

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MODELADO SÍSMICO EN EL ORIENTE DE VENEZUELA PARA EVALUAR DIFERENTES DIAGNÓSTICOS Y GEOMETRÍAS DE ADQUISICIÓN

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al Título
de Ingeniero Geofísico
Por la Br. Anny J. Lara Guzmán.

Caracas, octubre de 2002

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MODELADO SÍSMICO EN EL ORIENTE DE VENEZUELA PARA EVALUAR DIFERENTES DIAGNÓSTICOS Y GEOMETRÍAS DE ADQUISICIÓN

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Gustavo Malavé
TUTOR INDUSTRIAL: Msc. Daniel Mujica

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al Título
de Ingeniero Geofísico
Por la Br. Anny J. Lara Guzmán.

Caracas, octubre de 2002

Lara G., Anny

MODELADO SÍSMICO EN EL ORIENTE DE VENEZUELA PARA EVALUAR DIFERENTES DIAGNÓSTICOS Y GEOMETRÍAS DE ADQUISICIÓN

Tutor Académico: Dr. Gustavo Malavé. Tutor Industrial: Msc. Daniel Mujica. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2002, 203 p.

Palabras claves: Modelado Sísmico 2D, Secciones símicas sintéticas, Levantamientos Sísmicos 3D.

RESUMEN

Los ejercicios de modelado sísmico y geológico buscan resolver los problemas estructurales y estratigráficos, además de optimizar en algunos casos los parámetros de adquisición. El modelado sísmico estructural simula los tiempos de llegada, permitiendo pronosticar la ubicación de las estructuras principales presentes en el subsuelo, además de simular en otras cosas las secciones símicas.

Este trabajo se realizó con el objetivo de contribuir con al estudio de un área en el Oriente de Venezuela, al norte del estado Monagas, para así disminuir el grado de incertidumbre acerca de la secuencia litológica y estratigráfica existente por debajo de los 18000 pies en esta zona, mediante un modelado sísmico 2D. Para ello, se generaron un grupo de secciones símicas sintéticas, entre las cuales tenemos: Secciones de Cero Offset, Perfiles Sísmicos Verticales y Shot Gathers para los tres escenarios propuestos, permitiéndonos realizar la comparación entre la sísmica real y determinar que el escenario 3, que corresponde a la Secuencia Terciaria es el más probable, en términos de tiempos de viaje y topes de las formaciones. Adicionalmente se procedió al diseño en planta de un levantamiento sísmico 3D, a partir de tres geometrías distintas (Ortogonal, Ladrillo y Diagonal) de las cuales se obtuvieron sus respectivos diagnósticos (Distribución de Cobertura, Distribución de Offset, Distribución de Azimuth, entre otros) se concluye que el diseño con geometría diagonal es la opción más factible para obtener una buena imagen del subsuelo en esta área, seguido del diseño con geometría tipo Ladrillo, que podría ser otra opción factible pero un poco más costosa.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
RESUMEN	ii
LISTA DE FIGURAS	v
1. CAPITULO I	1
1.1 Introducción	1
1.2 Ubicación del área de estudio	3
1.3 Breve descripción geológica del área de estudio	4
2 CAPITULO II	11
2.1 Modelado Sísmico 2D	11
2.2 Elastodinámica	12
2.2.1 Ecuación de Onda Acústica	15
2.3 Fundamentales Trayectorias de Rayos	16
2.3.1 Trayectoria de rayos sísmicos	16
2.3.2 Reglas que gobiernan la trayectoria de los rayos sísmicos	17
2.4 Método de diferencias finitas	20
2.4.1 Estabilidad de la solución	22
2.4.2 Consistencia de la solución	23
2.4.3 Condiciones de borde	23
2.4.4 Dispersión Numérica	24
2.5 Metodología seguida para la construcción del modelo de Macal	25
2.5.1 Seismic Unix (SU)	25
2.5.2 Generación del modelo estructural	25
2.5.3 Construcción de Modelos Triangulares	26
2.5.4 Conversión de mallados	30
2.5.5 Suavizado del modelo de velocidades sísmicas	30
2.6 Datos sísmicos sintéticos en medios triangulares	32
2.6.1 Generadores de datos sintéticos	34
2.6.2 Simulación de Secciones de Cero Offset	35
2.6.3 Simulación de Perfiles Sísmicos Verticales (VSP)	40
2.6.4 Simulación de Componentes Verticales del Sismograma (“Shot Gathers”)	48
2.7 Revisión de los modelos de velocidades	56
2.8 Generación de Sismogramas Sintéticos	57
2.9 Identificación sobre la sísmica real de reflectores fuertes	67
3 CAPITULO III	69
3.1 Parámetros de adquisición para el diseño de un levantamiento sísmico 3D	69
Definiciones de términos 3D	72
3.3 Planificación y diseño	76
3.3.1 Cobertura	76
3.3.2 Tamaño del bin	77
3.3.3 Determinación del tamaño del bin grid	78
3.3.4 Espaciamiento entre líneas de fuente	79
3.3.5 Espaciamiento entre líneas receptoras	80
3.3.6 Offset Mínimo	81

3.3.7	Offset Máximo	82
3.3.8	Cobertura estrecha	84
3.3.9	Apertura de migración	84
3.3.9.1	Apertura de migración definida por el buzamiento	84
3.3.9.2	Apertura de migración definida por la zona de Fresnel	85
3.4	Diseños en planta de los levantamientos sísmicos 3D	88
3.5	Factores que influyen en el Diseño de un proyecto 3D:	94
3.6	Levantamiento Sísmico 3D	94
3.6.1	Levantamiento sísmico con geometría ortogonal	94
3.6.2	Levantamiento sísmico con geometría diagonal	98
3.6.3	Levantamiento sísmico con geometría tipo ladrillo	102
4	CAPITULO IV	107
4.1	Conclusiones y Recomendaciones	107
5	BIBLIOGRAFÍA	111
6	APÉNDICES	114
6.1	Apéndices I	114
6.2	Apéndice II	116
6.3	Apéndice III	124
6.4	Apéndice IV	131
6.5	Apéndice V	139
6.6	Apéndice VI	195
6.7	Apéndice VII	196
6.8	Apéndice VIII	197
6.9	Apéndice IX	198
6.10	Apéndice X	200

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1- Ubicación del área de estudio	7
Fig. 1.2- Ubicación relativa de los prospectos dentro del área de Macal	8
Fig. 1.3- Escenarios Propuestos. a)Escenario 1: Repetición de Querecual-Chimana-El Cantil, b)Escenario 2:Secuencia Pre-cretáctica, c)Escenario 3:Secuencia Terciaria.	9
Fig. 1.4- Modelo estructural del Prospecto Macal, formaciones geológicas comunes para los tres escenarios propuestos.	10
Fig. 2.1- Muestra cinemática de la relación entre la trayectoria de rayo y los frentes de ondas. La trayectoria de rayo es normal al frente de onda y van en dirección contraria a la fuente de la onda sísmica.	17
Fig. 2.2- Trayectoria de Rayos Asociados con la llegada de la refracción	19
Fig. 2.3- Trayectoria de los rayos de reflexión	20
Fig. 2.4- Modelo generado con Trimodel, a)Solapamiento y cruce de los horizontes, b)Triangulaciones que permiten la construcción del modelo final	27
Fig. 2.5- Digitalización de los escenarios propuestos	28
Fig. 2.6- Modelos estructurales de los modelos propuestos generados con la rutina Trimodel; a)Escenario 1: Repetición de Querecual-Chimana-Cantil, b)Escenario2: Secuencia Pre-cretáctica, c)Escenario 3: Secuencia Terciaria	29
Fig. 2.7- Conversión de mallados triangulares a mallados uniformes	30
Fig. 2.8- Modelo de velocidades correspondiente al escenario 1, donde se observa el efecto de la discretización rectangular y el suavizado del modelo.	31
Fig. 2.9- Secciones de Cero offset. a)Tope San Juan-San Antonio-Querecual; b)Tope de la cuña.	33
Fig. 2.10- Ondículas de Ricker utilizadas para generar a) VSP y Shot Gathers, y b) las Secciones de cero offset	35
Fig. 2.11- Secciones de Cero Offset para el Escenario 1: Repetición de Querecual-Chimana-Cantil; a)Parámetros utilizados para la generación de la sección de cero offset, b) Identificación de los topes de las formacionales en la sección de cero offset.	37
Fig. 2.12- Secciones de Cero Offset para el Escenario 2: Secuencia Pre-cretáctica; a)Parámetros utilizados para la generación de la sección de cero offset, b) Identificación de los topes de las formacionales en la sección de cero offset.	38
Fig. 2.13- Secciones de Cero Offset para el Escenario 3: Secuencia Terciaria; a)Parámetros utilizados para la generación de la sección de cero offset, b) Identificación de los topes de las formacionales en la sección de cero offset.	39
Fig. 2.14- Campo de estudio para los diseños de VSP. La fuente en superficie S1 esta localizada en incidencia cero con respecto al geófono localizado en el pozo.	41
Fig. 2.15- Modelado de un VSP sobre el Escenario 1:Repetición de Querecual-Chimana-Cantil con fuente en a) 28 Km, y b) 29Km.	43
Fig. 2.16- Modelado de un VSP sobre el Escenario2: Secuencia Pre-cretáctica con fuente en a) 28 Km, y b) 29Km.	44
Fig. 2.17- Modelado de un VSP sobre el Escenario 3: Secuencia Terciaria con fuente en a) 28 Km, y b) 29Km.	45
Fig. 2.18- Comparación de la sísmica real con la información obtenida de los VSP con respecto a los tiempos de viaje, para cada modelo de velocidades propuestos	46

Fig. 2.19- Diferencia entre los tiempos de viaje de la sísmica real y la información obtenida de los VSP para a) el escenario 1, repetición de Querecual-Chimana-Cantil, b) escenario 2, Secuencia Precretáctica.	47
Fig. 2.20- Diferencia entre los tiempos de viaje de la sísmica real y la información obtenida de los VSP para el escenario 3, Secuencia Terciaria.	48
Fig. 2.21- Modelado de Shot Gathers sobre el Escenario 1: Repetición de Querecual-Chimana-Cantil con fuente en a) 27 Km, y b) 28Km, y c)29Km.	50
Fig. 2.22- Modelado de Shot Gathers sobre el Escenario 2: Secuencia Pre-cretáctica con fuente en a) 27 Km, y b) 28Km, y c)29Km.	51
Fig. 2.23- Modelado de Shot Gathers sobre el Escenario 3: Secuencia Terciaria con fuente en a) 27 Km, y b) 28Km, y c)29Km	52
Fig. 2.24- Comparación de la sísmica real con la información obtenida de los Shot Gathers con respecto a los tiempos de viaje, para cada modelo de velocidades propuestos	54
Fig. 2.25- Diferencia entre los tiempos de viaje de la sísmica real y la información obtenida de los Shot Gathers para a) el escenario 1, repetición de Querecual-Chimana-Cantil, b) escenario 2, Secuencia Precretáctica.	55
Fig. 2.26- Diferencia entre los tiempos de viaje de la sísmica real y la información obtenida de los Shot Gathers para el escenario 3, Secuencia Terciaria	56
Fig. 2.27- Procesos de cálculo del sismograma sintético	58
Fig. 2.28- Contraste de impedancia para los tres modelos de velocidades con una frecuencia dominante de 6 Hz.	59
Fig. 2.29- Espectro de fase, Amplitud y ondícula extraída de la línea ET88A17V usando a) el programa Seiswell y b) Wiener-Levinson	60
Fig. 2.30- Sismogramas Sintéticos de los modelos de velocidades de los tres escenarios, utilizando una ondícula de Ricker a 12.5 Hz, y densidad de 1 gr/cm ³ .	62
Fig. 2.31- Sismogramas Sintéticos de los modelos de velocidades de los tres escenarios propuestos, utilizando una ondícula de Ricker a 6 Hz, y densidad de 1 gr/cm ³ .	63
Fig. 2.32- Sismogramas Sintéticos de los modelos de velocidades de los tres escenarios propuestos, utilizando una ondícula de Ricker a 6 Hz, y densidad de 2.3gr/cm ³ .	64
Fig. 2.33- Sismogramas Sintéticos de los modelos de velocidades de los tres escenarios propuestos, utilizando una ondícula de Ricker a 13 Hz, y densidad de 2.3gr/cm ³ .	65
Fig. 2.34- Sismogramas Sintéticos de los modelos de velocidades de los tres escenarios propuestos, utilizando una ondícula de Ricker a 29 Hz, y densidad de 2.3gr/cm ³ .	66
Fig. 2.35- Sección sísmica correspondiente a las líneas ET86A39 y a dos líneas arbitrarias del levantamiento sísmico Tacata 3D. Junto con la interpretación geológica-estructural de dicha línea.	67
Fig. 3.1- Objetivos de un diseño 3D	70
Fig. 3.2- Flujo de trabajo para el modelado sísmico 3D	71
Fig. 3.3- Términos utilizados en un estudio 3D	72
Fig. 3.4- Manejo de términos en los bordes de un levantamiento sísmico 3D	75
Fig. 3.5- Cobertura versus tamaño del bin	77
Fig. 3.6- Definición del offset mínimo con el cambio de una línea de estaciones por el medio de la esquina de la caja	81
Fig. 3.7- Zona de Fresnel (después Yilmaz, 1987)	85
Fig. 3.8- Adquisición de tres zonas del modelo teórico	87

