. Interpretación sísmica | 85 |
| 6.1.2.1. Sector I..... | 86 |
| 6.1.2.2. Sector II | 90 |
| 7. RESULTADOS..... | 94 |

| | |
|--|-----|
| 7.1 SECCIÓN APILADA EN NMO CON PRESENCIA DE MÚLTIPLES VS. SECCIÓN ATENUADA CON LA TRANSFORMADA RADÓN. | 94 |
| 7.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CRS VS. DMO EN LAS SECCIONES APILADAS..... | 95 |
| 7.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS APERTURAS 120-1000-500 EN EL SECTOR I. | 96 |
| 7.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS APERTURAS 120-500-1000 EN EL SECTOR II. | 98 |
| 7.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS APERTURAS 120-500-1000 EN EL SECTOR III. | 99 |
| 7.6 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CRS VS. NMO/DMO EN LAS SECCIONES APILADAS DEL SECTOR I DE LA LÍNEA. | 101 |
| 7.7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CRS VS. NMO/DMO EN LAS SECCIONES APILADAS DEL SECTOR II DE LA LÍNEA. | 103 |
| 7.8 COMPARACIÓN SECCIÓN APILADA DE LOS DATOS SINTÉTICOS CON NMO VS. CRS..... | 104 |
| 8. CONCLUSIONES..... | 106 |
| 9. RECOMENDACIONES | 109 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 110 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO. | 6 |
| FIGURA 2. ESQUEMA EN DOS DIMENSIONES DE UN MEDIO ISOTRÓPICO Y NO HOMOGÉNEO. EL RAYO CENTRAL (EN MORADO) X_0ROX_0 (EN EL CASO DEL RAYO NORMAL) Y EL RAYO PARAXIAL (EN NARANJA) FRG SE ENCUENTRA EN LA VECINDAD DEL RAYO CENTRAL. | 9 |
| FIGURA 3. ELEMENTOS EN SÍSMICA MARINA. | 10 |
| FIGURA 4. ESQUEMA QUE MUESTRA LOS ELEMENTOS NECESARIOS EN SÍSMICA MARINA. | 10 |
| FIGURA 5. PRINCIPIOS DE LA MEDICIÓN DEL CAMBIO EN LA PRESIÓN CON UN CRISTAL PIEZOELÉCTRICO (HIDRÓFONO). DEBIDO AL CAMBIO QUE OCURRE EN EL VOLTAJE DEL MATERIAL. | 11 |
| FIGURA 6. TIPOS DE <i>STREAMER</i> | 11 |
| FIGURA 7. <i>TAIL BOUY</i> | 12 |
| FIGURA 8. SISTEMA DE REGISTRO. | 12 |
| FIGURA 9. ETAPAS DEL PROCESAMIENTO CONVENCIONAL. | 13 |
| FIGURA 10. PRIMERA ETAPA DEL PROCESAMIENTO CONVENCIONAL. | 14 |
| FIGURA 11. IMPEDANCIA. | 17 |
| FIGURA 12. DEFINICIÓN DE SEÑAL SÍSMICA. | 17 |
| FIGURA 13. SEGUNDA ETAPA DEL PROCESAMIENTO SÍSMICO. | 19 |
| FIGURA 14. ORDENAMIENTO CMP. | 19 |

| | |
|---|-----------|
| FIGURA 15. ANÁLISIS DE VELOCIDAD (DE IZQUIERDA A DERECHA); ESPECTRO DE VELOCIDAD, CMP, DYNAMIC STACK, APILADOS A VELOCIDAD CONSTANTE..... | <u>21</u> |
| FIGURA 16. EFECTO HIPERBÓLICO DEBIDO AL OFFSET Y CORRECCIÓN NMO. | <u>22</u> |
| FIGURA 17. CORRECCIÓN NMO: (A) CORRECCIÓN TOMADA EN BASE A UNA VELOCIDAD INFERIOR A LA CORRECTA. OCURRE SOBRECORRECCIÓN. (B) CORRECCIÓN TOMADA EN BASE A UNA VELOCIDAD IGUAL A LA VELOCIDAD NMO ENTONCES SE HORIZONTALIZAN LOS EVENTOS. (C) CORRECCIÓN TOMADA EN BASE A UNA VELOCIDAD SUPERIOR A LA CORRECTA ENTONCES OCURRE SUBCORRECCIÓN..... | <u>23</u> |
| FIGURA 18. TRAZADO DE RAYO PARA UN REFLECTOR CON BUZAMIENTO... .. | <u>24</u> |
| FIGURA 19. ESQUEMA QUE MUESTRA LA GEOMETRÍA DEL MÚLTIPLE..... | <u>25</u> |
| FIGURA 20. CLASIFICACIÓN DE LOS MÚLTIPLES..... | <u>26</u> |
| FIGURA 21. OTRA CLASIFICACIÓN DE MÚLTIPLES; (A) MÚLTIPLE LIBRE, (B) MÚLTIPLE INTERNA O INTERESTRATIFICADA..... | <u>26</u> |
| FIGURA 22. ANÁLISIS DE VELOCIDAD; PANEL DE VELOCIDAD O SEMBLANCE DONDE SE OBSERVA UN TREN DE VELOCIDADES, LA VELOCIDAD MAS BAJA LA CUAL SE UBICA POR FUERA DEL TREN DE VELOCIDADES CORRESPONDE A LA VELOCIDAD DEL MÚLTIPLE DEL FONDO DEL MAR. EN LA IMAGEN DE LA DERECHA OBSERVAMOS LOS EVENTOS CON LA CORRECCIÓN NMO NOTE QUE EL MÚLTIPLE SE OBSERVA CON GEOMETRÍA PARABÓLICA..... | <u>28</u> |
| FIGURA 23. APILAMIENTO; SECCIÓN SÍSMICA APILADA EN EL DOMINIO DE LOS PUNTOS MEDIOS COMUNES..... | <u>29</u> |
| FIGURA 24. TERCERA ETAPA DE PROCESAMIENTO CONVENCIONAL..... | <u>29</u> |
| FIGURA 25. (I) IMAGEN MIGRADA, (II) IMAGEN APILADA..... | <u>32</u> |

| | |
|---|-----------|
| FIGURA 26. MUESTRA EL OPERADOR SUPERFICIAL CRS EN CONTRASTE CON LOS DATOS LINEALES QUE TOMA NMO/DMO (TOMADO DE JÄGER, R., 1999). | <u>33</u> |
| FIGURA 27. EXPERIMENTO QUE GENERA LOS FRENTES DE ONDA R_{NIP} , PRODUCIDOS POR UNA FUENTE PUNTUAL UBICADA EN EL PUNTO NIP. LOS FRENTES DE ONDA SON DESCRITOS EN ROJO. EL RAYO DE INCIDENCIA NORMAL (NEGRO) ES REFLECTADO EN EL PUNTO NIP. | <u>34</u> |
| FIGURA 28. EXPERIMENTO QUE GENERA LOS FRENTES DE ONDA NORMAL R_N , PRODUCIDOS POR EL EXPERIMENTO DE UN REFLECTOR EXPLOTANTE. LOS FRENTES DE ONDA SON DESCRITOS EN ROJO. EL RAYO DE INCIDENCIA NORMAL (NEGRO) ES REFLECTADO EN EL PUNTO NIP. | <u>35</u> |
| FIGURA 29. ETAPAS DEL PROCESAMIENTO CONVENCIONAL. | <u>36</u> |
| FIGURA 30. ETAPAS QUE REALIZA CRS DENTRO DE SU PROCESAMIENTO. | <u>36</u> |
| FIGURA 31. FLUJO DE LAS ETAPAS Y LOS PARÁMETROS QUE HAYA CRS EN CADA ETAPA (TOMADO DE GAMBOA, J., 2003). | <u>37</u> |
| FIGURA 32. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA APERTURA EN EL CMP GATHER (ROJO). | <u>41</u> |
| FIGURA 33. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA APERTURA EN LA SECCIÓN CERO OFFSET (CO). | <u>42</u> |
| FIGURA 34. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL CRS, DURANTE LAS OPERACIONES DE APILAMIENTO, SE APLICA UNA FUNCIÓN DE COSENO EN EL TAPE QUE SE DESPLAZA DENTRO DEL ÁREA LIMITADA ENTRE LA CURVA EN NEGRO Y LA CURVA INTERNA EN ROJO. | <u>42</u> |
| FIGURA 35. MAPA GEOLÓGICO DEL NORTE DE COLOMBIA. TOMADO DE FLINCH, (2003). | <u>44</u> |
| FIGURA 36. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL ÁREA DEL SINÚ – SAN JACINTO. TOMADO DE FLINCH 2003. | <u>46</u> |

| | |
|--|----|
| FIGURA 37. CORTE ESTRUCTURAL DE LAS PROVINCIAS DEL VALLE INFERIOR DEL MAGDALENA, DEL CINTURÓN PLEGADO DE SAN JACINTO Y LA CUÑA DE ACRECIÓN DEL SINÚ..... | 48 |
| FIGURA 38. EXPLICA LOS TRES ESTADIOS DE LA CINEMÁTICA DEL PLIEGUE DE FLEXIÓN POR FALLA..... | 50 |
| FIGURA 39. MUESTRA LA GEOMETRÍA PARTICULAR DEL SHEAR FAULT BEND FOLDING..... | 51 |
| FIGURA 40. ESQUEMA DE PROCESOS SUPERFICIALES Y PROFUNDOS ACTUANDO DURANTE EL LLENADO DE UNA CUENCA FORELAND SINTECTÓNICA Y LA POSICIÓN DE ESTRATOS DE CRECIMIENTO RELACIONADOS A PLIEGUES VERGÉS, J., ET AL 2002)..... | 52 |
| FIGURA 41. MAPA DE FALLAS Y CARACTERÍSTICAS TECTÓNICAS DE LOS LÍMITES DE PLACA SURAMERICANA, CARIBE, PANAMÁ, Y LOCALIZACIÓN DE LOS CINTURONES SAN JACINTO Y SINÚ..... | 53 |
| FIGURA 42. ZONAS QUE CONFORMAN EL FONDO MARINO..... | 55 |
| FIGURA 43. A) UBICACIÓN DE LOS PERFILES BATIMÉTRICOS REALIZADOS EN ÉSTE ÁREA DEL CARIBE. B) PERFIL BATIMÉTRICO LÍNEA 32 CERCA DEL ÁREA DE ESTUDIO (TOMADO DE VERNETTE, G., 1985)..... | 56 |
| FIGURA 44. MODELO CON GEOMETRÍA..... | 59 |
| FIGURA 45. GENERACIÓN DE BLOQUES CON VELOCIDAD P..... | 61 |
| FIGURA 46. GENERACIÓN DE BLOQUES CON VELOCIDAD S..... | 61 |
| FIGURA 47. GENERACIÓN DE BLOQUES CON DENSIDAD..... | 62 |
| FIGURA 48. ORIENTACIÓN DE LA LÍNEA DE ADQUISICIÓN..... | 63 |
| FIGURA 49. TRAZADO DE RAYO ADQUISICIÓN NO148..... | 63 |
| FIGURA 50. SISMOGRAMA SINTÉTICO ADQUISICIÓN 148..... | 64 |
| FIGURA 51. TRAZADO DE RAYO CERO OFFSET..... | 65 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 52. GEOMETRÍA..... | 67 |
| FIGURA 53. FUENTES..... | 68 |
| FIGURA 54. BINNING..... | 68 |
| FIGURA 55. ANÁLISIS DE VELOCIDADES..... | 69 |
| FIGURA 56. CAMPO DE VELOCIDADES..... | 70 |
| FIGURA 57. APILADO NMO..... | 71 |
| FIGURA 58. APILADO DMO..... | 72 |
| FIGURA 59. APILADO CON OPERADOR DE 120 CDP 8000-12000..... | 74 |
| FIGURA 60. APILADO CON OPERADOR DE 1000 CDP 8000-12000..... | 74 |
| FIGURA 61. FLUJOS BÁSICOS EN EL PROCESAMIENTO CON PROMAX..... | 75 |
| FIGURA 62. APILAMIENTO NMO PARA CDP 9261-13458..... | 76 |
| FIGURA 63. APILAMIENTO DMO PARA CDP 9261-13458..... | 77 |
| FIGURA 64. ANÁLISIS ESPECTRAL APILADO V1 CDPS 3978-8779..... | 77 |
| FIGURA 65. ANÁLISIS ESPECTRAL APILADO DMO CDPS 3978-8779..... | 78 |
| FIGURA 66. MIGRACIÓN KIRCHHOFF PARA LOS CDP 9261-13458 CON UN OPERADOR DE LONGITUD DE 1500 Y BUZAMIENTO DE 180..... | 79 |
| FIGURA 67. APILADO CRS PARA LOS CDP 3978-8779 CON APERTURAS MÁXIMA 500 Y MÍNIMA 40..... | 80 |
| FIGURA 68. APILADO CRS PARA LOS CDPS 3978-8779 CON APERTURAS MÁXIMA 1000 Y MÍNIMA 40..... | 80 |
| FIGURA 69. MIGRACIÓN KIRCHHOFF PARA LOS CDP 9261-13458 CON UN OPERADOR DE LONGITUD DE 1500 Y BUZAMIENTO DE 180..... | 81 |
| FIGURA 70. MAPA DE LOCALIZACIÓN DEL DELTA DEL NÍGER Y EL OFFSHORE DE NIGERIA (TOMADO DE AJAKAIYE, D., Y BALLY, A., 2002)..... | 83 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 71. ESTILO ESTRUCTURAL DEL DELTA DEL NÍGER (TOMADO DE AJAKAIYE, D. Y BALLY, A., 2002). | 84 |
| FIGURA 72. ESTILO ESTRUCTURAL DE LA CUÑA ACRECIÓN DEL SINÚ CSSJ (TOMADO DE FLINCH, J. 2003). | 85 |
| FIGURA 73. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE DOMINIOS ESTRUCTURALES. | 86 |
| FIGURA 74. SECCIÓN APILADA DMO. | 87 |
| FIGURA 75. SECCIÓN APILADA CRS. | 87 |
| FIGURA 76. SECCIÓN APILADA SECTOR II CON DMO. | 91 |
| FIGURA 77. SECCIÓN APILADA SECTOR II CON CRS. | 91 |
| FIGURA 78. (I). SECCIÓN APILADA POR NMO/DMO CON MÚLTIPLES; (II). SECCIÓN APILADA CON ATENUACIÓN DE MÚLTIPLES. | 94 |
| FIGURA 79. (I). SECCIÓN APILADA POR NMO/DMO; (II). SECCIÓN APILADA POR CRS. | 95 |
| FIGURA 80. ANÁLISIS COMPARATIVO DE UNA SECCIÓN APILADA EN CRS EMPLEANDO APERTURAS DE 120, 500 Y 1000 METROS EN EL SECTOR I. | 96 |
| FIGURA 81. ANÁLISIS COMPARATIVO DE UNA SECCIÓN APILADA EN CRS EMPLEANDO APERTURAS DE (A) 120, (B) 500 Y (C) 1000 EN EL SECTOR II. | 98 |
| FIGURA 82. ANÁLISIS COMPARATIVO DE UNA SECCIÓN APILADA EN CRS EMPLEANDO APERTURAS DE 120, 500 Y 1000 METROS EN EL SECTOR III. | 99 |
| FIGURA 83. (I). SECCIÓN APILADA POR NMO/DMO; (II). SECCIÓN APILADA POR CRS. | 101 |
| FIGURA 84. (I) SECCIÓN APILADA POR NMO/DMO; (II). SECCIÓN APILADA POR CRS. | 103 |
| FIGURA 85. (I) SECCIÓN APILADA POR CRS PARA DATOS SINTÉTICOS. (II). SECCIÓN APILADA POR NMO PARA DATOS SINTÉTICOS. | 104 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA 1. TIPOS DE FILTRO..... | 15 |
| TABLA 2. RECUPERACIÓN DE AMPLITUDES..... | 16 |
| TABLA 3. TIPOS DE MIGRACIÓN EN TIEMPO (MEDINA, H., 2004)..... | 31 |
| TABLA 4. DESCRIPCIÓN DE BLOQUES DEL MODELO GEOFÍSICO SINTÉTICO..... | 58 |
| TABLA 5. PROPIEDADES BLOQUES..... | 60 |
| TABLA 6. INFORMACIÓN DE FUENTE/RECEPTOR..... | 62 |
| TABLA 7. PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN CERO-OFFSET..... | 64 |
| TABLA 8. INTERVALO DE DISPARO PARA OBTENER UNA SECCIÓN CERO OFFSET..... | 65 |
| TABLA 9. AUTO MARINE 2D GEOMETRY..... | 67 |
| TABLA 10. TABLA COMPARATIVA DE LAS CUENCAS SINÚ-SAN JACINTO Y DEL DELTA DEL NÍGER..... | 84 |
| TABLA 11. COMPARACIÓN ENTRE LAS SECCIONES APILADAS DE NMO Y CRS EN EL SECTOR I..... | 90 |
| TABLA 12. COMPARACIÓN ENTRE LAS SECCIONES DMO Y CRS EN EL SECTOR II..... | 93 |

RESUMEN

Título: APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE APILADO CRS (COMMON REFLECTION SURFACE) Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL EN SÍSMICA MARINA.¹

Autor (es): Duarte Castro, María Teresa.; Rangel Galvis, Ana Milena²

Palabras Claves: Caribe Colombiano, CRS, Procesamiento sísmico, Estructural.

La técnica de imagen CRS ha probado generar imágenes de superior calidad en varios casos de estudio sísmico 2D comparado con el generado por el procesamiento convencional NMO/DMO. Esta técnica fue fundamentada a mediados de los años 80's por Peter Hubral y se implementó a principios de los años 90's por Jürgen Mann, Thylo Müller, Rainer Jäger, Peter Hubral y German Höcht entre otros. Una de las principales características de la técnica CRS es el incremento de la relación señal/ruido permitiéndole cuando éste sea el caso incrementar la continuidad de los reflectores; por consiguiente en el proceso se observan los parámetros cinemáticos CRS (El ángulo emergente β , las curvaturas de los frentes de onda tipo R_N y R_{NIP} de un rayo simulado a offset cero) y se logra un campo de velocidad refinado debido a que éste es generado en cada muestra del apilado final. Así, que se esperaba una mejor definición en los sedimentos con buzamientos, en las zonas profundas como en las estructuras terrestres.

En éste trabajo procesamos una línea 2D mar adentro del Caribe Colombiano y se realizó un análisis riguroso de las imágenes y de los resultados apilados y Migrados Post Apilados, esto fue hecho para entender las diferencias y ventajas de las dos secuencias de procesamiento desde un punto de vista estructural.

¹ Proyecto de Grado, Modalidad Tesis de Investigación.

² Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Geología. Director, Geólogo Ph.D. Germán Yuri Ojeda Bueno; Codirector, Ing. Químico M.Sc. Andrés Eduardo Calle Ochoa.

ABSTRACT

Title: APPLICATION OF THE CRS (COMMON REFLECTION SURFACE) STACK TECHNIQUE AND STRUCTURAL EVALUATION IN MARINE SEISMIC³.

Autor(s): Duarte Castro, María Teresa.; Rangel Galvis, Ana Milena⁴

Keys words: Colombian Caribbean, CRS, Seismic Processing and structural.

The **CRS** imaging technique has proved to produce superior images in various 2D seismic case studies compared with those ones produced by the standard **NMO/DMO** processing process. This technique was established in mid- 80's by Peter Hubral and it was implemented at beginning 90's by Jürgen Mann, Thylo Müller, Rainer Jäger, Peter Hubral and German Höcht among others ones. One of the main features of the **CRS** technique is the increase in the signal-to-noise ratio enabling it to produce better continuity of reflectors. Additionally, in the process it looks for the so called CRS kinematics parameters (The emergence angle β , the curvatures of hypothetic wave fronts R_N and R_{NIP} of a simulated zero offset ray) and a very improved velocity field is reached because it is generated in each sample of the final Stack. Thus it is also expected to resolve better in slope sediments as well as in deeper zones like crustal structures.

In this work we process a 2D line from the Colombian Caribbean Offshore and a rigorous analysis of the images, stack and Post Stack Migration results, was done in order to understand the differences and advantages of the two processing sequences from the structural point of view.

³ Degree Work, Research Modality.

⁴ Engineering Physical – Chemistry Department, Geology School. Geologist Ph.D. Germán Yuri Ojeda Bueno; Director. Chemistry Engineer M.Sc. Andrés Eduardo Calle Ochoa; Co-director.

INTRODUCCIÓN

El procesamiento es la elección y la aplicación posterior de parámetros y algoritmos de tratamientos adecuados a los datos sísmicos adquiridos en el campo (datos en bruto) para obtener una sección sísmica de alta calidad. Dentro del procesamiento sísmico se encuentra una etapa llamada apilado o stack, la cuál es la aplicación más importante del procesamiento de datos en el mejoramiento de la calidad de estos (Sheriff, R., et al 1991).

El método de la Superficie Común de Reflexión (CRS) es una técnica de apilado cuyo resultado es el incremento de la relación señal/ruido, el cual fue desarrollado por el Consorcio WIT, con sede en la Universidad de Karlsruhe (Alemania). Contrario al apilamiento de la técnica convencional NMO/DMO, el método CRS no requiere de un macro-modelo de velocidades de apilado, ya que el procesamiento CRS determina automáticamente los parámetros de apilamiento que vienen de las mediciones de valores de coherencia en los datos pre-apilados.

El apilamiento en CRS considera a los reflectores como elementos, los cuales están definidos por la ubicación en subsuelo, la curvatura del reflector y el buzamiento, éstos son conocidos como la superficie común de reflexión. El método CRS emplea un mayor número de trazas para la simulación de cada traza de la sección offset cero, lo que proporciona una mejora en la relación señal/ruido y a su vez una mayor utilización de las geometrías posibles a encontrar (en especial para áreas con geometrías complejas) en comparación con el procesamiento NMO/DMO o el PreSDM de Kirchhoff (Hubral, P., et al 1999).

Existen varios estudios realizados empleando ésta técnica, en los cuales ninguno de éstos se ha centrado en evaluar el efecto de ésta técnica de apilamiento en la

definición de las estructuras, además existen pocas publicaciones de la aplicación de ésta técnica en áreas costa afuera excepto en el trabajo de Gierse, G., et al, 2001, donde se realizó una aplicación de ésta técnica para un conjunto de datos sísmicos marinos 3D del margen continental costa fuera en Costa Rica y mostrando una mejor continuidad de los reflectores tanto en la sección apilada como en la sección migrada en tiempo pos-apilada en relación con los resultados obtenidos por la técnica convencional. Además el estudio mostró imágenes de estructuras con fuertes buzamientos en las secciones migradas de CRS, las cuales no se vieron en la sección migrada NMO.

Este trabajo pretende establecer un modelo con determinadas características en los datos sintéticos como medio de soporte para la definición de posibles estructuras en las imágenes obtenidas de los datos reales. En el presente trabajo se plantearon dos objetivos específicos: 1) Atenuar los múltiples por medio de la transformada Radón y 2) evaluar las imágenes obtenidas por medio de las técnicas CRS y NMO/DMO, desde el punto de vista estructural. Los resultados indican que la técnica CRS ofrece una mayor definición de eventos profundos, mientras que la técnica convencional permite imágenes de mayor fidelidad geológica.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

- Comparar la técnica de apilamiento convencional NMO/DMO con la técnica de apilado CRS dentro del procesamiento sísmico aplicado.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las imágenes obtenidas por medio de la técnica de apilado CRS y la convencional NMO/DMO desde el punto de vista estructural.
- Atenuar el ruido coherente (Múltiples) en datos sísmicos marinos utilizando la transformada Radón.

2. ESTUDIOS PREVIOS CON CRS

A continuación presentaremos algunos estudios anteriores que se han publicado, ya que durante la etapa de recolección bibliográfica se encontró con trabajos mencionados más no publicados, por lo que hemos omitido su referencia. Empezaremos comentando los inicios de ésta técnica, como los trabajos descritos por: (Hubral, P., 1983), dónde el autor abarca los inicios de la fundamentación matemática que luego dio origen a la técnica CRS para un modelo 2-D y 3-D de capas no horizontales sino con curvaturas; (Grosfeld, V., Biloti, R. y Portugal, R., 2002), en su trabajo presentan un breve recuento del funcionamiento de la técnica de apilado CRS y se da un pequeño ejemplo en datos sintéticos 2-D.

Otros trabajos sobre CRS tratan sobre la mejora de la imagen como los descritos por, (Hubral, P., Hoecht, G., y Jäger, R., 1999), en donde los autores tratan sobre la obtención de una imagen sísmica pero no sólo en cuestión de iluminación y además en el realce del reflector por efectos de la mejora del diseño de adquisición; utilizando no sólo PreSDM y PostSDM como puntos de referencia, sino considerando la obtención de una mejor iluminación en busca de nuevos principios de imagen y diseñando nuevos métodos para tal fin. El de (Rainer, J., Mann, J., German Höcht, and Hubral, P., 2001), los autores comentan sobre el origen, funcionamiento y la aplicación de la técnica de apilamiento CRS paso a paso para un conjunto de datos sintéticos y de multicobertura 2D. El de (Hoecht, G., OPERA, Ricarte, P., Institut francais du petrole, currently OPERA, 2006), donde comentan sobre los operadores empleados por el apilamiento CRS o la interpolación. Además, para la imagen del método y la manera cómo emplea la interpolación CRS para 2D y cómo aplicar el objetivo y los esquemas orientados a parámetros para los datos Sigsbee. También se debe tener en cuenta que se puede aplicar para un 3D.

En otros se realizan comparaciones de la técnica CRS con las convencionales como el trabajo realizado por (Gierse, G. y Pruessmann, J., TEEC, R. Backhouse, A. Naveed, Lovatt-Smith, P. y Ellis, C, Premier Oil plc., 2004), en éste se describe el procesamiento 2D en tiempo y profundidad realizado en Assam-India (onshore), dónde se presenta una serie sobrecabalgamientos de gran complejidad estructural. Además se hace una comparación de las técnicas convencionales incluyendo PreSDM⁵ con CRS, pero no realizan una comparación estructural y el área es continental no marina.

Por otro lado mencionaremos los trabajos sobre las aplicaciones de CRS como, (Yang, K., Wang, Hua-Zhong., Dong, Liang-Guo., 2006), en éste trabajo se habla desde el punto de vista de CRS-IIS⁶ y del CRS-OIS⁷ definidos por la teoría de imagen unificada tipo-Kirchhoff, donde se explica que el CRS Clásico es de tipo (IIS) y se pretende implementar un método nuevo al CRS llamado CRS-OIS por un OIS, esto aplicado tanto para datos sintéticos 2-D como para datos reales de un área al W de China onshore caracterizada por topografía compleja, más sin embargo no presentan nada desde el punto de vista estructural. El de (Heilmann, Z., Mann, J., Ingo Koglin Geophysical Institute, 2006), los autores hacen mención a un estudio realizado para un conjunto de datos terrestres de la Península de Arabia. Estos vienen de una topografía superficial bastante accidentada y muestra el fuerte contraste entre las capas someras y la geología compleja, pero no hay interpretación estructural al respecto. Este trabajo es el único publicado sobre la técnica CRS aplicada para datos sísmicos marinos, (Gierse, G., Pruessmann, J., Laggiard, E., Boennemann, C., Meyer, H., 2001), en éste trabajo se describe la aplicación de CRS a un conjunto de datos sísmicos marinos 3D que se realizó en la margen continental costa fuera de Costa Rica, donde se buscó mostrar las fortalezas y capacidades de la técnica para un estudio 3D, pero no fue interpretado estructuralmente.

⁵ PreSDM: Del inglés Pre-Stack Depth Migration

⁶ IIS: Del inglés Input Imaging Scheme

⁷ OIS: Del inglés Output Imaging Scheme

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio (línea sísmica) se encuentra dentro del área conocida como Sinú, ubicada al NW de Colombia, en el Mar Caribe. El área del Sinú está demarcada dentro de las siguientes características: su extensión de sur a norte es de aproximadamente 240 km² que van desde San Juan de Urabá hasta Cartagena de Indias. Su límite occidental coincide con el cinturón deformado del Caribe; su límite oriental es el lineamiento del Sinú; y su límite sur es la Falla de Uramita. En el área se han perforado los pozos exploratorios Soledad-1, San Bernardo-2X, San Bernardo-1X, el Bobito-1X (1684-1X), Morrosquillo-1, Morrosquillo-1 ST 1, Fuerte-1, Uvero-1X, Uvero-1AX (1538-1XA) (Figura 1).

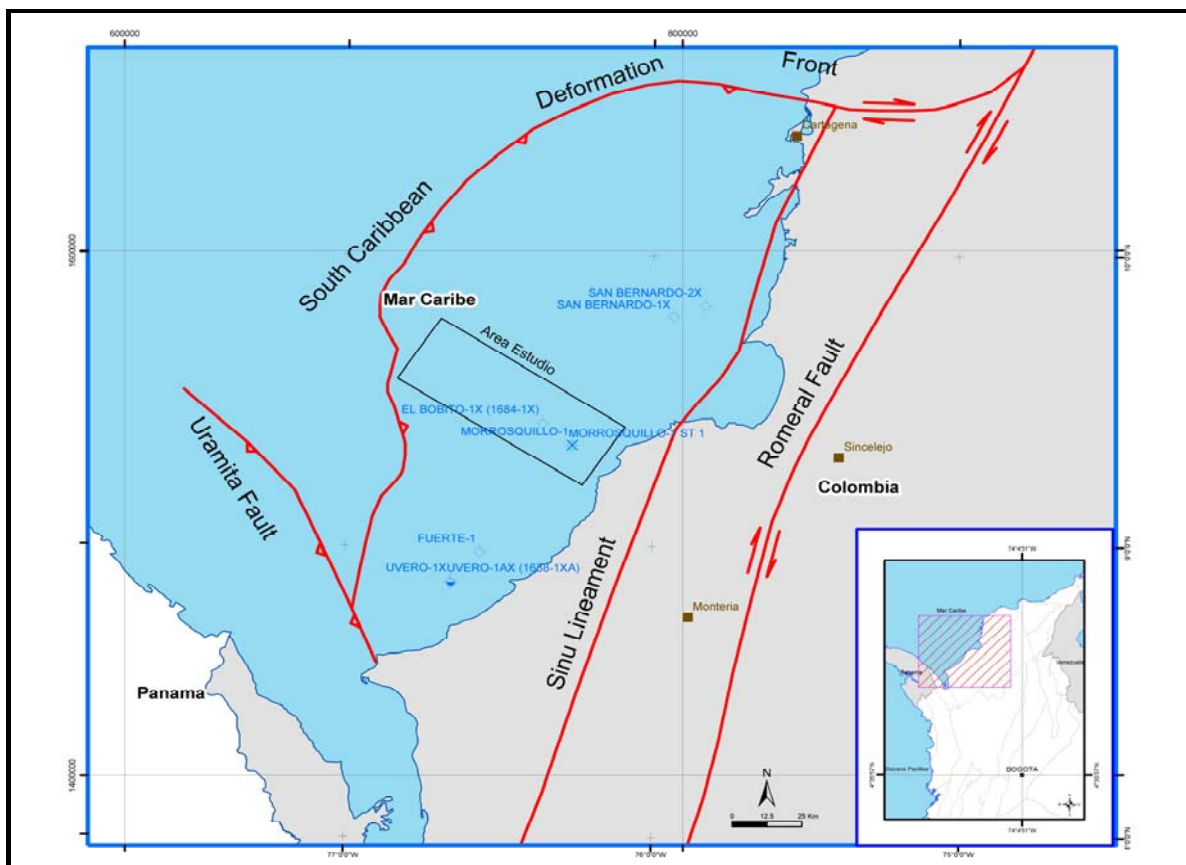


Figura 1. Localización del área de estudio.

La cuenca marina del norte de Colombia se encuentra ubicada dentro de la placa del Caribe, en donde la placa se profundiza de 4 a 8 km de espesor. El origen y edad de la corteza oceánica del Caribe continúan en discusión. La edad radiométrica de los flujos de basaltos de la cuenca de Colombia está entre 75 y 90 Ma (Mauffret y Leroy, 1997). Sin embargo, Sinton et al., (1998), propusieron una edad entre 88 y 91 Ma, edad que es de las más aceptadas para esta placa oceánica.

El origen de la placa oceánica del Caribe es objeto de debate. Mauffret y Leroy, (1997), sugirieron que esta placa se originó cerca del punto caliente de Galápagos en el Pacífico oriental. Contrariamente, Meschede y Frisch (1998) propusieron un origen *in situ*, y sugirieron que se formó en América Central. La edad de la corteza oceánica de la cuenca del norte de Colombia parece ser pre-Coniciano (Case et al., 1990). En la actualidad, la tasa de convergencia entre las placas Caribe y Suramericana está entre 1.3 ± 0.3 cm/por año (Van der Hilst and Mann, 1994) hasta 2.0 cm/por año (Trenkamp et al., 2002). Una descripción completa de la estratigrafía y geología estructural se presenta en el Capítulo 4.

2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La aplicación de la técnica de apilado CRS (Common Reflection Surface) en áreas costa fuera es importante porque: (1) permite obtener una mejor relación señal/ruido como consecuencia de la mayor cobertura que maneja la técnica CRS con respecto al apilado convencional (Mann, J., et al, 2000); (2) logra definir un poco más las estructuras debido a un incremento general en la continuidad de los reflectores (Mann, J., et al, 1999 y Müller, T., 1998); y (3) entrega una buena imagen para áreas con geometrías complejas (Gierse, G., et al, 2001).

3. MARCO TEÓRICO

3.1. FUNDAMENTOS DEL TRAZADO DE RAYOS

El trazado de rayos es un método que permite calcular tiempos de viaje de las ondas sísmicas como amplitudes, que se propagan en el subsuelo, empleando la ley de Snell para resolver los contactos entre capas (Rayos geométricos) y la ley Keller para describir la difracción en puntos previamente definidos (Rayos difractores) (Klem-Musatov, 1994). El poder de la técnica de trazado de rayos estriba en la habilidad para almacenar todos los aspectos geométricos de cada rayo, incluyendo múltiples parámetros dinámicos asociados. En particular, los análisis de iluminación son una herramienta poderosa que puede ser empleada para todo tipo de experimentos sísmicos, permitiendo la optimización del fold, antes y durante la adquisición sísmica (Barbosa, P., 2005).

Si se desea conocer un poco más sobre el tema para profundizar le recomendamos leer los trabajos que al respecto han realizado Cervený, V. (1985), Claerbout, J. (1985), Lay, T. y Wallace, T. (1995), Klimes, L., et al (1985), entre otros.

3.1.1. Teoría del Rayo Paraxial

Su origen viene de la óptica, en donde la palabra paraxial representa la vecindad de los ejes del sistema óptico. En este caso la técnica CRS la denota como la vecindad del conocido rayo central. La teoría del rayo paraxial es una extensión del método estándar del rayo con la propuesta para describir aproximadamente el comportamiento de los rayos paraxiales en la vecindad cercana a un rayo central, el cual se asume que es conocido (Según Heilmann, Z., 2002). Esto se emplea para ser usado en la suposición paraxial que acierta en el sistema de trazado de rayo para un

rayo particular es también aproximadamente válido también en la vecindad cercana de éste rayo (Figura 2).

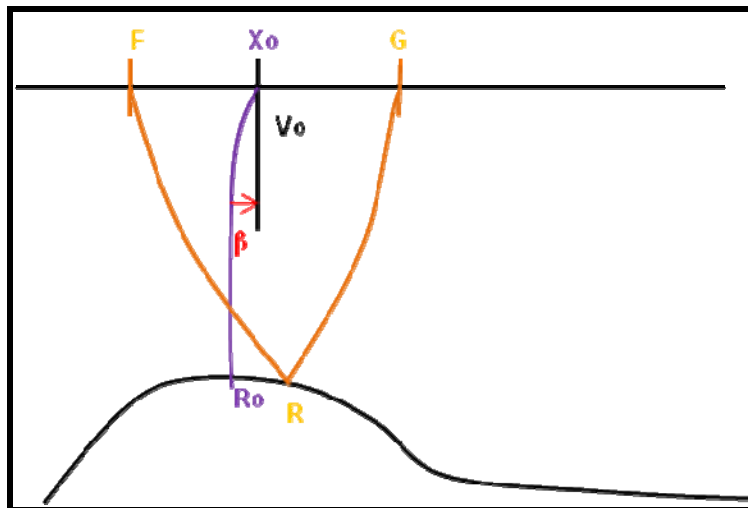


Figura 2. Esquema en dos dimensiones de un medio isotrópico y no homogéneo. El rayo central (en morado) x_0Rox_0 (en el caso del rayo normal) y el rayo paraxial (en naranja) FRG se encuentra en la vecindad del rayo central.

3.2. ADQUISICIÓN

En sí misma es la planificación de un diseño sísmico 2D ó 3D, la cual no sólo depende de los parámetros técnicos sino de las interpretaciones personales que puedan darse. En primera instancia, para evaluar un área determinada se necesita tener conocimiento del objetivo exploratorio de interés, es por ésta razón que se realiza con anterioridad un estudio geológico de superficie con el propósito de definir las características del subsuelo que se esperan resolver con la sísmica, como por ejemplo, profundidad del objetivo, tipos de trampa (estratigráfica, estructural, o combinación de ambas), buzamientos esperados, etc. Además se pueden apoyar en datos sísmicos anteriores para lograr un diseño más óptimo. Las mediciones hechas sobre diferentes medios han permitido establecer que esa velocidad de propagación varía en las rocas entre 2.000 y 6.000 m/seg.

3.2.1. Adquisición Marina

La adquisición marina se realiza generando ondas de choque por medio de una fuente, estas ondas viajan por la columna de agua hasta atravesar el fondo oceánico y se reflejan hasta llegar de nuevo a superficie del agua donde un medio de detección capta esta señal sísmica “hidrófonos” y es enviada al barco donde esta es almacenada y se le realiza un control de calidad.

3.2.1.1. Elementos básicos para la adquisición marina: Para realizar la adquisición marina son necesarios los siguientes elementos (Figuras 3 y 4).

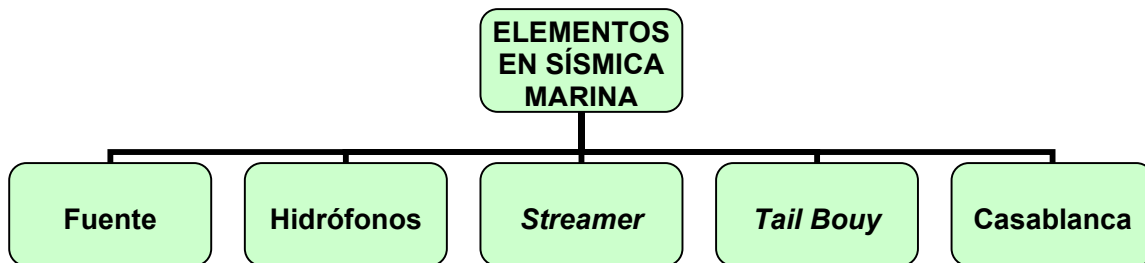


Figura 3. Elementos en sísmica Marina.

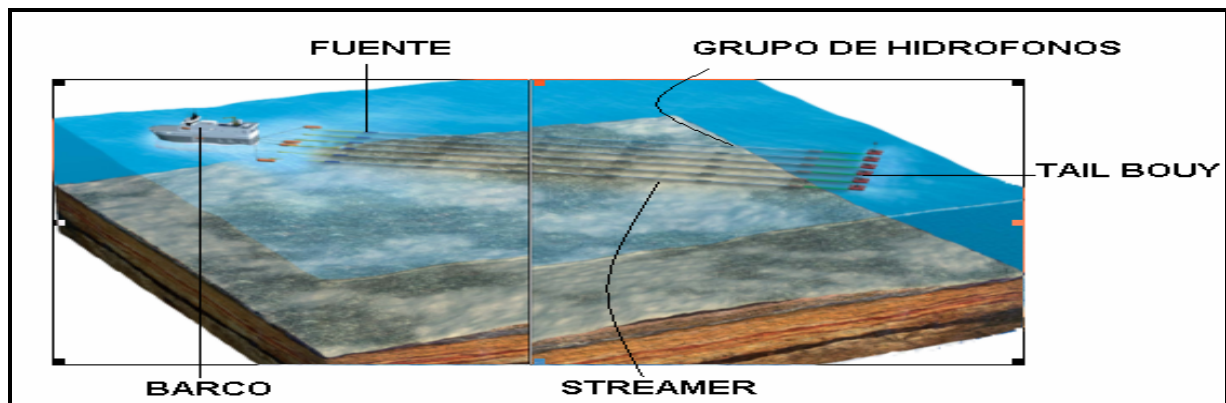


Figura 4. Esquema que muestra los elementos necesarios en sísmica marina.