Fig. 3.9- Diseño ortogonal; a)Levantamiento sísmico 3D, b)Acercamiento del levantamiento, c)Distribución de cobertura, d)Muestreo global de offset y azimuts, e)Distribución de offset por cada bin, f)Distribución de azimuts por cada bin.	89
Fig. 3.10- Diseño ladrillo; a)Levantamiento sísmico 3D, b)Acercamiento del levantamiento, c)Distribución de cobertura, d)Muestreo global de offset y azimuts, e)Distribución de offset por cada bin, f) Distribución de azimuts por cada bin.	91
Fig. 3.11- Diseño Diagonal; a)Levantamiento sísmico 3D, b)Acercamiento del levantamiento, c)Distribución de cobertura, d)Muestreo global de offset y azimuts, e)Distribución de offset por cada bin, f)Distribución de azimuts por cada bin.	93
Fig. 3.12- Levantamiento sísmico con geometría ortogonal donde se incluyen las zonas de exclusión. En el acercamiento se observa las fuentes y detectores desactivados.	95
Fig. 3.13- Resumen de los parámetros utilizados en el levantamiento sísmico ortogonal	96
Fig. 3.14- Diseño Ortogonal con la influencia de las zonas de exclusión; a)Mapa de cobertura, b)Distribución de offset cercano, c)Distribución de offset lejano, d)Muestreo global de offset y azimuts, e)Distribución de offset por cada bin, f)Distribución de azimuts por cada bin.	97
Fig. 3.15- Levantamiento sísmico con geometría diagonal donde se incluyen las zonas de exclusión. En el acercamiento se observan los detectores y fuentes desactivados.	98
Fig. 3.16- Resumen de los parámetros utilizados en el levantamiento sísmico diagonal	100
Fig. 3.17- Diseño Diagonal con la influencia de las zonas de exclusión; a) Distribución de Cobertura, b)Distribución de offset cercano, c)Distribución de offset lejano, d)Muestreo global de offset y azimuth, e)Distribución de offset por cada bin, f)Distribución de azimuth por cada bin.	101
Fig. 3.18- Levantamiento sísmico con geometría tipo ladrillo donde se incluyen las zonas de exclusión. En el acercamiento se observan los detectores y fuentes desactivados	102
Fig. 3.19 - Resumen de los parámetros utilizados en el levantamiento sísmico tipo ladrillo	104
Fig. 3.20- Diseño tipo ladrillo con influencia de las zonas de exclusión; a)Mapa de cobertura, b)Distribución de offset cercanos, c)Distribución de offset lejanos, d)Muestreo global de offset y azimuts, e)Distribución de offset por cada bin, f)Distribución de azimuts por cada bin.	105
Fig. 6.1- Movimiento de compresión y dilatación de una onda P	200
Fig. 6.2- Dirección de propagación de una onda S	201
Fig. 6.3- Rayos y Frentes de ondas que se propagan en una interface	201

1. CAPITULO I

1.1 Introducción

El hombre tiene la necesidad absoluta de penetrar y escudriñar las entrañas de los medios que le rodean para saber cómo están formados y qué es lo que contienen. Necesita hurgar en el océano en busca de alimento, conocimiento y riquezas; necesita penetrar el aire y necesita adentrarse en la tierra sólida para encontrar, entre las cosas que ella atesora, el combustible que es sustento de su civilización. Esta gran necesidad surge para obtener un mayor conocimiento de su hábitat, lo cual le ayuda a comprenderlo mejor, a explotar mejor sus recursos y a elaborar mejores hipótesis sobre su origen y su destino final, y definitivamente, se da en busca de su futuro.

Para poder acceder en cada uno de esos medios, necesita los “ojos” y la “luz” adecuados. Para Euclides, en el siglo III A.C., la visión era posible porque los ojos enviaban luz hacia el objeto de la vista. Esto no es cierto en tanto se refiere al ojo humano, pero es totalmente cierto en cuanto se habla de algunas formas de investigar el océano, la atmósfera, y la tierra firme. La “luz”, en cada caso, es una forma de radiación (electromagnética o sonido) emitida por algún tipo de “linterna” (fuente) que tiene la capacidad de “canalizar” esta radiación, creando un fuerte efecto direccional al iluminar el medio (un haz).

Se aplica a una variedad de actividades relacionadas con el sondeo del planeta, mediante diseños de superficies bidimensionales y tridimensionales por computadora. Es allí donde los métodos sísmicos juegan un papel importante en la búsqueda de ese combustible tanpreciado como lo son los hidrocarburos. El diseño de un buen estudio se lleva a cabo mediante objetivos geofísicos, que minimizan el costo, y el tiempo de adquisición y procesamiento. Básicamente, las componentes de los métodos sísmicos para la exploración de hidrocarburos son la adquisición, procesamiento e interpretación.

Estas tres áreas están muy relacionadas entre sí, ya que, el procesamiento e interpretación de la data sísmica se ven afectados por los parámetros de adquisición en campo. Hoy en día se tiene mas conciencia de la importancia de tener los métodos sísmicos como un todo, y tomar las tres áreas de estos métodos como un conjunto, donde una conlleva a la otra.

En Venezuela existen grandes complejidades geológicas y estructurales, que requieren técnicas de adquisición que mejoren la calidad de los datos y faciliten el procesamiento e interpretación de los mismos. A medida que se evalúa la iluminación de esas estructuras, se logra aplicar una metodología para realizar modelado sísmico que permita escoger los parámetros óptimos de adquisición sísmica.

El modelado sísmico es una herramienta importante que permite obtener la imagen de la respuesta sísmica del subsuelo con sus complejidades estructurales y estatigráficas. Trata las secciones sísmicas como despliegues de reflexiones a partir de un modelo en profundidad y, al compararla con la data real, el intérprete puede ser capaz de determinar si el modelo es compatible con los datos reales, sino el modelo es modificado hasta obtener una buena aproximación de las reflexiones. Esto es de gran utilidad antes de ir a campo, ya que permite analizar aspectos importantes en el proceso de adquisición (Musser , 2000). La necesidad de detectar estructuras complejas se debe a que muchas de ellas contienen acumulaciones de petróleo. Por lo tanto, el descubrimiento de nuevos prospectos y la habilidad de inferir zonas que anteriormente no podrían ser reconocidas como es el caso del área de Macal, donde la baja relación señal-ruido de los datos grabados en campo, combinado con una tectónica compleja, influyen en el enmascaramiento de la señal de la formación Naricual, justo al frente del corrimiento en su parte de mayor buzamiento.

Existe actualmente una gran variedad de aproximaciones de modelado sísmico, que intentan simular la respuesta sísmica. Entre estas tenemos, el modelado sísmico de la ecuación de onda, que modela directamente frentes de ondas mediante los cambios físicos en el subsuelo, sin importar que tan complejo sea el modelo y logrando una imagen sísmica sintética y continua de los eventos que allí se encuentran. Se genera un modelo 2D de velocidades sísmicas, el cual se introduce al operador de diferencias finitas para obtener la imagen sísmica de la misma, y poder determinar que tanto ésta se ajusta a la data real. Esto es posible gracias al *Seismic Unix*, donde se encuentran importantes herramientas que permiten obtener una buena representación de la complejidad del modelo como lo es *Trimodel*, generando los modelos de velocidades.

Una vez elaborados los modelos de velocidades, se realizará un modelado sísmico 2D, por diferencias finitas con otra rutina existente en el *Seismic Unix*, llamada *Sufdmod2*, que permitirá realizar la comparación con la sísmica real que se tiene del área y determinar cual de los escenarios es el más probable a través de secciones sísmicas sintéticas (VSP, Shot Gathers y Secciones de Cero Offset). Una vez realizado este trabajo se procederá al diseño de levantamientos sísmicos 3D que permitirán una mayor delineación y estudio del área prospectada, a partir de tres geometrías de adquisición distintas (Ladrillo, Ortogonal, Diagonal), de las cuales se extraerán sus respectivos diagnósticos (cobertura, azimut, y offset), y se determinará que geometría nos permitirá obtener una buena imagen del subsuelo, que corrobore la conclusión a la cual se ha llegado con el modelado sísmico 2D, a un bajo costo antes de ir a campo.

Este trabajo se realizó con el fin de contribuir con el estudio de un área en exploración al norte del estado Monagas, en el Oriente de Venezuela (Fig. 1.1). La cuenca Petrolífera Oriental de Venezuela, es una depresión estructural ubicada en la zona centro-este del país, que se extiende aproximadamente 800 Km en sentido oeste-este y 200 Km de norte a sur, ocupando un área total de 165.000 Km². Se encuentra limitada al norte por la Cordillera de la Costa, al sur por el río Orinoco, al este por la plataforma del delta del mismo río y al oeste por el arco de El Baúl.

El proceso evolutivo de la cuenca petrolífera de la Venezuela Oriental dio lugar a la presencia actual de estructuras geológicas de características complejas cuya imagen sísmica es de gran interés obtener. Una breve descripción de este proceso permite destacar durante el Mioceno medio la transgresión de la placa tectónica del Caribe contra la Suramericana, ocasionando el movimiento de la Serranía del Interior y la deformación del flanco norte de la Cuenca Oriental de Venezuela. Esta deformación tectónica del Norte de Monagas, generado por un régimen de tipo compresional, dio lugar a estructuras anticlinales segmentadas en bloques fallados.

1.2 Ubicación del área de estudio

El área Macal se encuentra sobre la línea sísmica ET88-A17V y está cubierta por 4.000 Km de sísmica 2D y unos 30 pozos de los cuales 10 son pozos someros con profundidades entre 3000' y 7000' (Fig. 1.2). Esta área se considera como una zona geológicamente compleja, formada por

un conjunto de fallas y el famoso corrimiento de Pirital como se a señalado anteriormente, sobre el cual existe una secuencia estratigráfica conocida. Hacia la parte noreste de los modelos propuestos, donde se encuentra el pozo Macal 1X, el cual se encuentra ubicado a aproximadamente a 75 Km al Noroeste de la ciudad de Maturín, y a 19 Km al Noroeste de la ciudad Punta de Mata en la Cuenca Oriental, Estados Anzoátegui / Monagas, solo existe información hasta 18000 pies de profundidad aproximadamente, y hasta los momentos no se ha encontrado la continuación de la secuencia litológica y estratigráfica vista por los pozos adyacentes.

Es ahí donde comienza el aporte de este trabajo especial de grado, debido a que basados en suposiciones de lo que en esa pequeña área existe, se manejaran tres escenarios que difieren sólo en la zona prospectada por el pozo Macal 1X (Figura 1.3). Estos tres escenarios se digitalizaron, de tal manera de obtener la información de los puntos distancia-profundidad que permitirán la construcción de los modelos de velocidades. Cada uno de estos escenarios tienen en común un conjunto de formaciones (Fig. 1.4), de las cuales se dará a continuación una breve descripción geológica-estructural.