- Fuentes; Son las encargadas de generar las ondas de choque, estas pueden ser cañones de aire.
- Hidrófonos; Son los receptores estándar en sísmica marina y responden a las variaciones de presión. Generalmente están compuestos de materiales

cerámicos o piezoeléctricos, estos generan un voltaje (Figura 5). Este voltaje es proporcional a la variación de presión. También los hidrófonos son usados en grupos igual que los geófonos.

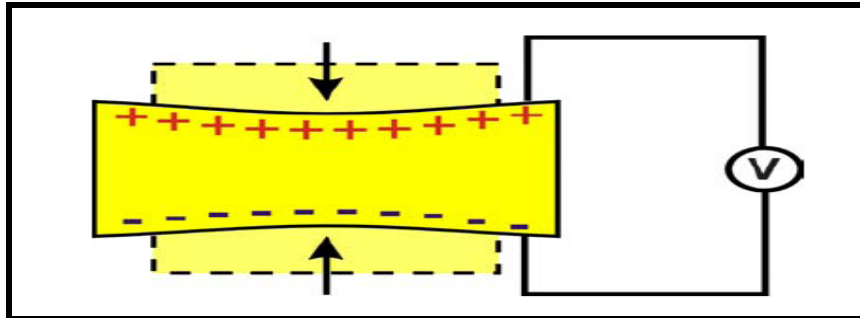


Figura 5. Principios de la medición del cambio en la presión con un cristal piezoeléctrico (Hidrófono). Debido al cambio que ocurre en el voltaje del material.

- Streamer (Figura 6); En general son utilizados varios canales en la sísmica reflexión marina. Por esta razón varios hidrófonos son ubicados a distancias específicas en un *streamer*. Cerca de los hidrófonos está presente un sensor de presión, el cuál mide la profundidad de suspensión, y si el *streamer* se desvía del nivel requerido los ángulos de los alerones (tail bouy) son empleados para nivelar. Los *streamers* están llenos en general con un aceite especial el cual se adapta a la densidad del agua. Como las mediciones en tierra, varios *streamer* con diferentes longitudes y diferentes canales son empleados. El número de canales puede variar desde 48 a 600 con variación promedio de 12.5 metros.

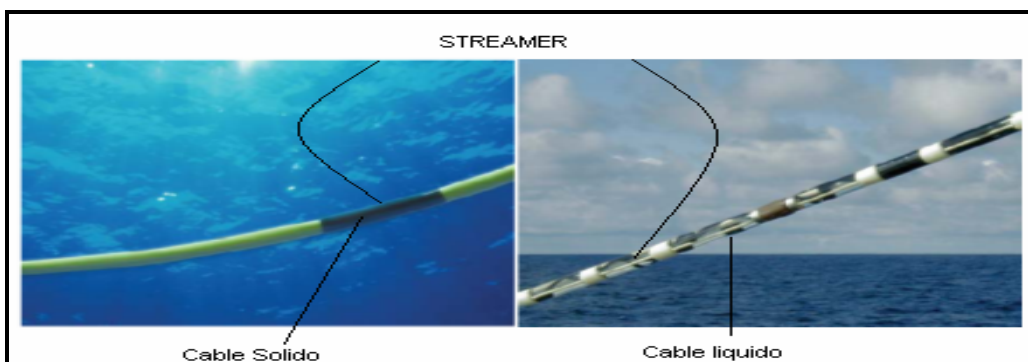


Figura 6. Tipos de *streamer*.

- *Tail bouy*; Corresponde a la balsa que le da estabilidad al *streamer*. (Figura 7).

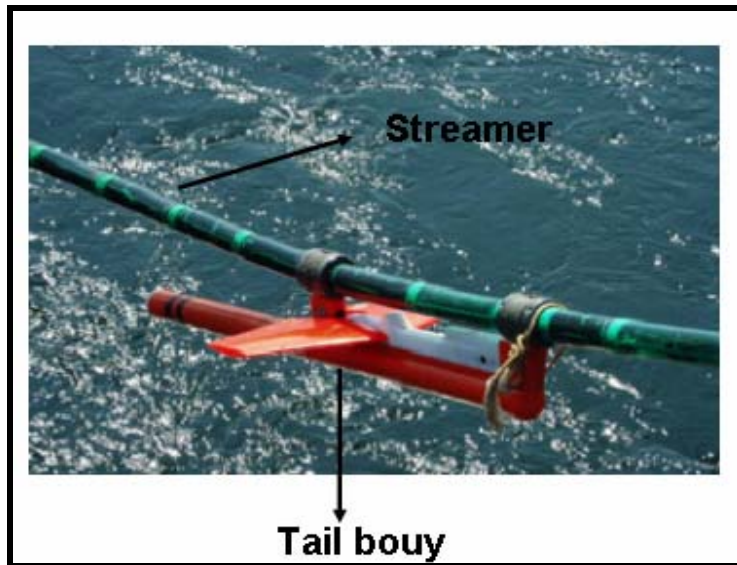


Figura 7. Tail bouy.

- Barco (Figura 8); Lugar donde se registra la información captada por los hidrófonos en ella se realiza un pre-procesamiento con el objetivo de realizar control de calidad a los datos.



Figura 8. Sistema de registro.

3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS SÍSMICOS DE REFLEXIÓN

El procesamiento consiste en la elección y posterior aplicación de los parámetros y algoritmos de tratamiento adecuados a los datos sísmicos adquiridos en el campo (datos brutos) con el fin de obtener secciones sísmicas de calidad. El objetivo fundamental de todo procesamiento es aislar en los registros las reflexiones de interés de los otros eventos sísmicos que se superponen a ellas (ruido ambiental, múltiples, reverberaciones, fantasmas) (Gaya, M., 2004).

Elementos importantes en procesamiento;

1. Seleccionar una secuencia correcta de pasos de procesamiento para información de campo.
2. Seleccionar un conjunto apropiado de parámetros para cada paso de procesamiento.
3. Evaluar los resultados obtenidos a partir de cada paso del procesamiento, para que esa manera diagnosticar cualquier problema causado por la inapropiada selección de los parámetros.

Según Yilmaz, O. (1988) el procesamiento sísmico está comprendido en tres etapas: pre-apilado, apilado y pos-apilado (Figura 9).



Figura 9. Etapas del Procesamiento Convencional.

3.3.1. Pre-Apilamiento

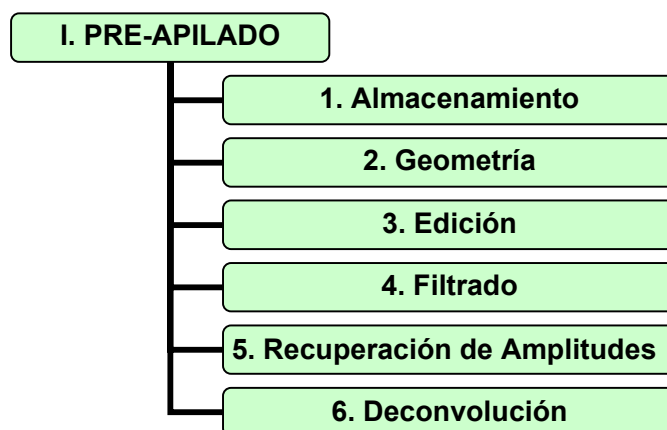


Figura 10. Primera Etapa del Procesamiento Convencional.

3.3.1.1. Almacenamiento: Los datos de campo son grabados en un formato conocido como SEG-D, este formato debe ser posteriormente convertido a un formato SEG-Y⁸ el cual es compatible con los programas de procesamiento empleados.

3.3.1.2 Geometría: El siguiente paso es configurar la geometría de adquisición, es decir asignar a cada punto de tiro y de recepción, sus coordenadas correspondientes, así como otras características como el offset⁹, el azimuth¹⁰ entre otras. Para ésta labor se necesita contar con los archivos Ukooas¹¹ y el reporte del observador elaborados por la compañía que realiza la adquisición. Estos archivos contienen información referente a la adquisición; coordenadas, estaciones vivas, canales, estacas desplazadas, observadores, etc.

⁸ SEG-Y: Creado por la Sociedad de Exploración Geofísica. Es el formato estándar más utilizado para el almacenamiento de datos sísmicos

⁹ offset: Es la distancia entre la fuente y el receptor.

¹⁰ Azimuth: Es el ángulo medido entre una línea de la superficie de la Tierra y el meridiano geográfico.

¹¹ Ukooas: Es el formato estándar que emplea el Reino Unido para el manejo de los datos sísmicos 2D.

Esta etapa es de suma importancia ya que muchos tipos de problemas en el procesamiento se originan de la configuración incorrecta de la geometría de campo en el sistema de procesamiento. Independientemente del cuidado con que sean escogidos los parámetros de procesamiento, la calidad de una sección sísmica apilada puede dañarse severamente por la introducción de una geometría de campo incorrecta (Medina, H., 2004).

3.3.1.3 Edición: Consiste en la eliminación de trazas contaminadas con ruido que no es posible atenuarse con los métodos de procesamiento existentes, éstos problemas son frecuentemente ocasionados por el mal funcionamiento de los equipos de adquisición o agentes externos.

3.3.1.4. Filtrado: Consiste en atenuar el ruido y resaltar los eventos de reflexión. Los filtros por lo general, operan sobre el dominio de la frecuencia y la amplitud de las trazas. Los principales tipos de filtros son:

| TIPOS DE FILTROS | |
|-------------------------|---|
| Proceso | Descripción |
| Filtro Pasa-Banda | Tiene como finalidad dejar pasar la señal en una banda limitada de frecuencias de manera que se aceptan las frecuencias que contienen la energía de reflexión coherente y se rechazan aquellas frecuencias asociadas a ruido sísmico. |
| Filtro F-K | Este tipo de filtro es útil para eliminar el ruido coherente. |

Tabla 1. Tipos de Filtro.

3.3.1.5. Recuperación de Amplitudes: En la mayoría de los casos la amplitud de la señal sísmica decae con el incremento del tiempo de tránsito. Para obtener una imagen real, este decaimiento debe ser compensado. Dentro de los principales procesos se encuentran;

| RECUPERACIÓN DE AMPLITUDES | |
|---|--|
| Proceso | Descripción |
| Control de Ganancia Programada (PGC) | Consiste en asignar un valor predefinido a los datos. Se le calcula el inverso de la envolvente de la traza (curva que une los picos de las trazas) de manera que al aplicar esta relación se corrige el decaimiento de la amplitud. |
| Control de ganancia automática (AGC) | Se obtiene calculando el valor medio (o promedio absoluto) de la amplitud dentro de una ventana específica de tiempo, luego se obtiene la relación entre el valor RMS deseado y el promedio antes calculado. Este escalar es asignado a la función de ganancia la cual se aplica a cada muestra dentro de una ventana de temporal elegida. |
| Corrección de amplitud por divergencia esférica | El objetivo es reconstruir las amplitudes debido al decaimiento del frente de onda con la distancia. |

Tabla 2. Recuperación de Amplitudes.

3.3.1.6. Deconvolución: La deconvolución puede ser aplicada en las diferentes etapas del procesamiento, es un algoritmo que se utiliza con el fin de aumentar la resolución temporal de las reflexiones. Para comprender la deconvolución, primero necesitamos examinar el proceso de construcción de la traza sísmica. La cuál supone que la tierra está compuesta por capas de roca de diferente litología y propiedades físicas. En la sísmica las capas de roca se definen por las densidades y velocidades con las cuales las ondas sísmicas se propagan a través de ellas. El

producto de estas dos: densidad y velocidad es conocido como impedancia acústica (Figura 11).

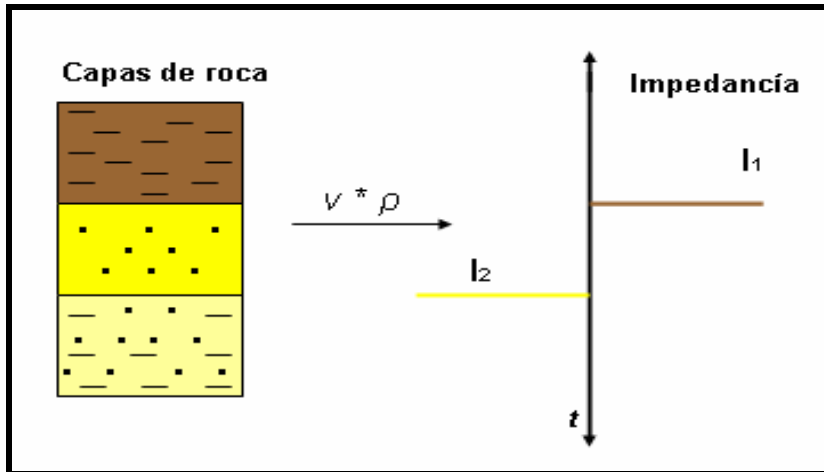


Figura 11. Impedancia.

El contraste de impedancia acústica entre capas de roca adyacentes causa las reflexiones. La señal sísmica puede considerarse como la convolución de la ondícula fuente con la respuesta de la tierra (Figura 12). Esta respuesta incluye algunos efectos indeseados como múltiples, reverberaciones, fantasmas entre otros.

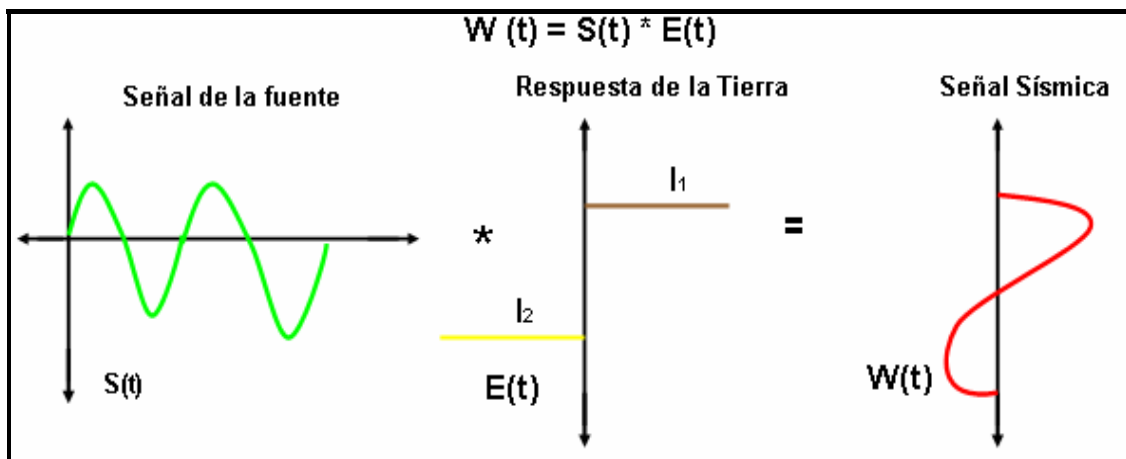


Figura 12. Definición de señal sísmica.

El objetivo de la deconvolución es el de estimar la secuencia reflectiva terrestre por medio del diseño y aplicación de filtros inversos que remueven la ondícula emitida

por la fuente. Después de la deconvolución la información mejora su resolución temporal.

De acuerdo con el objetivo, existen dos tipos diferentes de deconvolución, Yilmaz (2000).

- **Deconvolución Impulsiva;** Es utilizada, generalmente, para alargar el espectro de frecuencia de las trazas sísmicas. Un problema serio de esta deconvolución es que ella invierte la relación original de amplitud entre las trazas, haciendo con que las trazas mas fuertes se torner mas débiles y viceversa.
- **Deconvolución Estadística;** Su función es eliminar ruido del tipo periódico, por ejemplo, las reflexiones múltiples. Este concepto deriva del factor que los coeficientes de la función de reflectividad no son predecibles, mientras que los coeficientes de los eventos indeseados, de naturaleza convolutiva, siguen la ley de formación.

En relación a la utilización de la deconvolución predictiva, se podrían decir que las reflexiones son también predecibles; este puede ser el caso de un mecanismo de deposición cíclico. No obstante, este tipo de deposición no es encontrado frecuentemente y, por tanto, desconsiderado en la práctica. Mientras que el filtro predictivo revela la componente predecible (las reflexiones múltiples) del sismograma, la parte no predecible restante, (o sea, el error de la serie), representa, esencialmente, las reflexiones primarias.

3.3.2. Apilamiento

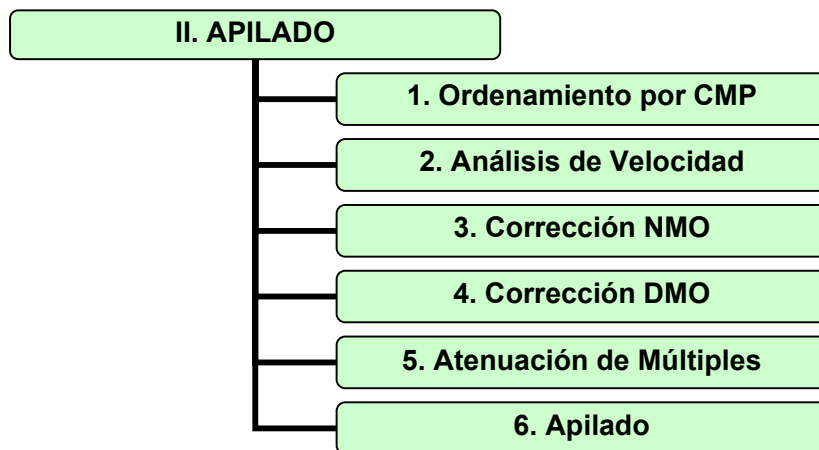


Figura 13. Segunda Etapa del Procesamiento Sísmico

3.3.2.1. Ordenamiento por CMP: Este ordenamiento se realiza en superficie y consiste en agrupar las trazas que por geometría pertenecen a un mismo punto medio entre una fuente y un receptor determinado (Figura 14).

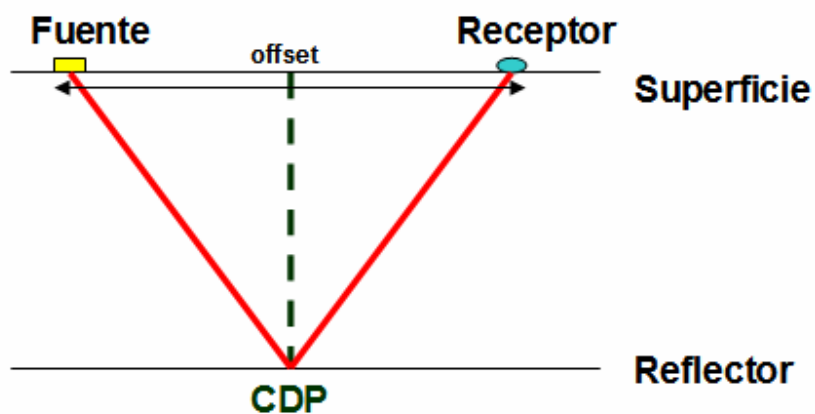


Figura 14. Ordenamiento CMP.

3.3.2.2. Análisis de velocidad: Ésta etapa se realiza sobre un conjunto o grupo de CMP determinados (Figura 15); el resultado del análisis es un campo de velocidades, que se usará en el apilamiento para obtener una sección sísmica; velocidad versus el tiempo (Yilmaz, O., 1988). Cuando hay poca precisión en el establecimiento de las velocidades de reflexión, la calidad de la sección apilada puede degradarse, ya que las reflexiones no se suman coherentemente.

3.3.2.3. Corrección NMO¹²: Por efecto de offsets diferentes a cero obtenemos trayectorias hiperbólicas de los eventos de reflexión, lo cual es observado debido a la diferencia que existe entre el tiempo t_0 ; tiempo en una sección offset cero y el tiempo t ecuación (1) que es el tiempo de llegada para cualquier offset; la corrección NMO elimina esta diferencia de tiempo ($t - t_0$) y los eventos se horizontalizan (Figura 16) de ésta forma las trazas ya no son dependientes del offset y pueden ser sumadas.

$$(1): \Delta t_{nmo} = t - t_0$$

¹²NMO (Del inglés Normal Moveout Out); Hace referencia a la corrección que se realiza al tiempo de tránsito debido al efecto del offset.

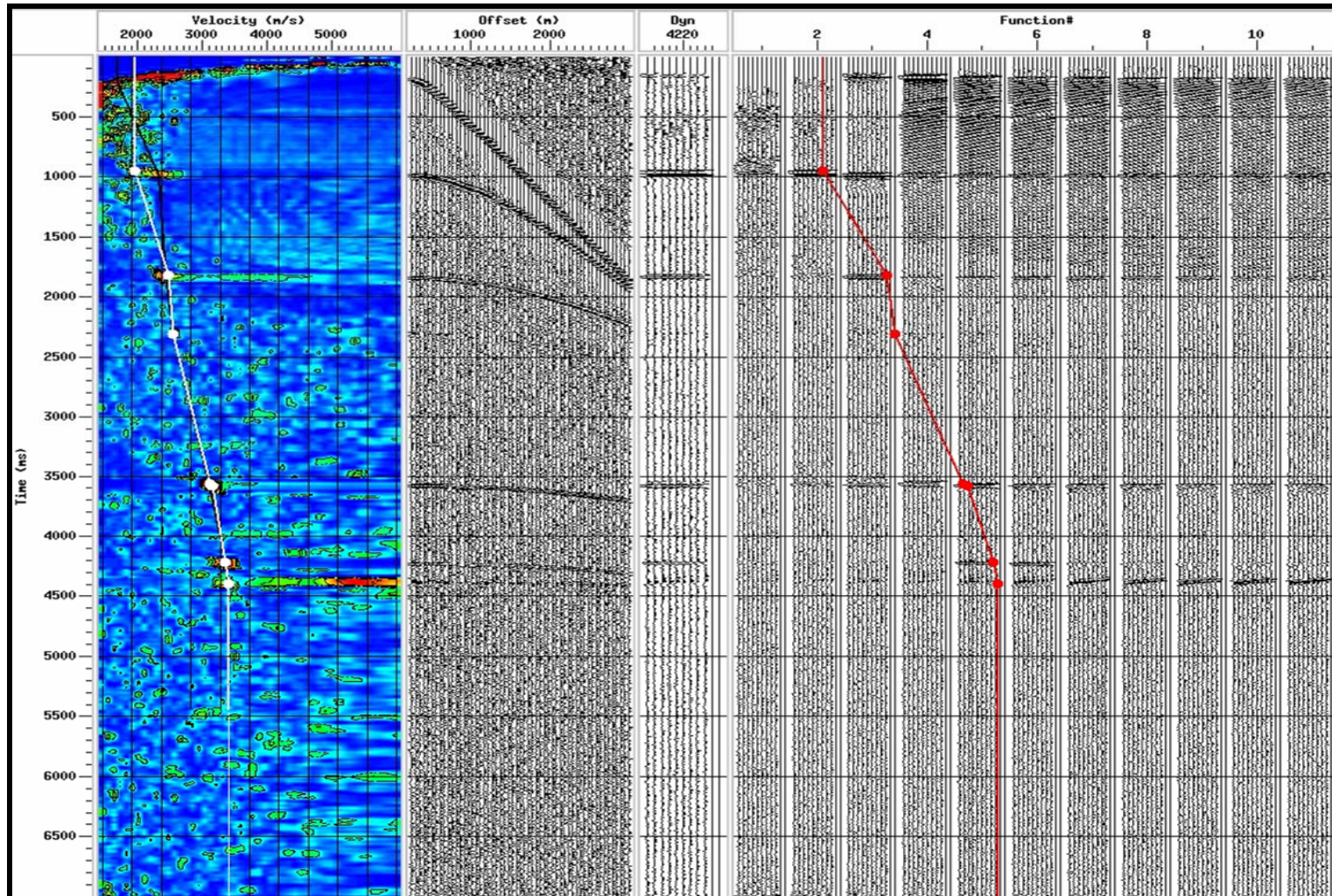


Figura 15. Análisis de Velocidad (de izquierda a derecha); Espectro de velocidad, CMP, Dynamic stack, Apilados a velocidad constante.

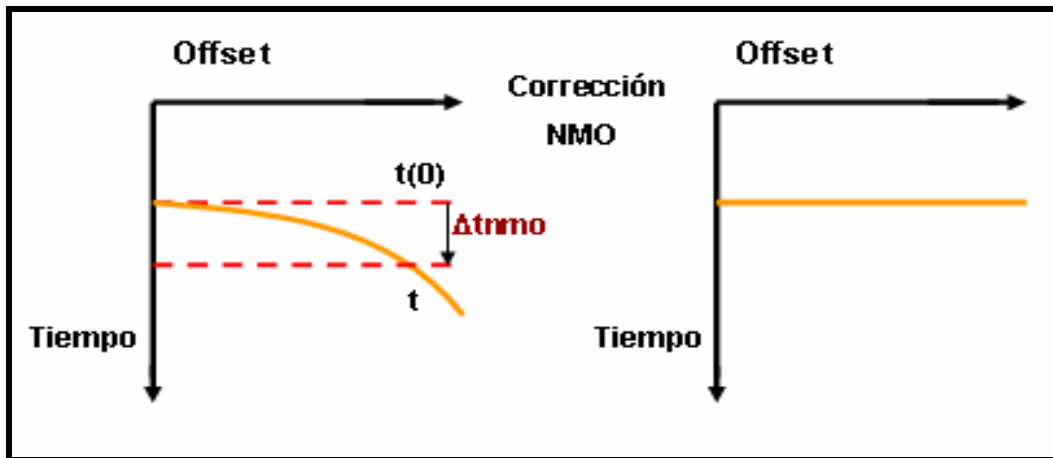


Figura 16. Efecto Hiperbólico debido al offset y corrección NMO.

Para el caso de un único reflector plano que separa dos medios homogéneos, la hipérbola de reflexión puede ser corregida de forma exacta, es decir, la dependencia a la distancia fuente receptor puede ser eliminada siempre y cuando la velocidad usada arriba del reflector sea la correcta como se muestra en la ecuación (17). No obstante sí la velocidad empleada es mayor que la del medio, entonces la hipérbola no es completamente horizontalizada y ocurre una subcorrección y si se emplea una velocidad menor que la del medio ocurre una sobrecorrección (Figura 17).

$$(18): \quad t^2(x) = t(0)^2 + \left(\frac{x}{v}\right)^2$$

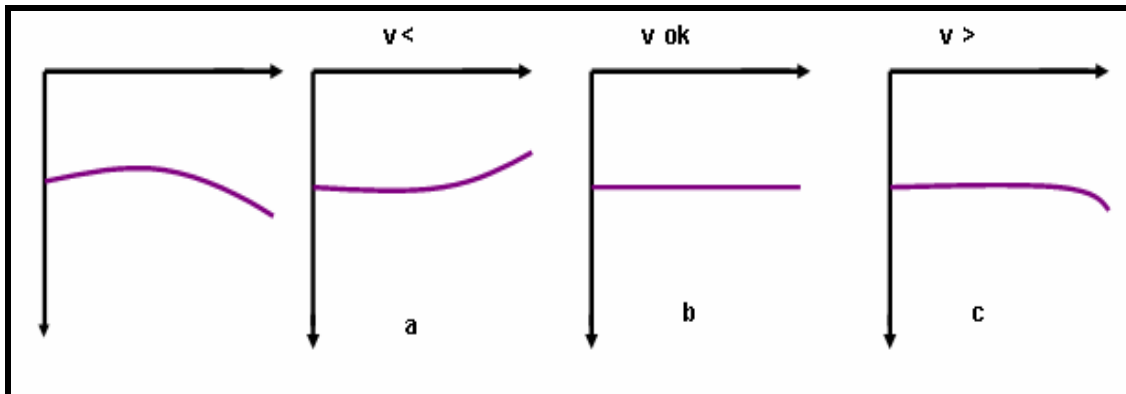


Figura 17. Corrección NMO: (a) Corrección tomada en base a una velocidad inferior a la correcta. Ocurre sobrecorrección. (b) Corrección tomada en base a una velocidad igual a la velocidad NMO entonces se horizontalizan los eventos. (c) Corrección tomada en base a una velocidad superior a la correcta entonces ocurre subcorrección.

3.3.2.4. Corrección DMO¹³; Debido a que la corrección NMO se basa en un modelo de capas horizontales y la geología está compuesta de estratos con buzamientos. En este caso las trazas de una familia CMP poseen puntos diferentes de reflexión; esto es conocido como dispersión del punto de reflexión y como consecuencia el ápice de la hipérbola de reflexión es desplazado horizontalmente.

El proceso de DMO (Figura 18) tiene por objetivo la corrección de los errores del apilamiento NMO debido al buzamiento de los reflectores. Este supone la ecuación de sobretiempo en partes como se muestra en la ecuación (19); los dos primeros términos de la ecuación representan el sobretiempo normal de reflexión correspondiente a los reflectores sin buzamiento es decir corrección NMO. La segunda parte está constituida por el tercer término de la ecuación que representa el sobretiempo adicional relativo a las reflexiones correspondientes a los reflectores con buzamiento es decir corrección DMO, al contrario de la corrección NMO que está restringida a un solo dominio CMP, la corrección DMO es aplicado en un dominio en el cual los buzamientos pueden ser reconocidos como por ejemplo, el dominio offset-común.

¹³DMO (Del inglés Dip Move Out).

$$(19): t^2(h) = t_o^2 + \frac{4h^2}{v^2} - \frac{4h^2}{v^2} \sin^2(\theta)$$

En la ecuación (19), θ indica el buzamiento del reflector, v es la velocidad del medio arriba del reflector y h es la media distancia fuente-receptor.

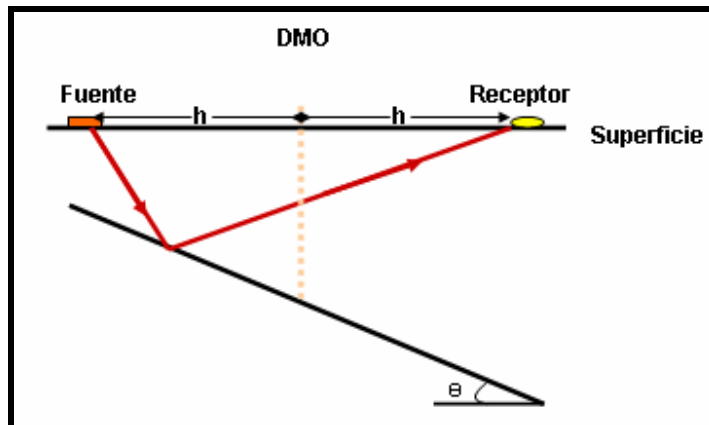


Figura 18. Trazado de rayo para un reflector con buzamiento.

Propiedades de la corrección DMO;

- La corrección no posee ningún efecto para los datos en Offset Cero ($h = 0$).
- La corrección será mayor en tanto sea mayor el buzamiento.
- Cuanto menor es la velocidad, mayor es la corrección. Esto también implica que para los eventos más someros, éste término es más significativo, una vez que las velocidades más bajas son encontradas (Gamboa, J. F., 2003).

3.3.2.5. Atenuación de múltiples: Los múltiples pueden ser definidos como un evento sísmico que sufre más de una reflexión ascendente (Figura 19). La energía del múltiple resulta, entre otros factores, de la intensidad de los coeficientes de reflexión: cuanto mayor es el contraste de impedancia entre las interfaces envueltas, más fuertes serán los múltiples generados.

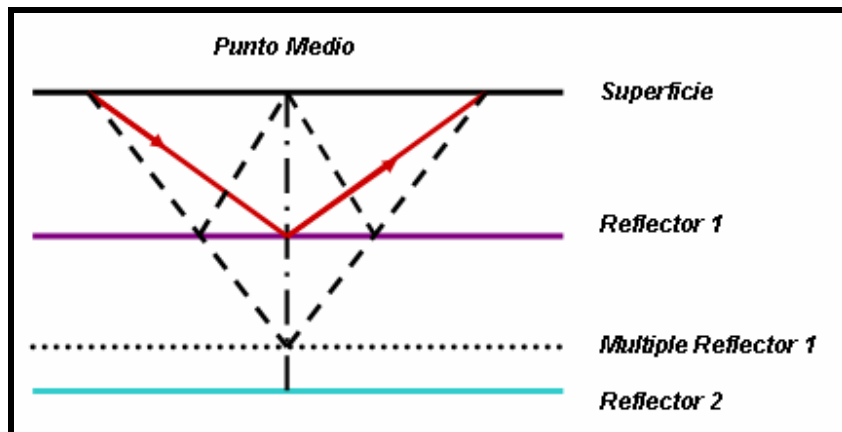


Figura 19. Esquema que muestra la geometría del múltiple.

La Figura 19 muestra una sencilla situación donde una parte de la energía es reflejada y vuelta a la superficie del reflector, rebota en la superficie de nuevo desde la interfase. El rayo que viaja descendientemente será reflejado de nuevo por el reflector más profundo y retornará a la superficie para ser registrado por los geófonos. Los geófonos por lo tanto reciben la señal dos veces del mismo reflector sísmico.

- **Clasificación de los múltiples**, los múltiples pueden ser clasificados (Figura 20) de acuerdo a,
 - ❖ Su recorrido en: Múltiples de corto y largo período.
 - ❖ Su simetría en: Asimétricos y simétricos.
- **Otra clasificación de múltiples**, son los múltiples de superficie libre y múltiple interna. Los múltiples de superficie libre se dan en la primera interfase es decir la interfase tierra/aire o agua/aire a ésta interfase agua/aire se asocia

con los múltiplos del fondo del mar. Múltiples internas o interestratificadas son aquellos que ocurren entre los estratos más profundos. (Figura 21).

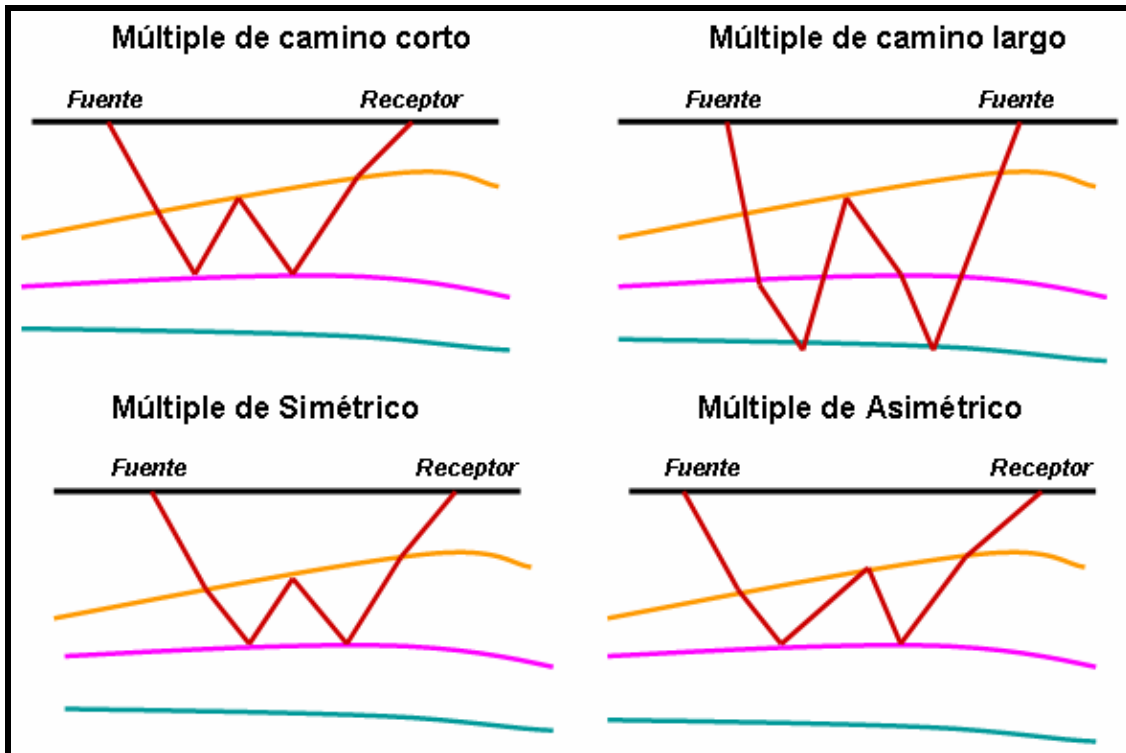


Figura 20. Clasificación de los Múltiples.

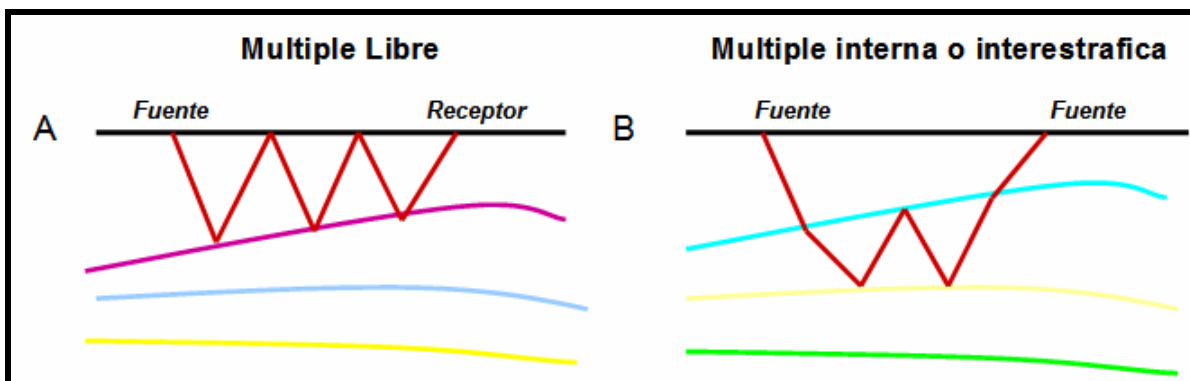


Figura 21. Otra clasificación de múltiplos; (a) Múltiple libre, (b) Múltiple interna o interestratificada.

- **Propiedades de los múltiplos**, una de las propiedades más importantes de los múltiplos hace referencia al tiempo de tránsito o moveout porque para un mismo tiempo de tránsito a Offset Cero (OC) los múltiplos presentan mayor

moveout que las primarias por consiguiente las velocidades de los múltiples serán más bajas en relación a los otros eventos (Figura 22).

- **Algunas técnicas para la atenuación y/o eliminación de los múltiples,** para eliminación y/o atenuación de las reflexiones múltiples existen varias técnicas las más comunes son: deconvolución, atenuación de múltiples en el dominio CMP, Transformada Slant Stack, Transformada Radón entre otras. Información más detallada sobre estas técnicas Yilmaz (1987).

- ❖ **Transformada Radón,** (Gamboa, J. F., 2003) Transformada Radón utiliza datos en el dominio tiempo-moveout donde se puede generar la energía de las primarias. La energía restante de los múltiples, puede ser entonces sustraída de los datos. La Transformada de Radón distingue las primarias de los múltiples con base en la diferencia entre los moveout que presentan los dos tipos de reflexión. La transformada es aplicada a los datos en la configuración CMP y corregidos por NMO usando las velocidades de reflexión primarias.

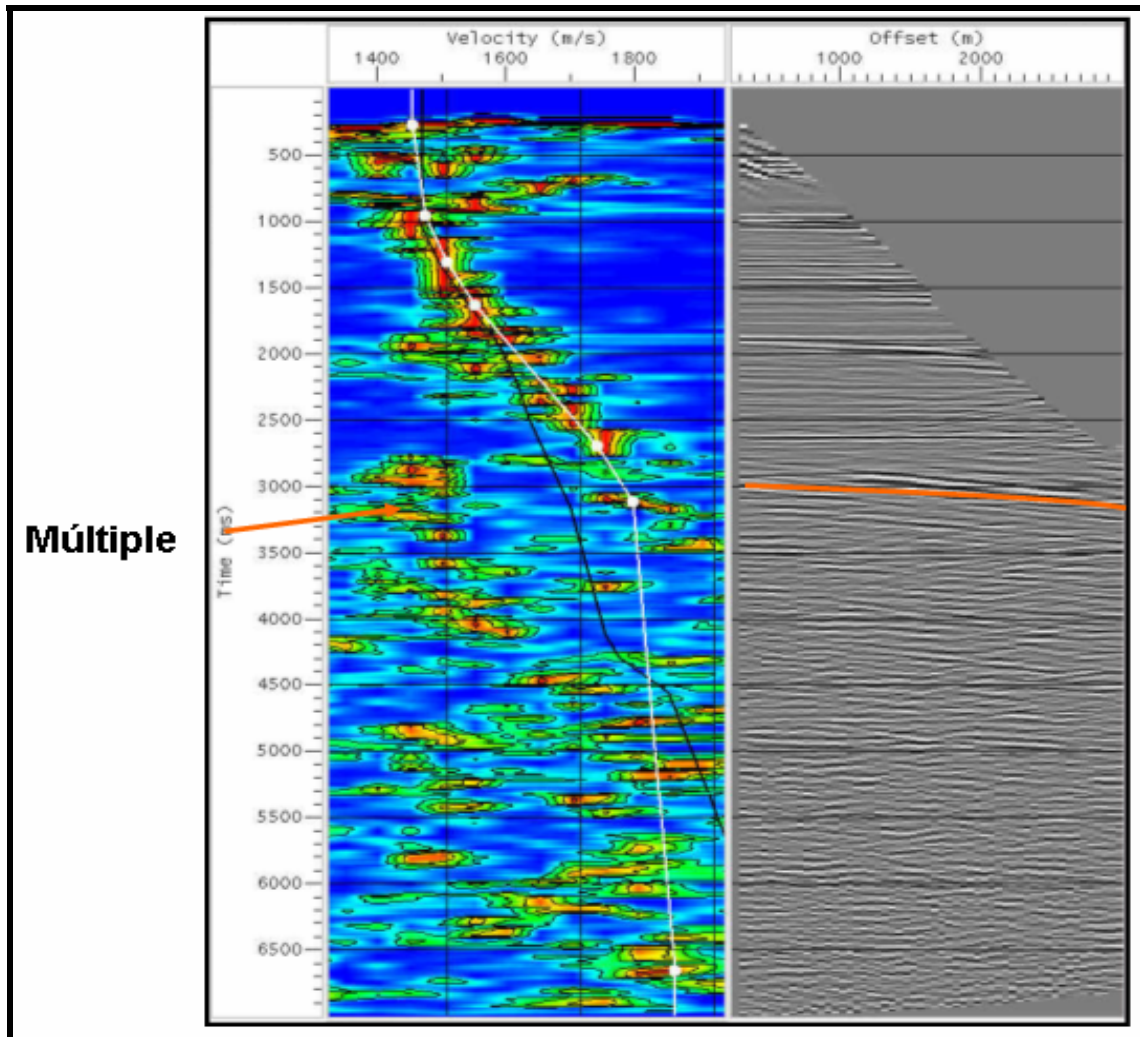


Figura 22. Análisis de Velocidad; Panel de velocidad o Semblance¹⁴ donde se observa un tren de velocidades, la velocidad más baja a la cual se ubica por fuera del tren de velocidades corresponde a la velocidad del múltiple del fondo del mar. En la imagen de la derecha observamos los eventos con la corrección NMO, note que el múltiple se observa con geometría parabólica.

3.3.2.6 Apilamiento: Con los resultados del análisis de velocidad y una vez aplicadas las correcciones NMO se procede mediante la suma promedio, a obtener la sección sísmica (Figura 23).

¹⁴ Semblance: Panel de velocidad que contiene las velocidades rms de la sección sísmica. Semblance es una medida de la coherencia multicanal (Sheriff, R., 1984).

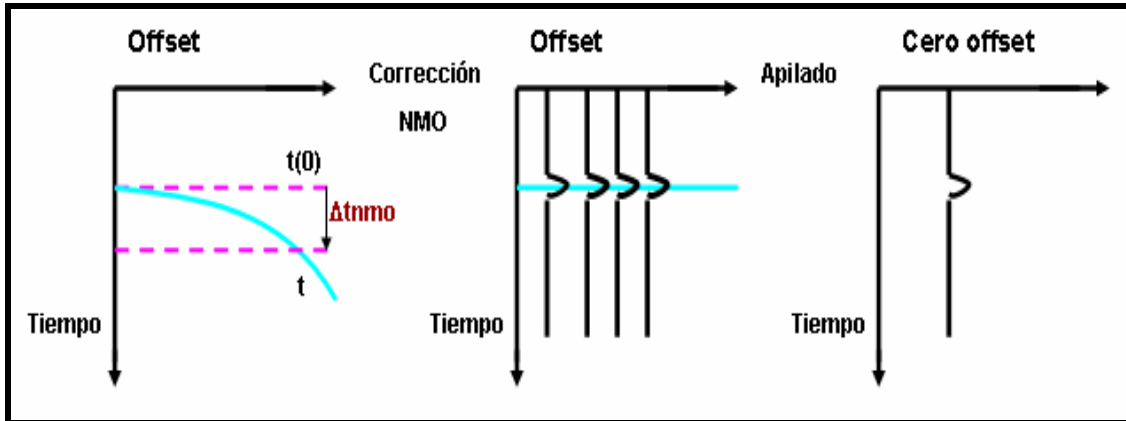


Figura 23. Apilamiento; Sección sísmica apilada en el dominio de los puntos medios comunes.

3.3.3. Pos-Apilamiento (Figura 24)

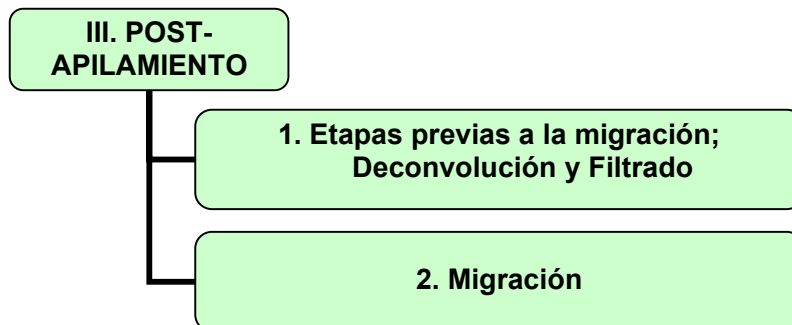


Figura 24. Tercera Etapa de Procesamiento Convencional.

3.3.3.1 Etapas previas a la migración: Por lo general, una secuencia de procesamiento pos-apilado incluye TvSw y la deconvolución predictiva para suprimir las reverberaciones y múltiples de período cortó. Adicionalmente suele aplicarse filtros como por ejemplo,

- Pasa Banda para eliminar el ruido asociado a bajas y altas frecuencias generadas en el apilamiento.

- Ganancia en la Amplitud se aplica una ganancia a los datos dentro de una ventana temporal elegida.

3.3.3.2. Migración: En áreas con estructuras complejas, los reflectores con buzamiento pronunciado aparecen sobre las secciones sísmicas en posiciones considerablemente alejadas respecto a sus verdaderas posiciones. Por lo cuál es necesario emplear un proceso que se aplica para corregir las difracciones colapsándolas y reubicando la energía en su verdadera posición (Yilmaz, O., 1988).

Existen varias clase de migración; la migración en tiempo que se aplica para zonas con ausencia de fuertes variaciones laterales en el campo de velocidad (Tabla 3) y la migración en profundidad corrige las reflexiones donde se presenta abruptas e importantes variaciones laterales y verticales en el campo de velocidad.

En la figura 25 (I) se aprecia la corrección de los reflectores a sus posiciones verdaderas, se logra destacar en los anticlinales una apariencia menos amplia (A) y los sinclinales con un aspecto más amplio (C), el proceso de migración tiene por defecto agregar más ruido a los datos pero tiene la ventaja de remover otros artefactos causados por los sinclinales como por ejemplo el corbatín presente debajo del sinclinal (B). La presencia de sonrisas (D).

| TIPOS MÁS COMUNES DE MIGRACION EN TIEMPO POS-APILADO | |
|---|--|
| Tipo | Discusión |
| Migración Kirchhoff | Trata con efectividad buzamientos de hasta 90 grados y produce migraciones confiables en presencia de cambios verticales y laterales de velocidad. |
| Migración en diferencia-finita | Este método resuelve con mayor eficacia los problemas de variación lateral de velocidades pero solo se pueden trabajar con aproximación de ángulos hasta de 75 grados. |
| Migración en el dominio frecuencia-número de onda | Al igual que en el método kirchhoff trata buzamientos hasta de 90 grados con buena aproximación pero su uso está condicionado a zonas con variación de velocidad únicamente en dirección vertical. |

Tabla 3. Tipos de Migración en Tiempo (Medina, H., 2004).

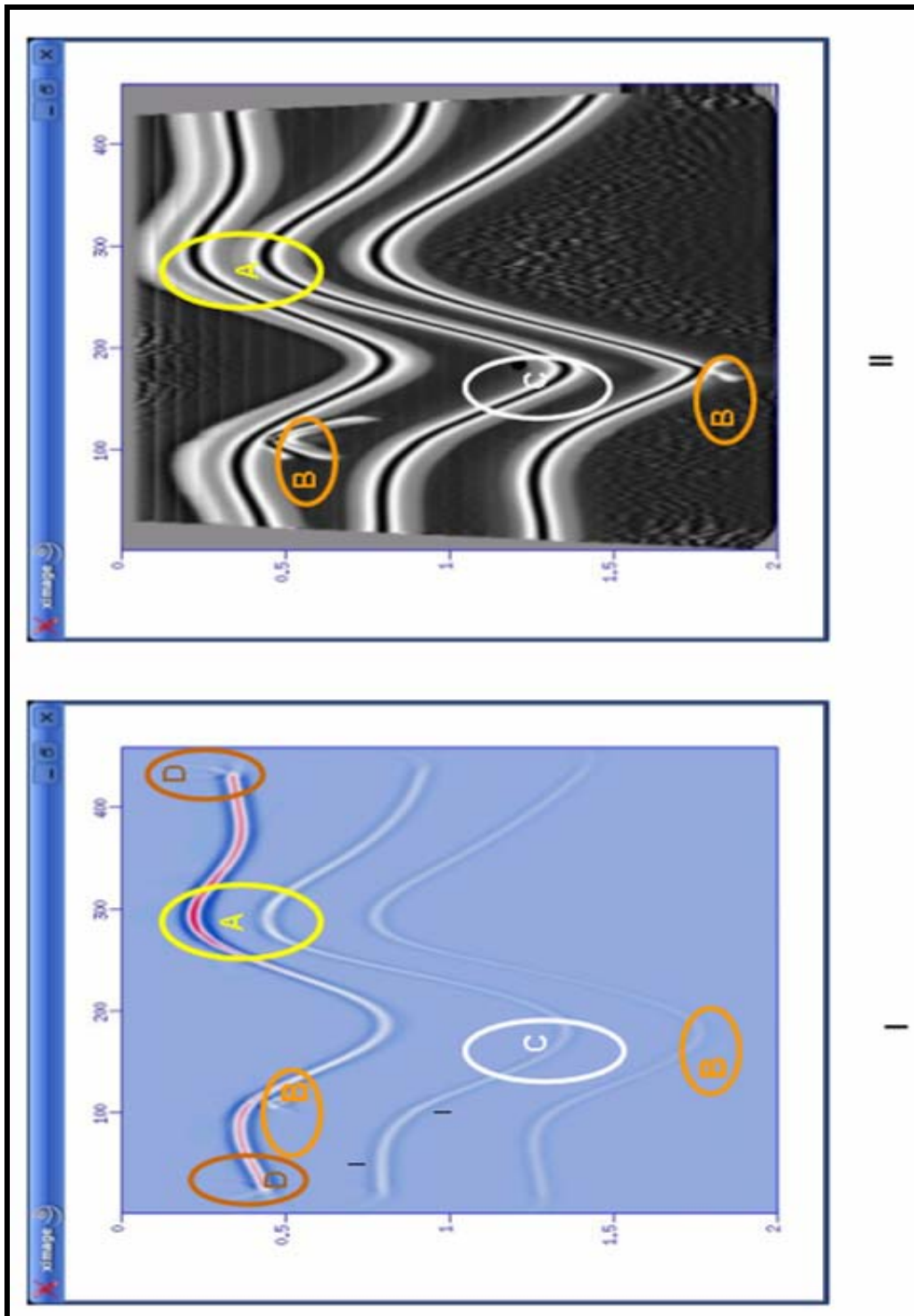


Figura 25. (I) Imagen Migrada, (II) Imagen Apilada

3.4. APILADO EN CRS

3.4.1. Teoría

La técnica de apilado CRS describe una transformación de los datos de reflexión (pre-apilados) de 2D en una sección apilada offset cero simulada. La transformación que emplea la técnica se basa en datos derivados del operador de apilamiento espacial CRS, el cual incluye el modelo de velocidad como lo emplea la técnica NMO/DMO en su forma convencional (Figura 26).

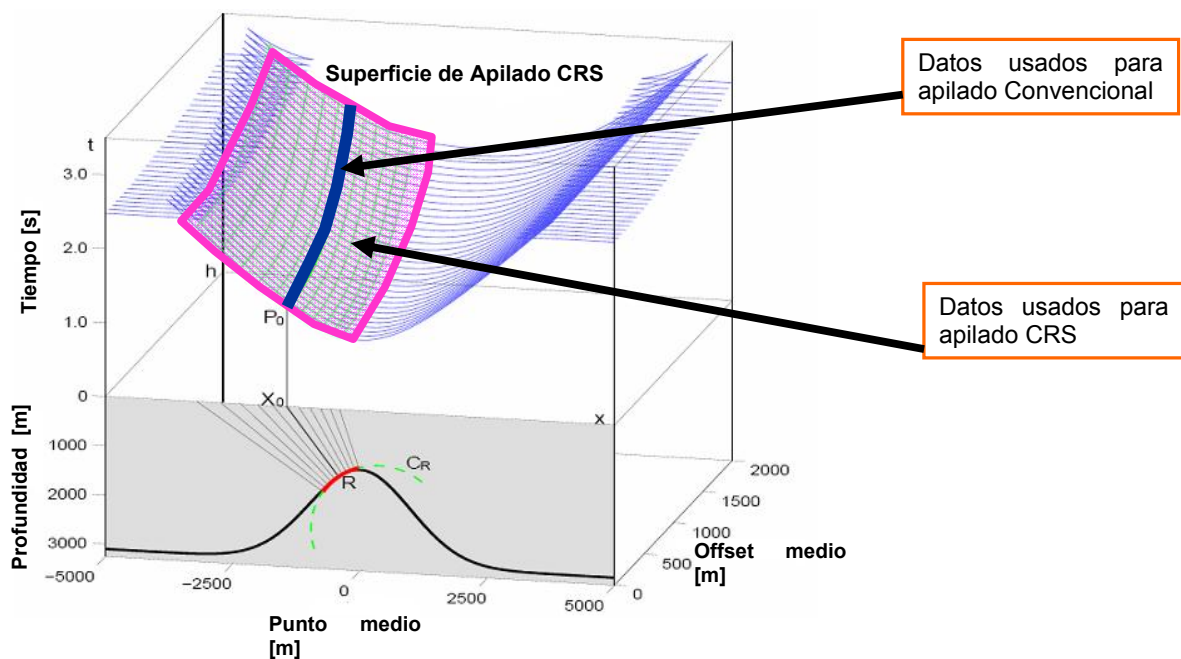


Figura 26. Muestra el operador superficial CRS en contraste con los datos lineales que toma NMO/DMO (Tomado de Jäger, R., 1999).

A mediados de los 80's (Hubral, P., 1983) realizó ciertos experimentos hipotéticos utilizando un modelo de tres capas homogéneas. En los experimentos obtenía dos frentes de onda, estos frentes de onda son de las ondas que se observan en las figuras 27 y 28, los cuales se generan considerando un punto NIP sobre la segunda

interfase asociada con un rayo de incidencia normal emergente en la ubicación de X_o sobre la superficie.

Una onda (Eigen wave, Hubral, P., 1983) es obtenida por ubicar una fuente puntual en NIP que genera la conocida onda del punto de incidencia normal (NIP) la cual se dirige hacia arriba (Figura 27, frentes de onda dirigidos). Un experimento del reflector explotante genera la segunda onda (Eigen wave Hubral, P., 1983) que se dirige hacia arriba llamada la onda normal (N) (frentes de onda son descritos de nuevo figura 28). En una vecindad de X_o ambos frentes de onda se aproximan en círculos con el radio de curvatura R_{NIP} de la onda NIP, y el radio de curvatura R_N de la onda normal (Mann, J., et al, 2000).

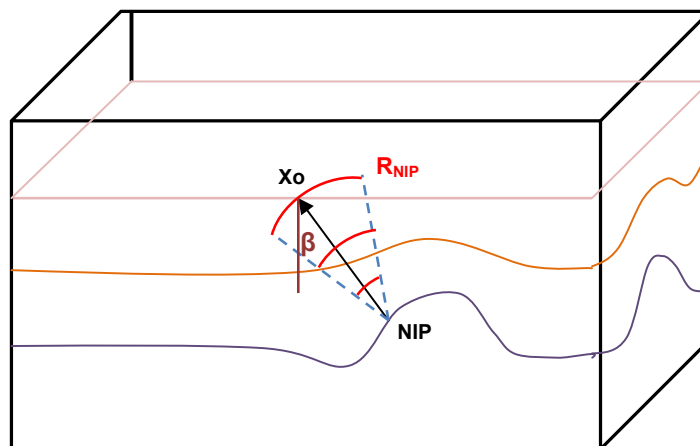


Figura 27. Experimento que genera los frentes de onda R_{NIP} , producidos por una fuente puntual ubicada en el punto NIP. Los frentes de onda son descritos en rojo. El rayo de incidencia normal (negro) es reflejado en el punto NIP.

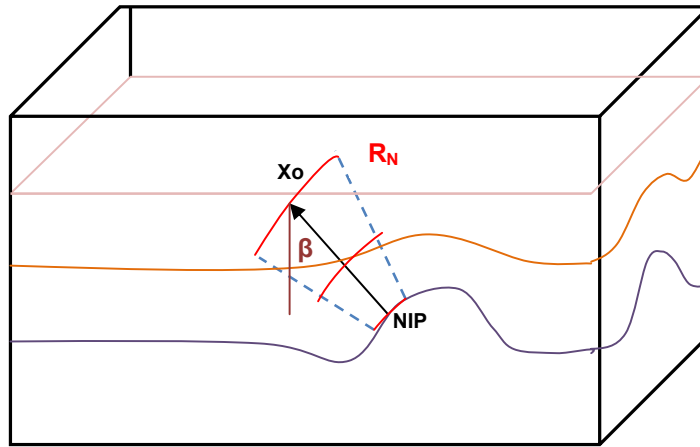


Figura 28. Experimento que genera los frentes de onda normal R_N , producidos por el experimento de un reflector explotante. Los frentes de onda son descritos en rojo. El rayo de incidencia normal (negro) es reflejado en el punto NIP.

El método se implementa por medio de la expansión de la ecuación de Taylor (ecuación 4) y ésta se deriva de la teoría del rayo paraxial (Schleider et al., 1993; Tygel et al., 1997) así:

$$(4): t^2(x_m, h) = \left[\left(t_o + \frac{2\text{Sen}\beta}{v_o} \right) \times (X_m - X_o) \right]^2 + \frac{2t_o \text{Cos}^2\beta}{v_o} \times \left[\frac{(X_m - X_o)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{\text{NIP}}} \right]$$

La distancia media entre fuente y receptor se denota con h , mientras que X_m denota el punto medio entre fuente y receptor. El método requiere de un parámetro conocido, la velocidad cercana a la superficie v_o . La muestra respectiva de la traza offset cero a ser simulada está definida por (t_o, X_o) .

Estudios realizados con la técnica CRS empleando distintas aproximaciones del operador, se ha encontrado que la aproximación hiperbólica, de t^2 , es más adecuada que la aproximación parabólica de t (Schleicher et al., 1993).

El operador CRS, es una aproximación que brinda buenos resultados para desplazamientos pequeños. Sin embargo, la implementación de la técnica de apilado CRS necesita que se fijen límites a los desplazamientos del punto medio $(X_m - X_o)$, y

a la distancia media entre fuente-receptor (h), pero estas condiciones son dadas por el usuario. A éstos límites se les conoce como **aperturas** (Gamboa, J. F. 2003).

Dentro del flujo de procesamiento convencional, se encuentra la etapa de apilamiento explicada en el siguiente diagrama de flujo (Figura 29).

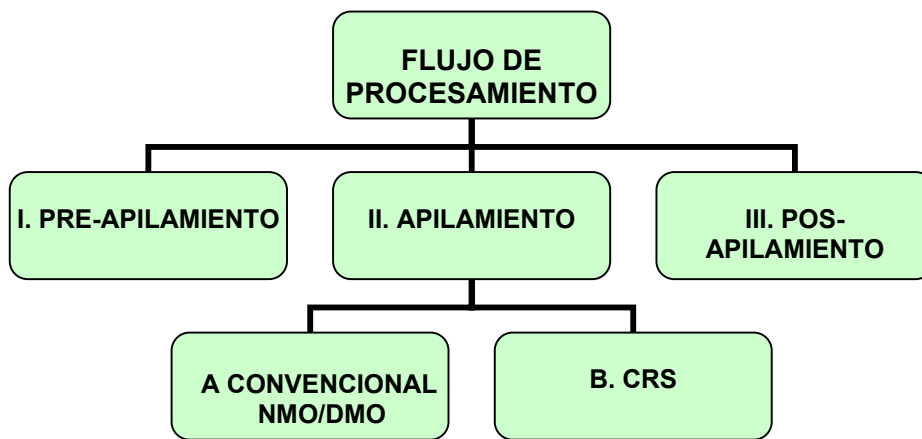


Figura 29. Etapas del procesamiento convencional.

3.4.2. Apilado CRS

La técnica de apilado CRS de la misma manera que la técnica convencional NMO/DMO posee unas subetapas, las cuales se describirán en el siguiente diagrama de flujo (Figura 30 y 31),

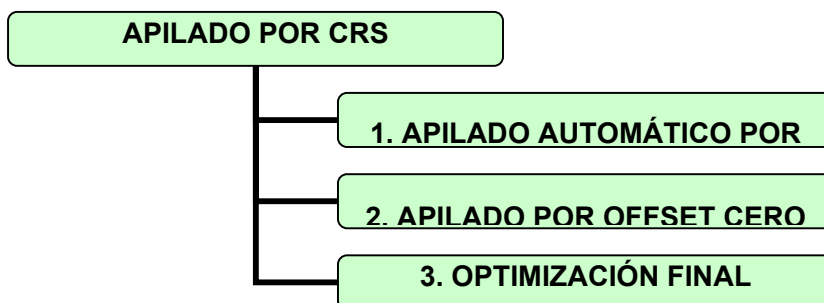


Figura 30. Etapas que realiza CRS dentro de su procesamiento.

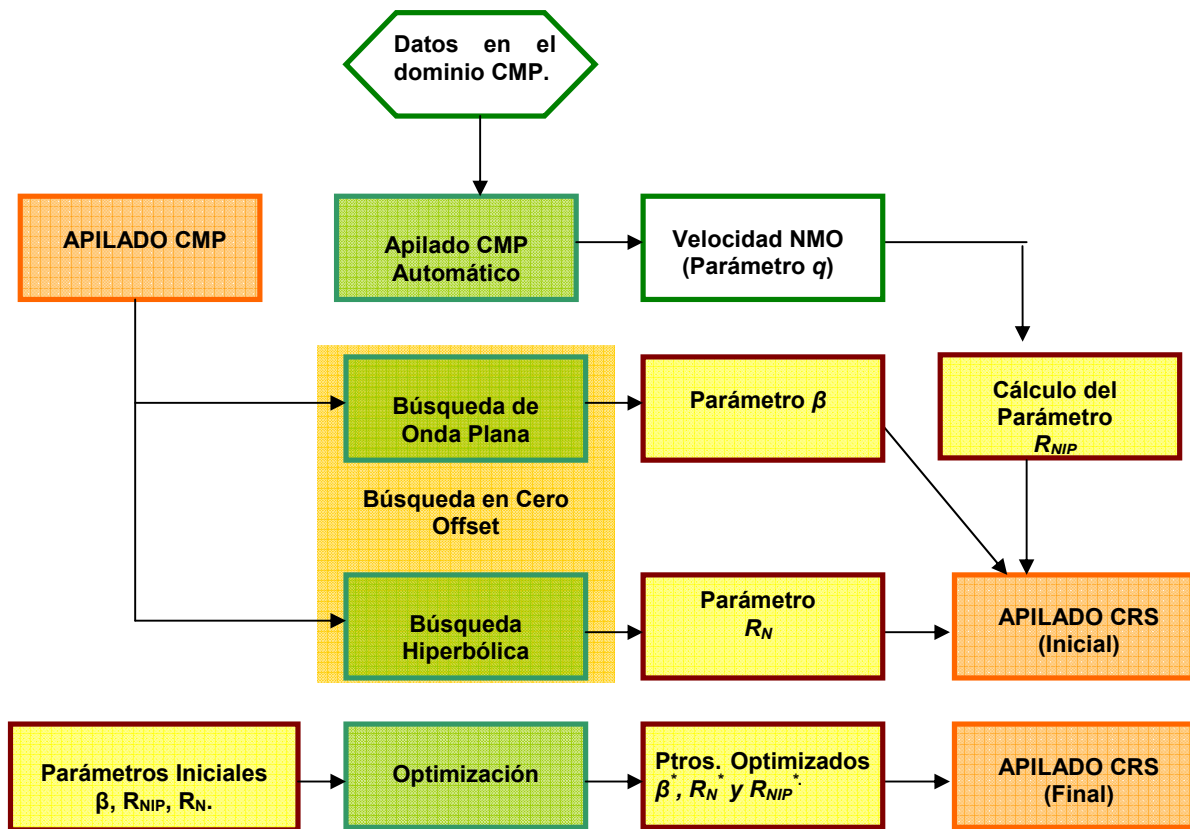


Figura 31. Flujo de las etapas y los parámetros que haya CRS en cada etapa (Tomado de Gamboa, J., 2003).

Para cada muestra (t_o , X_o) en la sección apilada, la sección offset cero (OC), se determinan los tres parámetros de apilamiento (β , R_{NIP} , R_N) que generan el operador de apilamiento que se adapta mejor a un evento en el conjunto de datos de multicobertura. Esto se realiza por medio de los análisis de coherencia del operador de apilamiento con los datos mencionados, a continuación se hará una breve descripción de las etapas empleadas por la técnica CRS de acuerdo a lo planteado por Mann, J., 2001.

El primer paso propuesto por Jäger, R., et al (2001) fue el Apilado automático por Common Mid Point (CMP), el cual partió del problema de optimización de los 3 parámetros ya que por efectos de costos no era viable hacer una búsqueda simultánea de los mismos, por lo tanto los investigadores decidieron realizar la

búsqueda separada por parámetro; estableciendo que los parámetros de entrada se restringen a los arreglos (gathers) específicos.

La búsqueda se inicia teniendo en cuenta el arreglo por CMP ($X_m=X_o=0$, ósea $\Delta x=0$). La técnica CRS se basa en la aproximación hiperbólica de la ecuación (5), la cual se reduce a la ecuación (6),

$$(5): t^2(\Delta x, h) = \left(t_o + \frac{2\text{Sen}\beta}{V_o} \Delta x \right)^2 + \frac{2t_o \text{Cos}^2\beta}{V_o} \left(\frac{\Delta x^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right)$$

$$\text{y } (6): t_{\text{CMP}}^2(h) = t_o^2 + \frac{2t_o h^2 \text{Cos}^2\beta}{V_o R_{NIP}}$$

La técnica internamente emplea el parámetro q explicado en la ecuación (7), este término está relacionado con la velocidad de apilamiento de la siguiente manera (8),

$$(7): q = \frac{\text{Cos}^2\beta}{R_{NIP}},$$

$$\text{y } (8): v_{\text{NMO}}^2 = \frac{2V_o}{t_o q}$$

Este parámetro q es empleado para obtener el mayor valor de coherencia a lo largo de la hipérbola de apilamiento. Los valores de q a ser probados se determinan indirectamente, teniendo en cuenta que q está en función de $q = f(v_{\text{NMO}}^2)$.

Es claro que la ecuación de moveout solo depende de un parámetro independiente (ecuación 8), por lo tanto los parámetros quedan organizados de la siguiente forma ecuación (9),

$$(9): v_{\text{NMO}}^2 = \frac{2V_o R_{NIP}}{t_o \text{Cos}^2\beta}$$

Convirtiéndola en la ecuación de normal moveout (NMO) (10),

$$(10): t_{\text{CMP}}^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{\text{NMO}}^2}$$

El segundo paso consiste en la búsqueda de la sección de Offset cero a través de la ecuación de la onda plana, en ésta etapa se determinan los valores iniciales del ángulo emergente β , consideramos la sección simulada Offset cero (OC) en el siguiente paso. Con $h=0$ y los términos de 2do orden que por implementación de la onda plana se hacen 0, el operador CRS (ecuación 5) se reduce a la siguiente expresión (11),

$$(11): t_{\text{PW}}(\Delta x) = t_0 + \frac{2\text{Sen } \beta}{v_0} \Delta x$$

Los índices PW denotan que el factor de ésta ecuación describe ondas planas con el buzamiento β . Partiendo que es una aproximación de 1er orden, su rango de validez es más pequeño que para una aproximación de 2 orden. Por lo que se considera emplear una apertura más pequeña para la búsqueda de la onda plana.

En los casos donde se presentan buzamientos conflictivos un conjunto de parámetros necesarios se consideran para buscar el máximo adicional local en el espectro de coherencia. Para obtener el máximo adicional local, los buzamientos adicionales se consideran sólo si la coherencia global máxima excede a la coherencia global permitida.

El siguiente paso comprende la búsqueda hiperbólica en la sección offset cero (OC), los términos de 2do orden del operador de apilamiento debido a que en el paso anterior se hacen 0, no se consideran para reducir el número de parámetros desconocidos. Con el conocimiento de β , los términos de 2do orden pueden ser considerados. En la sección Offset Cero la aproximación hiperbólica (12) con todos los términos es,

$$(12): t_{\text{HYP}}^2(\Delta x) = \left(t_0 + \frac{2\text{Sen}\beta}{V_0} \Delta x \right)^2 + \left(\frac{2t_0\text{Cos}^2\beta}{V_0 R_N} \Delta x^2 \right)$$

Los valores R_N para ser probados son determinados indirectamente por un rango temporal en la sección Offset cero (OC) para el CMP más distante en la apertura común. Se debe tener en cuenta que el rango temporal está limitado por las trayectorias de la onda directa y la onda plana, las cuales se desplazan con ángulo β .

Ésta estrategia puede ser aplicada separadamente por cada buzamiento conflictivo detectado en el paso de la búsqueda anterior, la ecuación empleada en casos de buzamientos conflictivos se expresa de la siguiente manera (ecuación 13), donde la curva de válidez está en el dominio del disparo o receptor,

$$(13): t^2 = \left(t_0 + \frac{2\text{Sen}\beta}{V_0} \Delta x \right)^2 + \frac{2t_0\text{Cos}^2\beta h}{V_0 R_{CS}} \quad \text{con} \quad \frac{1}{R_{CS}} = \frac{1}{R_N} + \frac{1}{R_{NIP}}$$

El cuarto paso consiste en el apilamiento inicial de CRS, en los procedimientos anteriores de búsqueda y apilamiento están todos confinados a los arreglos específicos de los datos de entrada utilizando líneas hiperbólicas como operadores de apilamiento. El apilamiento inicial de CRS que ejecuta un apilamiento con una superficie apilada completa 2D basada en los atributos iniciales.

Luego, los datos medidos son sumados a lo largo de los operadores que se definieron para el apilamiento, esto con el fin de generar la sección apilada inicial CRS. Como resultado se obtienen cuatro secciones de salida. Tres de los parámetros de apilamiento también como un criterio de coherencia que depende de (t_0, X_0) , estos resultados representan los primeros estimados, sujetos a un refinamiento posterior.

Finalmente, el quinto paso es el llamado Apilamiento Optimizado CRS, en donde tomamos los primeros estimados de los parámetros $(\beta, R_N$ y $R_{NIP})$ obtenidos en el

paso anterior, los cuales son valores iniciales necesarios para un posterior proceso de optimización, pero que involucra los 3 parámetros simultáneamente. Este proceso representa en esencia el refinamiento de las búsquedas anteriores en vía de encontrar los resultados más adecuados para los parámetros, posterior al refinamiento se obtiene el optimizado (Gamboa, J. F., 2003).

Ya que la técnica de apilado CRS posee ciertos operadores que trabajan como aproximaciones de respuesta a reflexiones cinemáticas de las interfases curvas en una vecindad paraxial del rayo central considerado (Mann, J., 2001). Por consiguiente, es necesario definir una apropiada apertura en la cuál la aproximación sea valida.

Según Mann, J. (2001) La apertura que se maneja es una superficie elíptica en el dominio del *offset mid-point*. El eje medio está definido en la sección offset cero (OC), y el otro por CMP *gather*. Ambos ejes-medios son funciones del tiempo de propagación t .

- La apertura del CMP está definida en el plano tiempo-offset (Figura 32).

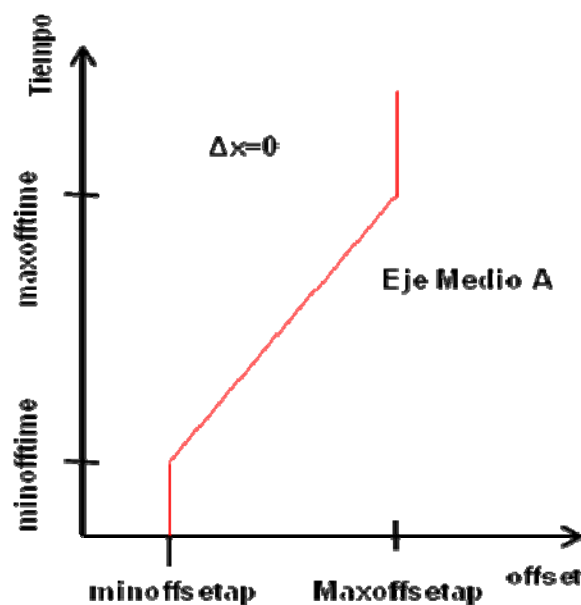


Figura 32. Representación esquemática de la apertura en el CMP gather (rojo).

- La apertura OC está definida en el plano tiempo-common-mid-point. (Figura 33).

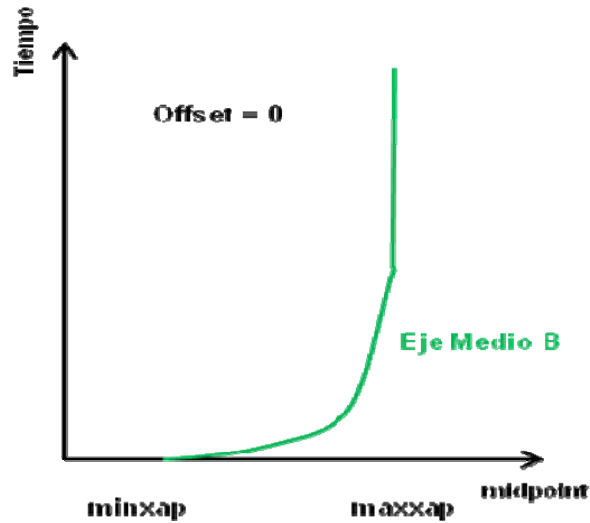


Figura 33. Representación esquemática de la apertura en la sección cero offset (CO).

- La apertura en CRS, (Figura 34). El tamaño de la apertura depende sólo del tiempo de propagación OC en t sobreestimado. La apertura para un tiempo de propagación particular OC es constante para todas las curvas moveout y superficies que van a ser probadas.

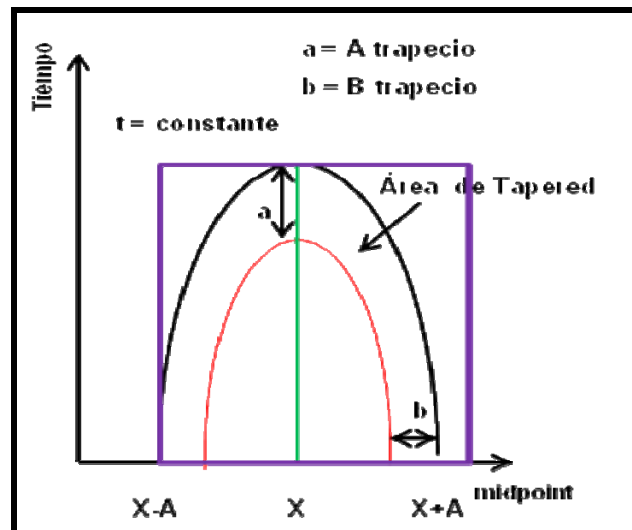


Figura 34. Representación esquemática del CRS, durante las operaciones de apilamiento, se aplica una función de coseno en el tape que se desplaza dentro del área limitada entre la curva en negro y la curva interna en rojo.

4. GEOLOGÍA DEL NORTE DE COLOMBIA

4.1. ESTRATIGRAFÍA

La estratigrafía del área de estudio varía lateralmente de oeste a este y es producto de la evolución tectónica del margen activo Caribe – Suramérica (Duque-Caro, 1979).

4.1.1. Basamento

El basamento del complejo acrecionado Sinú – San Jacinto está expuesto al occidente de Urabá, a lo largo del Istmo de Panamá, y localmente hacia la parte sur de la región de Montería (Ingeominas, 1997) (Figura 35). El basamento está compuesto por gabros del Cretácico tardío, basaltos, almohadillas de lava intruidas por monzodioritas, monzonitas, sienitas y gabros del Paleoceno. Estos depósitos de la corteza oceánica están superpuestos discordantemente por las facies volcánico-clásticas de la Formación Barroso. Esta unidad está compuesta por basaltos y diabasas intercaladas con areniscas y conglomerados que representan retrabajamiento de rocas volcánicas y depósitos volcano-sedimentarios.

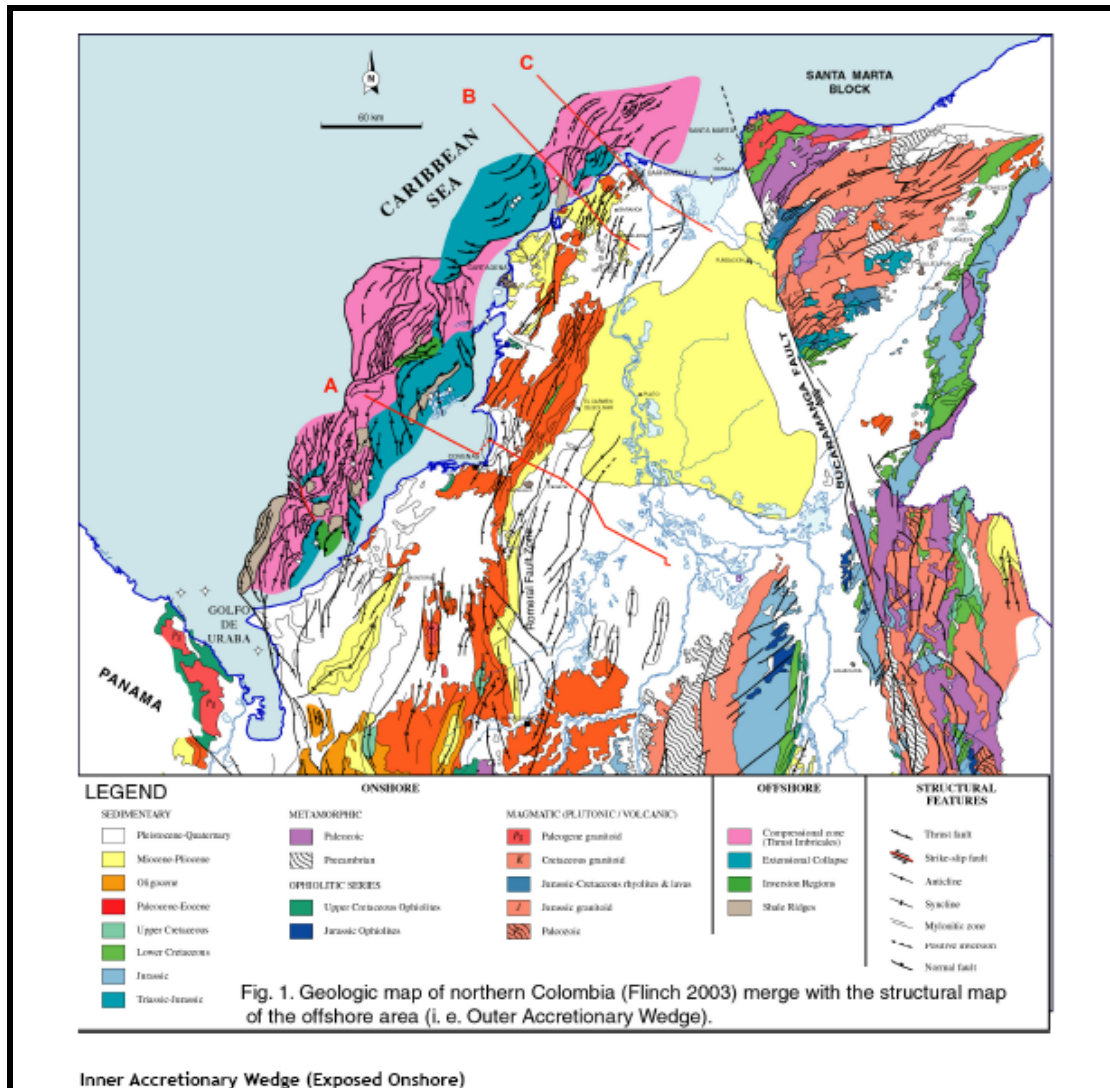


Figura 35. Mapa geológico del norte de Colombia. Tomado de Flinch, (2003).