1.3 Breve descripción geológica del área de estudio

- (a) Formación la Mesa/Las Piedras, consiste en arcillas solubles, areniscas de grano grueso y limolitas, formadas en un ambiente continental. De edad comprendida de Mioceno Tardío a Plioceno. La formación las Piedras descansa discordantemente sobre la formación Morichito y Carapita al norte del acuñamiento La Pica (Carnevalli, 1988). Tiene un espesor aproximado de 1585 pies. Estas arenas de la formación la Mesa/Las Piedras son productoras de petróleo pesado en los campos de Pirital, al norte del estado Monagas.
- (b) Formación Morichito, está compuesta por areniscas cuarzo cristalinas y arenas, desarrolladas en un ambiente continental. Por sus relaciones estratigráficas se le ha asignado una edad Mioceno Medio. Tiene un espesor aproximado de 2850 pies. Se acuña hacia la parte sur del modelo con la formación La Mesa/Las Piedras, la cual cubre discordantemente a la Formación Morichito; al oeste del área yace discordantemente sobre la Formación Carapita o unidades cretáceas.

- (c) Formación Querecual, consiste de lutitas grises oscuras a negras, limolitas marrones y calizas arcillosas. En el contacto inferior, en esta sección (Escenarios Propuestos) esta formación se encuentra fallada y, al igual que en la parte superior descansa concordante sobre las formaciones Chimana/El Cantil (Hedberg, 1950). Su contacto superior, es concordante y transicional con la formación San Antonio, la única diferencia entre ambas formaciones es el aumento en la proporción de areniscas, es por ello que en este caso no hay una clara distinción entre las unidades de San Antonio/San Juan/Querecual. La Formación Querecual es la roca madre por excelencia de los hidrocarburos de la Cuenca Oriental de Venezuela (Campos et. al.1985).
- (d) Formación San Antonio, espesor aproximado de 400 pies, consiste esencialmente de calizas y lutitas negras como en la Formación Querecual, con numerosas capas de areniscas que son escasas en este caso por lo que no se puede diferenciar la unidad de la formación Querecual y la formación San Juan (Rosales, 1960). El contacto con la formación Querecual es transicional, al igual que con la formación San Juan.
- (e) Formación San Juan, está formada por alternancias de capas de areniscas, con capas de lutitas y limolitas negras. El contacto inferior es concordante pero abrupto, con las limolitas negras de la formación San Antonio. Edad cretácica, desarrolladas en un ambiente marino somero.
- (f) Formación Barranquín, es un gran espesor de areniscas cuarzo cristalinas intercaladas con lutitas y limolitas, tiene un espesor aproximado de 6900 pies, desarrollado en ambiente continental transicional. La formación Barranquín en su contacto superior choca con el corrimiento de Pirital. La Formación Barranquín se halla cubierta por calizas macizas, características de la Formación Chimana/El Cantil (Vivas, 1987).
- (g) Formación Carapita, consiste casi exclusivamente de lutitas grises oscuras a negro, de edad mioceno medio, desarrollada en un ambiente marino de aguas profundas. Hacia el oeste, las lutitas de la formación son concordantes, con un contacto duacrónico y transicional, sobre las formaciones Naricual.
- (h) Formación Naricual, se compone de areniscas intercaladas con lutitas arenosas y carbonosas. Naricual es bruscamente transicional, vertical y lateralmente con la formación Carapita.

De manera general, en la Venezuela Oriental la historia de la sedimentación se inicia con clásticos arenosos y algunas calizas de plataformas (Formación Barranquín) de espesor aparentemente

uniforme que su equivalente en Occidente. Siguiendo a la deposición anterior, se forma una plataforma bien definida y extensa, carbonática-clástica (Formación Chimana/El Cantil). A partir del final del Albiense, se inicia al este de Venezuela y de manera diacrónica hacia el oeste, la invasión marina que llegó a cubrir extensas zonas hacia el sur del país, en áreas expuestas a la erosión desde finales del Jurásico o incluso desde finales del Paleozoico. Esta invasión marina coincide con el pulso mundial transgresivo del Cretácico Tardío, responsable de la sedimentación de lutitas y calizas ricas en materia orgánica en América y en Europa. Estas rocas se conocen en Venezuela como la Formación Querecual/San Antonio (Grupo Guayuta), Mucaria, Navay y La Luna.