4.1.2. Cretácico-Eoceno

La sección sedimentaria del Cretácico está superpuesta inconformemente sobre los basaltos, esquistos verdes, gabros y almohadillas de lava de la corteza oceánica. La unidad más delgada del Cretácico es de edad Coniaciano y es referenciada como la Formación Cansona (Ingeominas, 1997); esta es equivalente en tiempo con, y presenta facies similares a, la Formación La Luna de Venezuela (Flinch, J. F., 2003).

La Formación Cansona está compuesta de liditas, chert, e intercalaciones de calizas con shales ricos en materia orgánica pelágica y lodolitas. La sección de los shales

ricos en materia orgánica constituye el miembro Finca Vieja de la formación Cansona (Figura 36). La formación Cansona puede alcanzar 150 m de espesor en el área de San Jacinto (Duque-Caro, 1973). La sección del Cretácico superior constituye una sección cuyo ambiente sedimentario se va profundizando a medida que se asciende estratigráficamente, ya que está superpuesta por los shales hemipelágicos del Paleoceno y Eoceno medio con intercalaciones de areniscas turbidíticas y conglomerados de la Formación San Cayetano.

La sección del Paleoceno aflora en el área de Tolú, donde se observa una secuencia grano decreciente compuesta por areniscas de grano fino, limolitas silíceas, y shales grises de la Formación San Cayetano (Duque-Caro y Guzmán, 1995). La sección siliciclástica está superpuesta por carbonatos de plataforma de la Formación La Risa del Eoceno, consistentes a las calizas de arrecifes.

Las variaciones estratigráficas en la sección del Eoceno entre las áreas de Tolú y Lorica sugieren cambios de facies muy fuertes en el área del Sinú. En la región de Urabá, una unidad volcanoclástica de gran espesor de posible edad Eoceno se superpone inconformemente con la corteza oceánica (Flinch, J. F., 2003).

| SISTEMA | SERIE | LITOLOGÍA | FORMACION | | TIPO DE CUENCA |
|-----------|--------------------|-----------|-----------------------------------|------------------------|----------------------------|
| NEOGENO | Plioceno | | CORPA | AGUA SOMERAS NO MARINA | CUENCA PIGGYBACK |
| | Mioceno | | PAJUIL FLORESANTO | AGUAS PROFUNDAS | |
| PALEOGENO | Oligoceno | | REEF DE CALIZA LA RISA | ARRECIFES | CUÑA DE ACRECIÓN |
| | Eoceno | | | | |
| | Paleoceno | | | | |
| CRETÁCICO | Cretácico Superior | | ROCA FUENTE CANSONA / FINCA VIEJA | AGUAS PROFUNDAS | CORTEZA OCEANICA SUBDUCIDA |
| | Cretácico Inferior | | CORTEZA OCEÁNICA | | |
| | | | | | |

Figura 36. Columna Estratigráfica del área del Sinú – San Jacinto. Tomado de Flinch 2003.

4.1.3. Oligoceno – Mioceno

En el área de Sinú – San Jacinto también afloran rocas sedimentarias de edad Neógeno (Duque-Caro, 1972). Muchas de estas unidades están expuestas en superficie y también fueron penetradas por muchos pozos exploratorios. La sección del Oligoceno está compuesta en su mayoría por shales con intercalaciones ocasionales de areniscas en el área continental (Ingeominas, 1997). La formación Floresanto compuesta por areniscas turbidíticas de aguas profundas, calizas, arcillolitas arenosas, y shales pelágicos con presencia ocasional de capas de

conglomerados muy delgadas. La formación Paujil del Mioceno tardío esta compuesta por areniscas y conglomerados intercalados con shales y algunas arcillolitas que representan depósitos de playa (Flinch, J. F., 2003).

4.1.4. Plioceno - Pleistoceno

La formación Corpa está compuesta por shales grises y arcillolitas con intercalaciones ocasionales de areniscas y conglomerados. Estos depósitos representan facies de tipo fluvio-deltáico en el occidente y facies fluvio-aluviales hacia el oriente. La sedimentación durante el Plioceno y el Pleistoceno fue controlada por la migración de los paleo-deltas de los Ríos Magdalena y Sinú, y probablemente de otro sistema fluvial principal localizado a lo largo de la región sur de Urabá (Flinch, J. F., 2003). La morfología actual del fondo marino de esta área sugiere la presencia de canales meándricos y complejos de diques de canal de edad Pleistoceno hasta Reciente (Pirmez, et al. 1998).

En el Holoceno, el abanico del Magdalena se desarrolló al norte de donde hoy se encuentra su desembocadura. El ascenso más reciente del nivel del mar junto con la actividad tectónica (Pirmez, et al., 1998) aparentemente indujo la migración del abanico del Magdalena de sur a norte. El principal suministro de sedimentos al área fue el desencadenado por el levantamiento de los Andes desde el Mioceno, el cual es un proceso que continúa en la actualidad.

4.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La complejidad de las interacciones tectónicas entre las placas Caribe y Sur Americana presentes desde el Cretácico, controlaron la evolución tectónica del noroeste de Colombia y los sistemas imbricados del Sur del Caribe (Toto, E., et al, 1992; Vernetto, G., et al.1992). El desplazamiento al este de la placa Caribe con respecto a la placa Suramericana generó el desarrollo de una serie de provincias estructurales, que de este a oeste son: (1) la cuenca del Valle Inferior del Magdalena; (2) el Cinturón Plegado de San Jacinto; (3) la cuña acrecionada del Sinú; (4) la Cuenca de Urabá; y (5) el Arco de Panamá. Estas cinco provincias están separadas

por tres estructuras principales: (1) El sistema de Fallas de Romeral (SFR), considerado como la principal paleo-sutura entre el Valle Inferior del Magdalena y el Cinturón Plegado de San Jacinto; (2) el lineamiento del Sinú, entre el Cinturón Plegado de San Jacinto y la cuña acrecionada del Sinú; y (3) la Falla de Uramita, entre la cuña acrecionada del Sinú y la Cuenca de Urabá (Duque-Caro, H., 1979, 1984, 1990). En la figura 37 se presenta las provincias estructurales presentes en el área del Caribe Sur.

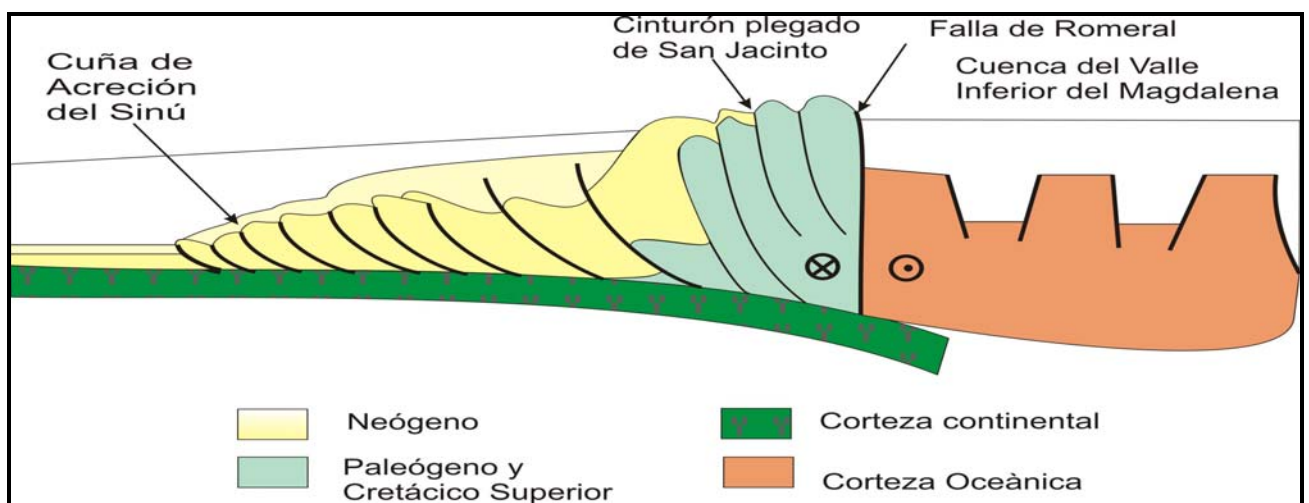


Figura 37. Corte estructural de las provincias del Valle Inferior del Magdalena, del Cinturón Plegado de San Jacinto y la cuña de acreción del Sinú.

4.2.1. Cuña Acrecionada del Sinú

Desde el punto de vista estructural el área del cinturón plegado del Sinú pertenece a la Cuña Acrecionada del Caribe Sur. Esta cuña se extiende desde el Urabá hasta Venezuela a lo largo del margen Caribeño. La parte trasera de la cuña acrecionada del Sinú está representada por la Falla de Uramita. Esta falla se ha interpretado como un cabalgamiento con vergencia al oeste (Flinch, J. F., 2003), pero otros autores (Duque-Caro, 1984, 1990; Ruiz et al., 2000) interpretaron esta estructura como una falla transpresional lateral-derecha. Como en todas las cuñas acrecionadas, las partes internas del prisma están rodeadas por rocas jóvenes. Al contrario de la provincia de San Jacinto, el área del Sinú representa la parte del prisma más juvenil. En el sector del Sinú afloran cuñas imbricadas con rocas del

Eoceno y Oligoceno por efecto de las cuencas tipo *piggyback* que se desarrollaron en el Mioceno. Algunos autores como Laverde (2000), enfatizaron el papel de las fallas rumbo-deslizantes en la deformación del área de Sinú – San Jacinto.

4.2.2. Estilo Estructural

Los estilos estructurales se clasifican en función de su relación con el basamento durante la deformación (Harding y Lowell, 1979), ya que el basamento es un factor determinante en la geometría de la estructura y en la cantidad de sedimentos involucrados en la deformación. Adicionalmente se emplean otros criterios para definir cada estilo estructural en particular, entre los cuales encontramos ambientes tectónicos y los esfuerzos involucrados durante la deformación. Para la zona de estudio el estilo estructural es un sistema contraccional de cuñas imbricadas delimitadas por cabalgamientos, sobre un despegue subhorizontal.

4.2.2.1 Sistema Imbricado Cabalgante: El límite norte del sistema imbricado es el patrón este-oeste de la Falla de Canoas. El límite oeste corresponde al frente de deformación del Sur del Caribe. Según Corredor, F., (2006) los patrones de sedimentación de crecimiento se pueden encontrar en los sistemas imbricados. Esta clase de sistemas preserva los estratos de crecimiento, los cuales registran fallas y pliegues cinemáticos. Estos sedimentos son depositados en cuencas tipo *piggy-back* formadas sobre los limbos traseros de las estructuras imbricadas, ya que las secuencias se superponen sobre los flancos delanteros.

4.2.3. Geometrías de las estructuras

En el área de estudio se presentan geometrías de pliegues relacionados con fallas (*fault-related-fold*), donde los pliegues son el resultado del desplazamiento de los bloques a lo largo de la falla. Gran parte de los pliegues relacionados con cabalgamientos se encuentran en los cinturones de pliegues y cabalgamientos situados en zonas externas de cordillera como los Pirineos, fenómenos diapíricos salinos como el Golfo de México o Deltas progradacionales como Delta del Níger (Poblet, J., 2004).

4.2.3.1. Pliegues de Flexión de Falla (*Fault-Bend-Fold*): Definidos por Rich, J. L. (1934), se generan como causa del movimiento de un bloque de falla a lo largo de una superficie de falla no planar, lo que genera la flexión del bloque de falla y por ende la formación del pliegue. Aunque se forman en el bloque superior de la falla, pueden desarrollarse también en el bloque inferior o en ambos (Figura 38).

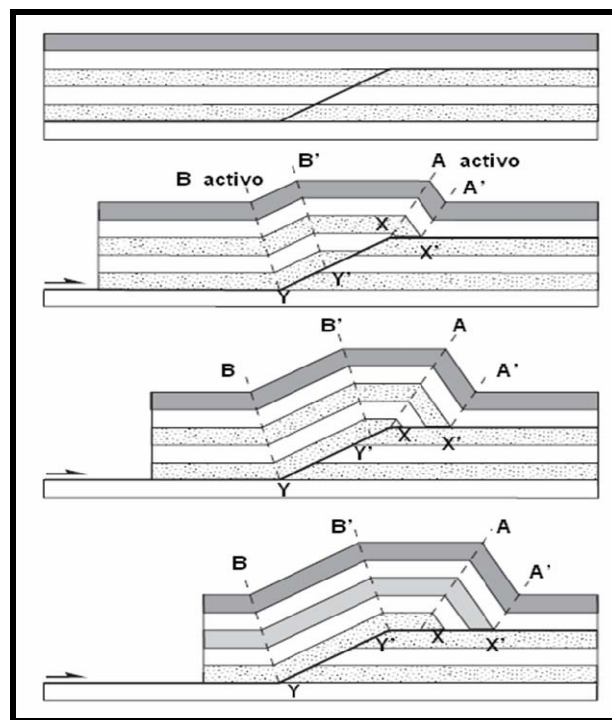


Figura 38. Explica los tres estadios de la cinemática del pliegue de flexión por falla.

De acuerdo a la cinemática (Suppe, J., y Namson, 1979), éste presenta un despegue en el nivel estructural y se mueve hasta un nivel estratigráfico más alto X, el movimiento y el principio de conservación del volumen producen que las capas vayan rampa arriba y se plieguen en el eje axial BY; de igual manera las capas que llegan al *flat* se pliegan en el eje AX de este punto en adelante las capas experimentan “desplazamiento inter-estratificado” en el flanco frontal, este desplazamiento produce cizallamiento en el limbo frontal el cual es responsable de la mayor inclinación de este limbo respecto al limbo trasero.

En la medida que el pliegue crece, el desplazamiento se incrementa, los paneles se amplían y el punto Y' se acerca a X; el eje axial B'Y' ha llegado hasta el tope de la rampa en este punto el pliegue ha llegado a su punto de máxima altura de allí en adelante el eje AY' se continuará alejando de B'X produciendo ampliación de la cresta del pliegue.

- **Shear Fault Bend folding:** Es un tipo especial de *Fault bend fold*, el cual genera rampas con formas particulares. Este tipo de pliegue se caracteriza por tener una gran longitud, flancos traseros moderados con buzamiento menor que la rampa de la falla, al contrario del clásico *fault bend fold* (Suppe, J., et al 2004) (Figura 39). El buzamiento de los flancos traseros y la longitud de los flancos se incrementa progresivamente con una falla de rumbo, debido a la combinación de la rotación del flanco y la migración de la banda tipo *kink*.

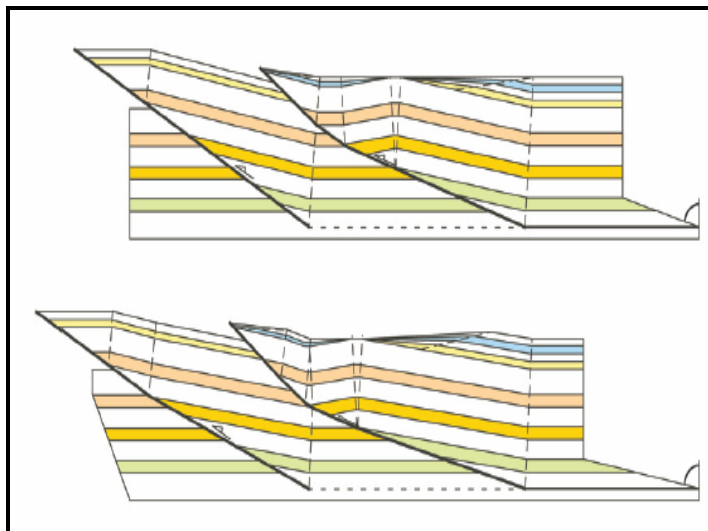


Figura 39. Muestra la geometría particular del Shear fault bend folding.

4.2.3.2. Estratos de crecimiento: Son depósitos sintectónicos porque se forman coetáneamente con los pliegues o fallas, haciéndolos muy importantes para entender la cinemática de plegamientos y cabalgamientos. El estudio de los estratos de crecimiento depende de la complejidad y duración de la actividad tectónica como de su grado de preservación. (Figura 40).

- **Cuencas Piggyback:** Son cuencas donde se depositan los sedimentos del sistema imbricado permitiendo con esto preservar los registros de fallas y pliegues cinemáticos. Éstas cuencas se forman sobre los flancos traseros de la estructura imbricada y posteriormente la secuencia se superpone de nuevo sobre los limbos frontales de la misma (Corredor, F., 2003). La estratigrafía de éste tipo de cuencas presenta sedimentos de grano fino y secciones condensadas. Son característicos de ambientes marinos distales.

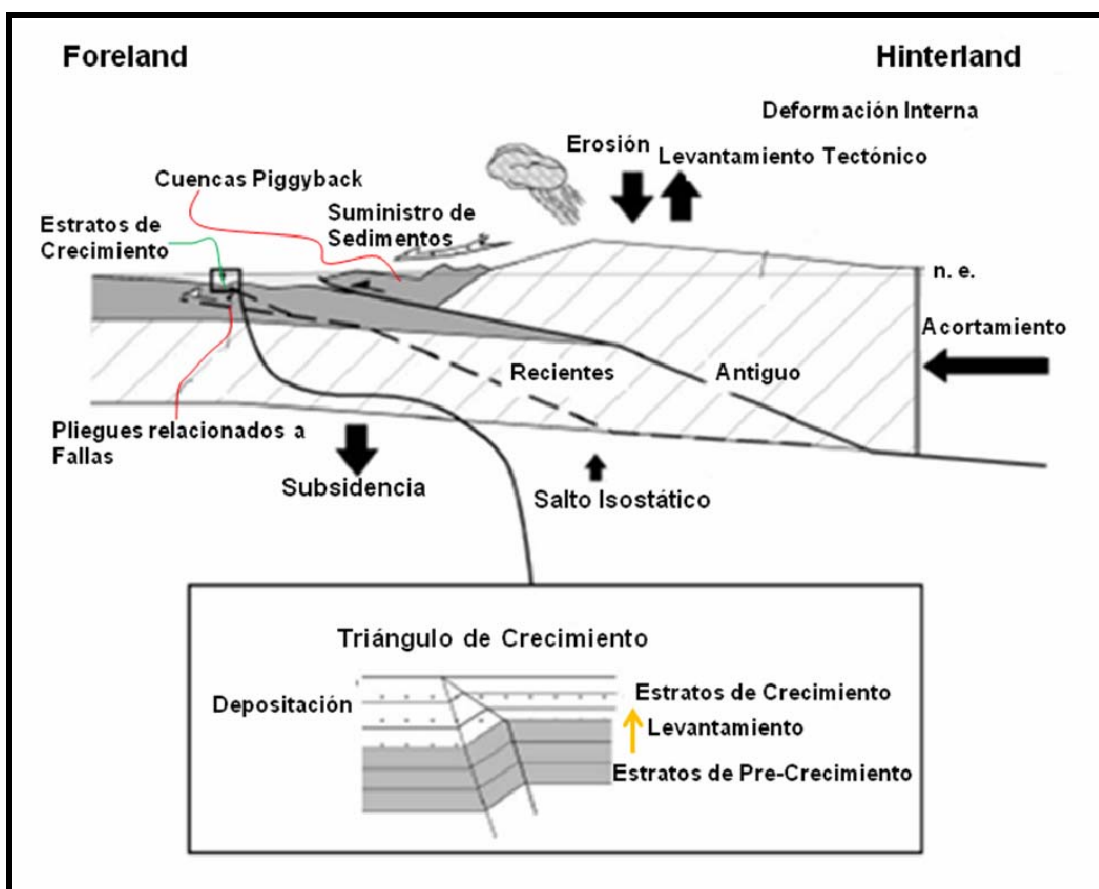


Figura 40. Esquema de procesos superficiales y profundos actuando durante el llenado de una cuenca foreland sintectónica y la posición de estratos de crecimiento relacionados a pliegues Vergés, J., et al 2002).

4.3. TECTÓNICA

El régimen tectónico del norte de Colombia está influenciado principalmente por la convergencia relativa entre las placas Caribe y Suramérica (Taboada, A., et al 1998). Esta zona se caracteriza por una deformación continental que se evidencia por la presencia de los cinturones de cabalgamiento del Sinú y de San Jacinto y además por las fallas de rumbo Bucaramanga-Santa Marta, Oca y Boconó, las cuales distribuyen parcialmente la convergencia Caribe - Suramérica (Burke, K., et al 1984) (Figura 41).

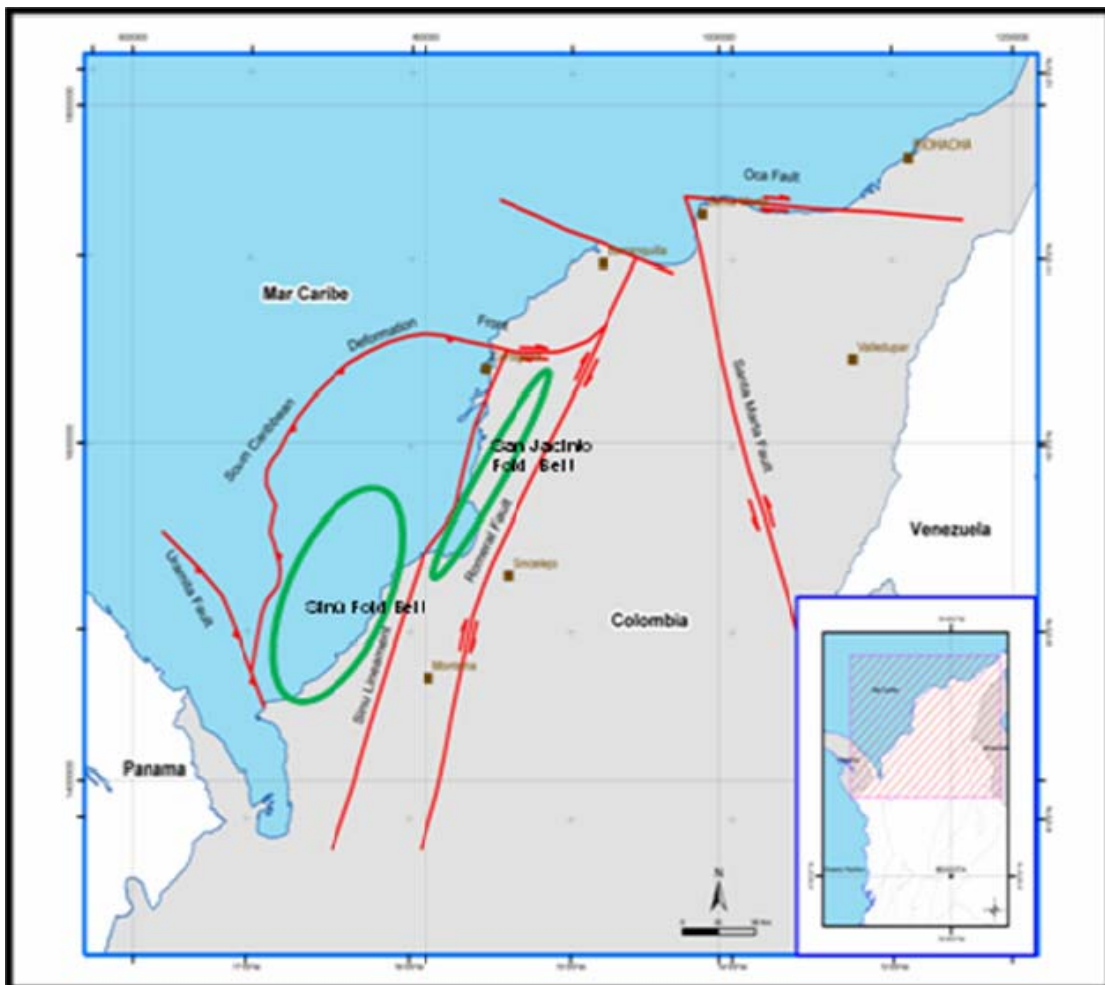


Figura 41. Mapa de fallas y características tectónicas de los límites de placa Suramericana, Caribe, Panamá, y localización de los cinturones San Jacinto y Sinú.

El occidente colombiano, incluido su margen Caribe, contiene terrenos de afinidad oceánica que fueron acrecionados contra la antigua margen continental (Ingeominas, 1988). Esto hace pensar que existe un límite tectónico en el occidente Colombiano que pone en contacto el dominio continental al oriente y oceánico al occidente. En el Caribe colombiano, este límite corresponde a la extensión norte de la Falla de Romeral (Ingeominas, 1988).

Con el transcurrir del tiempo geológico la convergencia relativa entre las placas Caribe y Suramérica ha permitido la formación de un prisma de acreción oceánico. Este prisma demuestra que el movimiento de la Placa Caribe es continuo y su subducción lenta bajo los cinturones plegados de Sinú y San Jacinto (Taboada, A., et al 1998).

- **Diapirismo de Lodo:** Son estructuras que se originaron como resultado de desplazamientos de materiales caracterizados por su baja densidad y viscosidad. Estos desplazamientos vienen de niveles profundos a través de materiales a niveles más someros. En algunos casos estos diapiros afloran en superficie formando domos y volcanes de lodo (Milkov, A. V., 2000). El diapirismo es un fenómeno que se presenta a nivel global en varios contextos geodinámicos, es decir en ambientes marinos como continentales. Por lo general se asocian a prismas de acreción marinos como la Cuña del Sinú y en contextos continentales como Mississippi (Morgan et al., 1965). Basados en estudios realizados en el área del Sinú se ha logrado establecer que el diapirismo ejerce como factor deformante dominante (Duque-Caro, H., 1979; Vernet, G., 1985). El fenómeno para el área del Sinú se asocia a tres causas: 1) La inversión de densidad y compresión vertical, 2) la tendencia del lodo a migrar hacia los pliegues anticlinales y c) la tendencia que posee el lodo de viajar a través de los planos de falla (Vernet, G., 1985-89).

4.4. MORFOLOGÍA DEL FONDO MARINO

El fondo marino cubierto por la línea sísmica objeto de este estudio se extiende desde la plataforma continental hasta la llanura abisal (Figura 42).

A continuación se describe cada sector batimétrico.

- **Plataforma continental:** Es el perímetro extendido de cada continente, que queda cubierto durante los períodos interglaciares por mares relativamente poco profundos y golfos. En el área de estudio, se extiende desde la línea de costa hasta los 200 metros (200,00 m) de profundidad.
- **Talud Continental:** Es el sector del margen continental con mayor pendiente, y se encuentra limitado en su parte somera por la plataforma continental y en su parte profunda por la llanura abisal. En el área de estudio se extiende entre los 200 metros (200,00 metros) y los 38,758 metros (38,758 metros).
- **Llanura Abisal:** Es el sector profundo del margen continental, y corresponde a la parte más profunda de la cuenca oceánica. En el área de estudio está a una profundidad entre 3875,00 m y 4675,00 m.

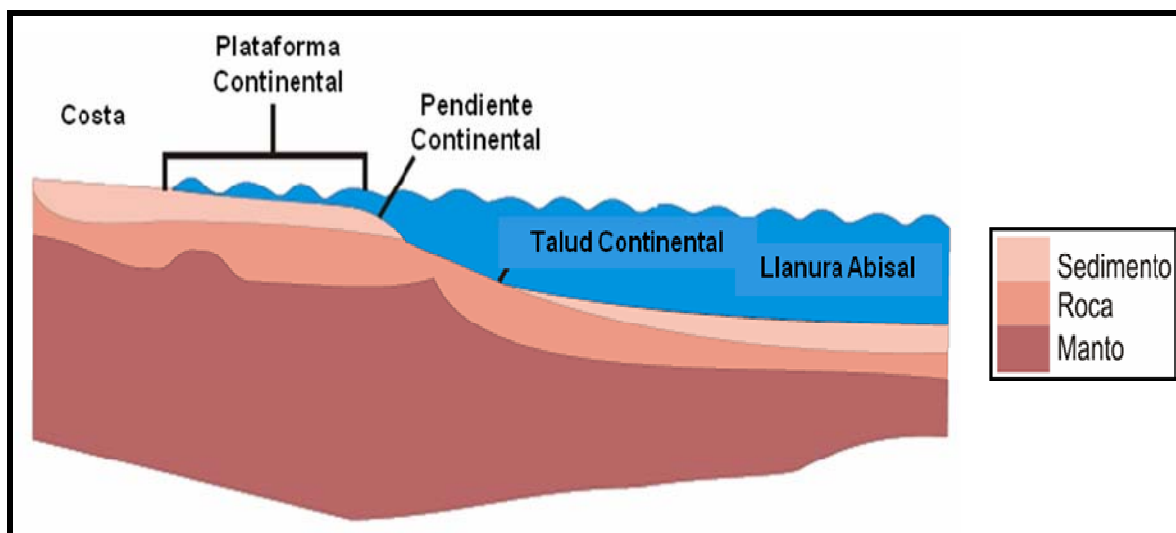


Figura 42. Zonas que conforman el Fondo Marino.

Estudios previos a lo largo de la costa norte del Caribe Colombiano han logrado establecer que la geomorfología costera resulta de procesos tanto marinos como sub-aéreos y de la combinación de neotectonismo/diapirismo de lodos, bajas tasas de sedimentación, y ascenso relativo del mar (Correa, I., et al, 2007). Estos procesos a su vez juegan un papel importante en la arquitectura del fondo marino, como lo sugiere Vernette (1985) (Figura 43). De hecho, el archipiélago Islas de San Bernardo, es una construcción arrecifal que se formó sobre un diapiro de lodo.

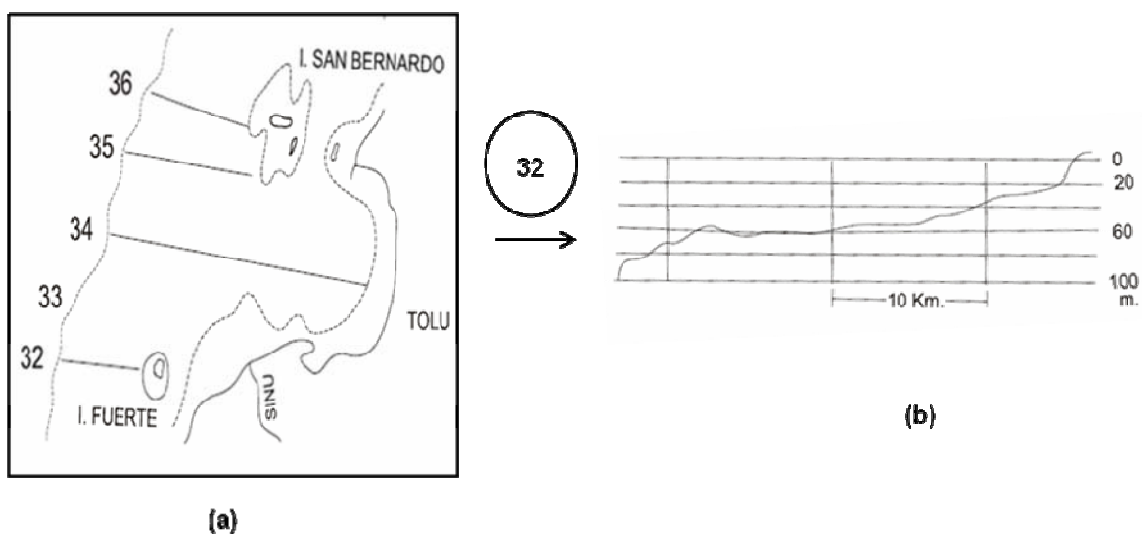


Figura 43. a) Ubicación de los perfiles batimétricos realizados en éste área del Caribe. b) Perfil batimétrico línea 32 cerca del área de estudio (Tomado de Vernette, G., 1985).

El fenómeno de diapirismo de lodo que se manifiesta de manera constante en el prisma de acreción del Sinú – San Jacinto, es uno de los principales modificadores de la geomorfología del terreno, tanto en la zona emergida (Duque-Caro, 1979) como en la plataforma y talud continental (Vernette, G., 1985). Sin embargo, la línea sísmica objeto de este estudio no mostró evidencia de este fenómeno.

5. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de los objetivos se plantearon tres pasos los cuales consistieron en:

1. Creación modelo sintético, adquisición sísmica marina, trazado de rayo y generación del formato SEG-Y en norsar¹⁵.
2. Procesamiento de datos sintéticos en ProMAX y CRS.
3. Procesamiento de datos reales en ProMAX y CRS

5.1. GENERACIÓN DEL MODELO SINTÉTICO

Para la construcción del modelo sintético se inició con la creación de un modelo geológico el cual está compuesto estructuralmente por 6 fallas de cabalgamiento y 3 diapiros. El fondo marino en general se diseñó muy deformado. La longitud horizontal del modelo fue de 90 km. El fondo marino está compuesto de 3 zonas: llanura abisal de 0 a 11 km, talud continental 11 a 68,75km con una pendiente de aproximadamente 7.29 grados y la plataforma continental de 68,75 a 90km. Para el diseño del modelo se inició con la creación de interfases. A partir de esas interfases fueron definidos los once bloques del modelo (Tabla 4). El primer bloque correspondió a la columna de agua; los bloques 2 a 8 a unidades estratigráficas, y los bloques 9 a 11 a diapiros que intruían el modelo. Estos diapiros se ubicaron uno en la plataforma a 3,4 km de altura medida desde su base. El segundo diapiro se ubicó en el talud a 1,9 km de altura medida desde su base y el último en la llanura abisal a 1,3 km de altura medida desde su base.

¹⁵ Norsar; Programa empleado para realizar modelamiento y generar trazado de rayo.

| BLOQUE | DESCRIPCIÓN |
|-----------|--|
| Bloque 1 | Agua del mar, la cual está a una profundidad máxima de 4 km en la llanura abisal y mínima de 900m en plataforma. |
| Bloque 2 | Terrazas marinas. |
| Bloque 3 | Arcillolitas con intercalaciones de areniscas de grano medio a grueso. |
| Bloque 4 | Areniscas de grano grueso. |
| Bloque 5 | Areniscas intercaladas con arcillolitas. |
| Bloque 6 | Basaltos. |
| Bloque 7 | Peridotitas. |
| Bloque 8 | Gabros. |
| Bloque 9 | Diapiro de lodo somero. |
| Bloque 10 | Diapiro de lodo medio. |
| Bloque 11 | Diapiro de lodo profundo. |

Tabla 4. Descripción de bloques del modelo geofísico sintético.

En la Figura 44 se observan las 86 interfases y los 11 bloques generados, los colores en la parte inferior del dibujo simboliza los índices de colores del modelo, como son muchas interfases toman colores repetidos. Cabe resaltar que existen bloques compuestos de 1 o más bloques lo cual se observa en las cuencas cercanas al fondo marino (A).

El siguiente paso consistió en definir una función matemática representada por parámetros geofísicos, estos parámetros están compuestos básicamente de tres propiedades: velocidad P, velocidad S y densidad (Tabla 5) con el objeto de generar bloques asignando dichos parámetros.

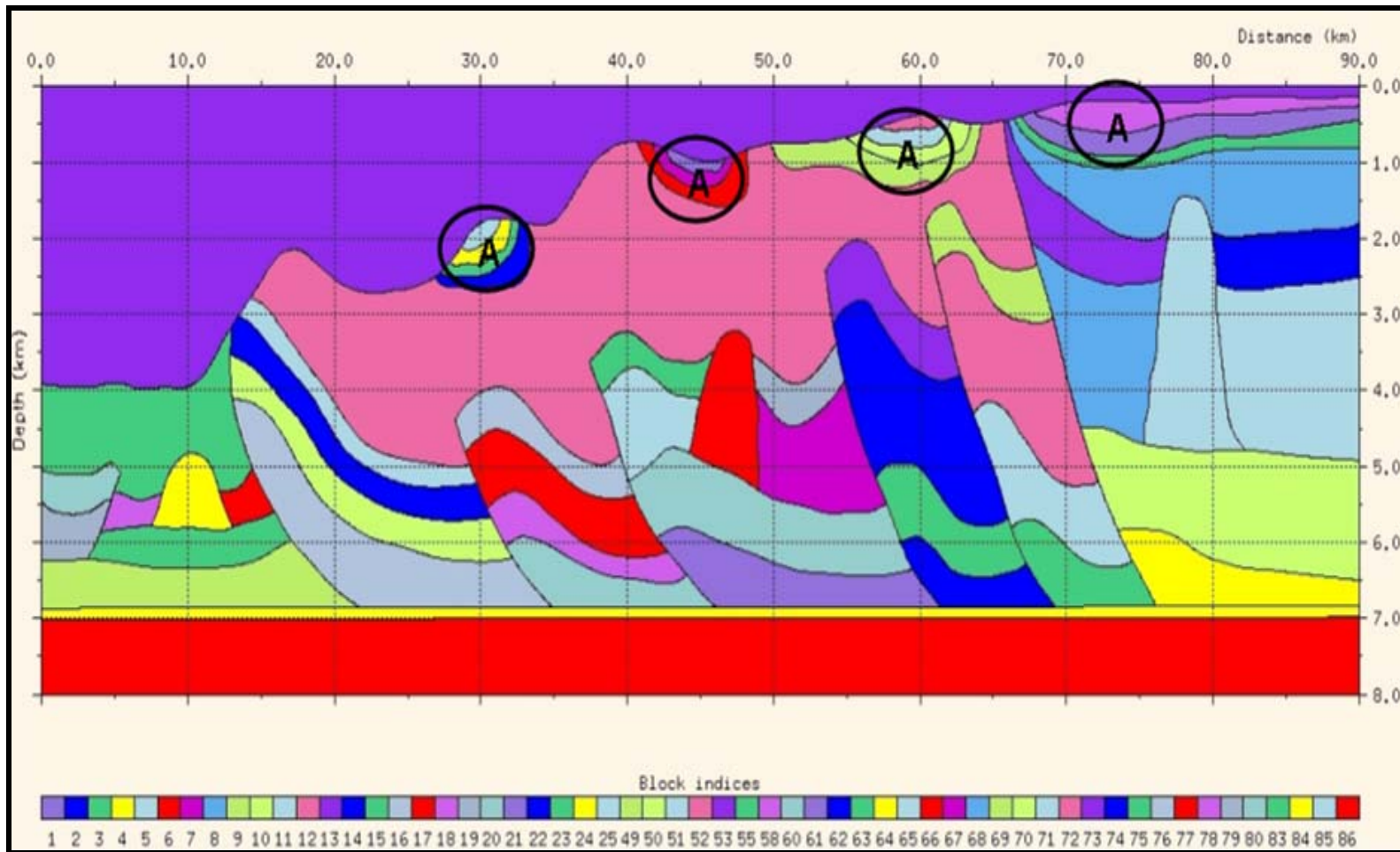


Figura 44. Modelo con geometría.

Para crear la tabla de propiedades se asignaron valores promediados para los bloques por ejemplo la velocidad P se tomo con base a dos autores Davis, G. H. (1996) y Gebart, B. R. (1995), para obtener la velocidad S se dividió la velocidad P en dos y para obtener los valores de densidad nos guiamos de Jones E.J.W. (2004). La primera propiedad asignada correspondió a la velocidad P (Figura 45), seguidamente se asignó la velocidad S (Figura 46) y por se ultimo asignó la densidad (Figura 47).

| BLOQUE | VELOCIDAD (P) (km/s) | VELOCIDAD (S) (km/s) | DENSIDAD (ton/m³) |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|---|
| Bloque 1 | 1.49 | 0.745 | 1.5 |
| Bloque 2 | 1.70 | 0.85 | 2.1 |
| Bloque 3 | 2.6 | 1.3 | 2.5 |
| Bloque 4 | 3.0 | 1.5 | 2.67 |
| Bloque 5 | 3.5 | 1.75 | 3.0 |
| Bloque 6 | 4.75 | 2.375 | 3.3 |
| Bloque 7 | 6.5 | 3.25 | 3.5 |
| Bloque 8 | 7.0 | 3.5 | 1.8 |
| Bloque 9 | 2.3 | 1.15 | 2.4 |
| Bloque 10 | 2.67 | 1.335 | 2.5 |
| Bloque 11 | 3.0 | 1.5 | 3.0 |

Tabla 5. Propiedades Bloques.

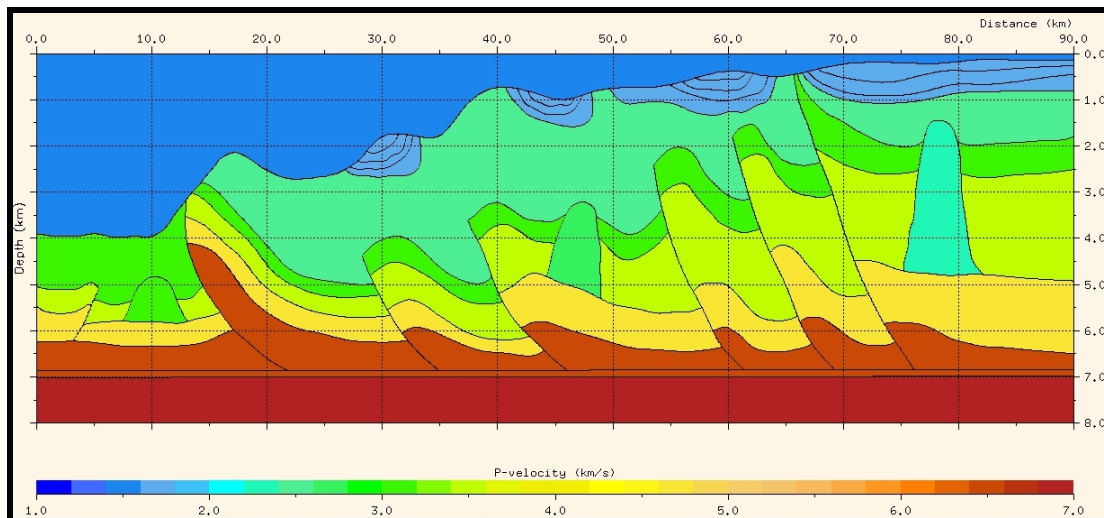


Figura 45. Generación de Bloques con velocidad P.

En la figura 45 se observa los once bloques generados asignándole a cada uno su respectiva velocidad P, en la parte inferior de la figura se observa el índice de colores; los colores claros están asociados a valores bajos de velocidad P por ejemplo el bloque 3 corresponde a la velocidad del agua de mar 1.49 km/s, mientras que los colores mas oscuros están asociados a valores altos de velocidad P por ejemplo el bloque 8 corresponde a gabros con velocidad de 7 km/s.

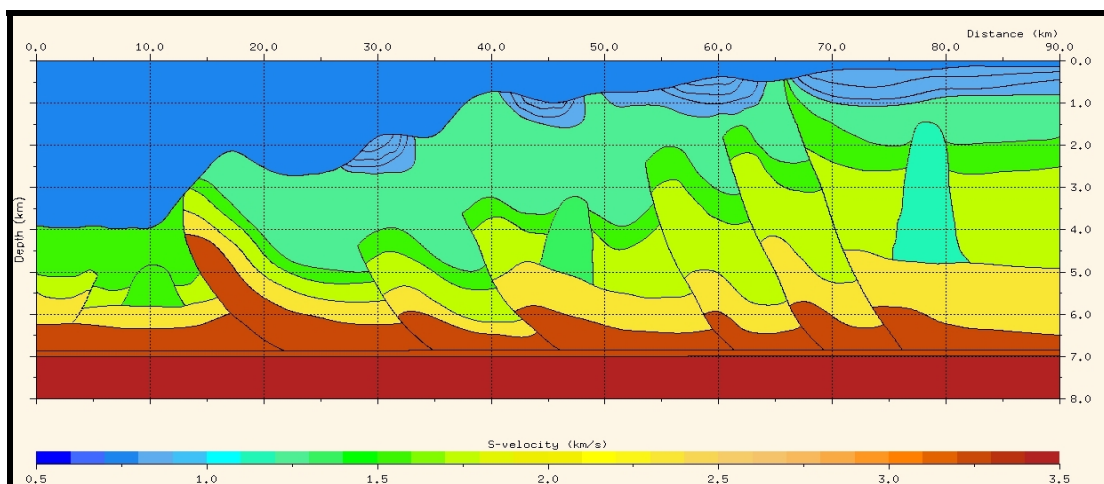


Figura 46. Generación de bloques con velocidad S.

Para la generación de los bloques; se tomó la velocidad P y se dividió en dos, el resultado es la velocidad S. Luego, ésta se le asignó a los bloques y el resultado se

observa en la Figura 46. Los índices de colores claros simbolizan bajas velocidades S y los colores oscuros altas velocidades S.

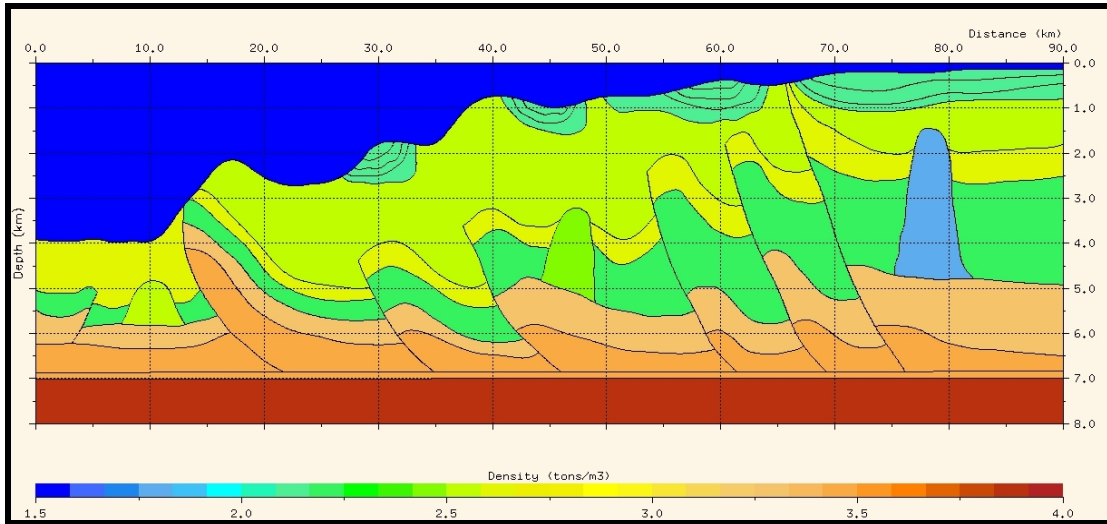


Figura 47. Generación de bloques con densidad.

5.1.1. Adquisición sísmica para modelo geofísico

Para realizar la adquisición se inició con la generación de los disparos por fuente común. En esta etapa se definieron los parámetros que se deben tener en cuenta de la fuente y receptor (Tabla 6). El trazado de rayo no se llevó a cabo en bloque completo sino por intervalos de disparo de 25 m debido a limitaciones del programa Norsar que solo permite generar menos de 1000 trazas, obteniendo así un total 3464 corridas, operación que resulta tediosa y repetitiva.

| DEFINIR FUENTE/RECEPTOR | |
|---------------------------------|--------|
| FUENTE | |
| Coordenada Z | 0.005 |
| Primera coordenada de disparo | 86.7 |
| Última coordenada de disparo | 86.625 |
| Incremento del disparo | -0,025 |
| RECEPTORES | |
| Coordenada Z | 0,0080 |
| Primera coordenada del receptor | 0.0338 |
| Incremento entre receptores | 0.0125 |
| Número de receptores | 240 |

Tabla 6. Información de Fuente/Receptor.

La dirección en que se planteó la adquisición sísmica (Figura 48) es 309 grados referenciados al norte magnético.

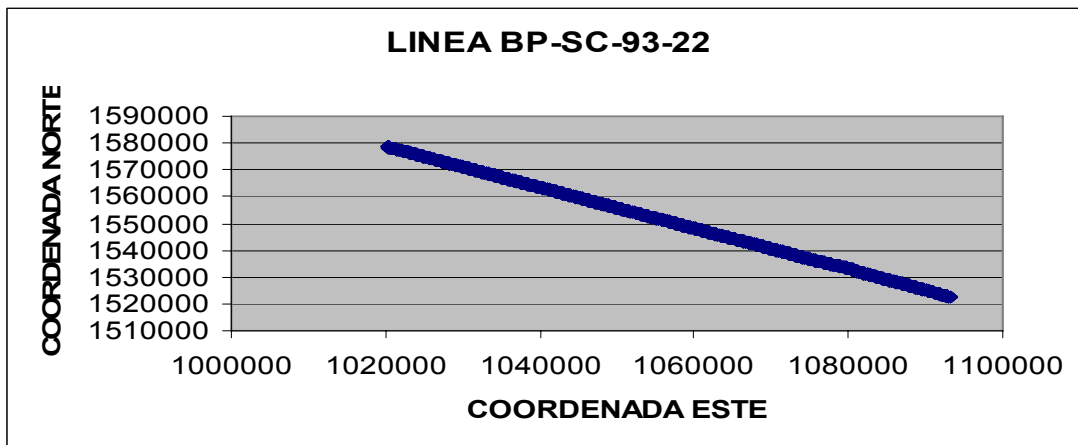


Figura 48. Orientación de la línea de adquisición.

La siguiente etapa consistió en generar el trazado de rayo para la onda directa P (Figura 49).

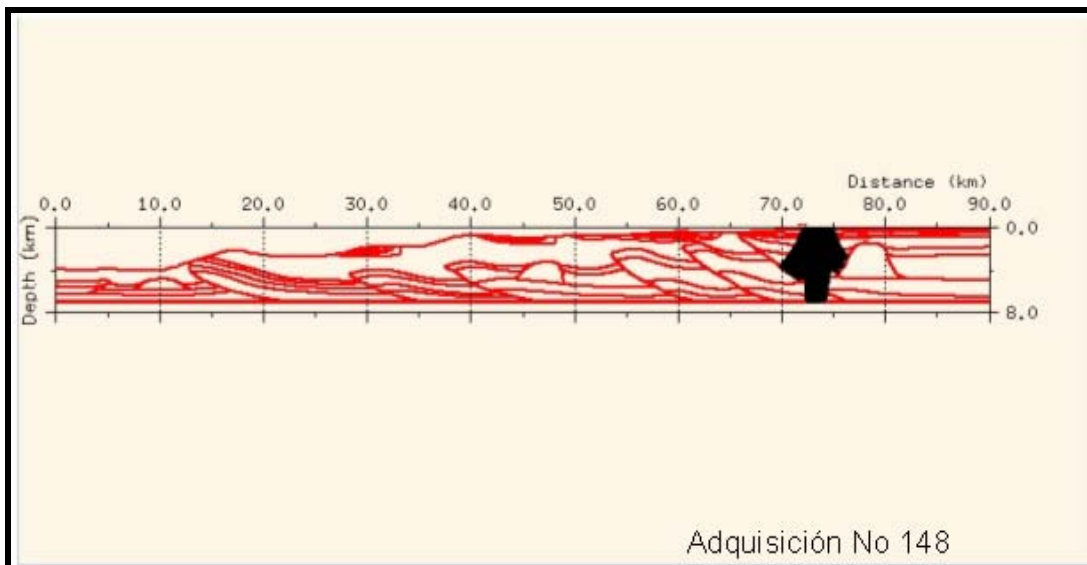


Figura 49. Trazado de rayo Adquisición No148.

Seguidamente se generó el sismograma el cual toma los archivos generados en el trazado de rayo y los convierte en formato SEG-Y (Figura 50).

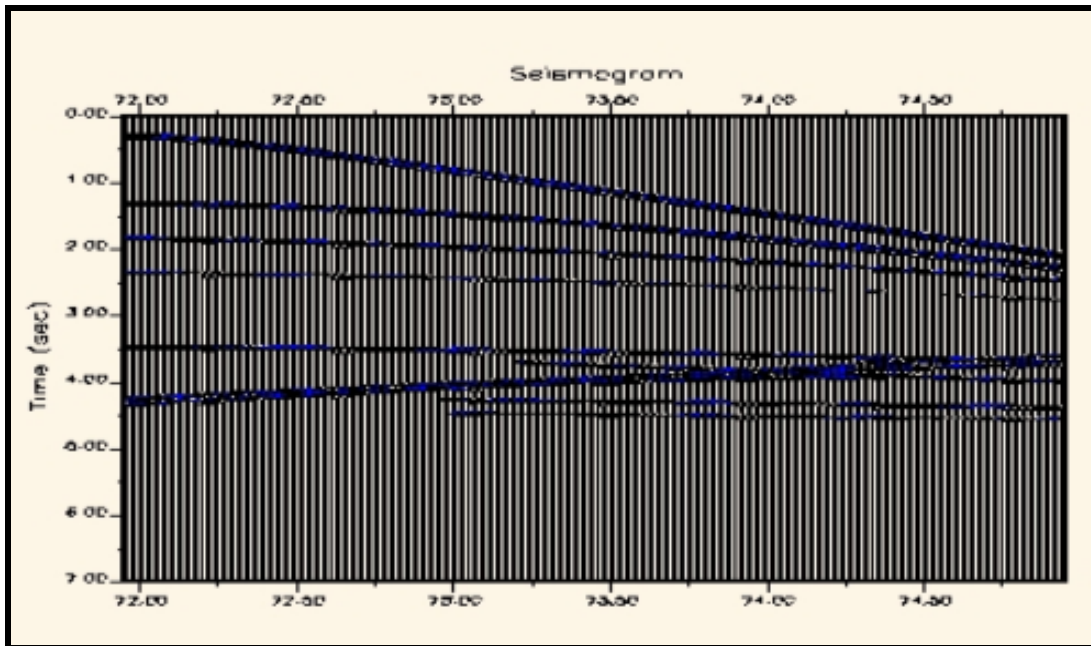


Figura 50. Sismograma Sintético Adquisición 148.

Por último se generó una sección *cero offset* (Figura 51) para tener una idea global del trazado de rayo en toda la sección y para realizar un factor de calidad con la imagen que se va a obtener mas adelante en ProMAX. En la adquisición *cero offset* es necesario definir ciertos parámetros de la fuente (Tabla 7).

| ADQUISICION CERO OFFSET | |
|--------------------------------|---------|
| Primera Coordenada | 88.6210 |
| Última Coordenada | 75.121 |
| Incremento | 0.0063 |
| Distancia entre CDP | 6.75 |

Tabla 7. Parámetros de Adquisición Cero-Offset.

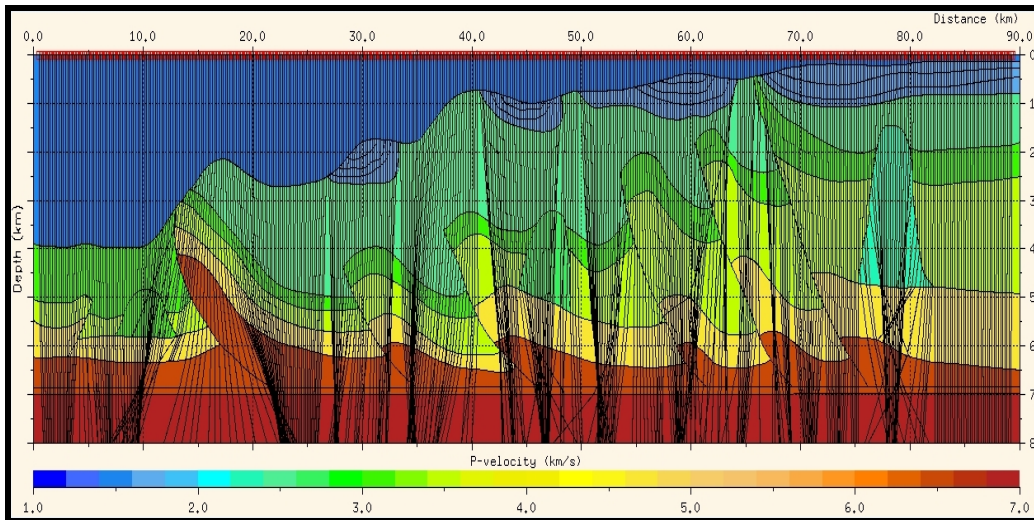


Figura 51. Trazado de rayo cero offset.

El modelamiento de la sección cero offset presentó el mismo inconveniente que la adquisición debido a la restricción en el número de disparos o trazas, por lo tanto se prosiguió a redefinir el intervalo de disparo, es decir el intervalo de distancia en el cual se va a realizar la adquisición este se calculado de la siguiente manera: distancia entre CDP por máximo número de trazas igual al intervalo entre disparo ($6.75 \times 2000 = 13.500$) (Tabla 8) por lo cual la Adquisición tuvo que ser dividida en 7 etapas.

| ADQUISICION CERO OFFSET | |
|---|--------|
| INTERVALO PARA GENERAR DISPARO (Distancia en Km.) | |
| 88.621 | 75.121 |
| 75.121 | 61.621 |
| 61.621 | 48.121 |
| 48.121 | 34.621 |
| 34.621 | 21.121 |
| 21.121 | 7.621 |
| 7.621 | 0.2605 |

Tabla 8. Intervalo de disparo para obtener una sección cero offset.

5.2. PROCESAMIENTO DE DATOS SINTÉTICOS

5.2.1 Procesamiento de modelo sintético en ProMAX

Para efectos prácticos, el procesamiento se hace usando programas de computador especializados. En este estudio se utilizó el programa ProMAX, el cual permite utilizar la información de las trazas para luego generar imágenes sísmicas. El procesamiento en ProMAX se llevó a cabo en 10 etapas (Figura 52).

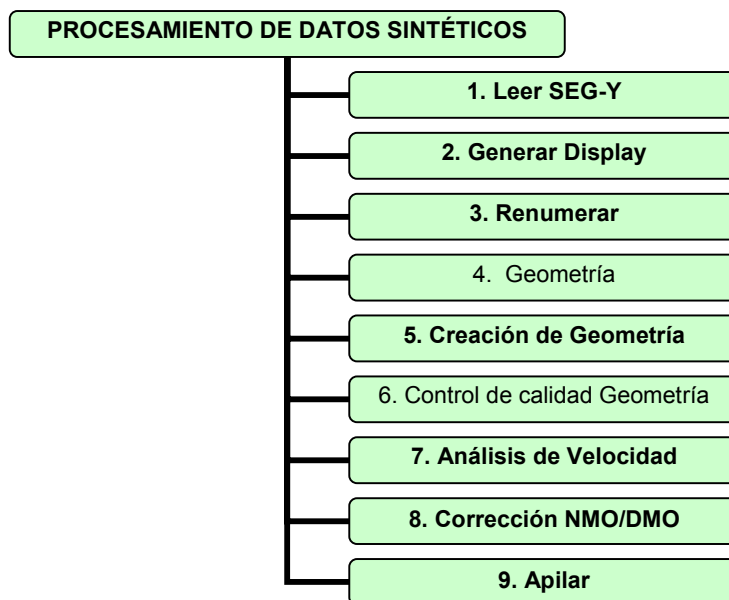


Figura 51. Flujos básicos en el procesamiento con ProMAX.5.2.1.1. Leer SEG-Y: Se leyeron los datos en formato seg-y provenientes de NORSAR este archivo se convirtió a un archivo en formato ProMAX.

5.2.1.2. Generar *Display*: Se visualizaron todos los disparos con ayuda del proceso *Trace Display*, además se le aplicó una ganancia a los datos (*Automatic Gain Control*) solo para visualizarlos.

5.2.1.3. Renumerar: Como es mencionó anteriormente la adquisición fue hecha en bloques lo cual implica que el número de registro (FFID ** *file field ID*), se reiniciará

en cada bloque, esto exige reenumerar los registros en ProMAX de tal forma que sean consecutivos.

5.2.1.4. Geometría: En esta etapa se configura la geometría de adquisición, es decir, se definen los parámetros de fuentes y receptores (Figura 52).

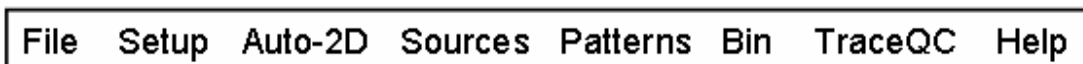


Figura 52. Geometría.

5.2.1.5. Creación de Geometría: Esta etapa estuvo compuesta de 4 fases;

La primera fase consistió en definir el *Auto Marine 2D Geometry*¹⁶ (Tabla 9).

| Auto Marine 2D Geometry | |
|--|----------|
| Canal más lejano | 1 |
| Canal más cercano | 240 |
| Incremento en el canal | 1 |
| Mínimo offset | 270.95 m |
| Offset Perpendicular | 0 |
| Intervalo Grupo | 12.5 m |
| Número de disparos | 3464 |
| Primera estación de disparo | 3776 |
| Incremento en el número de estación de disparo | -1 |
| Azimut línea | 309 |
| Intervalo de disparo | 25 m |
| Primera coordenada de disparo en x | 86700 m |
| Primera coordenada de disparo en y | 0 |

Tabla 9. Auto Marine 2D Geometry.

La segunda fase es definir las Fuentes: consistió en asignar a cada punto de tiro y recepción sus coordenadas correspondientes (Figura 53).

La tercera fase: consistió en asignar patrones, es decir, asignar el número mínimo y máximo de canales, su incremento y distancia fuente-receptor.

¹⁶ Auto Marine 2D Geometry: Etapa que se realiza para cargar la geometría consiste en definir los parámetros para la adquisición.

| Mark Block | Source | Station | X | Y | H2O Depth | Src Depth | FFID | Strwr Aznth | Time | Date | Src Pattern | Shot Fold* | Static |
|------------|--------|---------|---------|-------|-----------|-----------|------|-------------|------|------|-------------|------------|--------|
| 1 | 1 | 3776 | 86700,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 2 | 2 | 3775 | 86890,6 | 15,7 | 0,0 | 0,0 | 2 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 3 | 3 | 3774 | 86861,1 | 31,5 | 0,0 | 0,0 | 3 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 4 | 4 | 3773 | 86641,7 | 47,2 | 0,0 | 0,0 | 4 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 5 | 5 | 3772 | 86622,3 | 62,9 | 0,0 | 0,0 | 5 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 6 | 6 | 3771 | 86602,9 | 78,7 | 0,0 | 0,0 | 6 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 7 | 7 | 3770 | 86583,4 | 94,4 | 0,0 | 0,0 | 7 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 8 | 8 | 3769 | 86564,0 | 110,1 | 0,0 | 0,0 | 8 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 9 | 9 | 3768 | 86544,6 | 125,9 | 0,0 | 0,0 | 9 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 10 | 10 | 3767 | 86525,1 | 141,6 | 0,0 | 0,0 | 10 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 11 | 11 | 3766 | 86505,7 | 157,3 | 0,0 | 0,0 | 11 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 12 | 12 | 3765 | 86486,3 | 173,1 | 0,0 | 0,0 | 12 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 13 | 13 | 3764 | 86466,9 | 188,8 | 0,0 | 0,0 | 13 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 14 | 14 | 3763 | 86447,4 | 204,5 | 0,0 | 0,0 | 14 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 15 | 15 | 3762 | 86428,0 | 220,3 | 0,0 | 0,0 | 15 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 16 | 16 | 3761 | 86408,6 | 236,0 | 0,0 | 0,0 | 16 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 17 | 17 | 3760 | 86389,1 | 251,7 | 0,0 | 0,0 | 17 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 18 | 18 | 3759 | 86369,7 | 267,5 | 0,0 | 0,0 | 18 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 19 | 19 | 3758 | 86350,3 | 283,2 | 0,0 | 0,0 | 19 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 20 | 20 | 3757 | 86330,9 | 298,9 | 0,0 | 0,0 | 20 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |
| 21 | 21 | 3756 | 86311,4 | 314,7 | 0,0 | 0,0 | 21 | 129,0 | | | 1 | 240 | 0,0 |

Figura 53. Fuentes.

La cuarta fase: *2D Marine Binning*¹⁷ que se llevó a cabo en tres pasos; primero se organizaron los datos por punto medio, luego se realizó el *Binning* y finalmente se almacenaron en la base datos (Figura 54).

Figura 54. Binning.

¹⁷ Binning: Etapa que se realiza para cargar la geometría consiste en agrupar los datos por punto medio común y definir la distancia entre cdp, receptores y fuentes.

5.2.1.6. Control de Calidad Geometría: Este proceso consistió en realizar un control de calidad a la geometría adquirida anteriormente.

5.2.1.7. Análisis de velocidad (Figura 55): Este proceso se realizó sobre un conjunto de CMP o grupos de CMP determinados. Consistió en evaluar los máximos valores de coherencia con el objetivo de obtener un campo (Figura 56) de velocidades NMO.

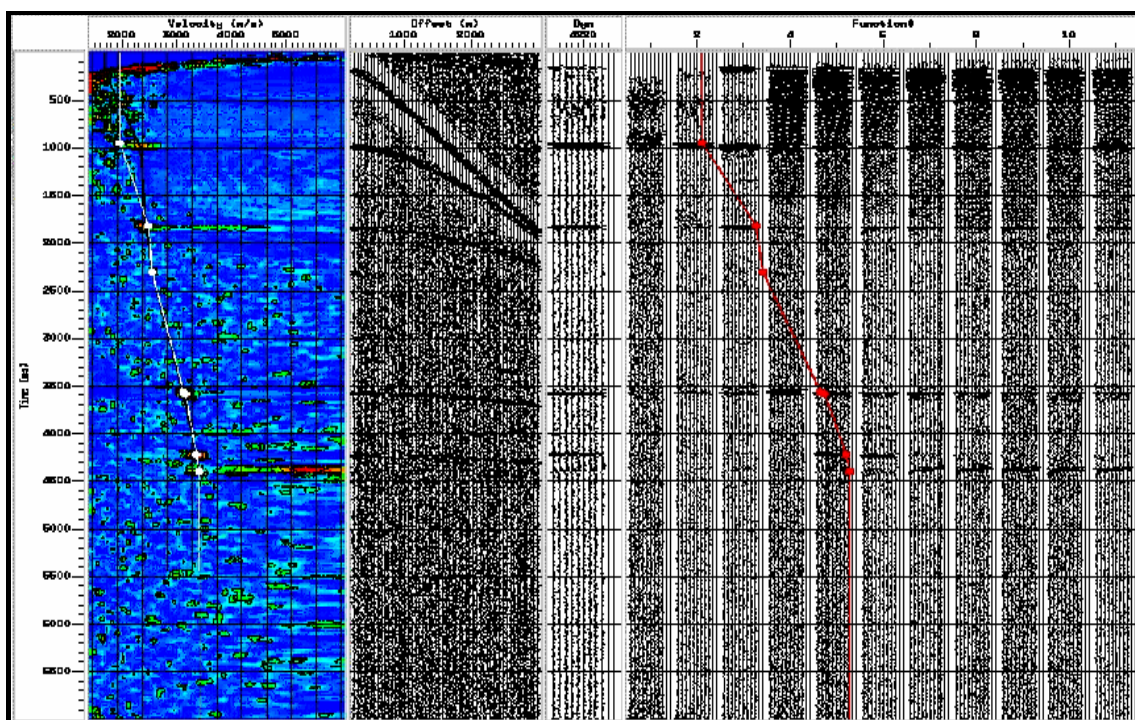


Figura 55. Análisis de velocidades.

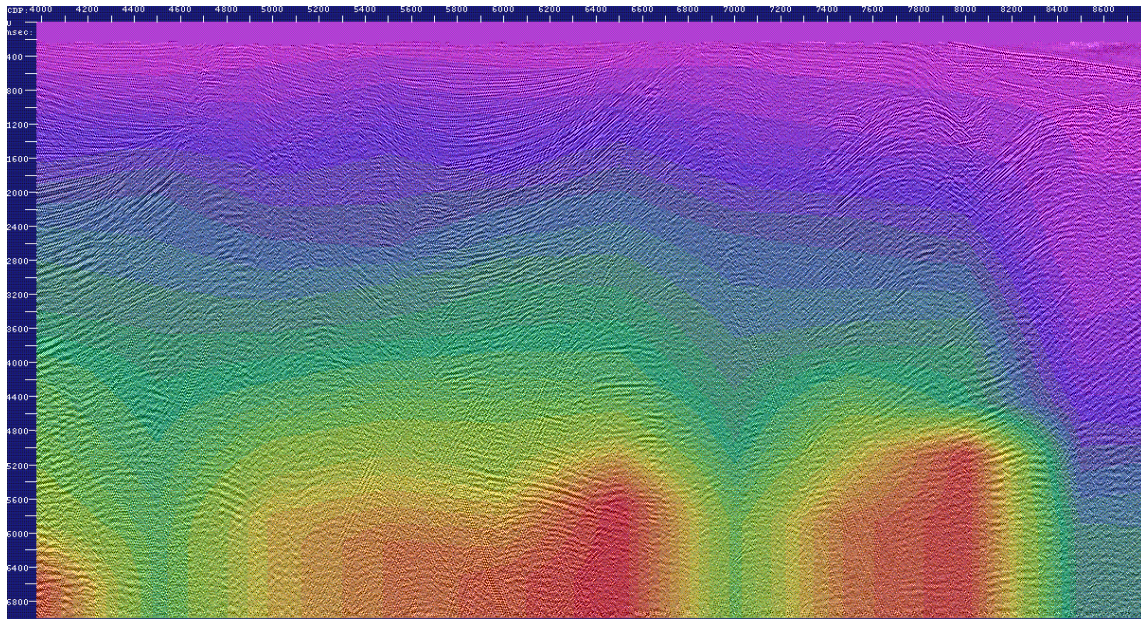


Figura 56. Campo de Velocidades.

5.2.1.8. Corrección NMO/DMO: Por efecto de offsets diferentes a cero obtenemos trayectorias hiperbólicas de los eventos de reflexión; la corrección NMO horizontaliza dichos eventos. La corrección DMO tiene por objetivo la corrección de los errores del apilamiento NMO debido al buzamiento de los reflectores.

5.2.1.9. Apilar: Consistió en sumar la información de las trazas presentes en el CMP las cuales ya no eran dependientes del offset para obtener un promedio de las amplitudes (Figuras 57 y 58).

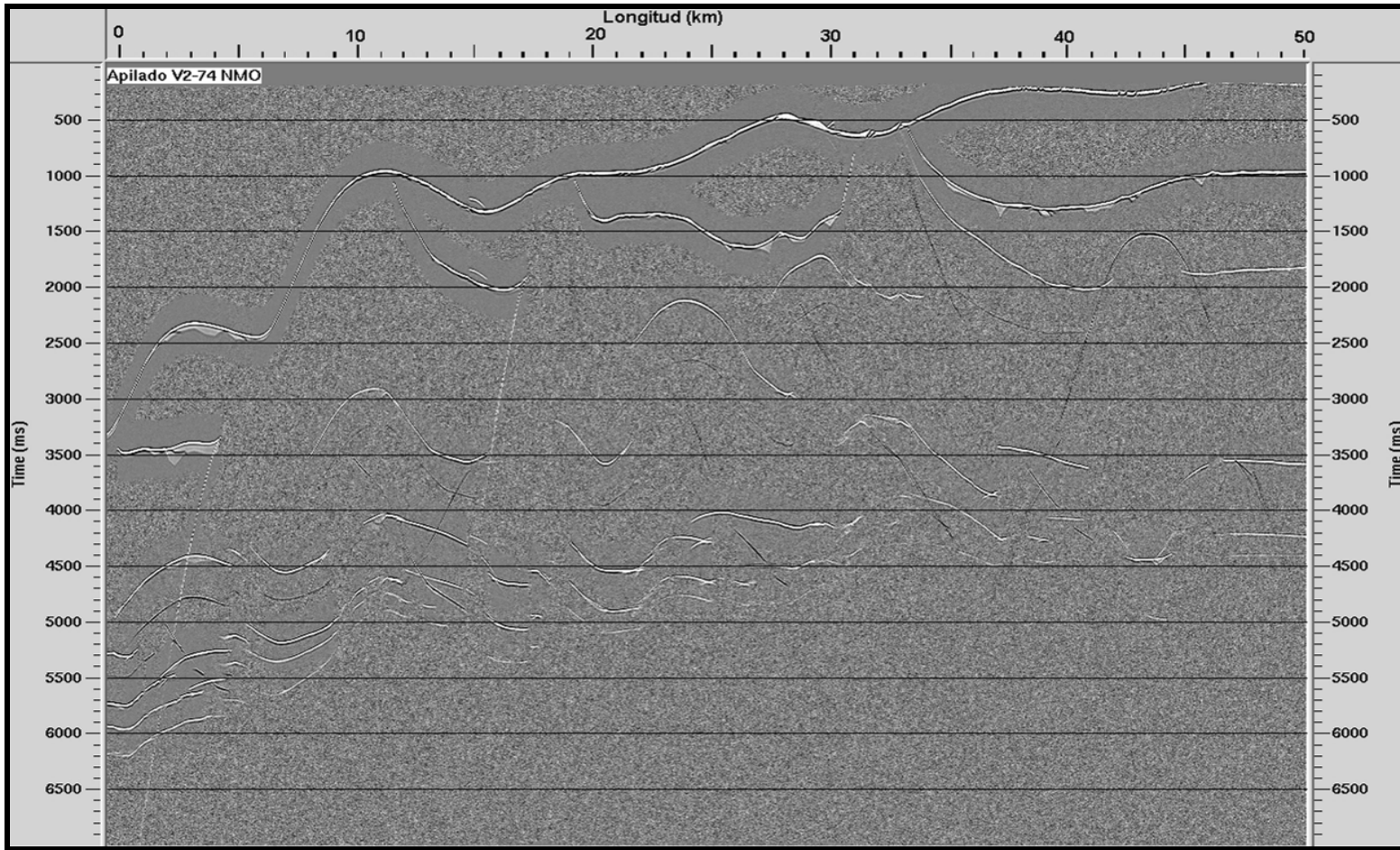


Figura 57. Apilado NMO.

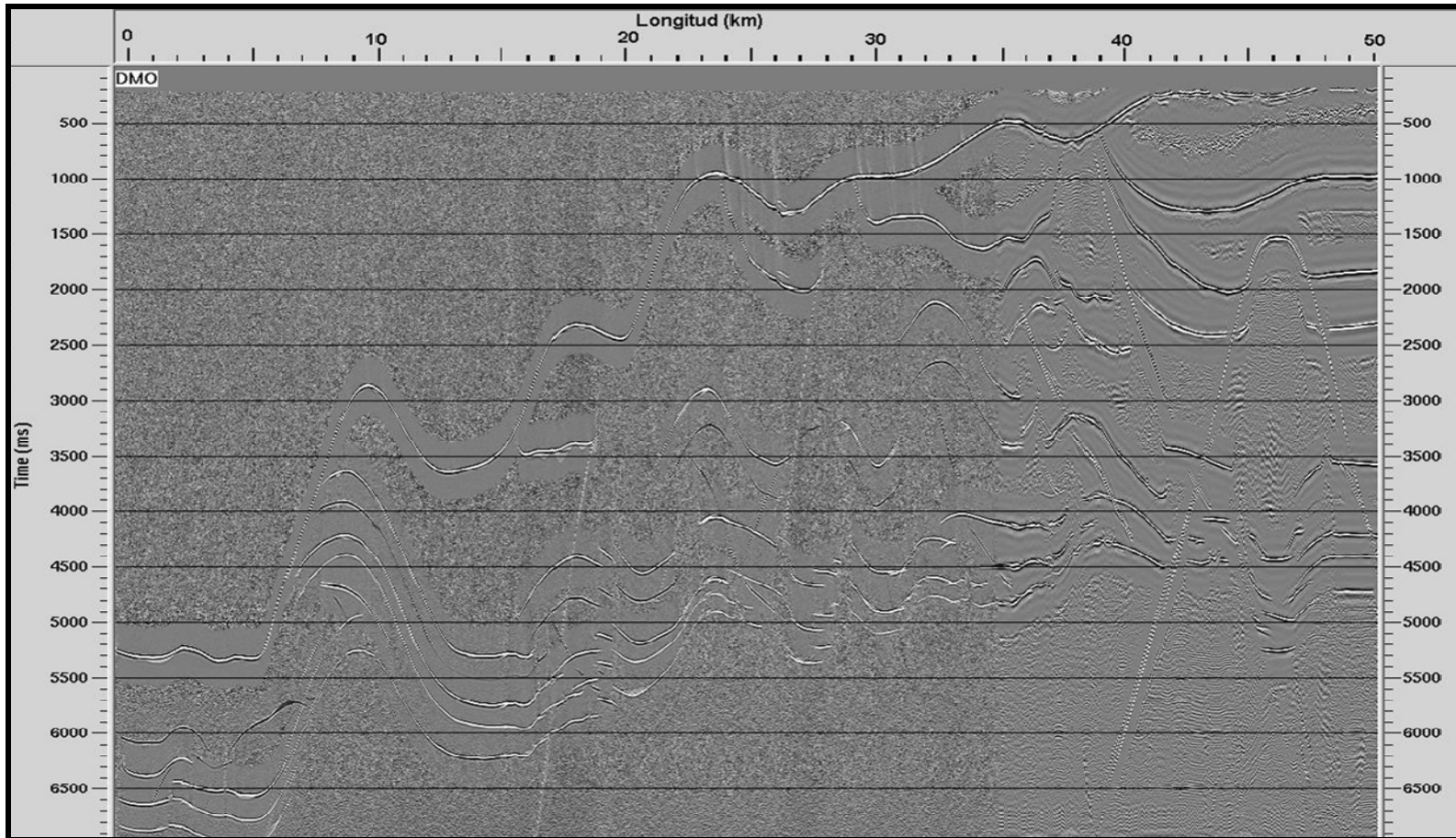


Figura 58. Apilado DMO.

5.2.2 Procesamiento de datos sintéticos por la técnica de apilado CRS

Para aplicar la técnica CRS se debe establecer los parámetros de entrada como la velocidad de la superficie, las aperturas, entre otras. Posteriormente el programa determina automáticamente los parámetros (como son R_{NIP} , R_N y β) que necesita para realizar el apilado a los datos pre-apilados por la técnica convencional.

Para el procesamiento de los datos sintéticos fue necesario segmentar los cdp en 3 partes; la primera parte comprendida entre los 4000 a 8000 cdp's, la segunda parte va desde los 8000 a 12000 cdp's y la tercera parte comprendida entre los 12000 y 16000 cdp's, debido a la gran longitud de la línea sísmica. Las variables que se tuvieron en cuenta consistieron en las aperturas máximas y mínimas; las aperturas máximas "maxxap" las cuáles consistieron de 100 m, 120 (Figura 59), 240, 500, 1000 (Figura 60) y mínima "minxap" de 30, 40, 65 m. También se definieron unas velocidades máximas y mínimas para el código; $v_{nmomin}= 1400$ km/s y $v_{nmomax}=5000$ la velocidad mínima corresponde a la primera interfase o unidad geológica que se pueda encontrar pero el modelo es offshore la primera interfase correspondió a la columna de agua.

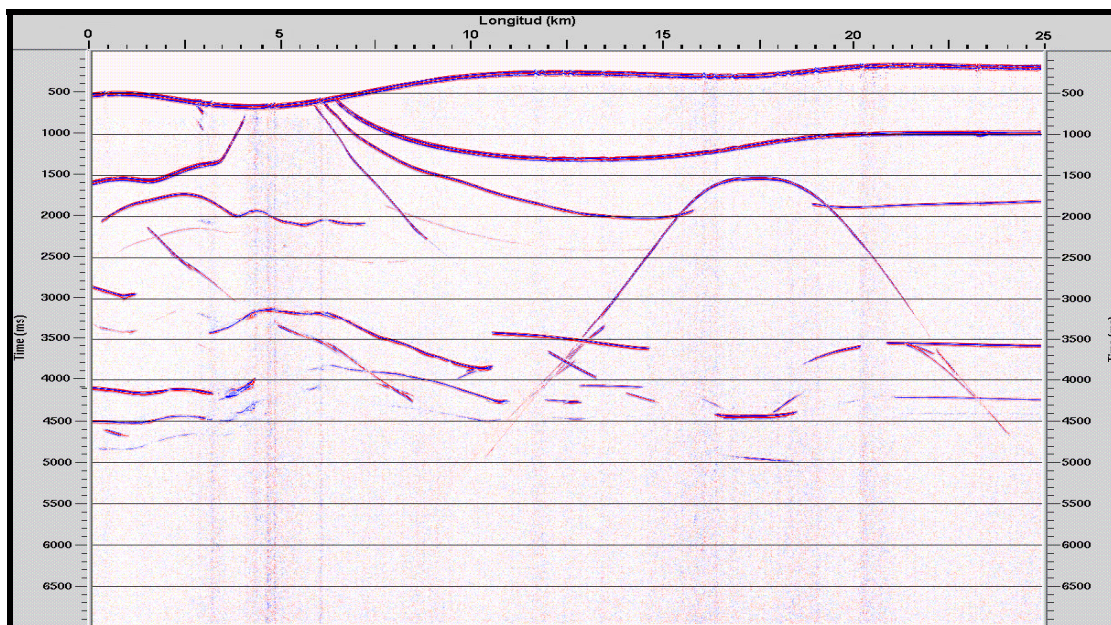


Figura 59. Apilado con operador de 120 cdp 8000-12000.