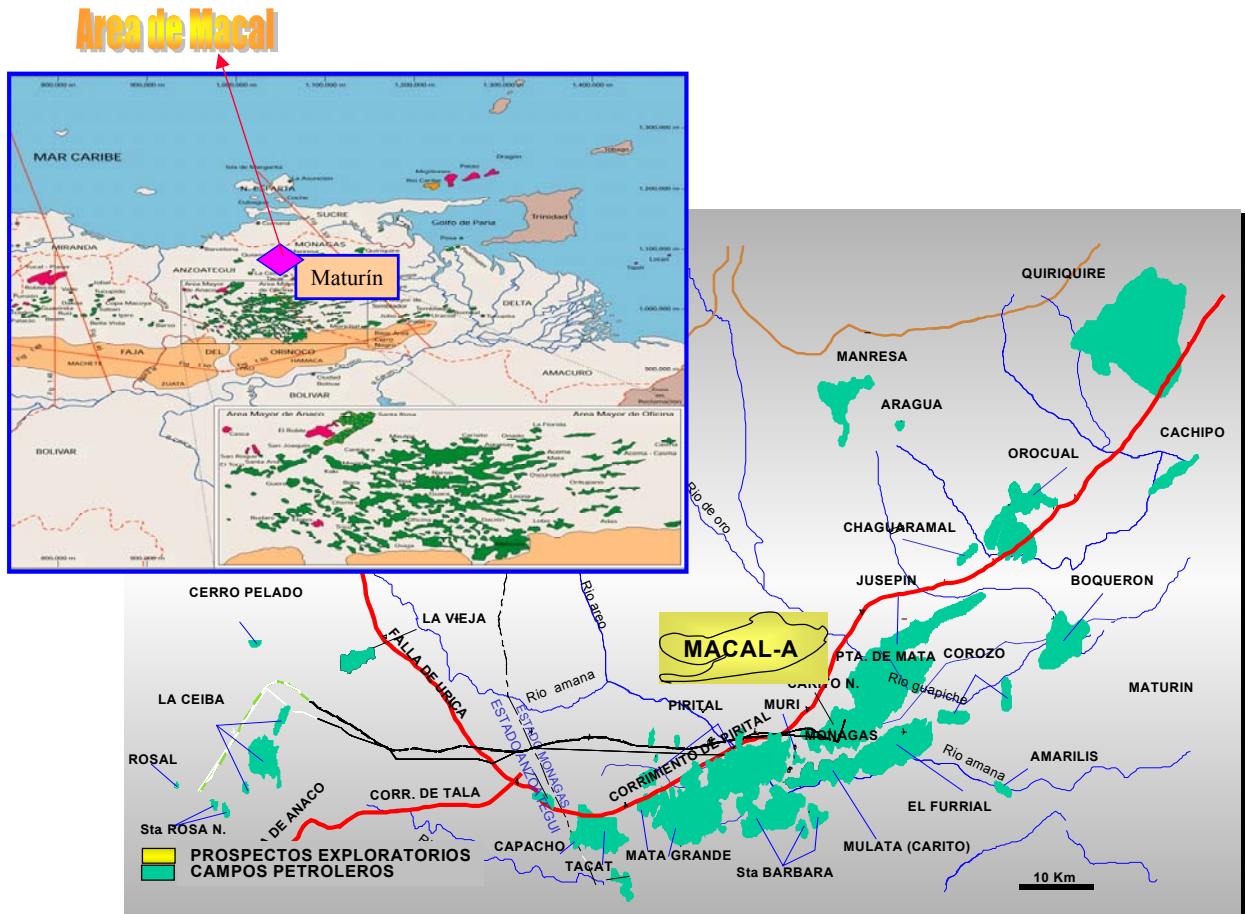


Fig. 1.1- Ubicación del área de Macal

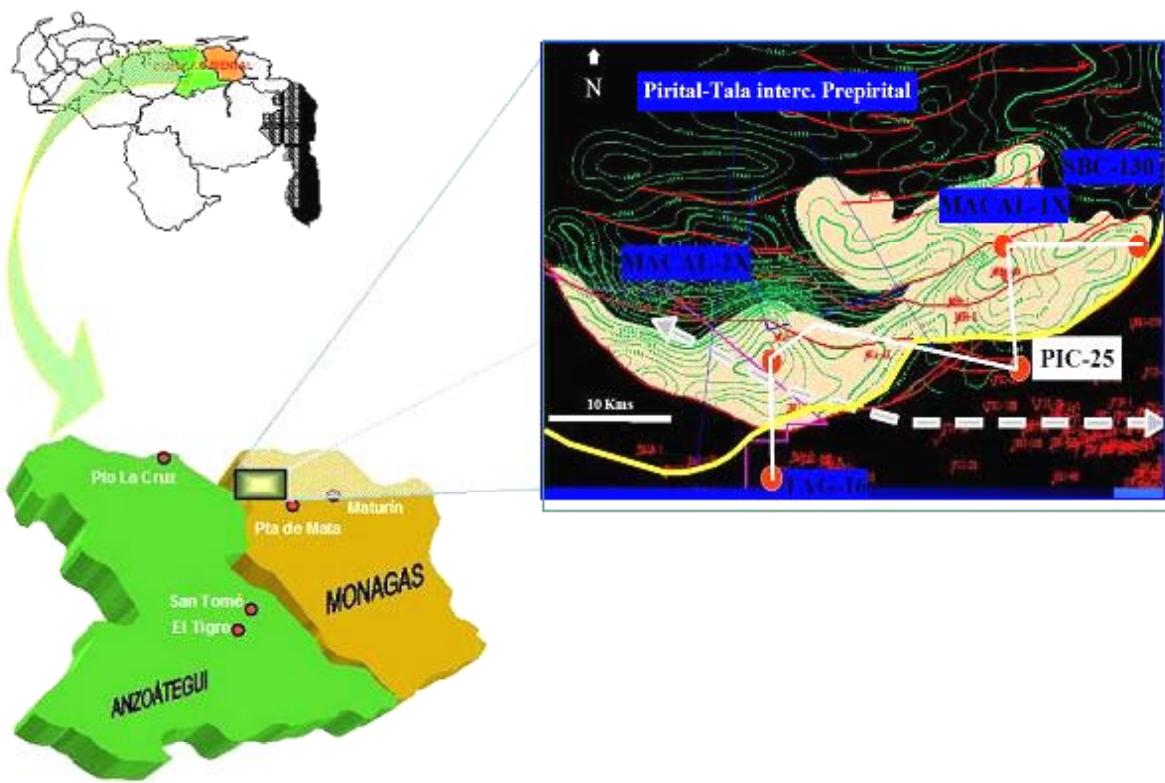


Fig. 1.2- Ubicación relativa de los prospectos dentro del área de Macal

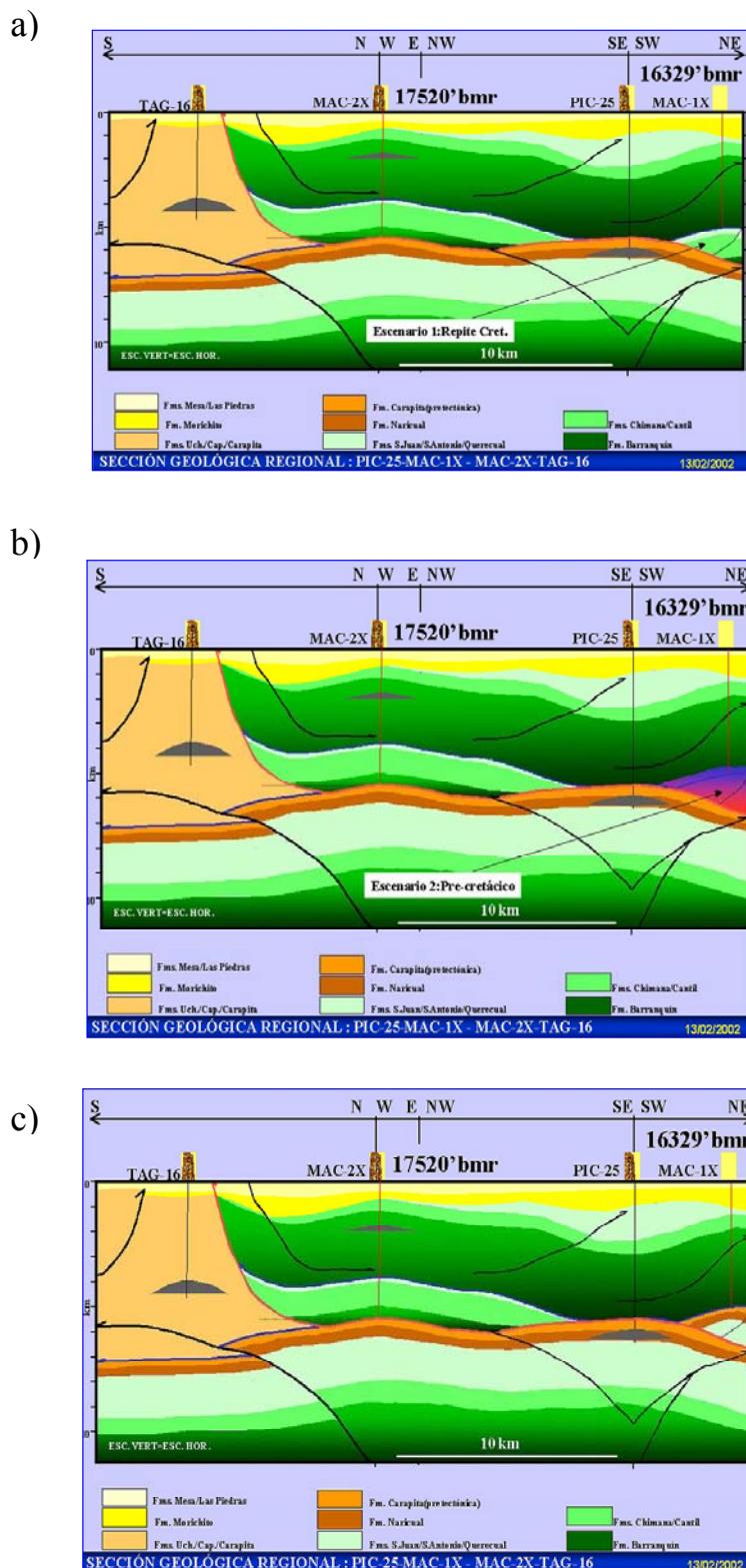


Fig. 1.3- Escenarios Propuestos. a)Escenario 1: Repetición de Querecual-Chimana-El Cantil, b)Escenario 2:Secuencia Pre-cretáxico, c)Escenario 3:Secuencia Terciaria.

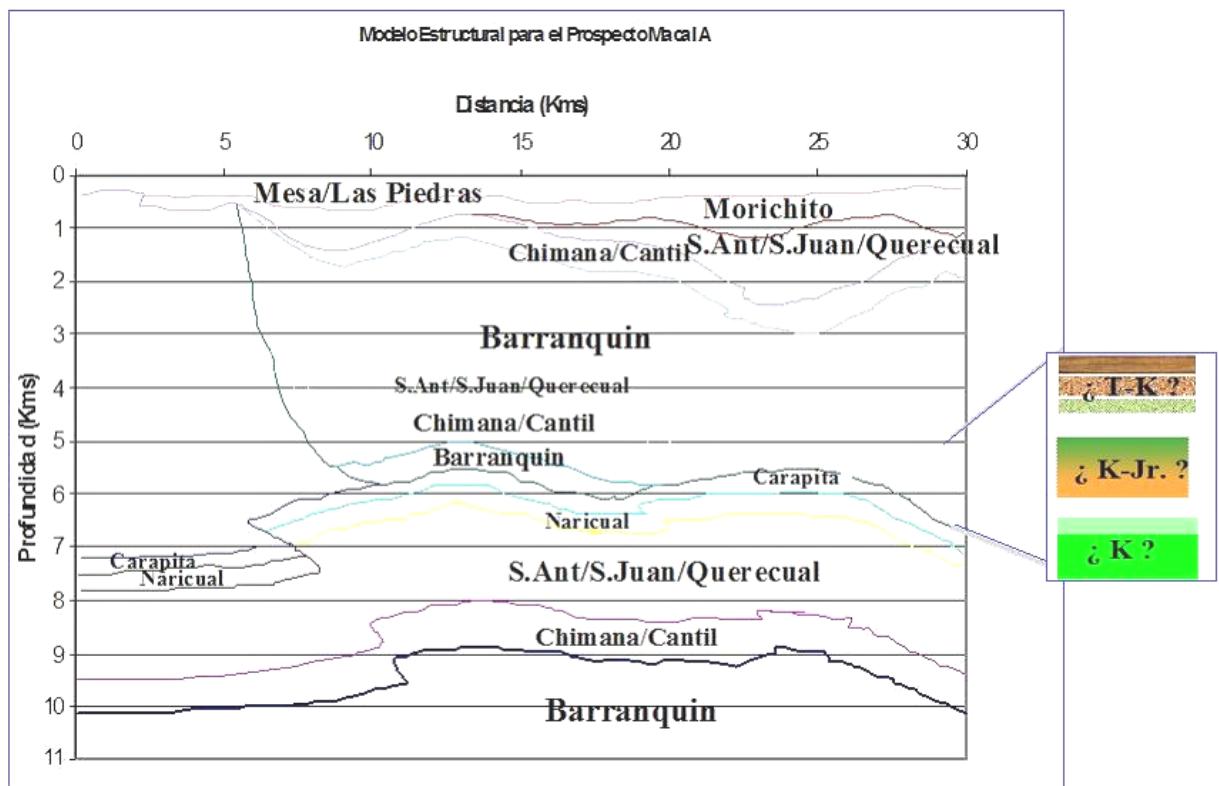


Fig. 1.4- Modelo estructural del Prospecto Macal, formaciones geológicas comunes para los tres escenarios propuestos.

2 CAPITULO II

2.1 Modelado Sísmico 2D

En este capítulo se presenta la metodología seguida para realizar un modelado sísmico 2D en estructuras complejas. A medida que la exploración se concentra en la iluminación, surge la necesidad de realizar ciertos análisis que generen estructuras sin depender de las secciones sísmicas como una imagen fotográfica. El modelado sísmico trata estas secciones sísmicas como despliegues de reflexiones más que como imágenes fotográficas, permitiendo comprender el comportamiento de las ondas sísmicas en el subsuelo. Existe una gran variedad de aproximaciones al modelado sísmico, entre las cuales se tiene el modelado por diferencias finitas. El modelado sísmico de la ecuación de onda acústica por diferencias finitas, permite obtener una buena respuesta sísmica del subsuelo, sin importar la complejidad del mismo; modelando directamente frentes de ondas los cuales se concentran en cada punto del modelo discretizado. La principal ventaja de modelar la ecuación de onda es mejorar la simulación de amplitud y continuidad de los eventos.

El modelado sísmico tiene el objetivo principal de generar sismogramas sintéticos sobre modelos de velocidades, como es este caso, que permitan entender la estructura y comportamiento del subsuelo.

Cuando se realiza un estudio de modelado sísmico en un área estructuralmente compleja, se debe comenzar con un estudio 2D, que permita tener una visión mas clara y precisa del estudio, permitiendo posteriormente llegar a realizar un buen estudio 3D. Esto es muy importante, debido a que el tiempo de cómputo aumenta con las dimensiones del modelo. Un estudio 2D permite determinar que tan importante es el área, cual es el buzamiento de las estructuras, información de velocidades, calidad de la información dada, para determinar de manera puntual cual es el objetivo específico del estudio, permitiendo a su vez disminuir las dimensiones del modelo, para poder concentrarnos en el objetivo, de manera que se ahorre tiempo y dinero.

2.2 Elastodinámica

Existe un conjunto de ecuaciones que describen los fenómenos físicos de la propagación de ondas, las cuales se deben comprender para poder modelar la propagación de ondas en el subsuelo por medio de algoritmos numéricos. Uno de los objetivos de este trabajo es simular la propagación de ondas sísmicas en medios elásticos. Para ello es importante caracterizar el medio en donde éstas se propagan. Para esta caracterización se puede tomar en cuenta propiedades físicas como densidad, velocidad de las ondas compresionales y de cizalla, como es el caso.

Un cuerpo es *elástico* cuando tiende a recobrar su forma y extensión cuando cesa de actuar la fuerza que lo modifica, que en este caso corresponde a las fuerzas compresivas y de cizalla. Para comprender mejor esta teoría se debe evaluar ciertas ecuaciones que relacionan esfuerzos y deformaciones de sólidos elásticos. Entre estas se encuentran a la Ley de la Elasticidad, hoy llamada *Ley de Hooke*, la cual establece que los cuerpos elásticos se deforman de manera proporcional a las fuerzas que se les aplica. Su forma unidimensional más elemental corresponde a:

$$f = kx \quad (2.1)$$

en donde f es el esfuerzo, k es la constante de elasticidad y x es la deformación.

Para un sólido elástico tridimensional se tiene la siguiente relación entre el tensor de deformación, el tensor de esfuerzos y el tensor elástico del medio, de acuerdo con la Ley de Hooke:

$$\underline{\underline{T}} \equiv \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{E}} \quad (2.2)$$

donde T es el tensor de esfuerzo, C el tensor elástico del medio y E el tensor de deformación.

La Ley de Hooke y la simetría del tensor de esfuerzos ($T_{ij} = T_{ji}$) implica que el tensor de coeficientes elásticos es simétrico en su primer par de índices, esto es $C_{ijkl} = C_{jikl}$. Aplicando esto pasamos de 81 pares de componentes independientes del tensor de coeficientes elásticos a 36 pares.

Por ultimo, tomando ciertas relaciones en termodinámica, se puede decir que el tensor de coeficientes elásticos también es simétrico bajo el intercambio del primer par de índices con el segundo: $C_{ijkl} = C_{klji}$. Aplicando esto pasamos de 36 pares de componentes a 21 pares que caracterizan el medio en todos sus puntos.

Por otro lado, también se sabe que la representación matricial del tensor elástico ortotrópico es de la forma,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{C} \\ \bar{\bar{C}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \\ M_{11} &= \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} \end{bmatrix} & M_{22} &= \begin{bmatrix} C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.3)$$

donde $M_{12} = M_{21}$ son completamente nulas.

Físicamente el caso isotrópico tiene lugar, si y solo si, las propiedades físicas del medio son independientes de la formación en que se comience en el sólido, es decir, en la orientación de este sólido respecto al frente de onda.

Se puede mostrar que el tensor isotrópico elástico es de la forma,

$$C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu [\delta_{ik} \delta_{ji} + \delta_{il} \delta_{jk}] \quad (2.4)$$

donde λ y μ son los coeficientes constantes de Lamé, definidos por

$$\begin{aligned} \lambda &= C_{12} \\ \mu &= C_{44} \\ \lambda + 2\mu &= C_{11} \end{aligned} \quad (2.5)$$

La Ley de Hooke se transforma de manera generalizada en:

$$T_{ij} = C_{ijkl} E_{kl} \equiv \lambda(E_{kk})\delta_{ij} + 2\mu E_{ij} \quad (2.6)$$

De acuerdo con esto, la representación matricial del tensor elástico queda de la siguiente manera:

$$C_{ijkl} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Una vez obtenida la matriz de coeficientes elásticos para medios isotrópicos se puede calcular las componentes de esfuerzos en términos de los desplazamientos resultantes. Como el material es homogéneo e isotrópico las constantes elásticas no varían con la posición, por lo cual la ecuación queda expresada de la siguiente manera:

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \nabla^2(u_x) - \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = 0 \quad (2.8)$$

El Teorema de Helmholtz, permite representar cualquier campo vectorial u , utilizando un potencial vectorial, ψ , y un potencial, γ .

$$u = \nabla \gamma + \nabla \times \Psi \quad (2.9)$$

Esta sustitución separa el campo de desplazamiento de ondas de corte y ondas compresionales.

$$\nabla \left[(\lambda + 2\mu) \nabla^2 \gamma - \rho \frac{\partial^2 \gamma}{\partial t^2} \right] + \nabla \times [\mu \nabla^2 \Psi] - \rho \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (2.10)$$

Cada uno de los términos en los corchetes debe ser ceros independientes. Si se definen,

$$\alpha = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$$

$$\beta = \sqrt{\mu/\rho} \quad (2.11)$$

los potenciales satisfacen las siguientes ecuaciones de onda. El potencial escalar, γ , satisface una ecuación de onda escalar y corresponde con las ondas compresionales (ondas P), que se propagan con velocidad α . El potencial vectorial, Ψ , satisface la ecuación de onda vectorial y representa una onda de corte o cizalla (ondas S) que se propagan con velocidad β .

$$\nabla^2 \gamma - \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \gamma}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (2.12)$$

2.2.1 Ecuación de Onda Acústica

La propagación de la energía por medio de ondas es un fenómeno realmente común en la actualidad. En este caso, los tipos de ondas que se estudiarán serán las ondas sísmicas, las cuales, han permitido obtener imágenes del interior de la Tierra.