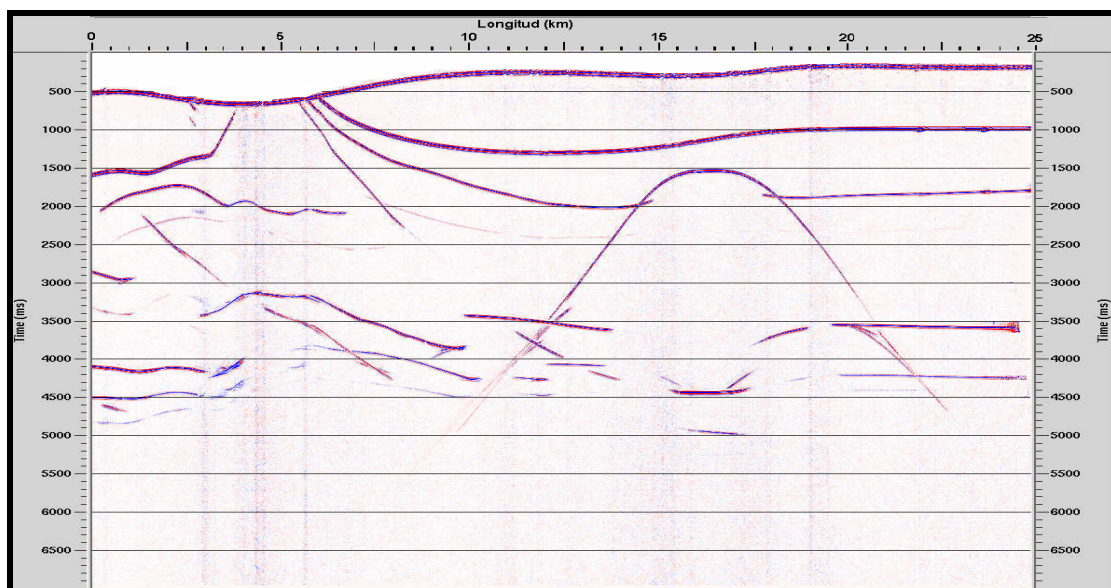


Figura 60. Apilado con operador de 1000 cdp 8000-12000.

5.3 PROCESAMIENTO DE DATOS REALES

5.3.1 Procesamiento de datos reales con ProMAX

Similar al procesamiento de datos sintéticos pero con pasos adicionales se realizó el procesamiento de los datos reales (Figura 61). Debido a la gran longitud de la línea y por razones prácticas la información fue dividida en tres grupos CDPS los cuales son; 3978-8779, 9261-13458, 13458-18685.

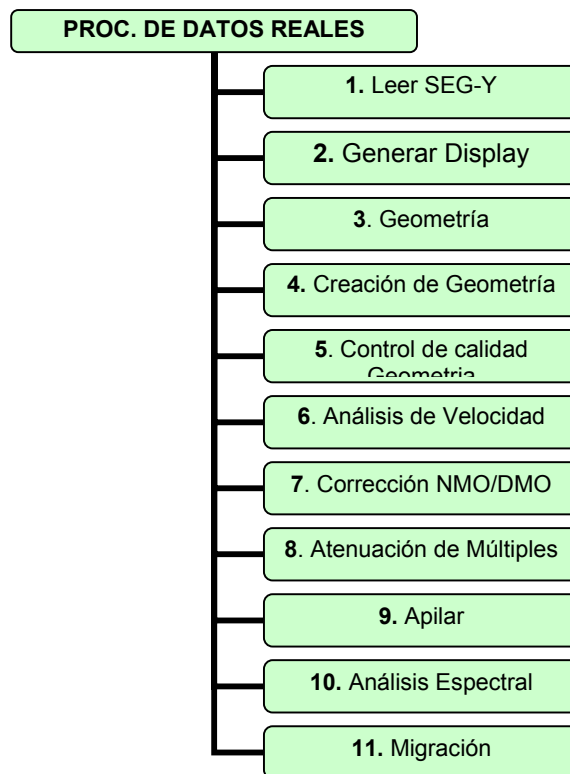


Figura 61. Flujos básicos en el procesamiento con ProMAX.

5.3.1.1. Primeras etapas: Las etapas del 1-7 se realizan de forma similar a las etapas explicadas anteriormente.

5.3.1.2. Atenuación de Múltiples; A diferencia de las otras etapas la atenuación de múltiples se llevó a cabo con el programa Hampson y Russell para ello fue necesario importar los SEG-Y de ProMAX.

En este programa la técnica empleada para la atenuación de múltiples consistió en medir el moveout residual de los eventos con respecto al múltiple y atenuar los eventos que presente tales move out residuales. Estos datos son exportados a ProMAX para continuar procesando los datos con múltiples atenuados.

5.3.1.3. Apilamiento: Se obtuvieron dos imágenes de apilamiento las cuales consistieron en el apilamiento NMO (Figura 62) y apilamiento DMO (Figura 63).

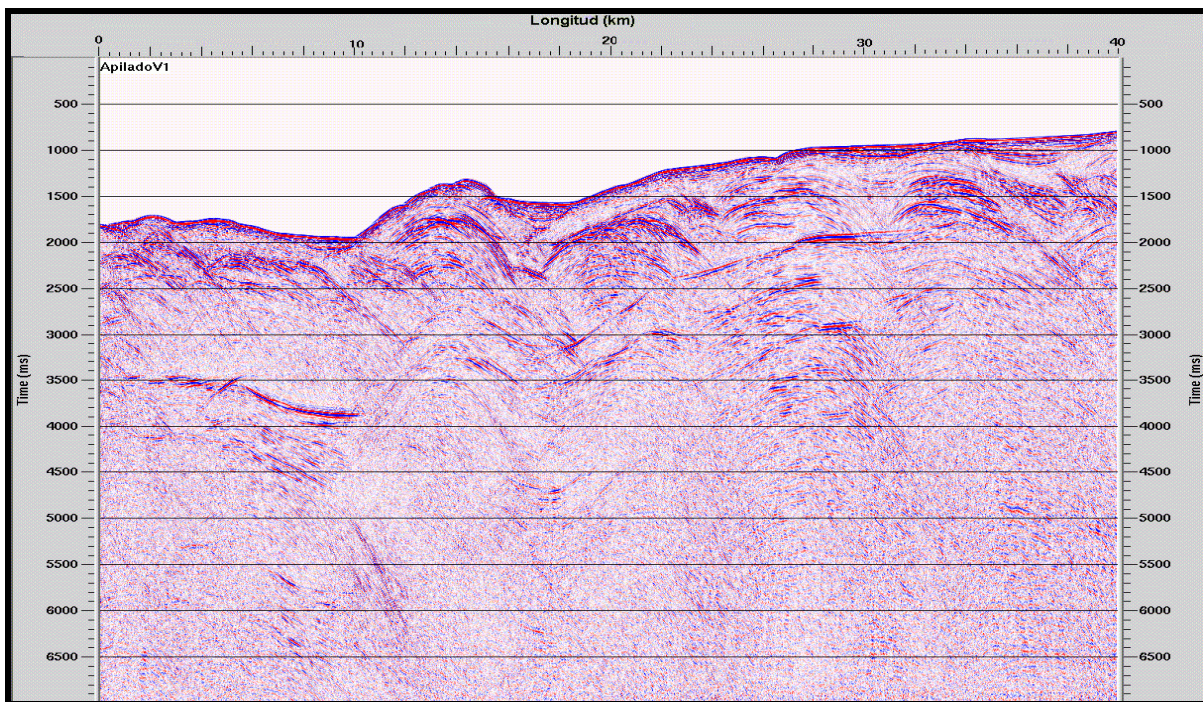


Figura 62. Apilamiento NMO para CDP 9261-13458.

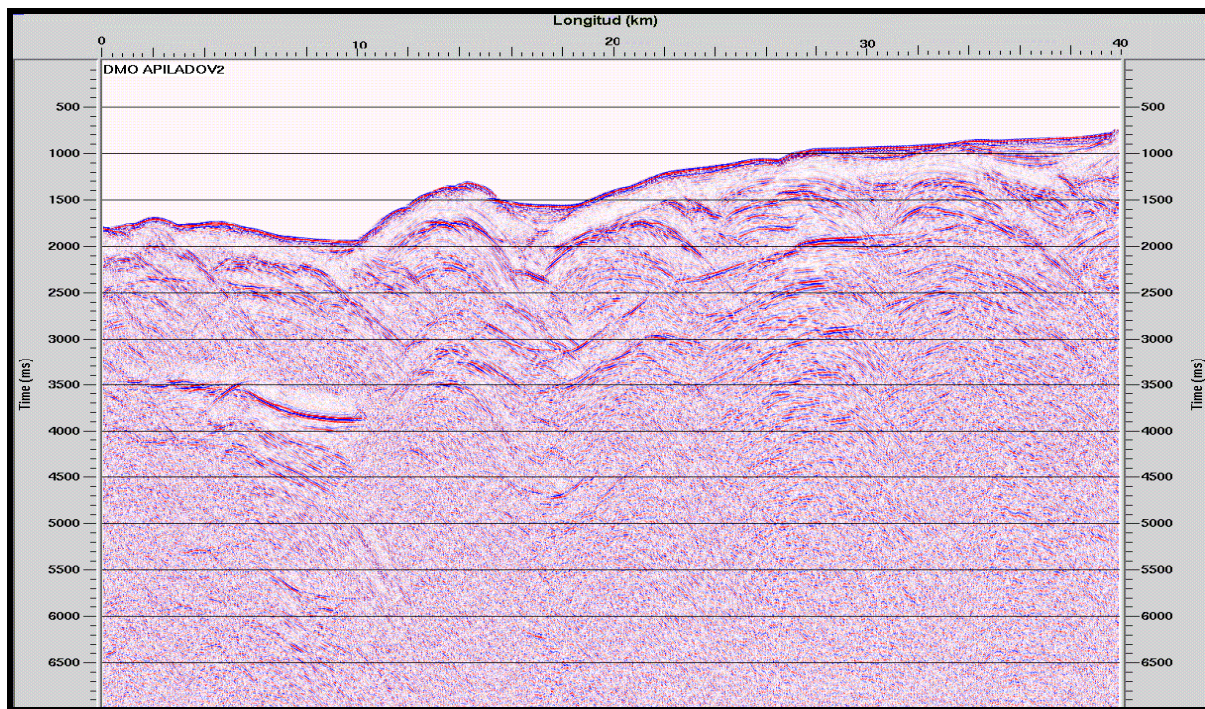


Figura 63. Apilamiento DMO para CDP 9261-13458.

5.3.1.4 Análisis Espectral: Se realizó para observar el contenido frecuencial en la sección sísmica (Figura 64) y (Figura 65).

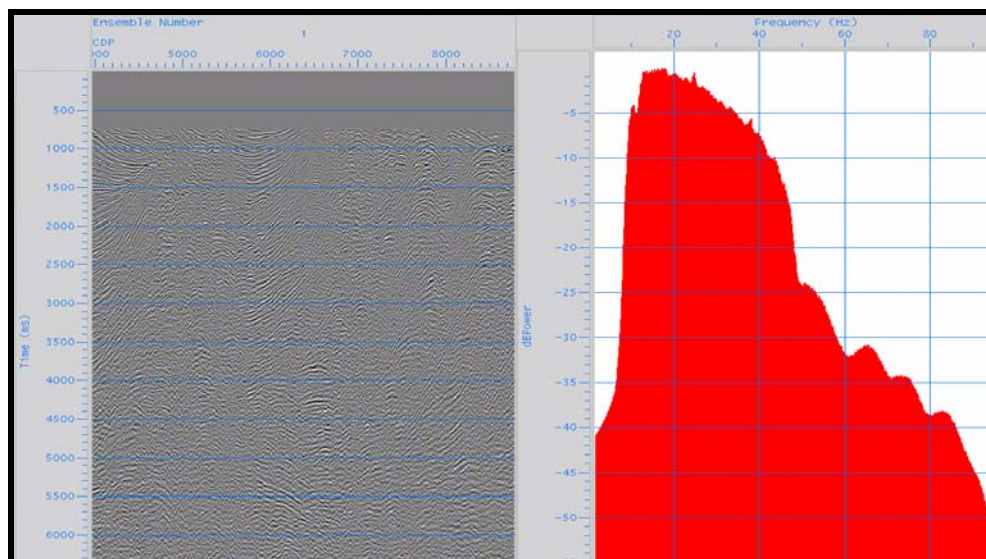


Figura 64. Análisis espectral Apilado V1 CDPS 3978-8779.

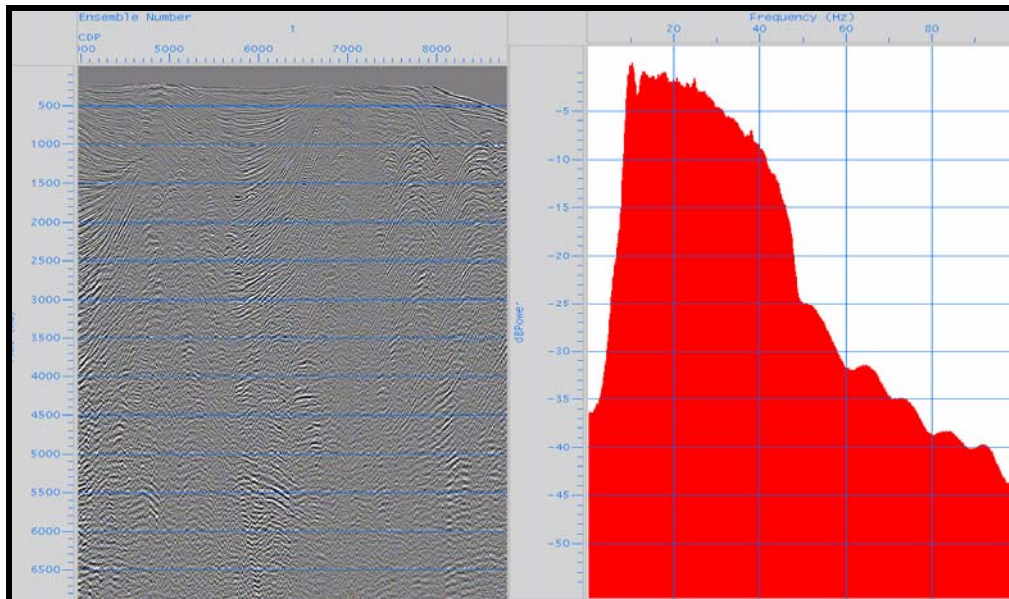


Figura 65. Análisis espectral Apilado DMO CDPS 3978-8779.

5.3.1.5. Migración: Esta etapa se llevó acabo para reubicar los reflectores a su verdadera posición para ellos se realizó migración por Kirchhoff (Figura 66) empleando aperturas; de longitudes 500-1000-1500 y apertura de buzamiento de 0-80-180, de las cuales se eligieron aperturas de 1500 en longitud y 180 en buzamiento.

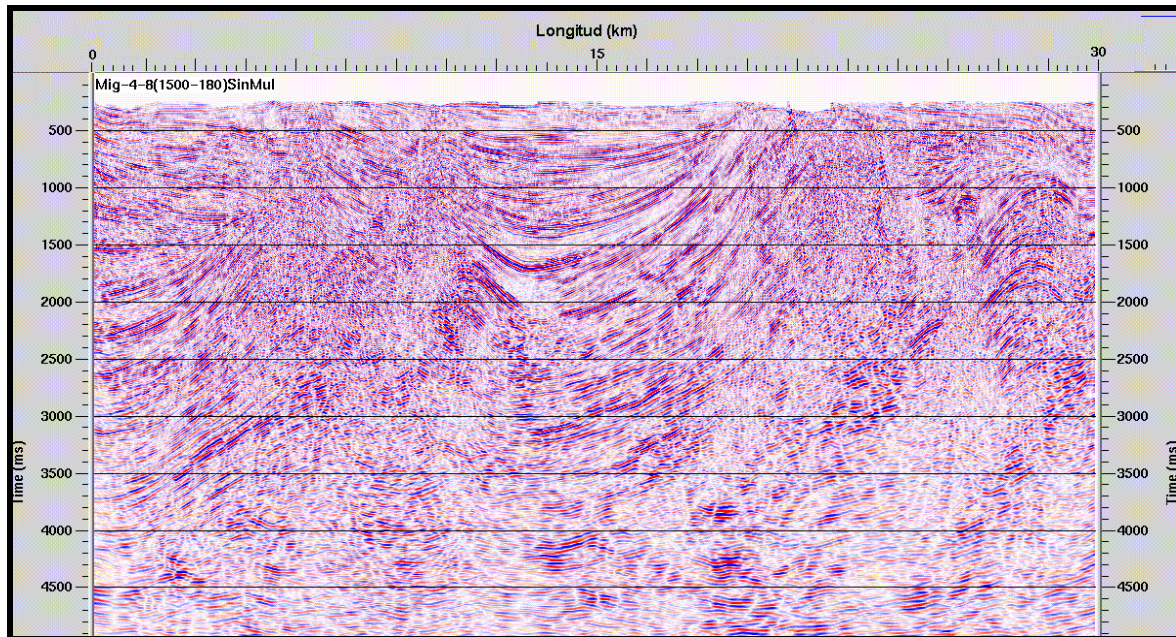


Figura 66. Migración Kirchhoff para los CDP 9261-13458 con un operador de longitud de 1500 y buzamiento de 180.

5.3.2 Procesamiento de datos reales por la técnica de apilado CRS

Similar al procesamiento de datos sintéticos el procesamiento por la técnica de apilado CRS emplea el mismo código y las variables que el procesamiento de datos sintéticos. Las cuáles consistían básicamente en aperturas máximas y mínimas; las aperturas máximas “maxxap” las cuáles consistieron de 100, 120, 240, 500 (Figura 67), 1000 (Figura 68) y mínima “minxap” de 30, 40, y 65. También se definieron unas velocidades máximas y mínimas para el código; vnmomin= 1400 y vnmomax=5000, la velocidad mínima corresponde a la primera interfase o unidad geológica que se pueda encontrar pero como nuestro modelo es offshore la primera interfase correspondió a la columna de agua.

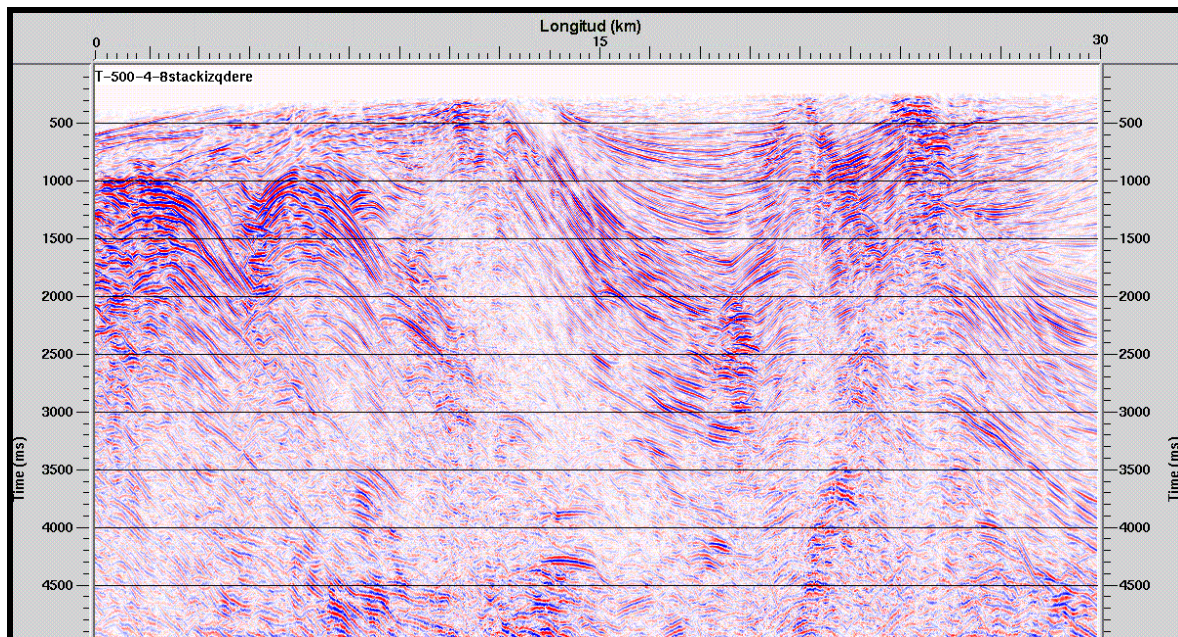


Figura 67. Apilado CRS para los CDP 3978-8779 con aperturas máxima 500 y mínima 40.

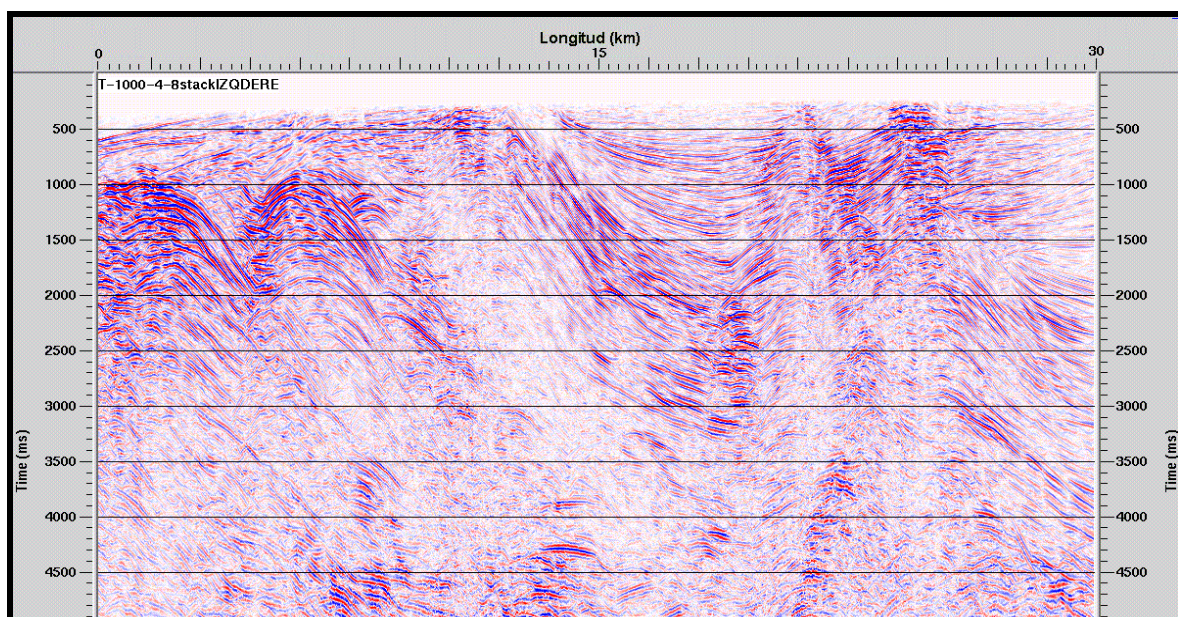


Figura 68. Apilado CRS para los CDPs 3978-8779 con aperturas máxima 1000 y mínima 40.

A los datos CRS se aplicó también migración para reubicar los reflectores a su verdadera posición para ellos se realizó migración por Kirchhoff empleando

aperturas; de longitudes 500, 1000, 1500 (Figura 69) y apertura de buzamiento de 0, 80, 180.

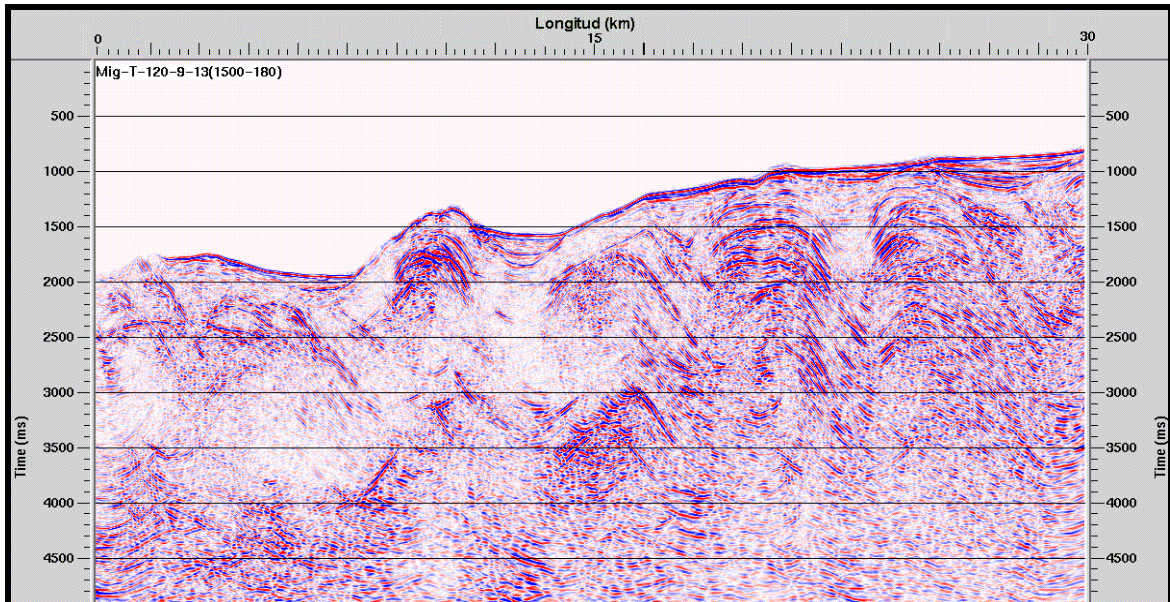


Figura 69. Migración Kirchhoff para los CDP 9261-13458 con un operador de longitud de 1500 y buzamiento de 180.

6. INTERPRETACIÓN SÍSMICA

6.1. METODOLOGÍA

El presente Capítulo contiene una explicación del estilo estructural predominante en la zona de estudio a partir de la interpretación de las secciones apiladas. La descripción se inicia con un ejemplo mundial, continúa con una breve descripción del contexto tectónico regional y termina con una interpretación estructural de algunos sectores del área de estudio.

6.1.1. Análogos Mundiales: Delta del Níger

Debido a que el área de estudio (Caribe Colombiano) presenta estructuras propias de ambientes de aguas profundas en márgenes activos y que a escala mundial existen ejemplos que presentan dominios estructurales semejantes a los representados en este trabajo, a continuación comentaremos sus características.

Según Weimer, P., (2007) existen cuatro tipos de cuencas en lo que respecta a ambientes de aguas profundas, las cuales son 1) Cuencas con sustrato móvil (sal, lodo) alimentadas por grandes afluentes de agua, 2) Cuencas con sustrato móvil alimentadas por pequeños afluentes de agua, 3) Cuencas con sustratos no móviles alimentadas por pequeños afluentes de agua, 4) Cuencas que contienen reservorios que no pertenecen a aguas profundas. Nuestro caso corresponde al tipo número uno (1), es decir, cuencas con sustrato móvil (lodo en este caso) alimentadas por grandes afluentes de agua (Ríos Magdalena y Sinú).

6.1.1.1 Delta del Níger: Se encuentra localizado en el Golfo de Nueva Guinea y se extiende a través de la Provincia del Delta del Níger (Klett et al, 1997) (Figura 70). La provincia del Delta del Níger está delimitada por la geología del sur de Nigeria y

suroeste de Camerún. Al norte limita con el flanco de Benin con tendencia noreste-este y está definido por los afloramientos del Cretácico sobre el alto de Abakaliki y hacia el este-sureste por el flanco Calabar. En tanto que la zona offshore está definida por la línea volcánica de Camerún al este, el límite oriental es la cuenca de Dahomey (Lo más oriental del margen transformante del oeste de África) al oeste. Esta cuenca es considerada una de las más prolíferas de hidrocarburos del mundo. El espesor de sus sedimentos es de unos 12 km en su parte central. Las reservas de ésta cuenca, estimadas en unos 35 BBO (billones de barriles de aceite) y 120 tcf (tera pies cúbicos) de gas (Ekweozor y Daukoru, 1994).

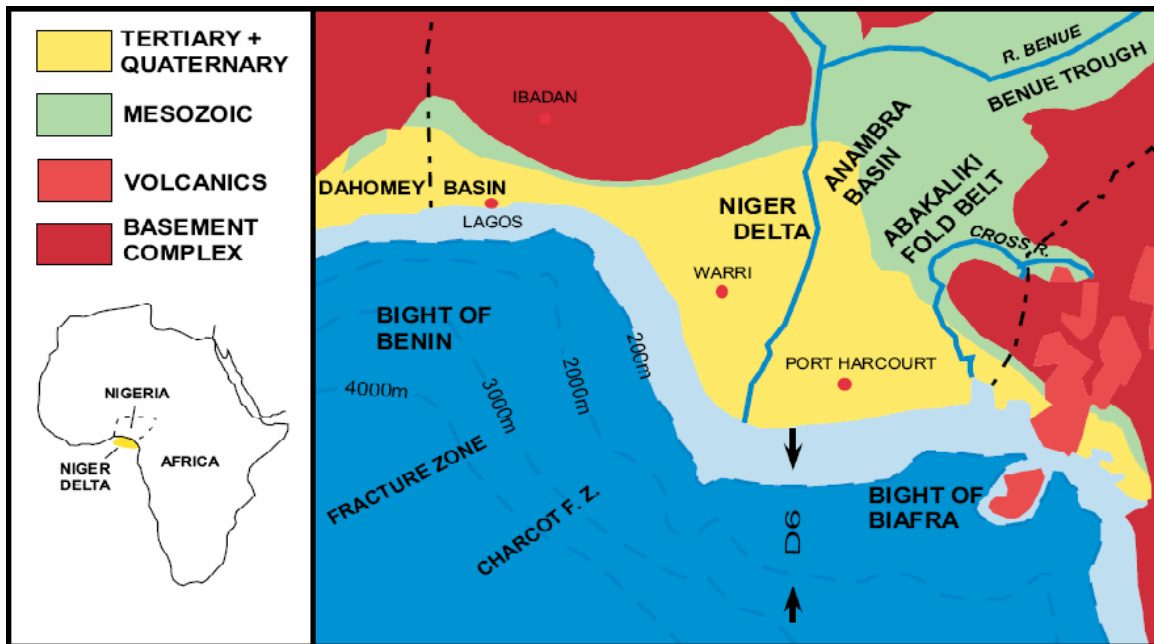


Figura 70. Mapa de localización del Delta del Níger y el Offshore de Nigeria (Tomado de Ajakaiye, D., y Bally, A., 2002).

A continuación se representa en la tabla 10 donde se comparan las cuencas de Sinú-San Jacinto y la cuenca del Delta del Níger.

| | Cuenca Sinú – San Jacinto | Cuenca del Delta del Níger |
|------------------------|--|--|
| Tipo de Margen | Activo (Duque-Caro, H., 1979) | Pasivo Rifting (Turtle, M. L., et al 2001) |
| Actividad Tectónica | Lineamiento del Sinú, fallas de rumbo y prisma de acreción. (Burke, K., et al 1984). | Rotación por gravedad (Turtle, M. L., et al 2001) |
| Edad de la deformación | Mioceno a Plioceno (Ruiz, C., et al 2000) | Mioceno a Plioceno Medio (Ajakaiye, D., et al 2002) |
| Tasa de sedimentación | Mioceno medio Aportes de los ríos Magdalena y Sinú. Por encima de 10 km de espesor (Duque-Caro, H., 1984) | Eoceno Aportes por el río Níger Por encima de 10 km. de espesor (Doust y Omatsola, 1989) |
| Tipo de estructuras | Cuña acrecionada, fallas de cabalgamiento, estratos imbricados (cuencas piggyback) y presencia de fallas rumbo-deslizantes. (Corredor, F., et al 2003) | Diapiros de lodo, anticlinales con rollover, rampas laterales de estructuras compresionales. (Ajakaiye, D., et al 2002). |
| Estilo Estructural | Se observa en la Figura 71. | Se observa en la Figura 72. |

Tabla 10. Tabla comparativa de las cuencas Sinú-San Jacinto y del Delta del Níger.

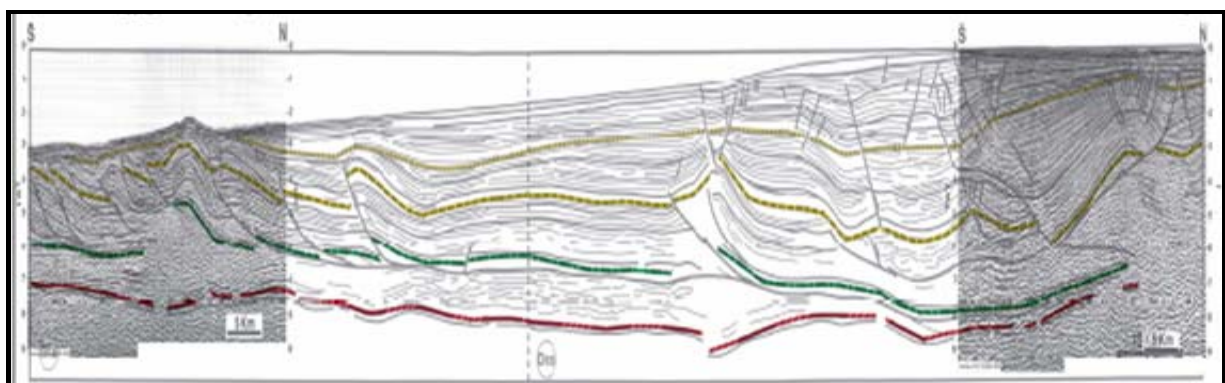


Figura 71. Estilo estructural del delta del Níger (Tomado de Ajakaiye, D. y Bally, A., 2002).

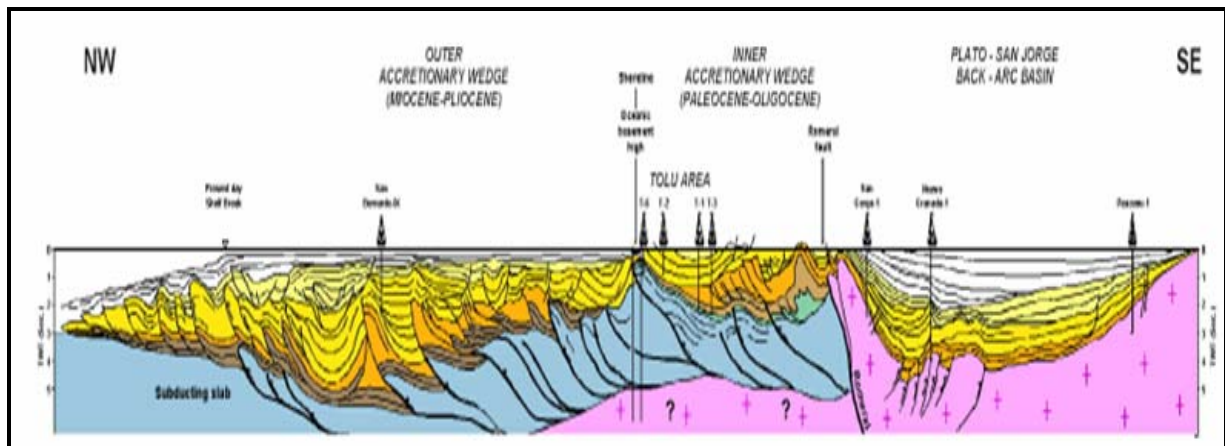


Figura 72. Estilo estructural de la cuña acrecionada del Sinú CSSJ (Tomado de Flinch, J. 2003).

6.1.2. Interpretación sísmica

A lo largo de las secciones apiladas del área de estudio se definieron verticalmente tres zonas (Profunda, Intermedia y Somera), que permiten describir las geometrías presentes en (Figura 73). La zona Profunda se extiende aproximadamente desde 4500 ms hasta 7000 ms; la zona Intermedia se extiende entre los 1500 ms y 4500 ms; y la zona Somera entre 250 ms y 1500 ms. Horizontalmente se definieron tres sectores: I es el sector más oriental de la línea; II es la parte central del área y III es la parte occidental de la línea. A continuación describiremos las geometrías de cada sector, con base en las tres zonas verticales.

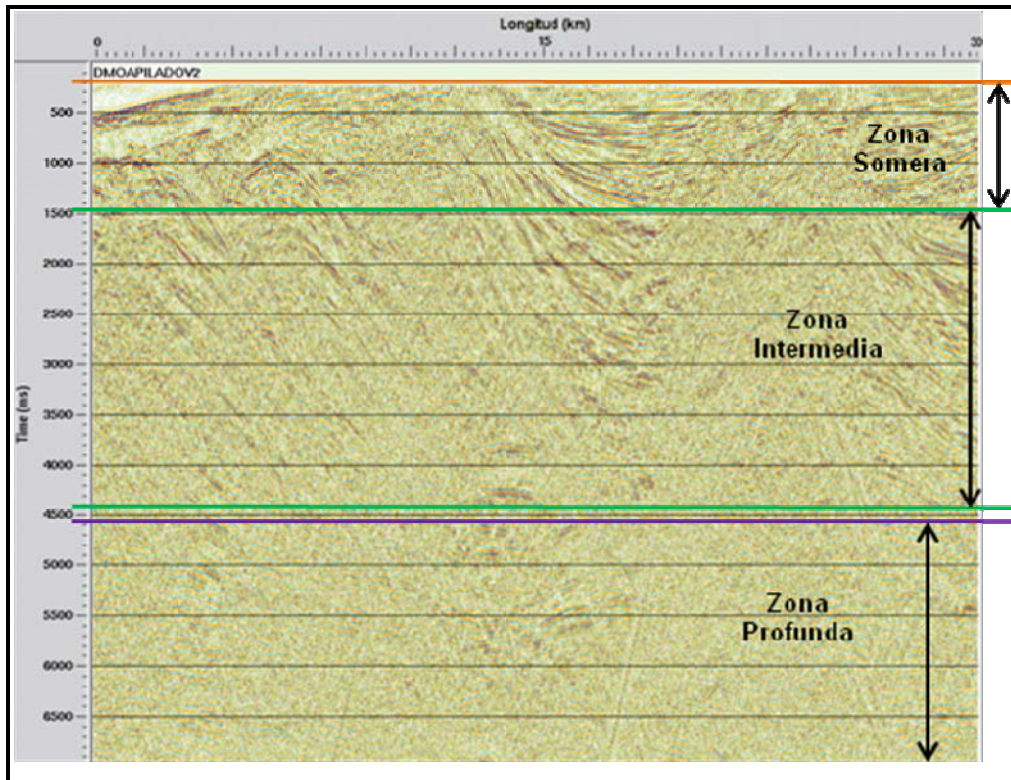


Figura 73. Identificación de Zonas de dominios estructurales.

6.1.2.1. Sector I: Describe las zonas para el sector I (Figuras 74 y 75) donde la primera es una sección apilada con NMO y la segunda, es una sección apilada con CRS. En la tabla 11 mostramos una descripción (D) e interpretación (I) de las secciones por zonas.

DMO

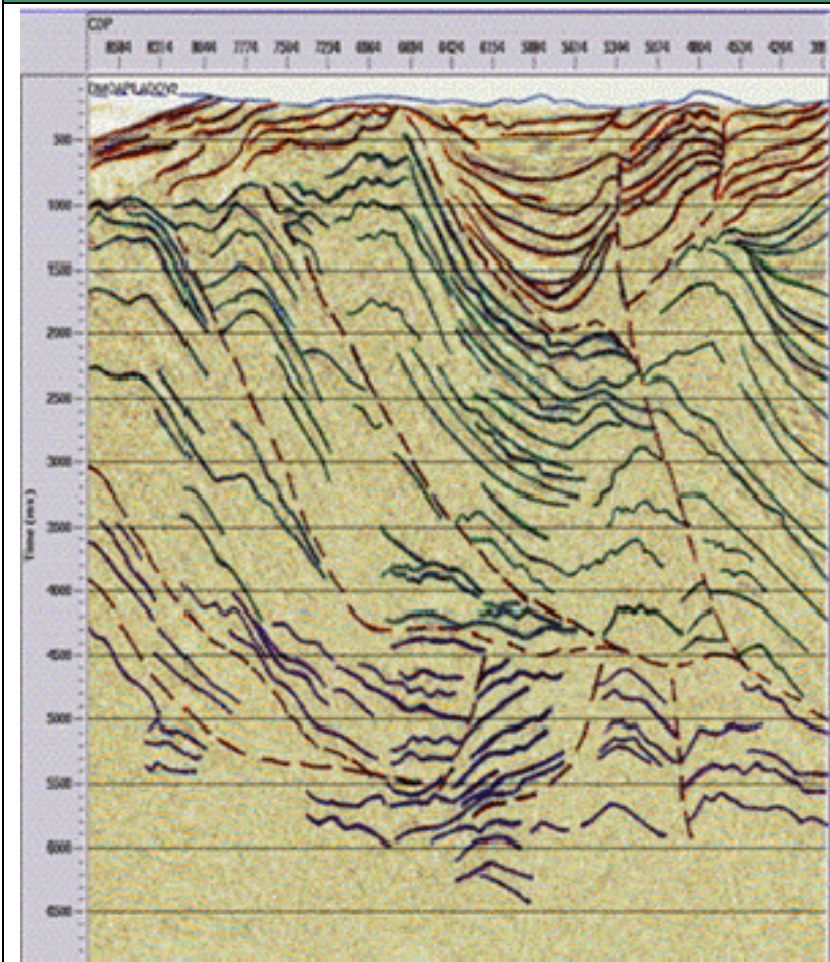


Figura 74. Sección Apilada DMO.

CRS

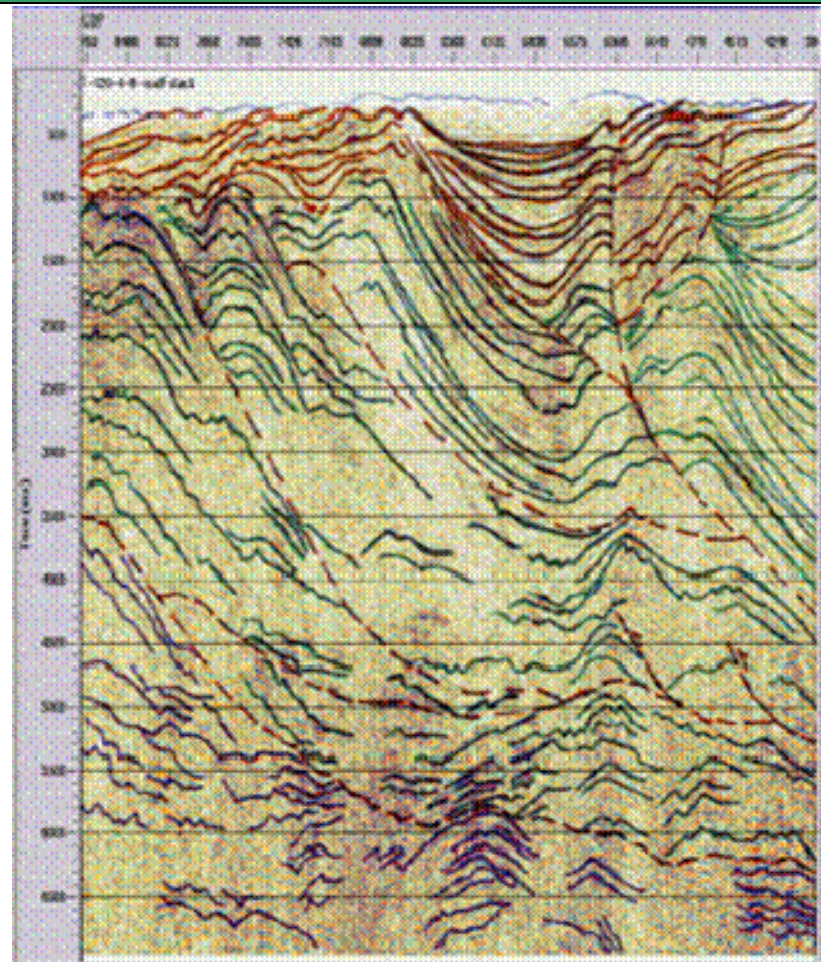


Figura 75. Sección Apilada CRS.

| DMO | CRS |
|--|---|
| <p>Zona Somera: (D) Se aprecian cierto número de reflectores continuos y definidos que muestran tres patrones de dirección el primero (derecha) muestra dos grupos de reflectores, uno limitado por un ligero plegamiento de los reflectores de la otra zona y con buzamiento menor. El segundo son los reflectores con geometría cóncava que están paralelos entre sí describiendo la misma forma y el tercer patrón muestra reflectores semi horizontales que hacia su parte terminal muestran una flexura. Los reflectores que se vieron muestran contenidos de bajas amplitudes.</p> <p>(I) Se observan geometrías definidas como cuencas tipo piggyback hacia la parte central de la sección, para la zona derecha lo que se observa es la posible presencia un back thrust pero no es muy claro por donde se extiende este, y a su vez unos horizontes acuñados hacia la parte inferior derecha que se podría interpretar como un acuñamiento de horizontes o un posible canal que se pincha en esta parte de la zona.</p> | <p>Zona Somera: (D) En esta sección observamos que hay un mayor número de reflectores pero estos contienen al parecer altas amplitudes, observadas en los plegamientos de los reflectores y zonas donde se intersectan los reflectores. Los reflectores describen un acuñamiento hacia la parte superior derecha que a su vez presentan reflectores semi-curvos hacia la parte más superficial con cierta caída hacia el lado izquierdo donde se intersectan con otros reflectores que vienen buzando de forma opuesta, luego encontramos otro grupo de reflectores con geometría cóncava limitados por una zona de estrechez de los reflectores y otra donde se intersectan con el patrón de dirección comentado anteriormente, y el último grupo muestra los reflectores con una tendencia subparalela entre sí pero se encuentran buzando con bajo ángulo ya que caen suavemente sobre los topes de los reflectores plegados.</p> <p>(I) Se observan 4 zonas de patrones geométricos, el primero nos muestra los horizontes acuñados en un punto y luego otros horizontes suprayaciendo a éstos pero manteniendo el mismo ángulo de buzamiento indicándonos una zona de estratos de crecimiento que se asocian a las dos fallas inversas que me determinan el otro patrón geométrico que son los back thrust y que a su vez dieron origen a las cuencas piggy back que se encuentran en los flancos traseros de estas. El tercer patrón lo conforman el cabeceo de los flancos de los pliegues que están cabalgando y por último los horizontes que muestran ciertas estructuras con geometría irregular pero que buzando con bajo ángulo.</p> |
| <p>Zona Intermedia: (D) Se observan reflectores hacia el lado derecho de la sección con cierto sub-paralelismo y buzamiento de bajo ángulo entre ellos pero a medida que ascendemos estos reflectores adquieren un espesor considerable y en cierto punto se van superponiendo como acuñándose, esta geometría se presenta a lo largo de la sección. Hacia la parte central los reflectores poseen formas cóncavas y a medida que se acercan su buzamiento se hace mayor a pesar de que se observan definidos y continuos otros muestran cierta irregularidad. Aunque a lo</p> | <p>Zona Intermedia: (D) Se aprecia un número mayor reflectores paralelos a sub-paralelos entre sí, que se encuentran limitados por dos patrones de geometría de buzamiento opuesto, uno que buza con alto ángulo en dirección vertical casi de 90° y el otro buza con ángulo moderado menor de 30° aproximadamente, en ésta zona los reflectores llegan y chocan con un espesor no tan pronunciado como los vistos en DMO, para el resto de la sección los reflectores presentan una forma lítrica con buzamientos de bajo ángulo y a su vez paralela entre ellos, hacia la parte terminal de los reflectores o tope, es visible</p> |

| | |
|---|--|
| <p>largo de la sección se observan reflectores es evidente que existen ciertos sectores donde no hay información generando zonas mudas.</p> <p>(I) Hacia el lado derecho de la sección se aprecian horizontes que están siendo plegados por una falla inversa que viene de la zona profunda y cuyo cabeceo de los pliegues es evidente. En general se aprecia un sistema de (4) fallas de cabalgamiento de moderado a alto ángulo con despegue basal en la zona profunda, evidenciado en la deformación de los estratos imbricados presentes.</p> | <p>ciertas flexuras en los reflectores deformados sinuosamente. Al parecer encontramos zonas mudas al igual que en DMO en ciertos sectores de la parte central.</p> <p>(I) La zona muestra una geometría compleja en lo relacionado a la deformación de las estructuras presentes en el área de estudio. En lo que respecta al despegue regional es posible que se encuentre a la altura de lo 5300 ms y por la geometría de los horizontes que son plegados por la misma indican de otro posible despegue que no se conoce su zona basal porque parece aflorar en la zona aledaña al área de estudio, para el despegue que se encuentra en la zona profunda lo definimos más por la geometría de esta zona que presenta sinclinales y anticlinales muy suaves que explicarían la presencia de fallitas locales con vergencia al oeste, además es posible seguir a los pliegues de flexión y encontrar los posibles planos de falla que los generan. Aunque en ciertas áreas no es claro la información (zona muda).</p> |
| <p>Zona Profunda: (D) Horizontes con geometría irregular algo sinuosa, se observan 4 patrones de geometría; el de la derecha muestra reflectores rugosos con cierta deformación hacia su lado izquierdo, sub-paralelos entre sí. El segundo indican reflectores con forma convexa flexurados hacia su lado izquierdo se encuentran en medio de dos posibles fallas; el tercer patrón muestra una dirección de buzamiento de los reflectores con ángulos moderados a altos sub-paralelos entre sí, pero los reflectores hacia la base de la sección se observan más deformados que los reflectores que los suprayacen y con cierta estrechez entre ellos. Para estos su geometría es diferente a los demás se ven al principio paralelos luego van adquiriendo una forma lítrica rugosa y aumenta la cercanía entre ellos.</p> <p>(I) Se caracteriza por horizontes con geometría irregular que hacia la mitad de la sección presentan buzamientos de bajo ángulo, lo que nos lleva a pensar por la forma en que se presentan los horizontes en una zona de despegue de los pliegues por flexión presentes en la zona intermedia y un para de fallas normales y una inversa de alto ángulo al parecer, se ven ciertas anomalías lineales que sugieren la presencia de ruido coherente con zonas mudas.</p> | <p>Zona Profunda: (D) Los horizontes se observan con una mayor continuidad y definición, evidenciando un patrón repetitivo con forma suaves convexas, los reflectores de la parte basal muestran un patrón distinto a los reflectores que los suprayacen, a pesar de su geometría su buzamiento es de menor ángulo que los reflectores superiores. Aunque en la sección hay información se observa la presencia de reflectores con altas amplitudes a diferencia de la imagen con DMO.</p> <p>(I) La forma de estos horizontes nos lleva a pensar en la posible presencia de dos despegues de las estructuras imbricadas que se presentan en la zona intermedia, uno que afecta a la parte basal y otro que pone en contacto ambos patrones geométricos sin descartar la presencia de fallas pequeñas normales con vergencia de alto ángulo evidenciado por la alta deformación que muestran los reflectores plegados y un posterior cambio del patrón de los horizontes muestra el posible camino de los despegues. No se observaron zonas mudas ni anomalías lineales.</p> |

Discusión:

Es claro que con la técnica de Superficie Común de Reflexión se tiene mayor información en ciertas zonas (como la zona profunda), donde la técnica NMO/DMO sólo mostraba zonas caóticas. Además no se encontró anomalías que sugirieran ruido coherente en las secciones con CRS, mientras que en las secciones con NMO/DMO si presentaban dichas anomalías, pero también es evidente que hacia la zona intermedia donde se presentaron zonas mudas ambos métodos no definieron algo concreto o concluyente. También observamos que mientras las secciones con la técnica NMO/DMO mantienen su información con bajas amplitudes, CRS parece que sus datos conservaran las altas amplitudes.

Tabla 11. Comparación entre las secciones apiladas de NMO y CRS en el sector I.

6.1.2.2. Sector II: Describe las geometrías de las zonas presentes para este sector II. En éstas (Figuras 76 y 77) se describen algunas diferencias indicadas en la tabla 12.

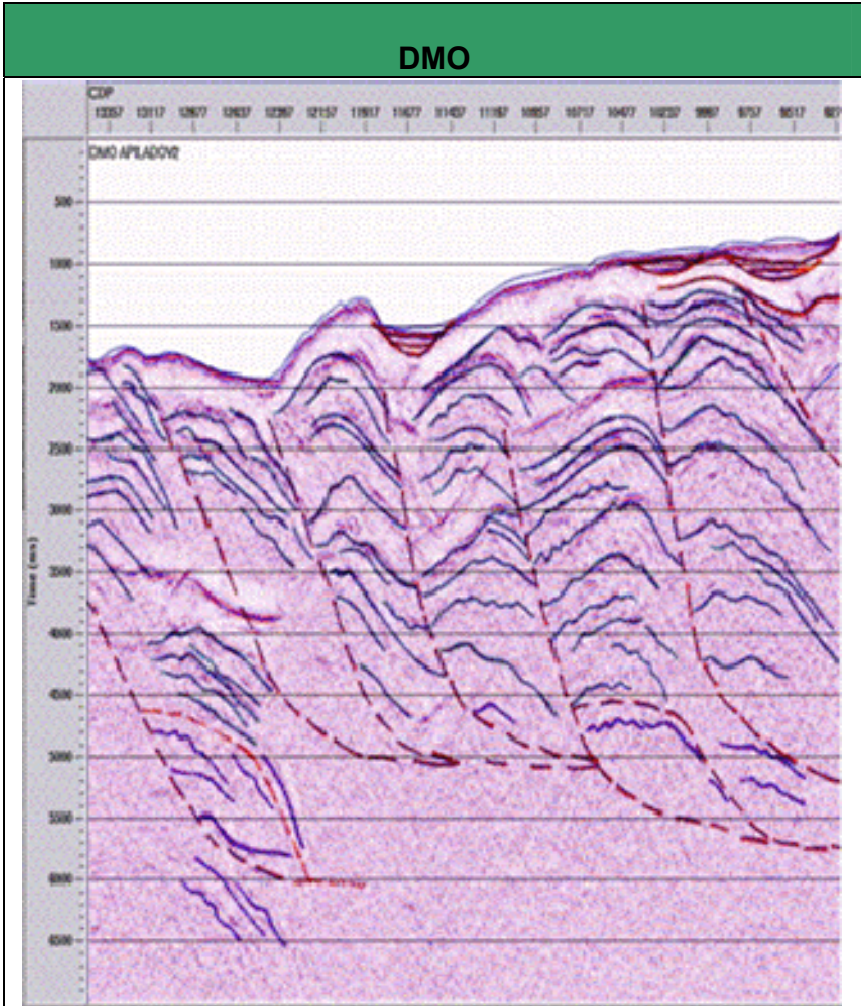


Figura 76. Sección Apilada Sector II con DMO.

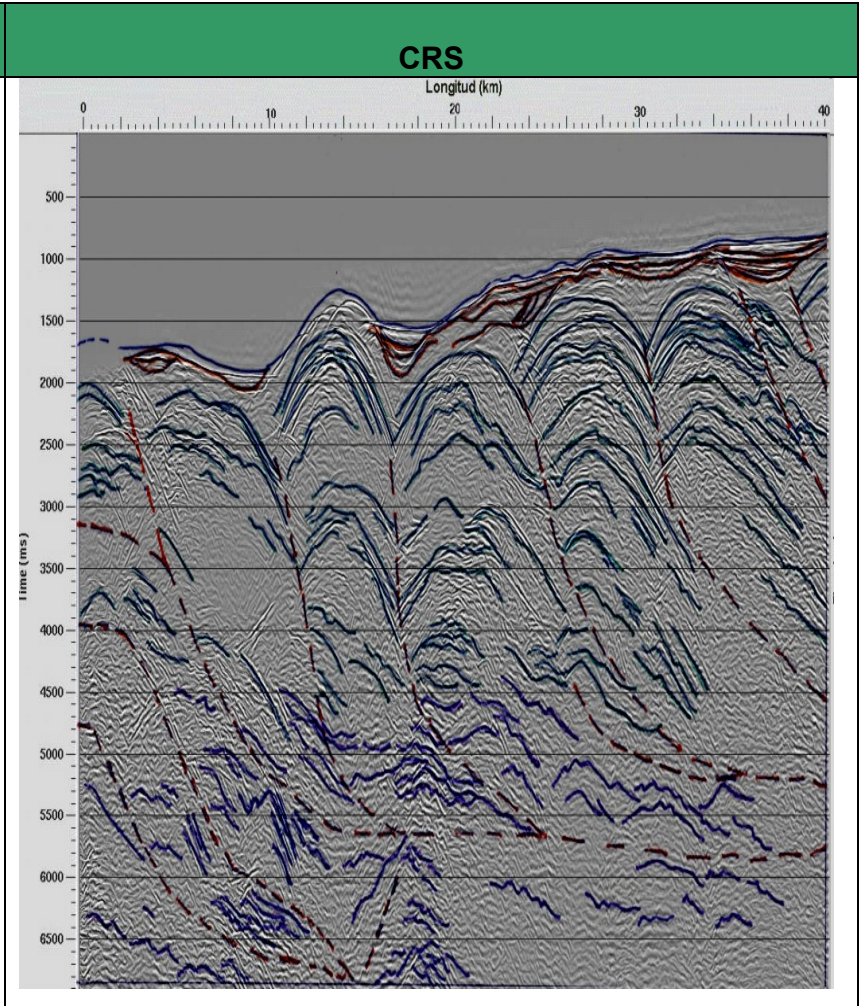


Figura 77. Sección Apilada Sector II con CRS.

| DMO | CRS |
|---|---|
| <p>Zona Somera: (D) Para esta zona hay muy poca información y la poca que hay parece que tuviera contenidos de altas amplitudes lo que hace resaltar los reflectores de la parte superficial, se logran definir ciertos reflectores paralelos a subparalelos con ligera sinuosidad, es decir cóncavos pero alargados en ciertos sectores en el resto de la sección parece predominar zonas mudas.</p> <p>(I) Aunque se aprecia poca información algunos horizontes definen la geometría de las cuencas tipo piggyback 2 concretamente y 1 insipiente. Para las crestas de los pliegues fallados se observan estructuras amplias no cerradas, es decir cabeceos de los flancos moderados.</p> | <p>Zona Somera: (D) Al parecer la zona es bastante compleja ya que muestra pocos reflectores definidos y continuos a lo largo de la sección, tan solo se ven cortos con geometrías cóncavas y algunos semi-cóncavos alargados y a su vez paralelos entre ellos pero hacia la parte más superficial de la zona. Además se logran identificar reflectores convexos algunos muy cerrados hacia la parte central de la sección y otros más abiertos hacia los lados de la misma sección.</p> <p>(I) Se observan un mayor número de reflectores que me definen bien 4 cuencas piggyback y 2 muy incipientes, la geometría principal son los horizontes convexos que hacen parte de las crestas de los pliegues por flexión de falla, al parecer los flancos de los pliegues están buzando con la misma inclinación a lo largo del cinturón plegado.</p> |
| <p>Zona Intermedia: (D) Se observan ciertos reflectores con formas plegadas ligeramente y con buzamientos bajos a moderados. A lo largo de la sección se presenta el mismo patrón reflectores plegados a lo largo de las zonas donde se intersectan estos mismos, pero donde se estrellan los reflectores no conservan su espesor sino que lo aumentan. Aunque parece que hay demasiado ruido mezclado con la información se logran definir cierta arquitectura de las estructuras.</p> <p>(I) Para esta zona se aprecia un cinturón de cabalgamiento de 7 fallas con un despegue basal que posiblemente será el regional. La vergencia del cinturón es constante para las fallas y parece ser que mantienen el mismo buzamiento la zona del despegue, en ciertos sectores se logra establecer por donde va la rampa de este sistema.</p> | <p>Zona Intermedia: (D) La información que brinda la sección es un poco mayor a la que brinda DMO, no obstante se observa ciertas anomalías en las reflexiones que sugieren la presencia de ruido incoherente para ambas secciones. En lo referente a los reflectores de esta zona se observa un patrón dominante y constante de reflectores con forma convexa, para los reflectores que se encontraban en la zona cerca a la profunda se observan más deformados y con un buzamiento mayor que los que están cerca a la zona somera. Los reflectores que se encuentran hacia base de esta zona indican cierto cambio espacial a lo largo de la sección mostrando posibles eventos importantes.</p> <p>(I) Los horizontes encontrados en esta zona corroboran la geometría típica de un cinturón de cabalgamiento con pliegues por flexión de falla, los cuales se reconocen porque en ciertas zonas se logra establecer la flexión del pliegue. La determinación de sí el despegue pasaba por este sector de la sección se evidenció con los horizontes monoclinales con moderada deformación pero se mantenían entre paralelos a subparalelos entre sí.</p> |
| <p>Zona Profunda: (D) Realmente no se logra definir con claridad los reflectores, además la continuidad de los mismos es poca. Sólo por un</p> | <p>Zona Profunda: (D) Los reflectores presentes en esta zona se ven cortos pero continuos y en mayor número que la sección NMO/DMO.</p> |

| | |
|---|--|
| <p>reflector con buzamiento moderado que tiene continuidad en la zona intermedia. Los otros reflectores se ven subparalelos con igual dirección que el reflector lístrico pero discontinuos.</p> <p>(I) La información de la sección es muy discreta sólo se logra establecer un insipiente despegue que se propaga hacia la zona intermedia. Pero el despegue regional no se logra establecer, zona con pocos horizontes, caótica. Sólo se muestran plegados los que se chocan con la falla lístrica que posiblemente se una a un despegue que no se ve.</p> | <p>Donde se logran observan 4 geometrías predominantes la primera comprende reflectores convexos irregulares seguidos que se extienden hasta el segundo patrón el cual muestra reflectores subhorizontales plegados, el tercer patrón reflectores con buzamientos moderados pero con dirección oeste y el último patrón indica reflectores paralelos a subparalelos pero los que se encuentran hacia la izquierda de la sección se ven deformados con buzamientos altos a moderados.</p> <p>(I) La información que nos muestran los horizontes nos evidencia un posible despegue pero a mayor profundidad y el segundo despegue que se define parece venir del sector I, indicándonos su continuidad por lo que se consideraría como el despegue regional para esta zona de estudio.</p> |
| <p>Discusión: Aunque para ambas secciones la información encontrada no es la mejor, se puede decir que encontramos mayor información en la sección apilada con CRS, no obstante a pesar de que ésta técnica nos brinda mayor información para ciertos datos a "profundidad" es posible que a su vez pierda información para las zonas superficiales como lo visto para ciertos sectores en áreas someras al igual que DMO.</p> | |

Tabla 12. Comparación entre las secciones DMO y CRS en el sector II.

7. RESULTADOS

7.1 SECCIÓN APILADA EN NMO CON PRESENCIA DE MÚLTIPLES VS. SECCIÓN ATENUADA CON LA TRANSFORMADA DE RADÓN.

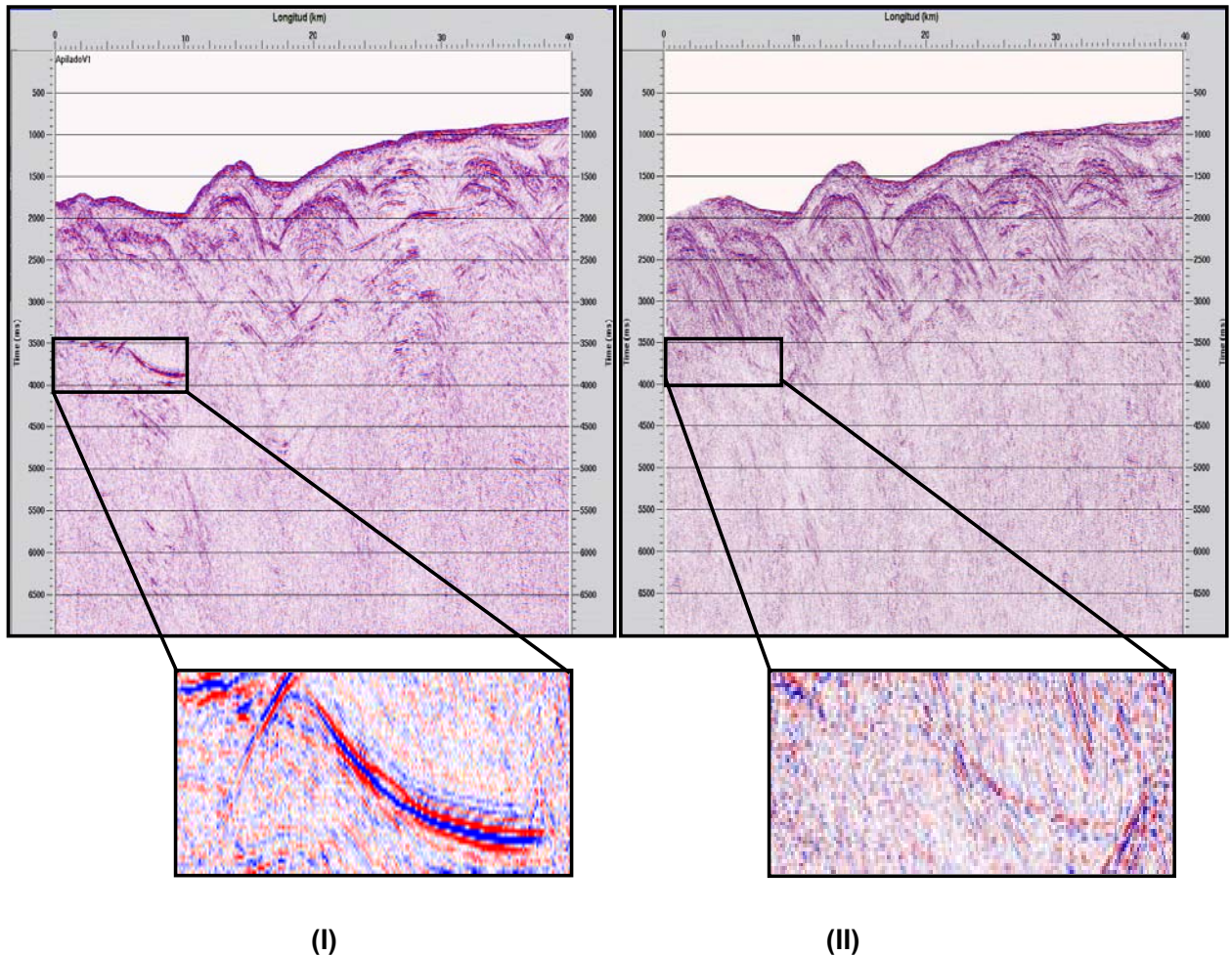


Figura 78. (I). Sección Apilada por NMO/DMO con múltiples; (II). Sección Apilada con atenuación de múltiples.

En la Figura 78 (I) y (II). (1) Indica la presencia del múltiple, en (I) la sección apilada NMO/DMO se observa la ubicación específica del múltiple y en (II) lo que se muestra es la misma sección apilada NMO/DMO pero se le realizó la atenuación del múltiple

aplicando la transformada Radón la cuál se efectúa empleando el programa Hampson and Russell. Este programa utiliza una corrección al NMO residual que por lo general presentan los múltiples y de ésta manera los localiza, separa y al final los atenúa, obteniendo al final una sección offset cero sin múltiples.

7.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CRS VS. DMO EN LAS SECCIONES APILADAS

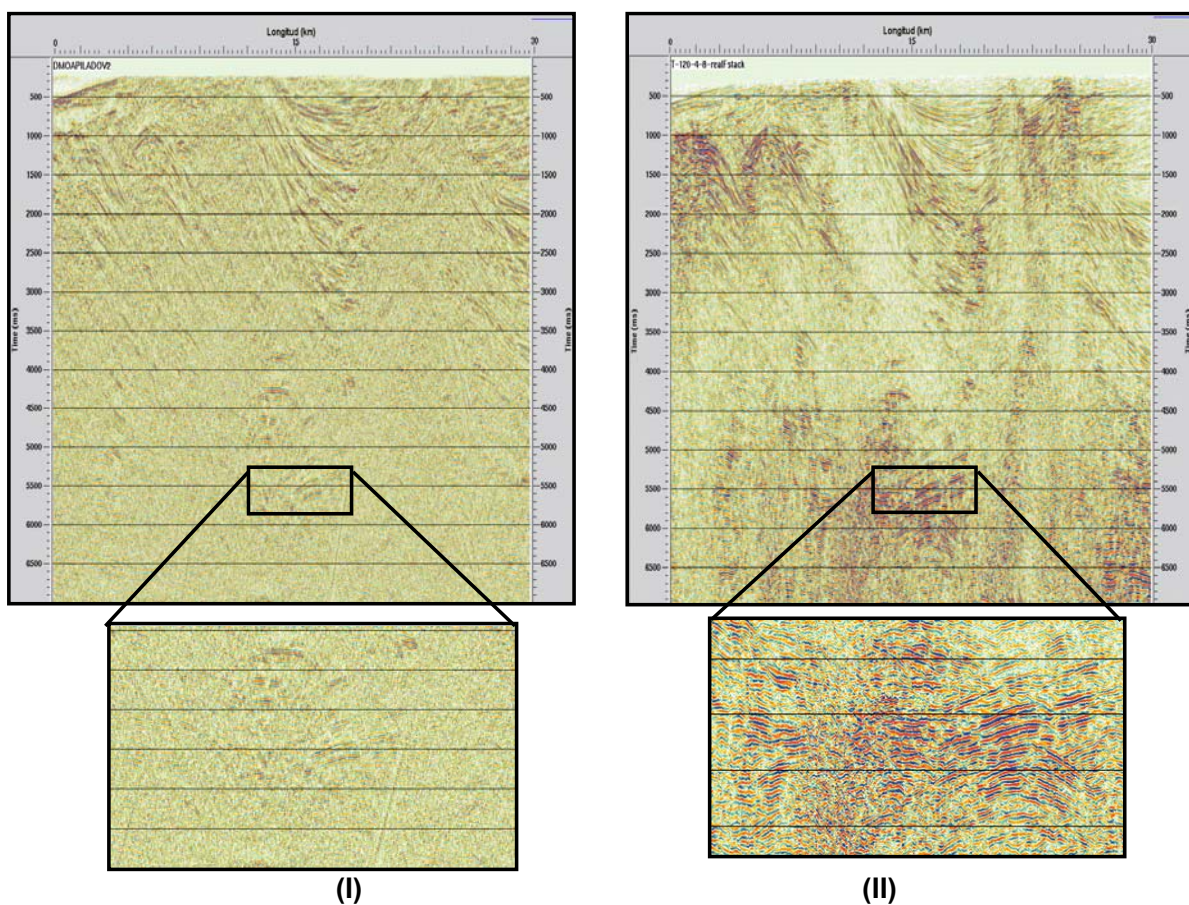


Figura 79. (I). Sección Apilada por NMO/DMO; (II). Sección Apilada por CRS.

En la Figura 79 (I) Indica discreta información sísmica para la zona profunda, y en (II) se muestra la misma sección apilada en CRS pero en ésta se observa mayor información a profundidad que en la sección con NMO/DMO.

7.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS APERTURAS 120-1000-500 EN EL SECTOR I.

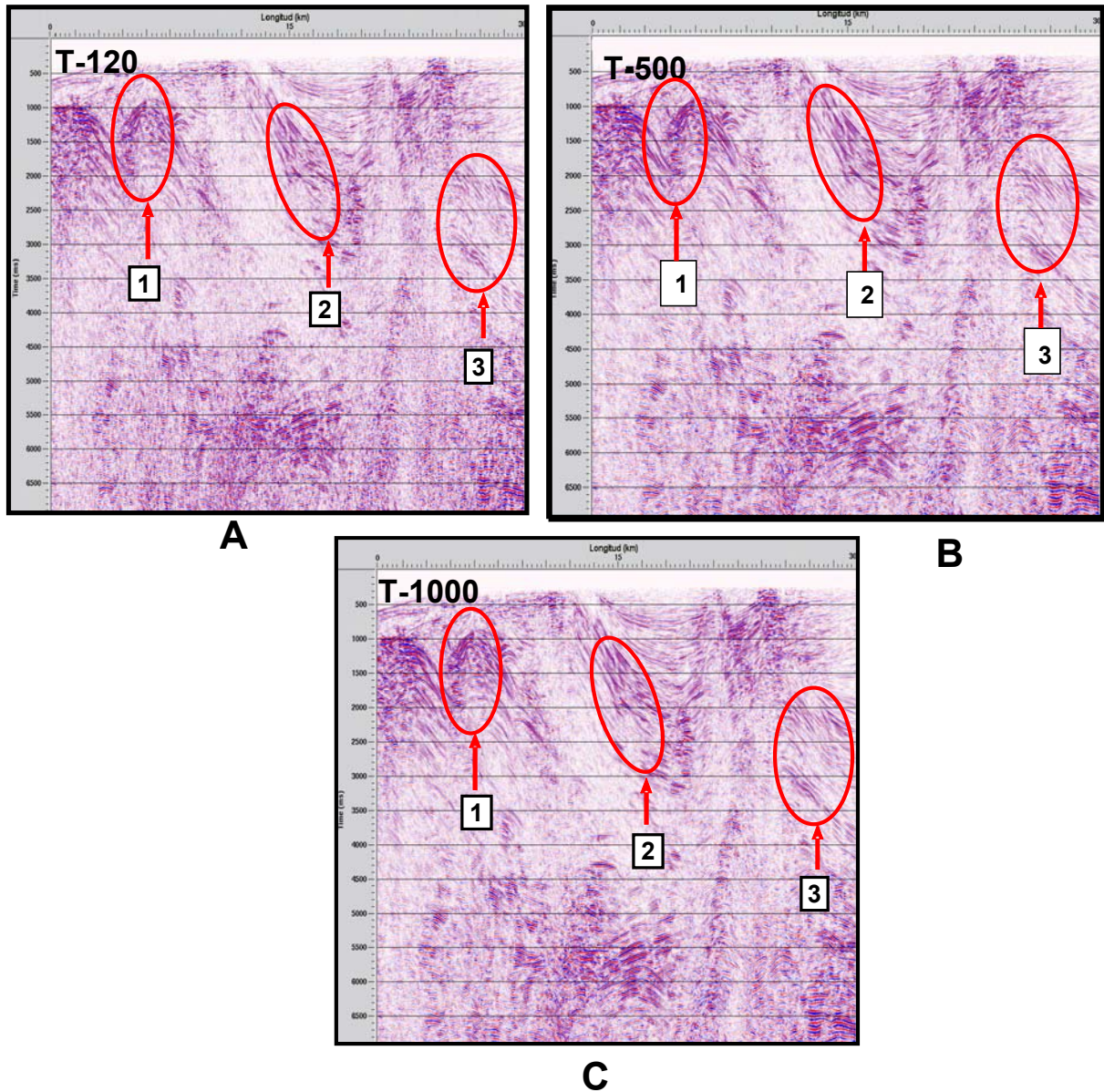


Figura 80. Análisis comparativo de una sección apilada en CRS empleando aperturas de 120, 500 y 1000 metros en el sector I.

Para la Figura 80, (1) Extensión de las estructuras cabalgantes; para (T-120): Mantiene la extensión de la estructura igual que DMO; para (T-500): La distancia

entre los limbos tiende a ampliarse a razón de 5 a 10 metros; para (T-1000): Este operador realiza más que el operador de T-500 generando una imagen menos confiable geológicamente. (2) Flancos de las escamas cabalgantes; para (T-120): Se observan continuidad de los flancos y es similar a la sección DMO pero con mejor definición en los horizontes; para (T-500): Se visualizan los flancos definidos, pero suavizados con respecto al buzamiento de los mismos; para (T-1000): Los horizontes van perdiendo definición y continuidad, el buzamiento de los flancos es suavizado. (3) Acuñaamiento de los estratos; para (T-120) son más evidentes y definidos que en el T-500 y T-1000.

7.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS APERTURAS 120-500-1000 EN EL SECTOR II.

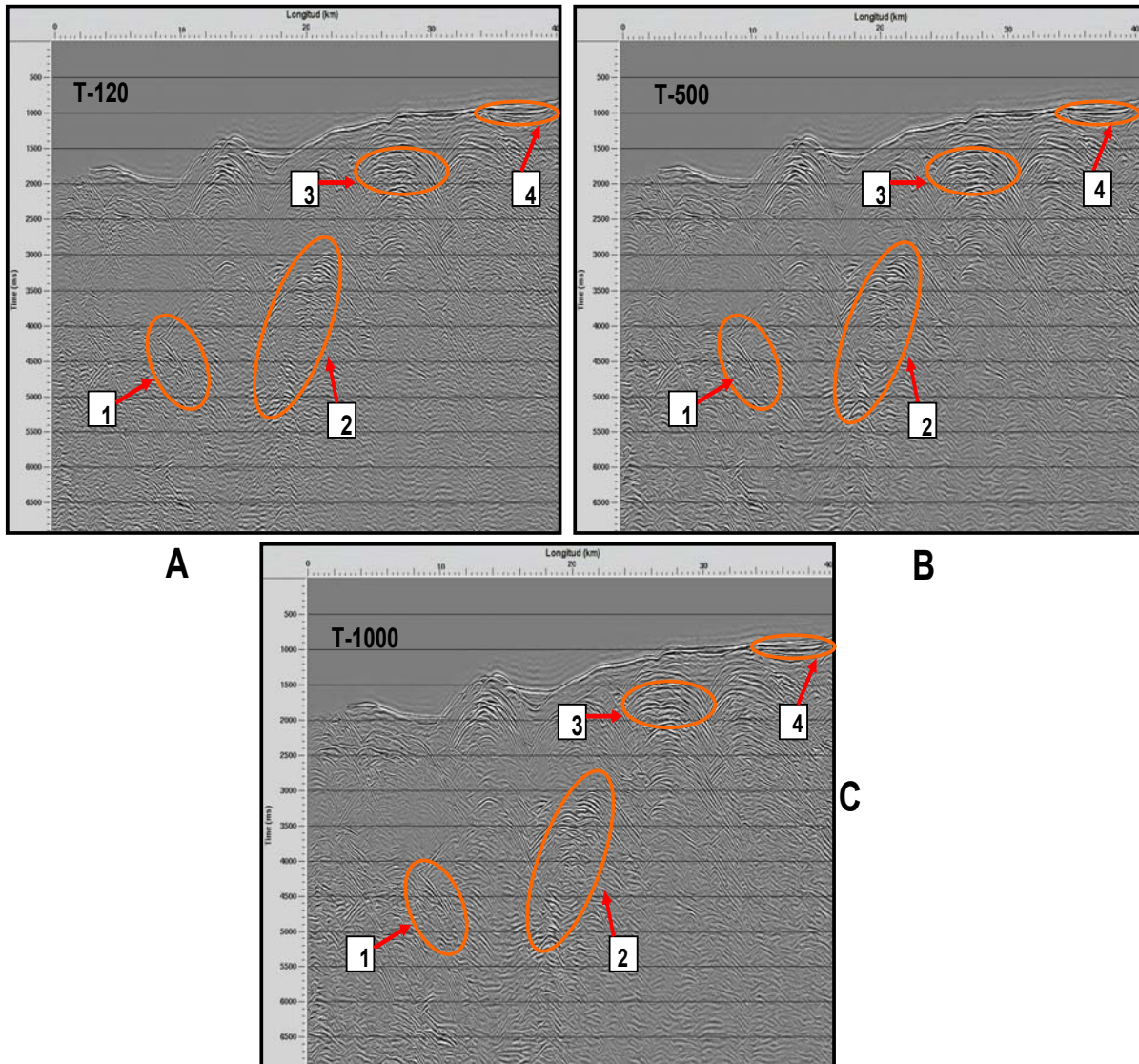


Figura 81. Análisis comparativo de una sección apilada en CRS empleando aperturas de (A) 120, (B) 500 y (C) 1000 en el sector II.

En la Figura 81 se describe, (1) Horizontes buzantes en tiempos mayores; para (A): Se observan mejor los horizontes y su buzamiento es similar al mostrado por la sección DMO, pero para B y C, los horizontes no son geológicamente concluyentes. (2) Definición de los topes de los anticlinales; para (A), el tope mantiene la forma de la estructura y los flancos se ven definidos y continuos. (B) la forma de la estructura se empieza a distorsionar y su extensión aumenta en comparación con A; para (C) la

estructura está tan distorsionada que no parece real. (3) Evidencia del trazo de falla; para (A) La intersección de los horizontes buzantes, muestra una área que sin ser caótica aún brinda información; para (B) la parte inicial se observan bien pero a medida que se aumenta en el tiempo los horizontes se ven tan realzados que no se ven geológicamente congruentes; para (C) sólo son visibles hacia la zona somera para tiempos mayores se evidencia zona caótica. (4) Cuencas piggyback; para (A) y (B), los horizontes que la definen se observan continuos, además se evidencia la extensión de la misma; para (C) los horizontes no se evidencian tan nítidos y su extensión ya no es tan clara como en los anteriores operadores.

7.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS APERTURAS 120-500-1000 EN EL SECTOR III.