Matemáticamente, la ecuación hiperbólica de diferencias parciales más sencilla es la ecuación de onda acústica de densidad constante. El suponer la densidad constante simplifica la representación de los modelos a estudiar, es decir, solo se requiere la velocidad.

La ecuación de onda acústica en dos dimensiones relaciona las derivadas respecto al espacio con las derivadas en tiempo y requiere una velocidad de propagación en el medio denominada $C(x, z)$.

Así, siendo Ψ el campo de onda de presión y $src(t)$ la fuente sísmica, se tiene que la ecuación de onda bidimensional de densidad no homogéneamente constante, viene dada por:

$$\frac{1}{c(x,z)^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \left[\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right] + SrC(t) \quad (2.13)$$

Esta ecuación es hiperbólica y no-homogénea debido a la presencia de varias velocidades dentro del modelo. Con respecto al factor de la fuente sísmica ($\text{src}(t)$), sólo se aplica en o cerca de la superficie.

A partir de la ecuación anterior se obtiene la ecuación de onda acústica considerando la perturbación en un medio con características de fluido además de cumplir con la ley de la conservación de la masa y del momento, se obtiene como resultado:

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

donde la velocidad de la partícula es el gradiente de ϕ y $v = \sqrt{K/\rho_0}$ siendo K el modulo de elasticidad y ρ_0 la densidad del medio en el momento inicial.

2.3 Fundamentales Trayectorias de Rayos

2.3.1 Trayectoria de rayos sísmicos

La manera en la cual una onda sísmica se propaga a través de la superficie es revelada por el *Principio de Huygen's*. La figura 2.1 muestra como un frente de ondas se propaga a través de un medio de velocidad constante, 2 segundos antes una fuente es activada. (El frente de onda es circular en sección cruzada, pero es esférico en tres dimensiones). Para predecir la posición del frente de ondas en 3 segundos, cada punto sobre los 2 segundos frentes de ondas es considerado como una nueva fuente. Los círculos centrales sobre estos puntos con radio correspondiente a 1 segundo de tiempo de viaje representan el frente de onda asociado con cada nueva fuente. La gran envolvente tangencial para estos pequeños frentes de onda representa la posición de avance de la onda sísmica a los 3 segundos. La porción del pequeño frente de onda no coincide con esta envolvente que está fuera de la fase y cancela uno y otro residuo de este fuera del ángulo del frente de onda.

Habiendo inducido una sucesión de frentes de ondas, se puede también derivar estos asociados con las normales. Estas normales podrían ir en dirección contraria para la localización de la

fuente debido a que la normal es el radio que conecta un frente de onda con la posición de la fuente sobre el precedido frente de onda. Estas normales las cuales conectan temporalmente sucesiones de frentes de ondas son llamadas trayectorias de rayos.

Son frentes de ondas verdaderos porque ellos describen esta porción de la sísmica perturbada que son continuos y en fase. La trayectoria de rayo, por otro lado, es conceptualmente un artificio, el cual, permite entender, describir, e ilustrar la propagación de la onda.

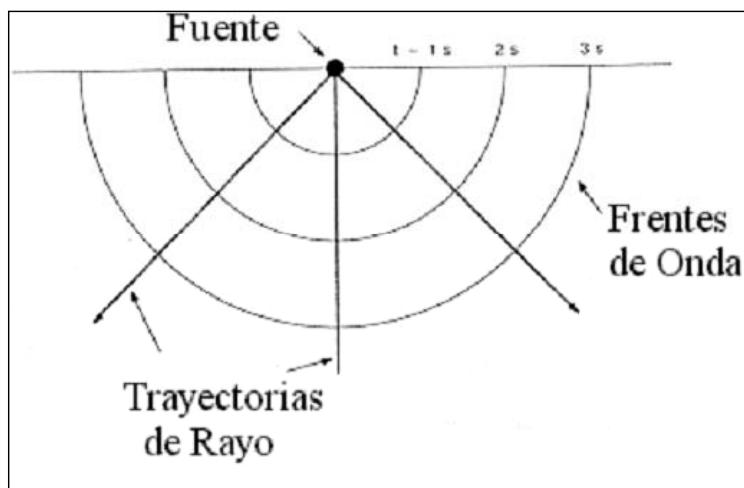


Fig. 2.1- Muestra cinemática de la relación entre la trayectoria de rayo y los frentes de ondas. La trayectoria de rayo es normal al frente de onda y van en dirección contraria a la fuente de la onda sísmica.

2.3.2 Reglas que gobiernan la trayectoria de los rayos sísmicos

1. Las trayectorias de rayos descansan en un medio de velocidad constante:

La figura 2.1 ilustra la propagación de onda a través de un medio de velocidad constante con un frente de onda concéntrico. Debido a que los frentes de onda son concéntricos, la trayectoria de rayos es recta y en dirección contraria a la localización de la fuente hacia el centro del frente de onda circular.

- Las trayectorias de rayos se inclinan o se encorvan en conformidad con la ley de Snell mientras se cruzan las velocidades en las interfases:

Existe una serie de frentes de onda que impactan sobre una interfase entre un medio de velocidades diferentes. Los frentes de ondas son planos pero se podría atender como una porción local del frente de onda los cuales son regionalmente esféricos.

El espaciamiento de sucesivos frentes de ondas es mayor a medida que se acercan al medio de altas velocidades, significando que la distancia de viaje es mayor al incrementarse el tiempo, Δt . Adicionalmente, el frente de ondas, y ellos asociados con la trayectoria de rayos, se doblan, o refractan, cuando ellos se encuentran con el medio de altas velocidades.

La cantidad de trayectorias de rayo que se inclinan depende de los contrastes de velocidades a través de la interfase y se pronostica por la ley de *Snell*:

$$\frac{\sin(a_1)}{V_1} = \frac{\sin(a_2)}{V_2} \quad (2.15)$$

Donde a_1 es igual al ángulo de incidencia y a_2 es igual al ángulo de transmisión. Estos son los ángulos entre los rayos entrantes y transmitidos, respectivamente, y la normal a la interfase.

Cuando el ángulo de incidencia es critico, la trayectoria de los rayos a lo largo de la interfase (para velocidad del medio subyacente) entra en el medio superior, el medio de baja velocidad a lo largo de una continuación de puntos en la interfase (ver la figura 2.2). Las ondas sísmicas representadas por estas trayectorias de rayos son una terminación de las ondas refractadas u onda principal.

De la *Ley de Snell* se puede inferir que la trayectoria de rayos se inclina con dirección a la interfase normal mientras ellos se introducen en el medio de baja velocidad, y fuera de la normal mientras se introducen en el material de alta velocidad. Debido a que la condición subterránea más común es que la velocidad se incrementa con la profundidad, la trayectoria de rayos cuida la

inclinación fuera de la normal como la propagación de ellos dentro de la tierra y próximo a la normal como cuando retornan hacia arriba de la superficie (ver la figura 2.3). También, si una trayectoria de rayos es normal a una interfase, el ángulo de incidencia es cero. Entonces el $\sin(a_1)$ en la ley de Snell es cero y el $\sin(a_2)$ y a_2 , el ángulo de transmisión, debe también ser cero.

La inclinación de la trayectoria de rayos resulta en el incremento de la longitud del rayo de trayectoria en la capa de velocidad alta con un consecuente acortamiento del tiempo de viaje. En realidad, los rayos de trayectoria encontrados por la *ley de Snell* entre dos puntos, podrían mostrarse para uno con menor tiempo de viaje entre estos dos puntos. Esto es conocido como el *principio de Fermat's*.

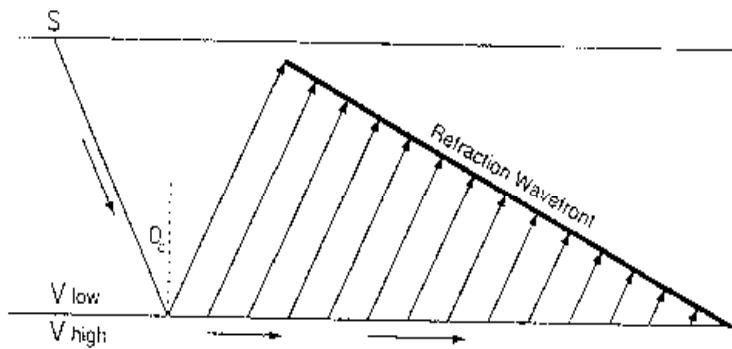


Fig. 2.2- Trayectoria de Rayos Asociados con la llegada de la refracción

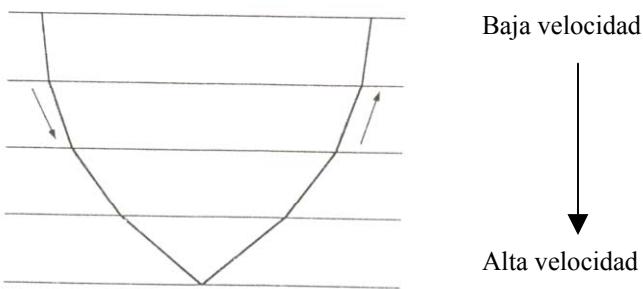


Fig. 2.3- Trayectoria de los rayos de reflexión

3. Las trayectorias de rayos se reflejan con un ángulo igual al ángulo de incidencia cuando ellos se encuentran con la impedancia en las interfases. La impedancia de un medio es producto del medio de velocidades y la densidad. Cuando la onda sísmica encuentra a una interfase entre unidades de impedancia diferente, parte de la energía sísmica es dirigida de regreso fuera de la superficie en forma de una onda reflejada. El ángulo de incidencia O_i es igual al ángulo de reflexión O_r .

Estas tres reglas gobiernan la propagación del frente de ondas. Obsérvese que cada regla está sujeta a un principio de reciprocidad: La trayectoria del rayo permanece igual sin tener en cuenta la dirección del viaje.

2.4 Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas es una de las técnicas más populares a través de los tiempos, porque ofrece el camino para formular problemas en términos de ecuaciones diferenciales de segundo orden pudiéndose implantar a nivel de “software”, permitiendo una solución que discretiza las variables de la ecuación, transformando una ecuación matemática en una ecuación analítica.

Esta técnica requiere que el dominio espacial completo sea representado en grids, los cuales pueden ser tan pequeños como la menor longitud de onda, así como también pueden ser de la

misma dimensión de la estructura de menor tamaño del modelo. Además puede desarrollar un amplio dominio espacial, que corresponde a soluciones de tiempo amplias.

El tamaño y la complejidad de la estructura que podría generarse por el método de diferencias finitas está limitada por la capacidad del computador. Otra limitación son los problemas de exactitud y dispersión numérica; al igual que el conjunto de difracciones y reflexiones artificiales encontradas en las respuestas sísmicas debido a los problemas de borde ocasionados por la generación de los grids por el operador de diferencias finitas.

La teoría de análisis numérico se basa en los cálculos de diferencias finitas, los cuales se fundamentan en el desarrollo de series de Taylor de funciones y sus derivadas (Kunz, 1957).