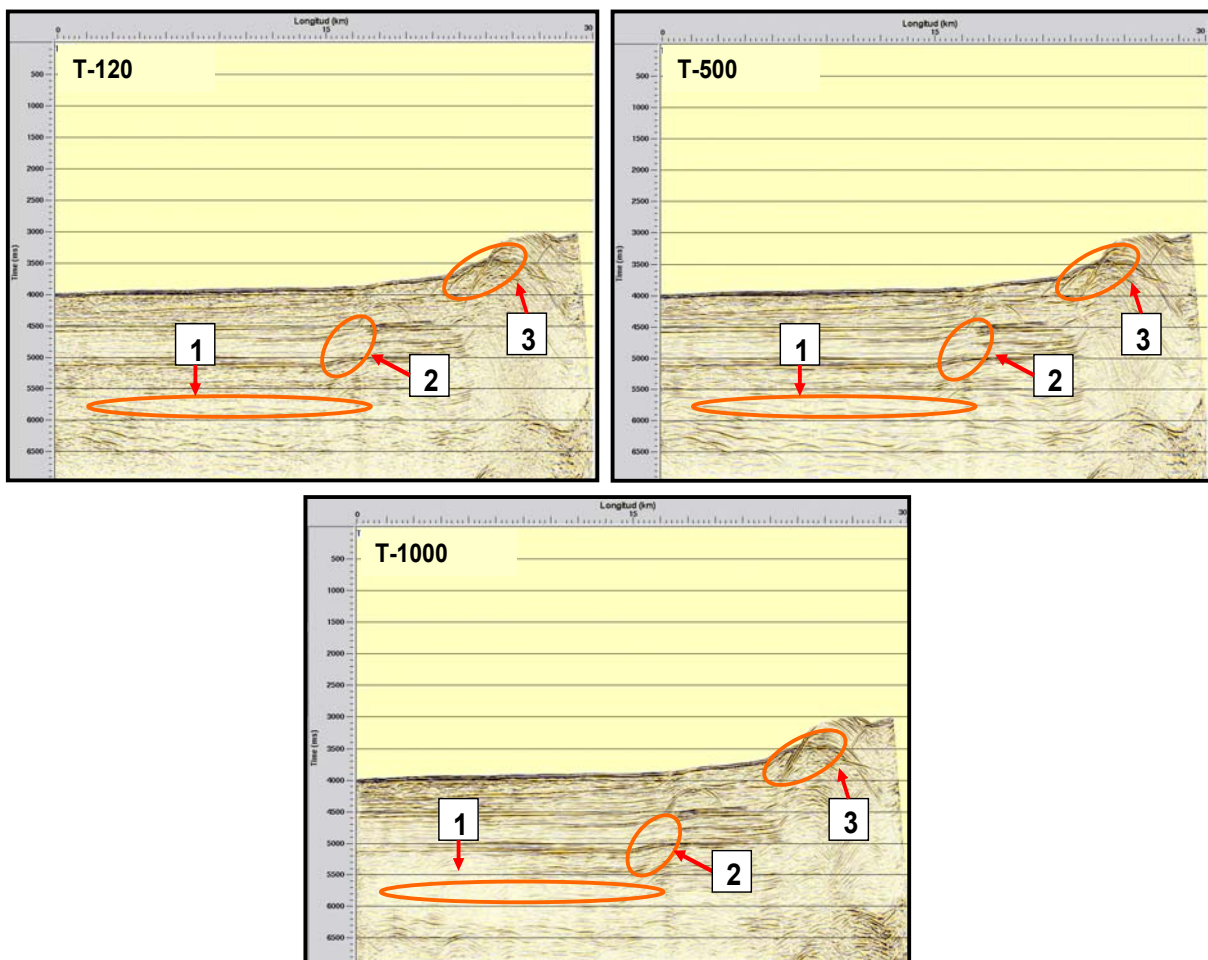


Figura 82. Análisis comparativo de una sección apilada en CRS empleando aperturas de 120, 500 y 1000 metros en el sector III.

En la figura 82 mostramos 3 elementos importantes como, (1) Horizonte que se comporta como flat. Para T-120 la forma sinuosa del horizonte es muy clara a lo largo de su extensión (evidencia de canal), pero en T-500 mantiene su extensión pero su sinuosidad varía (se ve más lineal) en tanto que para T-1000 se mantiene su extensión pero más linealizado que el T-500, mostrándonos que para eventos muy pequeños si se emplea un operador mayor a 120 no se apreciarán esos pequeños detalles. (2) Horizonte buzante (Cierre del sistema de canales trenzados); para T-120 se observa bien el horizonte flexurado, mostrando el patrón de adelgazamiento de la capa y luego posterior engrosamiento, cuya geometría podría semejarse a la arquitectura de canales trenzados, sin embargo en T-500 se visualiza que la flexura se va suavizando y no se define con claridad el posible trenzado de los canales. Para T-1000 los canales presentan no la geometría típica de un canal trenzado sino, más parecido a los canales anastomosados. (3) Geoformas en el sustrato; para T-120 el horizonte define mejor un quiebre que evidencia una falla activa que generó el pliegue aflorante sobre el fondo marino, en tanto que en T-500 se aprecia el mismo quiebre sólo que ligeramente suavizado y para T-1000 la apreciación es la misma, el flanco del pliegue que cae hacia la llanura muestra un buzamiento menor que el descrito T-120.

7.6 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CRS VS. NMO/DMO EN LAS SECCIONES APILADAS DEL SECTOR I DE LA LÍNEA.

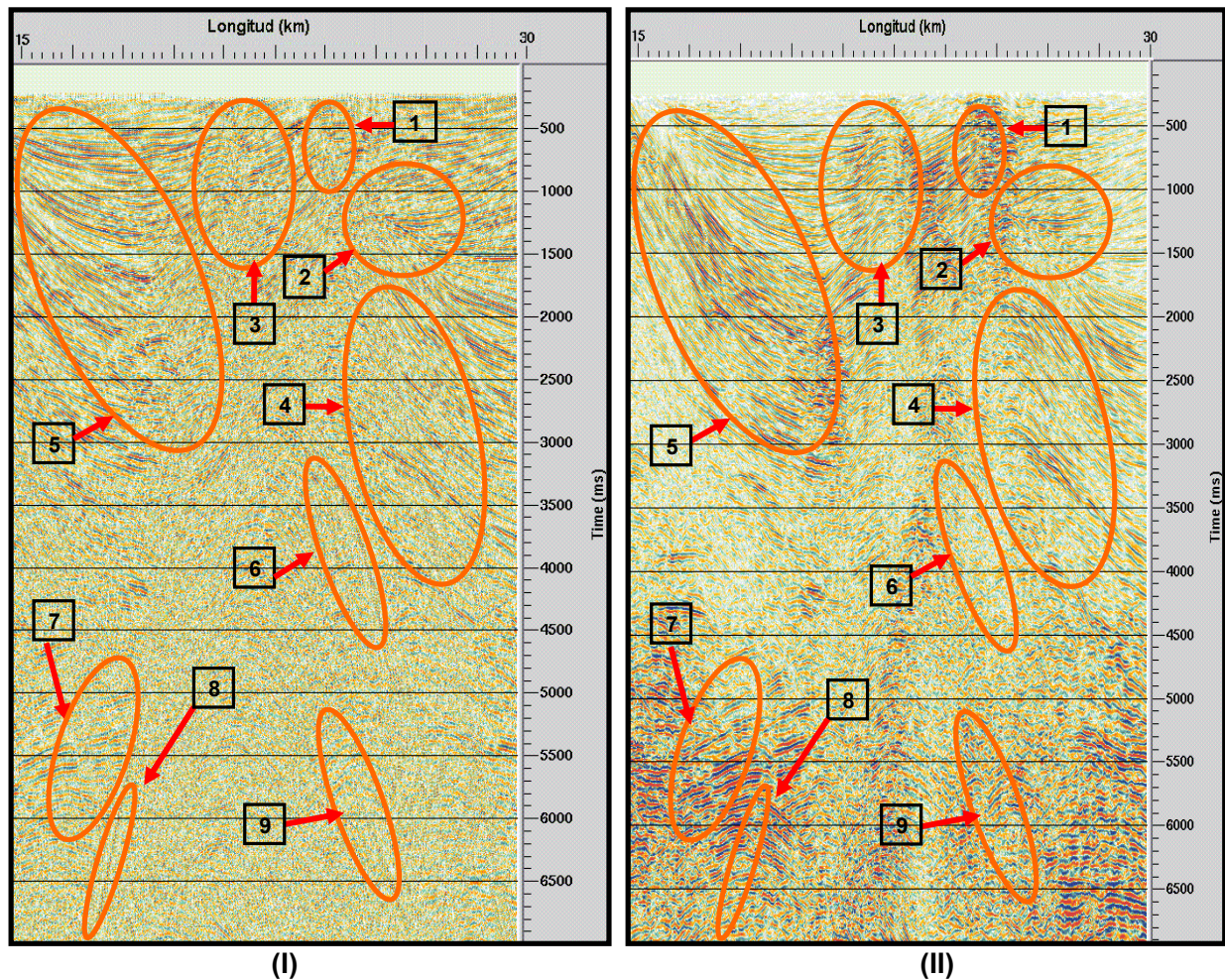


Figura 83. (I). Sección Apilada por NMO/DMO; (II). Sección Apilada por CRS.

En la Figura 83 (I) y (II) se indican 9 elementos importantes de resaltar. (1) Zona intensamente deformada; para (I) Los horizontes se visualizan de manera clara pero el apilamiento no es evidente sólo se ven buzando sin ser deformados, en tanto que en (II) los horizontes se aprecian apilados y distorsionados indicándonos una deformación posiblemente debida a una falla (2) Acuñaamiento de horizontes; para (I) se observa aunque difuso un acuñaamiento de capas pero no es clara la geometría de estratos de crecimiento y en (II) se aprecia una estreches de los horizontes indicando un acuñaamiento de los niveles someros que a su vez están siendo afectados por una falla que los infrayace, definiéndonos la geometría de estratos de crecimiento. (3)

Intersección de reflexiones; para (I) aunque se observa una zona caótica es claro el cruce de horizontes pero no es precisa, por otro lado (II) nos muestra los horizontes deformados y hasta los que están interrumpidos indicándonos el avance de la falla. (4) Horizontes con buzamientos altos; para (I) se ven ciertos horizontes que presenta un patrón de buzamiento alto pero luego se pierden y no se sabe que pasa, para (II) se evidencian dos patrones de buzamiento, el de los horizontes inferiores va entre 20° a 22° para los horizontes superiores alrededor de 30°, lo que nos indica que hay algo que genera este cambio. (5) Deformación de los limbos, en (I) se ve un patrón de horizontes que se acuña hacia el extremo izquierdo pero hacia el lado derecho no están bien definidos como si fueran horizontes fantasmas (aparecen y desaparecen), aunque para (II) se observa un mayor número de horizontes con un mismo patrón de buzamiento pero los que se encuentran más cercanos al centro de la sección se aprecian con cierta deformación indicándonos un plano de falla lístrica y que a su vez afectará los sedimentos de las mini cuencas. (6) y (8) Ruido lineal; para (I) se observan sectores donde se presentan ruido, mientras que, en (II) se logra observar información sísmica de eventos concretos. (7) y (9) Reflectores a tiempos mayores; para (I) se aprecia una zona caótica nada concreto, en tanto que en (II) los horizontes parecen seguir una geometría concreta e indican eventos geológicos coherentes.

7.7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CRS VS. NMO/DMO EN LAS SECCIONES APILADAS DEL SECTOR II DE LA LÍNEA.

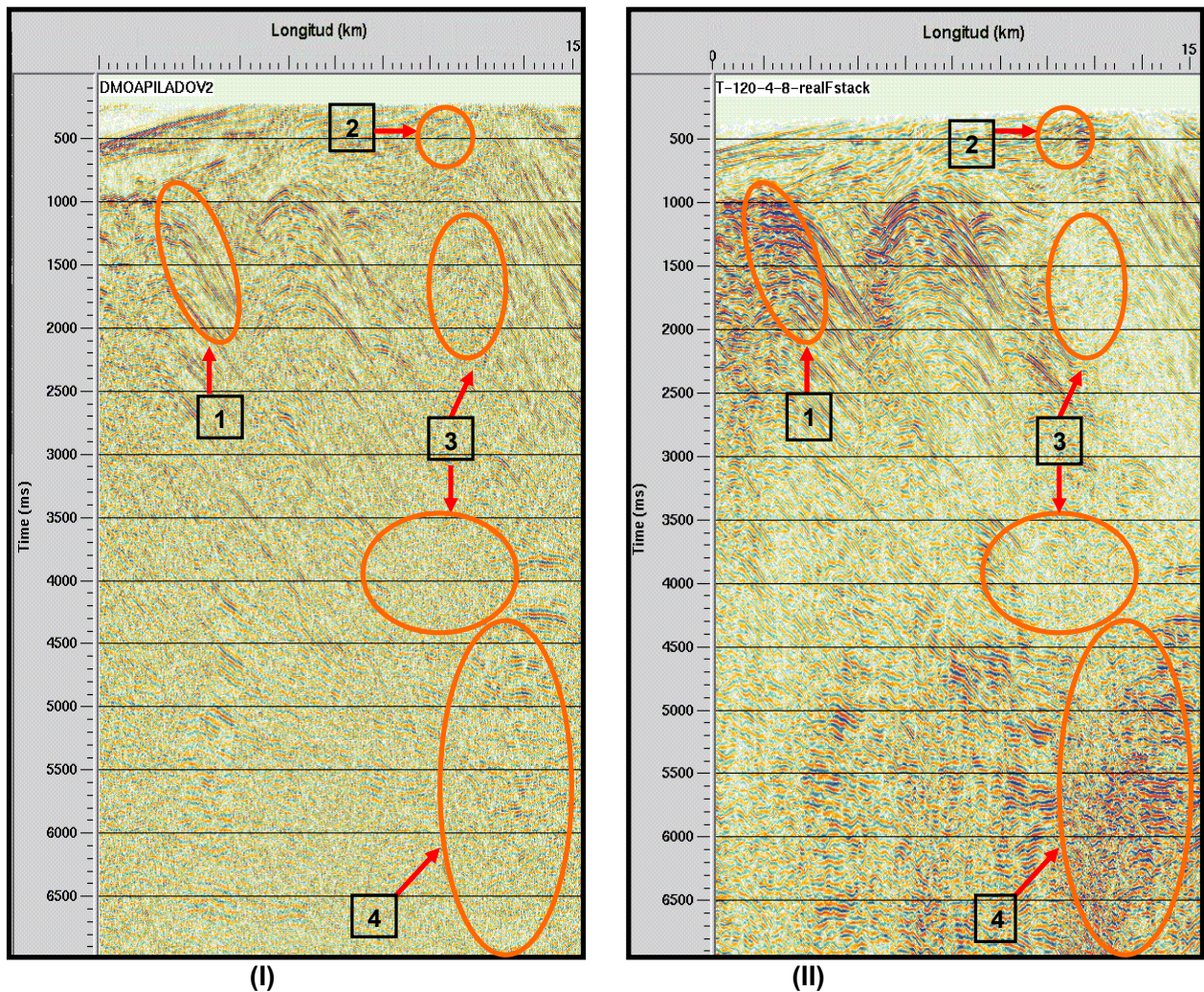


Figura 84. (I) Sección Apilada por NMO/DMO; (II). Sección Apilada por CRS.

En la figura 84 (I) y 84 (II) presenta imágenes de las secciones apiladas que corresponden al mismo conjunto de CDPs (3978-8779) con cada una de las técnicas. En ambas se evidencian 4 elementos en su respectivo orden son, (1) Limbos de los horizontes que están cabalgando; en lo concerniente a (I) se observan horizontes con mayor continuidad y forma muy concreta a pesar de su buzamiento moderado mostrándonos fenómenos de plegamiento (cabalgamientos) en la zona. Para (II) los horizontes con altos buzamientos no se observan muy definidos ni continuos, que nos den cierta certeza de alguna estructura plegada. (2) Acuñamientos de los

horizontes; para (I) Estos horizontes son tan claros que se observa una estructura algo insipiente definiendo una mini cuenca. Para (II) En el mismo sector se aprecian horizontes más no acuñados y la estructura no es tan evidente. (3) Presencia de ruido; en la figura (I) el ruido no está presente pero la información no es concluyente, y en (II) muestra ruido en ciertas áreas de la sección, zona muda. (4) Información a tiempos mayores; en la imagen (I) se ven horizontes con cierta geometría en tiempos mayores, permitiendo definir mejor algunos posibles eventos. En (II) nos muestra horizontes sin ninguna dirección ni forma concreta.

7.8 COMPARACIÓN SECCIÓN APILADA DE LOS DATOS SINTÉTICOS CON NMO VS. CRS

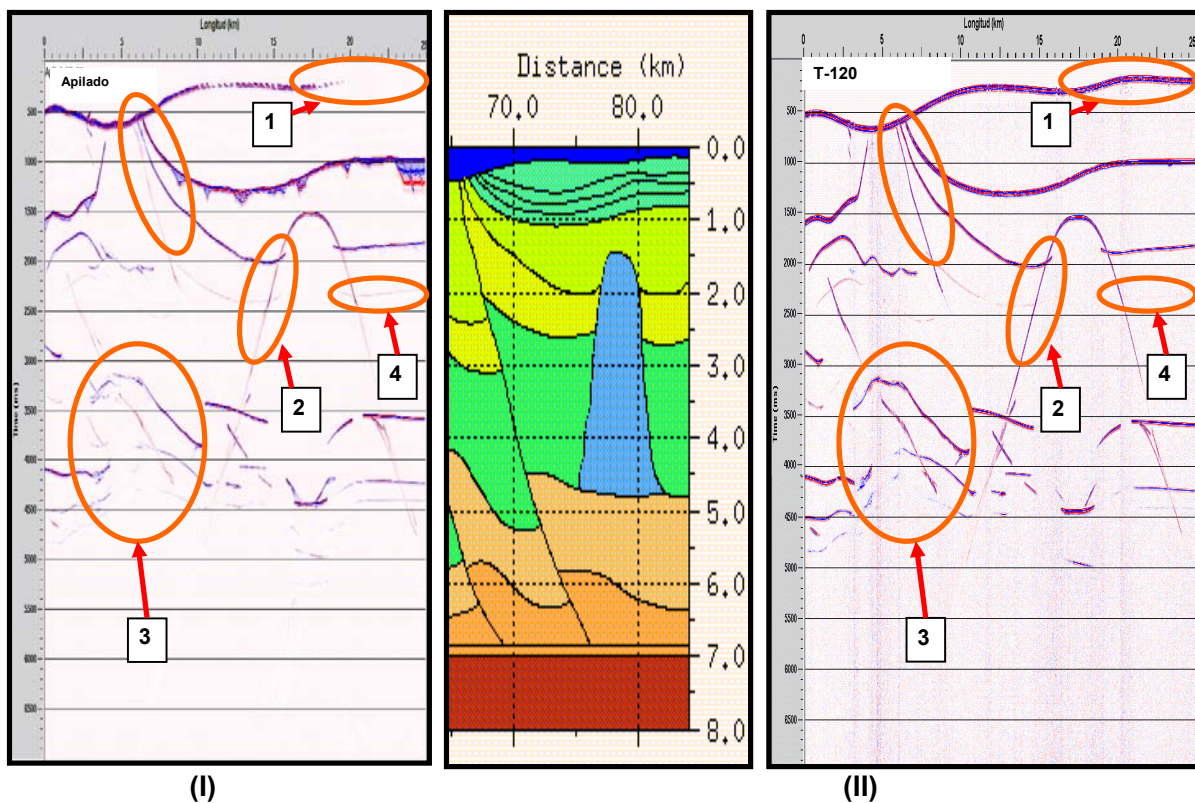


Figura 85. (I) Sección Apilada por CRS para datos sintéticos. (II). Sección Apilada por NMO para datos sintéticos.

En la Figura 85 (I) y (II) se muestran 4 elementos representativos. (1) Contorno del fondo marino; para (I) se observa continuo y bien definido mientras que, en (II) se pierde el contorno en ciertas zonas. (2) Definición de estructuras; en (I) Se ven

concretos los limbos de un anticlinal y su extensión, además se aprecian los acuñaientos de los horizontes hacia la zona somera, en tanto que para (II) se ven pero insipientes no concluyentes. (3) Fallas; según nuestro modelo geofísico para éstas zonas se deberían ver algunas escamas cabalgantes y un trazo de falla que en (I) es claro y definido (observándose 2 horizontes que llegan a la falla con cierto plegamiento en sus crestas), en tanto que en (II) los horizontes se ven pero no con la geometría esperada y el trazo de falla parece más una señal fantasma que una falla. (4) Horizontes dentro de estructuras; para ambos (I) y (II) no se aprecia una mejora, los horizontes se ven muy tenues y discontinuos.

8. CONCLUSIONES

- El método CRS ofrece una buena alternativa para tratar un número creciente de tareas en el procesamiento sísmico. La principal razón está en el uso de todos los datos disponibles y también la extracción automática de sus parámetros. En el caso de una única línea sísmica y considerando la llamada situación 2D el número de parámetros extraídos son tres: R_{NIP} , R_N y β . Esto contrasta con el único parámetro que emplea el método convencional.
- Con base en los resultados obtenidos a partir de los datos sintéticos se observó que no existe una diferencia apreciable entre la técnica CRS y la técnica convencional NMO, lo que nos indica que al contrario de lo que se piensa sobre la técnica CRS, ésta no agrega información ni artefactos a la imagen obtenida.
- En datos reales las imágenes apiladas por la técnica CRS permiten definir mejor los reflectores a tiempos mayores, resaltando de esta manera los eventos que por el ruido se encontraban ocultos en la imagen apilada por la técnica convencional NMO/DMO. Esto ocurre como consecuencia del aumento en la relación señal/ruido; sin embargo parece que se pierde cierta información (zonas mudas) en los reflectores ubicados a tiempos iniciales (áreas someras de la sección apilada), sobre todo en ciertos lugares donde se evidencian reflectores con buzamientos conflictivos, tanto en las secciones con NMO/DMO como para las secciones apiladas con CRS lo que nos corrobora que la técnica CRS no está agregando información a las imágenes.
- En relación a las mini cuencas tipo piggyback, la apertura de 120 se ajusta mejor en la zona de acuñamiento de la cuenca permitiendo visualizar con mayor definición los reflectores, que muestran la depositación de las capas plano paralelas.

- Para el análisis del sector III del área de estudio se seleccionó la apertura CRS de 120 m, ya que éste nos permitió definir mejor un horizonte entre los tiempos 5700 a 5800 (ms), el cual describía una geometría sinuosa (irregular). Por lo general se esperarían niveles o capas con contactos plano-paralelos pero el horizonte sufre una flexión comportándose como un posible cierre de canal trenzado. Luego entre los tiempos 5000-5400 se evidenció una posible zona pequeña de canales. La cual no se diferenciaba muy bien con el operador 500 y además era un poco más pequeña, en tanto que para el operador de 1000 la información no era nada concluyente.
- La calidad de la imagen de apilado en CRS es sensible al manejo de los parámetros, es decir, en las aperturas porque si se toman aperturas mayores a las debidas se observa pérdida en la información geológica. Por ejemplo, en el caso de cabalgamientos se observó que con operadores mayores a 120 (500 y 1000) se presentó extensión de la estructura y los ángulos de buzamiento de los flancos de las estructuras tendieron a suavizarse, por tanto no se mostraba el buzamiento real de la estructura.
- Se logró atenuar las anomalías que representaban los múltiples (ruido coherente) en los datos reales empleando la transformada de Radón y de esta manera se interpretaron imágenes adecuadas y en iguales condiciones que las imágenes que se obtuvieron con CRS.
- Tomando en cuenta los datos migrados se logró concluir que la técnica CRS ayuda a visualizar más las geometrías de estructuras mostrándonos reflectores que poseen acñamientos, buzamientos altos y continuos bien definidos, más que la técnica convencional NMO/DMO. Al parecer ésta técnica muestra en zonas cercanas a reflectores con buzamientos altos o moderados

lo que se conoce como zonas mudas (zonas con escasa o nula información, a veces sólo ruido).

- En lo relacionado con las aperturas se debe tener en cuenta que sí el usuario busca un mejor detalle de las estructuras posibles a encontrar en el área de estudio se le recomienda emplear operadores con aperturas pequeñas, en tanto que, sí su objetivo es obtener mayor cantidad de información sísmica del área de estudio se le recomienda emplear operadores con aperturas mayores; esto dependiendo de lo que el usuario esté buscando cuando este empleando la técnica.
- Con respecto a la interpretación de los resultados obtenidos, los cuales fueron valorados desde el punto de vista cualitativo, pero existe una forma desde el punto de vista del procesamiento, de conocer el factor de incremento de la información sísmica conociendo el número total de trazas empleado por cada técnica con la ecuación \sqrt{N} , en nuestro caso la razón de incremento para la técnica convencional NMO/DMO es de $\sqrt{60}$ y la de la técnica CRS es de 4.24 veces $\sqrt{60}$.

9. RECOMENDACIONES

- Con respecto a la selección de la apertura CRS en relación a estructuras como anticlinales, sinclinales, fallas de alto ángulo se recomienda emplear aperturas pequeñas, ya que éstos mejor definen eventos concretos y de menor desplazamiento, es decir que cambian de geometría espacialmente a lo largo de la sección a interpretar.
- Se sugiere introducir dentro del flujo de procesamiento el Método de apilamiento de la superficie común de Reflexión a manera de apoyo para la técnica convencional NMO/DMO, de ésta manera obtener 2 versiones complementarias que le brinden tanto al procesador como al interprete una mayor confianza en los datos sísmicos obtenidos.
- Para posteriores aplicaciones de la técnica de apilado CRS, recomendamos realizar varias pruebas con las diferentes aperturas, y de esta manera seleccionar y aplicar la apertura que mantenga la mayor fidelidad de la información sísmica en la imagen y a su vez sea coherente geológicamente hablando.
- Se sugiere realizar un estudio estructural de mayor detalle empleando balanceo de secciones para así de esta manera establecer posibles acortamientos y obtener modelos que ayuden a corroborar estructuras complejas a profundidad.

BIBLIOGRAFIA

- Ajakaiye, D., Bally, A. 2002. Some Structural Styles on Reflection Profiles from offshore Niger Delta. Search and Discovery Article Search and Discovery Article #10031, p. 7.
- Barbosa, P. 2005. Análisis de calidad de imagen de las líneas sísmicas del programa Achira-San Jacinto 2D, Valle Superior del Magdalena, Colombia (Tesis). Universidad Simón Bolívar, p. 117.
- Biloti, R., Santos, L., and Tygel, M. 2001. Inversión de tiempo de viaje Multiparamétrico. Universidad Estatal de Campinas, Brasil.
- Bowland, C. 1993. Depositional history of the Western Colombian basin, Caribbean Sea, revealed by seismic stratigraphy, Geological Society of America Bulletin, 105, p. 1321 – 1345.
- Burke, K., Cooper, C., Dewey, J.F., Mann, P., y Pindell, J.L. 1984. Caribbean tectonics and relative plate motions. In: W.E. Konini, R.B. Hargraves and R. Shagam (Editors), The Caribbean-South American Plate. Boundary and Regional Tectonics. Geol. Soc. Am. Mem., 162: 31-63-
- Caro, M., and Spratt, D. 2003. Tectonic evolution of the San Jacinto Fold Belt, NW Colombia. CSEG RECORDER, p. 36 – 43.
- Case, J. E., Holcombe, T. L., Martin, R. G. 1990. Map of geological provinces in the Caribbean.
- Castillo, M.V. 2007. Interpretación de estilos estructurales con datos sísmicos de reflexión. IX Congreso Geológico Venezolano, p. 64.
- Cervený, V. 1985. “The application of numerical modelling of seismic wavefields in complex structures”. Seismic shear waves. Part A: theory (Ed.) G. Dhor. Handbook of geophysical exploration, (Eds.), K. Helbig and S. Treitel, Geophysical Press, p. 124.
- Cervený, V. 2001. Seismic Ray Theory. Cambridge Univ. Press, New York, (ISBN 0-521-36671-2).
- Claerbout, J. 1985. Course grid calculations of waves in inhomogeneous media with application to delineation of complicated seismic structure. Migration of seismic data, Geophysics reprint series, N°4, p. 92 – 94.

- Correa, D., Ríos, Anselmo., González, D., Toro, M., Ojeda, G. y Restrepo, I. 2007. Erosión Litoral entre Arboletes y Punta San Bernardo, Costa Caribe Colombiana. XI Congreso Colombiano de Geología, p. 21.
- Corredor, F., Shaw, J. H., and Villamil, T. 2003. Complex Imbricate Systems in the Southern Caribbean Basin, Offshore Northern Colombia: Advanced Structural and Stratigraphic Analysis, and Implications for Regional Oil Exploration. VIII Simposio Bolivariano –Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, p. 46 – 56.
- Davis, G. H. y Reynolds, S. J. 1996. Structural Geology of Rocks and Regions. 2da Ed. John Wiley and Sons, Inc. p.776.
- Driscoll, N. W. and Diebold, J. B. 1999. Tectonic and Stratigraphic development of the Eastern Caribbean: new constraints from multichannel seismic data in Caribbean Basins, Sedimentary Basins of the World, p. 591 – 626.
- Doust, H., y Omatsola, E. 1989. Niger Delta in Divergent passive margin basin, J. D. Edwards and P. A. Santogrossi, eds., AAPG Memoir 48, p. 201- 238.
- Duque-Caro, H. 1972. Ciclos tectónicos y sedimentarios en el norte de Colombia y sus relaciones con la paleoecología: Boletín Geológico Ingeominas, v. 19, no. 3, p. 1 – 23.
- _____ 1973. The geology of the Montería area: Colombia Society of Petroleum Geologists and Geophysicists, 14th Annual Field Conference, Guidebook, p. 397 – 431.
- _____ 1979. Major structural elements and evolution of northwestern Colombia. AAPG Memoir 29, p. 329 – 351.
- _____ 1984. Structural style, diapirism and accretionary episodes of Sinú-San Jacinto Terrane, South Western Caribbean border: Geological Society of America, Memoir 162, p. 303 – 316.
- _____ 1990. The Chocó Block in the northwestern corner of South American: Structural tectonostratigraphic and paleogeographic implications. Journal of South American Earth Sciences, 3, p. 71 – 84.
- Duque-Caro, H., and Guzmán, G. 1995. Geología de la plancha 38: Informe No. 2188, Ingeominas.

- Ekweozor, C. M., y Daukoru, E. 1994. Northern Delta depobelt portion of the Akata-Agbada petroleum system, Niger Delta, Nigeria, in the petroleum system-from source to trap: AAPG Memoir 60, p. 599-613.
- Flinch, J. F., Grand, M. V., and Casero, P. 2000. Accretion and obduction along the Sinú-Lower Magdalena area (Northern Colombia): Memoria VII Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Sociedad Venezolana, p. 218 – 229.
- Flinch, J., Amaral, J., Doucet, A., Mouly, B., Osorio, C., Pince, J. 2003. Onshore –Offshore Structure of the Northern Colombia accretionary complex. AAPG International Conference Barcelona, Spain. P. 1-5.
- Flinch, J. F. 2003. Structural evolution of the Sinú – Lower Magdalena Area (Northern Colombia). AAPG Memoir 79, p. 776 – 796.
- Gamboa, J. F Caracterización y eliminación de múltiples por el método de superficie común de reflexión (CRS). Universidad Estatal de Campinas. Brasil, p. 99.
- Gaya, M. A. 2004. Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en el Complejo Turbidítico de Ainsa (Huesca – España) (Tesis). Universidad Politécnica de Cataluña, p. 100.
- Gebart, B. R. y Lidstrom, P. (1995). Measurement of in-plane permeability of anisotropic reinforcements. Polymer Composites 17 (1), 43-51.
- Gierse, G., Pruessmann, J., Laggiard, E., Boennemann, C., Meyer, H. 2001. Improved imaging of 3D marine seismic data from offshore Costa Rica by CRS processing. Trappe Erdgas Consultant (TEEC) and German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR).
- Gierse, G., Pruessmann, J., Laggiard, E., Boennemann, C., Meyer, H. 2001. CRS imaging of 3-D seismic data from the active continental margin offshore Costa Rica. TEEC and BGR (www.teec.de).
- Heilmann, Z. 2002. The Common-Reflection-Surface Stack under consideration of the Acquisition Surface Topography and of the Near-Surface Velocity Gradient (Tesis).Universidad de Karlsruhe, p. 107.
- Heilmann, Z., Mann, J., Ingo Koglin Geophysical Institute. 2006. CRS-stack-based seismic imaging for land data – a case study from Saudi Arabia. 68th Annual Meeting, SEG, Extended Abstracts, p. 2087 - 2091.

- Hoecht, G., Ricarte, P., and OPERA. 2006. Parameter –oriented CRS imaging: 68th Annual Meeting, SEG, Extended Abstracts, p. 2966 – 2970.
- Hubral, P. 1983. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, 48, p. 1051 – 1062.
- _____ 1999. Macro-model independent seismic reflection imaging: *J. Appl. Geophys.*, 42, Nos. 3, 4.
- Hubral, P. Höcht, G., and Jäger, R. 1999. Seismic Illumination: The Leading Edge, 18, p. 1268 – 1271.
- INGEOMINAS, 1988. Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:500.000.
- INGEOMINAS, 1997. Atlas Geológico Digital de Colombia, escala 1:500.000.
- INGEOMINAS, 2004. Geología de los Cinturones del Sinú, San Jacinto y borde occidental del Valle Inferior del Magdalena- Caribe Colombiano, escala 1:300.000.
- Jäger, R. 1999. The common Reflection Surface stack – Theory and application: Master's thesis Universität Karlsruhe.
- Jäger, R., Mann, J., Höcht, G., and Hubral, P. 2001. Common-Reflection-Surface stack: Image and attributes. *Geophysics*, 66, 97 – 109.
- Jones, E.J.W. 2004. *Marine Geophysics*. John Wiley & Sons Ltda. 2da Ed. West Sussex.
- Klem-Musatov, K. 1994. Theory of seismic diffractions. (Ed. Hron, F y Lines, L.), Society of Exploration Geophysics.
- Klimes, L., Kvasnicka, M., y Éervený, V. 1985. Grid computations of rays and travel times, Departamento de Geofísica, Facultad de Matemáticas y Física, Universidad de Charles, Ke Karovu. <http://sw3d.mff.cuni.cz>
- Kellogg, J., and Vega, V. 1995. Tectonic development of Panamá, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from global positioning systems geodetic studies and gravity. *Geological Society of America Special Paper* 295. p. 75 -90.
- Kellogg, J., Toto, E., and Cerón, J. 2005. Structure and tectonics of the Sinú – San Jacinto accretionary Prism in Northern Colombia. X Congreso Colombiano de Geología, p. 1 – 10.

- Knox, G., y Omatsola, E. 1989. Development of the Cenozoic Niger Delta in terms of the “scalator regression” model and impact on hydrocarbon distribution, in W. J. M. van der Linden et al., eds, 1987, Proceedings, KNGMG Symposium on Coastal Lowlands, Geology and Geotechnology: Dordrecht, Klumer Academic Publishers, p. 181-202.
- Laverde, F. 2000. The Caribbean Basin of Colombia a composite Cenozoic accretionary wedge with underexplored hydrocarbon potential: Memoria VII Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Sociedad Venezolana de Geólogos, Caracas, Venezuela, September, 2000, p. 394 – 410.
- Lay, T. y Wallace, T. 1995. Modern global seismology. Academic press, p. 71 – 74.
- Mann, J., Jäger, R., Müller, T., Höcht, G., y Hubral, P. 1999. Common-reflection surface stack – a real data example: J. Appl. Geophys., 42, n° 3, 4, p. 301 – 318.
- Mann, J., Müller, T., Jäger, R., Höcht, G., and Hubral, P. 2000. Applications of the Common – Reflection –Surface Stack. 69th Annual International Mtg Soc. of Expl. Geophys., p. 1829 – 1832.
- Mann, J. 2001. Common–Reflection–Surface Stack User’s Manual to version 4.2, Geophysical Institute, University of Karlsruhe, p. 1- 22.
- Mantilla, A., Alfonso, C. A., Jentzsch, G., and Kley, J. 2005. Crustal structure of the southwestern Colombian Caribbean area. 6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG), p. 472 – 476.
- Mauffret, A., and Leroy, S. 1997. Seismic stratigraphy and structure of the Caribbean igneous province: Tectonophysics, v. 283, p. 61 – 104.
- Medina, H. 2004. Mejoramiento de la imagen de subsuelo en el Piedemonte occidental de la Cordillera Oriental, Bloque San Gabriel, Valle Superior del Magdalena (Tesis). Universidad Industrial de Santander, p. 177.
- Meschede, M., and Frisch, W. 1998. A plate-tectonic model for the Mesozoic and Early Cenozoic history of the Caribbean plate: Tectonophysics, v. 296, p. 269 – 291.
- Milkov, A. V. 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. Marine Geology, v. 165, p. 29-42.

- Montes, L., Cárdenas, A., 2006. Stacking on Common Reflection Surface with multiparameter Traveltime. *Earth Sciences Research Journal*, 10, 2, 91 – 103.
- Moreno, M., and Pardo, A. 2003. Stratigraphical and sedimentological constraints on western Colombia: Implications on the evolution of the Caribbean Plate. *AAPG Memoir* 79, p. 891 – 924.
- Morgan, J. P., Coleman, J. M. y Gagliano, S. M. 1965. "Mudlumps: Diapirs Structures in Mississippi Delta Sediments", *Diapirism and Diapirs a Symposium, American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Memoir* 8, p. 145-161.
- Müller, T., Jäger, R., and Höcht, G. 1998. Common Reflection Surface Stacking Method- Imaging with an unknown velocity model: 70th Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts.
- Newman, P. 1973. Divergence Effects in layered Earth. *Geophysics*, 38, 481 – 488.
- Ojeda, G., Restrepo, I., Correa, I., Ríos, A. (2007). Morfología y arquitectura interna de una Plataforma Continental cambiante: Golfo de Morrosquillo. *XI Congreso Colombiano de Geología*, p. 16.
- Pirmez, C., Flood, R. D., and Ercilla, G. 1998. Contrasting submarine fans of the Amazon and Magdalena Rivers (Abs.): *AAPG International Conference and Exhibition, Extended Abstract Volume, Río de Janeiro, Brazil*, p. 410.
- Poblet, J. 2004. Geometría y cinemática de pliegues relacionados con cabalgamientos. *Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo*, 24, p. 127-146.
- Ruiz, C., Davis, N., Bentham, P., Price, A., and Carvajal, D. 2000. Structure and tectonic evolution of the South Caribbean Basin, southern offshore Colombia: A progressive accretionary system: *Memoria VII Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Sociedad Venezolana de Geólogos, Caracas*, p. 334 – 355.
- Schleider, J., Tygel, M. y Hubral, P. 1993. Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media. *Geophys. Prosp.*, 41, N°4, p. 459 – 513.
- Sinton, C. W., Duncan, R. A., Storey, M., Lewis, J., and Estrada, J. J. 1998. An oceanic flood basalt province within the Caribbean plate: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 155, p. 221 – 235.

- Suppe, J., y Namson, R. 1979. Principles of structural geology. Prentice and Hall, New Jersey, p. 537.
- Suppe, J., Connors, C. D., y Zhang, Y. 2003. Shear fault-bend folding, AAPG Memoir: Thrust Tectonics (82), p. 303-323.
- Shaw, J., Bilotti, F., Brennam, P. 1999. Patterns of imbricate thrusting. Geological Society of America Bulletin, v. 111, n°. 8, p. 1140-1154.
- Sheriff, R. y Geldart, Li. P. 1991. Exploración sísmológica: Procesamiento e interpretación de datos, vol. II, p. 1-275.
- Taboada, A., Dimanté, C. y Fuenzalida, A. 1998. Sismotectónica de Colombia: Deformación continental activa y subducción. Física de la Tierra, N°10, p. 111-147.
- Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymuller, J. y Mora, H. 2002. Wide Plate deformation, Southern Central America and Northwestern South America, CASA GPS Observations, Journal of South American Earth Sciences Vol. 15, p. 157-171.
- Turtle, M. L. W., Brownfield, M. E. y Charpentier, R. R. 2001. The Niger Delta petroleum system: Niger Delta Province, Nigeria, Cameroon and Equatorial Guinea, Africa. U. S. Geological Survey Open file report 99-50-H, CD Room.
- Tygel, M., Müller, T., Hubral, P. y Schleicher, J. 1997. Eigenwave based multiparameter travelttime expansions. 67th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys. Expanded Abstracts, p. 1770 – 1773.
- Van der Hilst, R., and Mann, P. 1994. Tectonic implications of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America: Geology, v. 22. p. 451 – 454.
- Vergés, J., Marzo, M. y Muñoz, J. A. 2002. Grown strata in foreland settings. Sedimentary Geology, 146, p. 1-9.
- Vernette, G. 1985. Le plate-forme continentale Caraïbe de Colombie (dú Debouché du Magdalena au Golfe de Morrosquillo). Importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la sedimentation. Thesé de doctorat d'etat Université Bordeaux 1, p. 378.
- Vernette, G. 1989. Impact du Diapirisme Argileux sur les recifes de la Plate-Forme Colombienne des Caraïbes. Bull. Inst : Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux, N° 45, p. 97-105.

- Vernet, G., Mauffret, A., Bobier, C., Briceño, L., and Gayet, J. 1992. Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombia Margin, *Tectonophysics*, 202, p.335 – 349.
- Weimer, P., y Buffler, R. 1992. Structural geology and evolution of the Mississippi Fan Fold Belt, deep Gulf of Mexico: *AAPG Bulletin*, v. 76, n°2, p. 225-251.
- Weimer, P., y Slatt, R. 2007. Introduction to the petroleum Geology of DeepWater Settings. *AAPG Studies in Geology* 57, *AAPG/Datapages Discovery Series* 8, p. 816.
- Yang, K., Wang, H-Z., Dong, L-D. 2006. An output imaging scheme of the Common Reflection Surface Stack: Applications to real data: 68th Annual Meeting, SEG, Extended Abstracts. 2529 – 2533.
- Yilmaz, O. 1987. Seismic data processing. Investigations of geophysics. Soc. Expl. Geophys. (Doherty, S. M, Ed.).
- Yilmaz, O. 1988. Seismic data processing. Society of exploration geophysics, p. 90 – 98.