La derivada de una función $\phi(x)$ en un punto dado está definida como

$$\lim_{x \rightarrow a} \frac{\phi(x) - \phi(a)}{x - a} \quad (2.16)$$

o lo que es equivalente,

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\phi(x + \Delta x) - \phi(x)}{\Delta x} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.17)$$

Se puede observar que Δx es una variación en el valor de x cuando x cambia de un punto a otro, y puede ser positivo o negativo. La aproximación puede ser mejor a medida que Δx se reduce, sin embargo para cualquier valor finito de Δx , un error (error de truncamiento) se introduce en la aproximación. Cuando Δx tiende a cero, el error se aproxima a cero. Las aproximaciones pueden obtenerse por el desarrollo de la serie de Taylor, para un intervalo $\phi(x + \Delta x)$,

$$\phi(x + \Delta x) = \phi(x) \pm \frac{\partial \phi}{\partial x} \Delta x + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} (\Delta x)^2 \pm \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} (\Delta x)^3 + \dots + \frac{1}{(n+1)!} \frac{\partial^{n+1} \phi}{\partial x^{n+1}} (\Delta x)^{n+1} \quad (2.18)$$

y agrupando se tiene:

$$\frac{\phi(x + \Delta x) - \phi(x)}{\Delta x} = \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \dots \quad (2.19)$$

Esta aproximación es de primer orden en Δx y puede escribirse de la siguiente manera:

$$\frac{\phi(x + \Delta x) - \phi(x)}{\Delta x} = \frac{\partial \phi}{\partial x} + O(\Delta x) \quad (2.20)$$

sin embargo, el error de eliminar términos $O(\Delta x)$ aumenta de acuerdo con la potencia a la cual se encuentra elevado el Δx .

2.4.1 Estabilidad de la solución

Cada término en la solución de la ecuación diferencial decrece exponencialmente con el tiempo, por lo cual, hay un incremento en el error de la aproximación. La condición de estabilidad puede establecerse mediante el requerimiento de que ningún error ϵ_i^j debe ser mayor que un valor acotado para $(j+1)$.

La condición de estabilidad está dada por:

$$\lim_{j \rightarrow \infty} |\epsilon_i^j| \leq K \quad (2.21)$$

para un Δt fijo, donde K es independiente de j . La condición de estabilidad para la ecuación de onda en un medio uniforme de dimensiones espaciales j esta dado por su parte por,

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{j\beta}} \quad (2.22)$$

donde β es la velocidad de cizalla $\sqrt{\mu/\rho}$.

En el programa utilizado (Sufdmod2) se determina el intervalo de muestreo en tiempo para asegurar la estabilidad, a través de la siguiente ecuación: (Apéndice V)

$$dt = \frac{h}{(2.0 * vmax)} \quad (2.23)$$

2.4.2 Consistencia de la solución

La consistencia del esquema está relacionado con la precisión con la que el operador diferencial discretizado se aproxima al operador diferencial que define a la ecuación diferencial en derivadas parciales (Hirsh, 1988). Se dice que un sistema es consistente,

$$D\phi - d_h\phi \rightarrow 0, \forall \phi \quad (2.24)$$

cuando Δt y Δx tiende a cero.

2.4.3 Condiciones de borde

En el modelado sísmico de la ecuación de onda hacia los bordes exteriores, se genera un conjunto de reflexiones que contaminan la solución a menos que se genere un mallado transparente o absorbente. Smith (1974) introduce un interesante método de eliminación de las reflexiones desde un borde artificial plano.

Este método consiste en asignar ciertas condiciones de borde especiales para un borde artificial. Mas de un plano de borde es requerido, mas soluciones son sumadas para eliminar las múltiples reflexiones. Por otro lado, si se dispone de memoria suficiente en el computador se podría expandir el mallado de tal manera que no afecte las dimensiones del modelo.

En este caso (Sufdmod2) se utilizaron dos diferentes condiciones de borde absorbente. La primera es la tradicional condición de borde absorbente creado por Hale, (1990); y la segunda está basada en capas perfectamente parejas (PML) creado por Berenger, (1995).

2.4.4 Dispersión Numérica

En los métodos de diferencias finitas existe un gran problema a la hora de variar la frecuencia, lo que causa cierta dispersión numérica. Es por ello que se requieren mallados muy finos que disminuyen estos problemas de dispersión, sin embargo el tiempo de cómputo se hace cada vez mayor.

Estos inconvenientes surgen debido a la limitación en la discretización y al tiempo de cómputo al modelar la ecuación diferencial. Las condiciones de dispersión dependen de igual manera del espaciamiento en x (Δx), la frecuencia máxima y la velocidad mínima involucrada en la propagación dentro del programa. En nuestro caso, la rutina Sufdmod2 determina la máxima frecuencia temporal para evitar la dispersión, mediante la siguiente ecuación: (Apéndice V)

$$f_{max} = \frac{v_{min}}{10.0 * h} \quad (2.25)$$

donde h es el mínimo intervalo de muestreo espacial $h = MIN (ABS (dx), ABS (dz))$

2.5 Metodología seguida para la construcción del modelo de Macal

2.5.1 Seismic Unix (SU)

Seismic Unix (SU) es un software desarrollado por Jack Cohen y John Stockwell de la Escuela de Minas de Colorado. Este paquete de programación se emplea principalmente por geofísicos de exploración en investigación sísmica y procesamiento de data. SU es un paquete público desarrollado para crear un ambiente de procesamiento sísmico en sistemas basados en Unix. La filosofía detrás de este paquete es una estructura de procesamiento gratis y un ambiente de desarrollo que pueda mantenerse y mejorarse de acuerdo con las necesidades del usuario. Además, el paquete permite el cambio de la data al formato SEG-Y de acuerdo con el protocolo industrial y provee un ambiente estándar para realizar pruebas de nuevos algoritmos de procesamiento. Es de fácil manejo, debido a que solo es necesario conocer comandos utilizados en Unix. Otra ventaja de SU es que permite al usuario escribir archivos con instrucciones ordinarios empleados en Unix para combinar la utilización de diferentes rutinas de dicho paquete (Cohen, 2001).

La mayoría de las rutinas del SU requieren como archivos de entrada uno que se encuentre en formato SEG-Y con trazas precedidas por un encabezado apropiado, lo que permite que los programas puedan leer la data de una forma consistente durante el procesamiento.

Entre las rutinas empleadas durante el desarrollo de este trabajo se encuentran *trimodel*, *tri2uni*, *unif2*, *triray*, *triseis*, *susynvxz*, *sufdmod2*, además de las rutinas que permitieron desplegar las imágenes tales como: *ximage*, *suximage*, *xmovie*, *suxmovie*, *xwigb*; el *sustrip* para eliminar los encabezados de las trazas; *smooth2* para suavizar los modelos de velocidades; *suop* para realizar operaciones matemáticas con las trazas; *sugain* para aplicar una ganancia a la imagen y obtener una mejor resolución de la misma.

2.5.2 Generación del modelo estructural

El modelo de Macal se construyó a partir de cuatro secciones sísmicas interpretadas, las cuales son representaban las estructuras cuya respuesta sísmica se deseaba modelar, como tres

escenarios debido a la incertidumbre de formaciones por debajo del Corrimiento de Pírital, en el pozo Macal 1X.

Seismic Unix presenta diferentes herramientas que permiten realizar estos modelos. En este caso se utilizó una rutina basada en la construcción a partir de triángulos por el método "Delaunay Triangulation".

2.5.3 Construcción de Modelos Triangulares

Existen dos caminos para la construcción de modelos triangulares. El primero es explícitamente para la entrada de las coordenadas de borde y la velocidad de la onda (actualmente valores de lentitud) con "Trimodel". El segundo, toma un ejemplo de modelo uniforme, y entonces se usa el "Uni2tri" para convertir el modelo uniforme en un modelo triangular. Entre los programas utilizados tenemos:

➤ **Trimodel:**

Esta rutina genera un perfil en dos dimensiones (2D), un modelo $1/V^2$ haciendo uso de las triangulaciones (Fig. 2.4b), lo que permite generar modelos estructuralmente complejos como este caso, permitiendo la existencia de áreas independientes dentro del modelo. Al principio se presentaron muchos inconvenientes con esta rutina, entre los cuales tenemos el solapamiento entre horizontes y los espacios en blancos que no permitieron la asignación de las propiedades en el modelo inicial. En la figura 2.4a se muestra parte de estos inconvenientes que se presentaron en principio con la utilización de la rutina sobre un modelo de velocidades sísmicas.

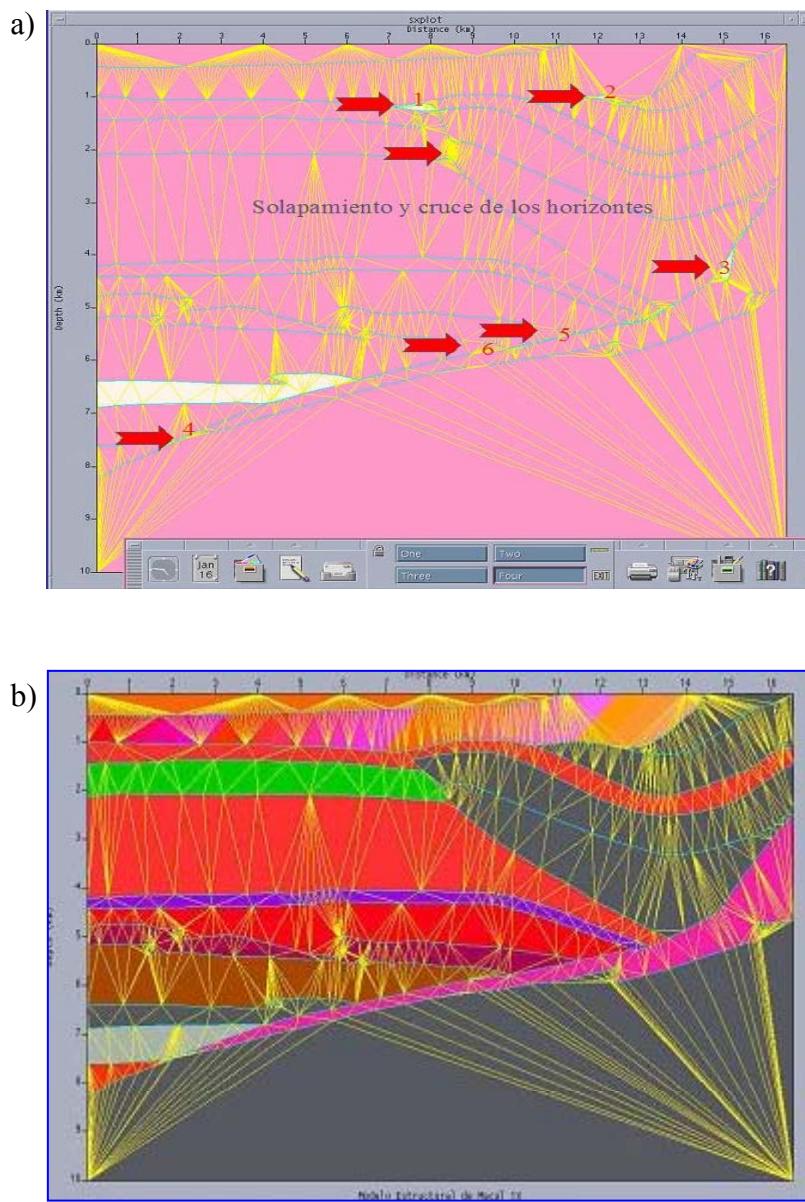


Fig. 2.4- Modelo generado con Trimodel, a)Solapamiento y cruce de los horizontes, b)Triangulaciones que permiten la construcción del modelo final

El programa pide los vértices y los correspondientes valores en el modelo, es decir, las coordenadas (x, z) para definir cada horizonte del modelo. Además de las coordenadas vertical y horizontal (x, z) máximas y mínimas, que permitan definir el área de estudio.

Entre los parámetros opcionales se encuentra el “sfill” que permite rellenar con valores de densidad y velocidad las regiones cerradas bordeadas por ejes definidos.

Sea (x, z) cualquier punto dentro de una región cerrada. El valor de “sfill” dentro de esta región está determinado por la siguiente ecuación:

$$s(x, z) = s00 + (x - x_0) * dsdx + (z - z_0) * dsdz \quad (2.26)$$

Un ejemplo de como debe escribirse este archivo se encuentra en los apéndices I, II, III.

Mediante esta rutina se generaron tres modelos geológicos de los escenarios propuestos del área correspondientes a los prospectos Macal A y B. Estos son: a) Escenario 1, Repetición de Querecual-Chimana –Cantil; b) Escenario 2, Secuencia Precretácica; c) Escenario 3, Secuencia Terciaria. Para ello, se realizó la digitalización de las imágenes de estos escenarios en Surfer, como se presenta en la figura 2.5.

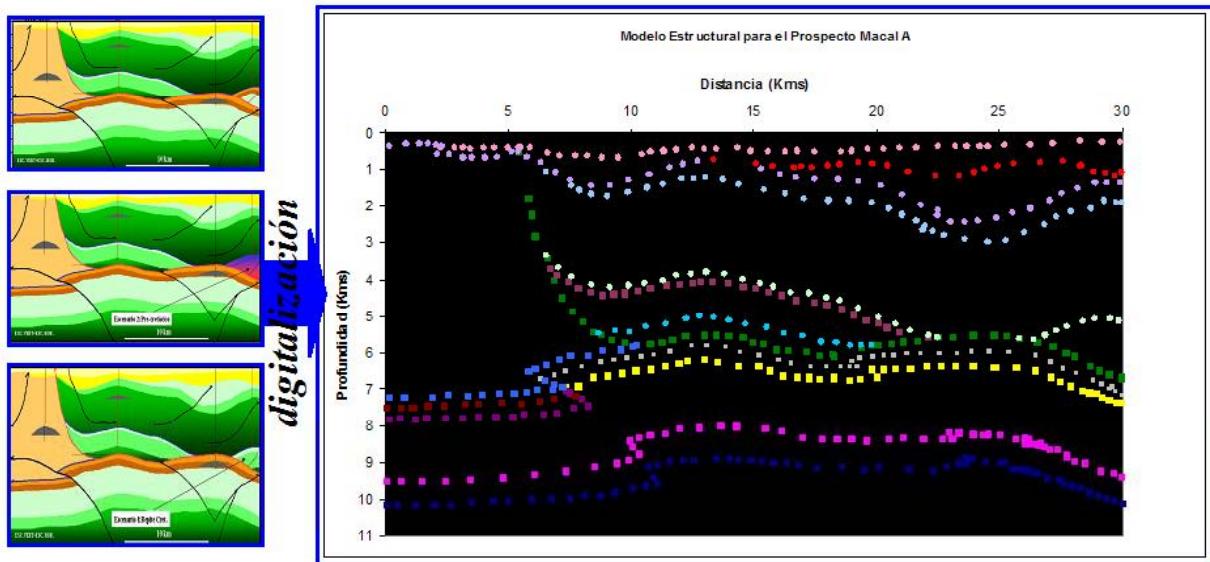


Fig. 2.5- Digitalización de los escenarios propuestos

Luego se introdujo en la rutina Trimodel la información correspondiente a los puntos de distancia y profundidad de cada horizonte de los escenarios propuestos, junto con la información de las velocidades interválicas de cada horizonte provenientes de la línea ET88A17V, para generar los modelos correspondientes a los tres escenarios antes mencionados. En la figura 2.6, se presentan los tres modelos generados con esta rutina, donde se destaca la complejidad estructural de esta área.

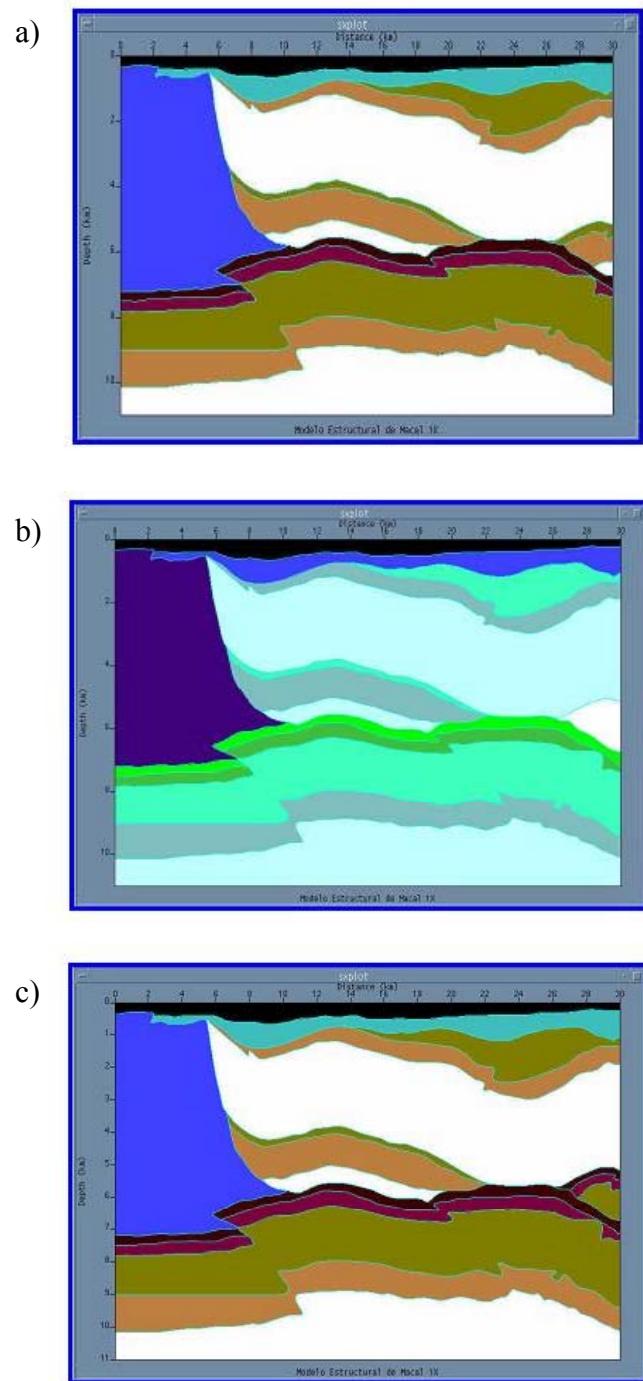


Fig. 2.6- Modelos estructurales de los modelos propuestos generados con la rutina Trimodel;
 a)Escenario 1: Repetición de Querecual-Chimana-Cantil, b)Escenario2: Secuencia Pre-
 cretácica, c)Escenario 3: Secuencia Terciaria

2.5.4 Conversión de mallados

Una vez generados los tres escenarios propuestos, se realizó la transformación de un modelo triangular a uno uniforme, debido a que las rutinas que permiten la construcción de los sismogramas sintéticos piden como modelos de entrada modelos uniformes. Esta transformación se realizó con la rutina *tri2uni*.

➤ **Tri2uni:**

El *tri2uni* permite obtener un modelo uniforme a partir de un modelo triangular. (Fig. 2.7)

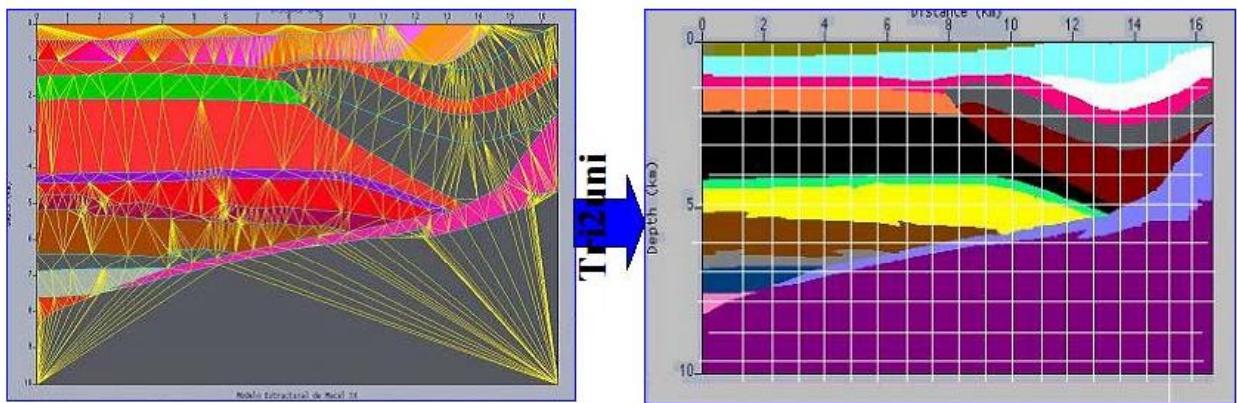


Fig. 2.7- Conversión de mallados triangulares a mallados uniformes

2.5.5 Suavizado del modelo de velocidades sísmicas

Una vez generados los modelos uniformes, se realizó el suavizado por mínimos cuadrados de estos modelos de velocidades sísmicas con la rutina *smooth2*, a fin de evitar las difracciones generadas por el operador en diferencias finitas, como consecuencia de la discretización rectangular utilizada durante el modelado sísmico, que no nos permite tener una visión clara de la respuesta sísmica en las secciones sintéticas (Figura 2.8). Este suavizado no deteriora los rasgos estructurales del modelo geológico original, de ahí que se preserven en los datos sintéticos la totalidad de los eventos sísmicos.

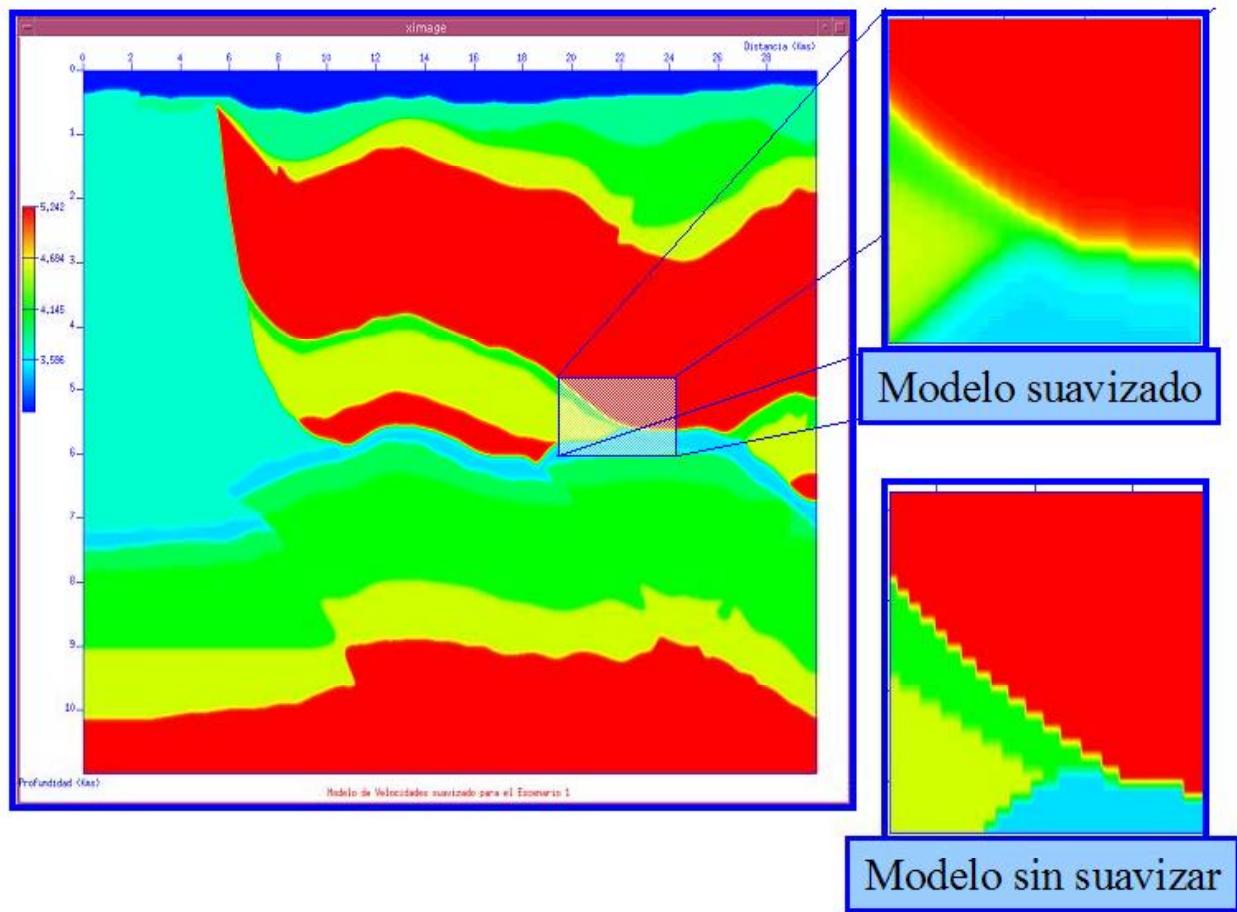


Fig. 2.8- Modelo de velocidades correspondiente al escenario 1, donde se observa el efecto de la discretización rectangular y el suavizado del modelo.

2.6 Datos sísmicos sintéticos en medios triangulares

Varios programas toman modelos triangulares para crear trazado de rayos, o sismogramas sintéticos basados en trazado de rayos. Entre estos se tienen:

- **Triseis:** esta rutina genera sismogramas sintéticos para modelos triangulares.

Los parámetros requeridos por el Triseis son la posición de la fuente (x, z), el reflector a iluminar, el intervalo de muestreo en tiempo y el número de muestras en tiempo (dt y nt respectivamente), número de trazas y separación entre las mismas (ns y ds respectivamente). Además del ángulo de entrada y salida de los rayos.

Sólo los rayos que terminan con el registro indicado (*Krecord*) podrían contribuir para la generación de los sismogramas sintéticos en la localización de los receptores (xg, zg). La localización de las fuentes y receptores, por su parte, se determinan por la interpolación de una línea cónica de coordenadas específicas (xs, zs) y (xg, zg). Por defecto, el incremento en la localización de la fuente (ds) se determina por el espaciamiento de la fuente en superficie definida por (xs, zs). De la misma forma ocurre con el incremento en la localización de los receptores (dg).

Sin embargo, no se pudo generar secciones de cero offset del modelo completo, debido a que para cada horizonte se requieren parámetros distintos y el número de trazas es diferente para cada horizonte, por lo cual, no se pudo realizar la suma o agrupación de las trazas centrales de cero offset (Fig.2.9)

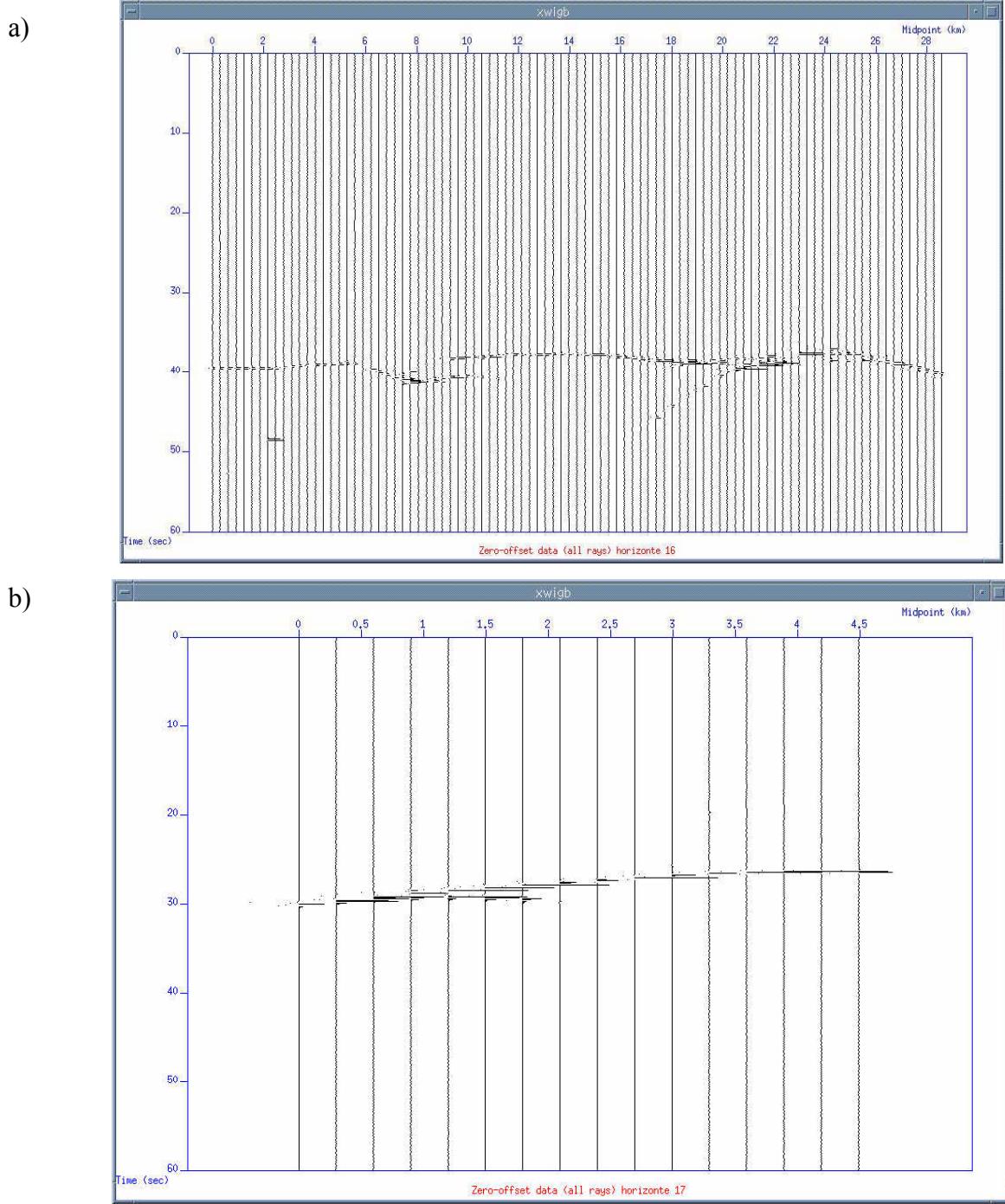


Fig. 2.9- Secciones de Cero offset. a)Tope San Juan-San Antonio-Querecual; b)Tope de la cuña.

2.6.1 Generadores de datos sintéticos

➤ **Sufdmod2:** Modelado de la ecuación de onda acústica por diferencias finitas de segundo orden.

$$\frac{1}{c(x, z)^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = \left[\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} \right] + SrC(t) \quad (2.27)$$

El archivo de entrada en esta rutina es el modelo de velocidades en formato binario generado con *Trimodel*, pero convertido a un modelo uniforme mediante la rutina *Tri2uni*. Es un arreglo bidimensional que contiene los valores de densidad (ρ) y Velocidad de onda P(Vp) para cada punto de la malla discreta sobre la cual se desarrollan las diferencias finitas. Un medio *isótropico* de N capas se define especificando los valores de Vp en cada punto. Tiene como parámetros requeridos el número de muestras en la primera y segunda dimensión (x y z respectivamente), posición de la fuente (x, z) y el tiempo máximo.

La fuente que usa la rutina es una fuente puntual de presión, es decir, es una fuente que produce sólo fuerzas compresionales.

Entre los parámetros opcionales se encuentran: el intervalo de muestreo en x , en z y en tiempo (dx , dz y dt). Este último se escoge tomando en cuenta las condiciones de estabilidad y dispersión numérica del código; la frecuencia máxima se selecciona de tal manera de evitar la dispersión numérica, ya que se sabe que a medida que se aumenta la frecuencia los operadores de diferencias finitas se hacen inexactos; coordenada x de la línea vertical del sismograma y coordenada z de la línea horizontal del sismograma (vsx y hsz), los archivos de salida bien sea para la línea vertical u horizontal del sismograma y el punto de tiro o fuente ($vsfile$, $hsfile$ y $ssfile$ respectivamente).

Además se encuentran los parámetros PML, que corresponden a los parámetros de absorción y el ancho del área de absorción (pml_max y pml_thick respectivamente), que permiten que se olviden los problemas de borde.

El archivo de ondícula es un archivo en formato *binario* que contiene los valores en tiempo de la amplitud (forma de onda) del disparo que se utiliza en la simulación. Se genera internamente en la rutina Sufdmod2. Esta ondícula corresponde a la de Ricker de fase cero, que corresponde a la segunda derivada de la ondícula Ricker. El dt coincide con el escogido en los parámetros de modelado. En la figura 2.10 se observan las ondículas de Ricker utilizadas para la generación de los sintéticos.

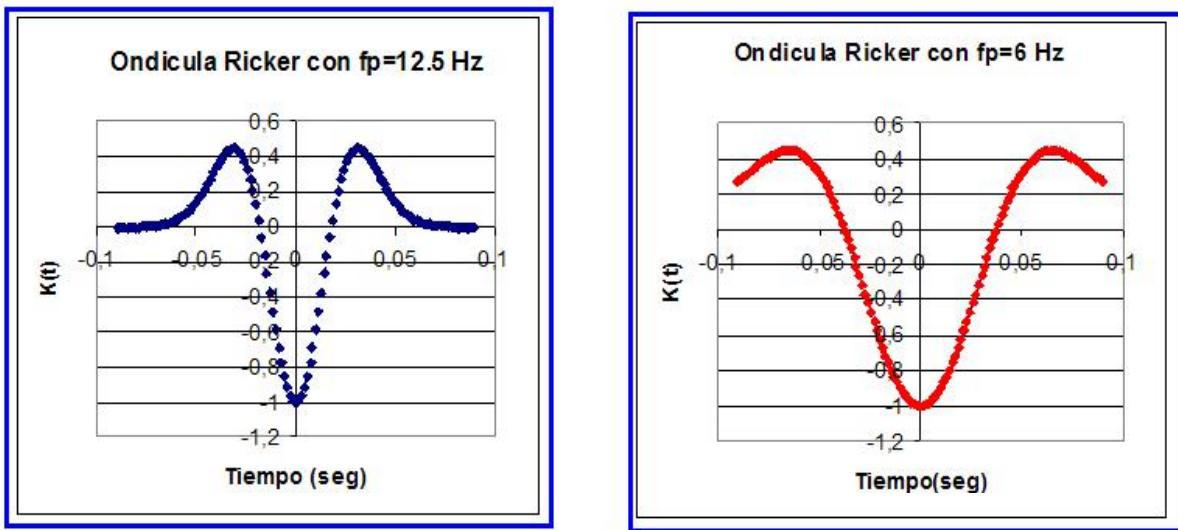


Fig. 2.10- Ondículas de Ricker utilizadas para generar a) VSP y Shot Gather, y b) las Secciones de cero offset

Para la generación de las secciones sintéticas se creó un programa en lenguaje Fortran (Apéndice IV), que produjera a partir de la rutina sufmod2, la traza de cero offset para las diversas posiciones de la fuente. Una vez generadas, las trazas se agruparon para obtener la sección de cero offset para los tres escenarios. De la misma manera, se generaron los archivos para los Shot Gathers y los perfiles sísmicos verticales (VSP).

2.6.2 Simulación de Secciones de Cero Offset

Las secciones de cero offset sintéticas se crearon a partir de datos de cero offset, donde existe una fuente única, y coinciden las ubicaciones de fuente y receptor. Esto fue posible debido a que entre las opciones de secciones sintéticas a generarse en la rutina se encuentra la de la traza de

cero offset, generando una traza por corrida. Se generaron trazas de cero offset cada 25 m, partiendo de una ubicación de fuente de 10 km en el modelo, es decir se generaron 800 trazas de cero offset para cada uno de los modelos mediante un programa elaborado en Fortran que genera a partir de la rutina *sufdmod2* las trazas centrales de cero offset, las cuales se agruparon para obtener las secciones de cero offset para cada escenario antes propuesto.

Las secciones de cero offset generadas con la rutina *sufdmof2* poseen los mismos parámetros para los tres escenarios propuestos, pero una frecuencia máxima de 6 Hz, debido a que emplea mucho tiempo de cómputo para cada escenario.

Los parámetros usados para la generación de los modelos son los mismos para los tres escenarios, como se observa en las figuras 2.11, 2.12, 2.13. Con un número de muestras en la primera dimensión (x) igual a 1200 y un número de muestras en la segunda dimensión (z) de 440. Los escenarios 1 y 3 conservan los mismos parámetros, sin embargo el escenario 2 difiere sólo en el número de muestras en tiempo (nt) y el intervalo de muestreo en tiempo (dt). Esto ocurre debido al desconocimiento de las velocidades en el Pre-Cretácico, por lo que se colocó una velocidad un poco mayor a la de Barranquín. A continuación se presentan los resultados que se obtienen luego de aplicar la rutina *Sufdmod2* sobre los modelos de velocidades.

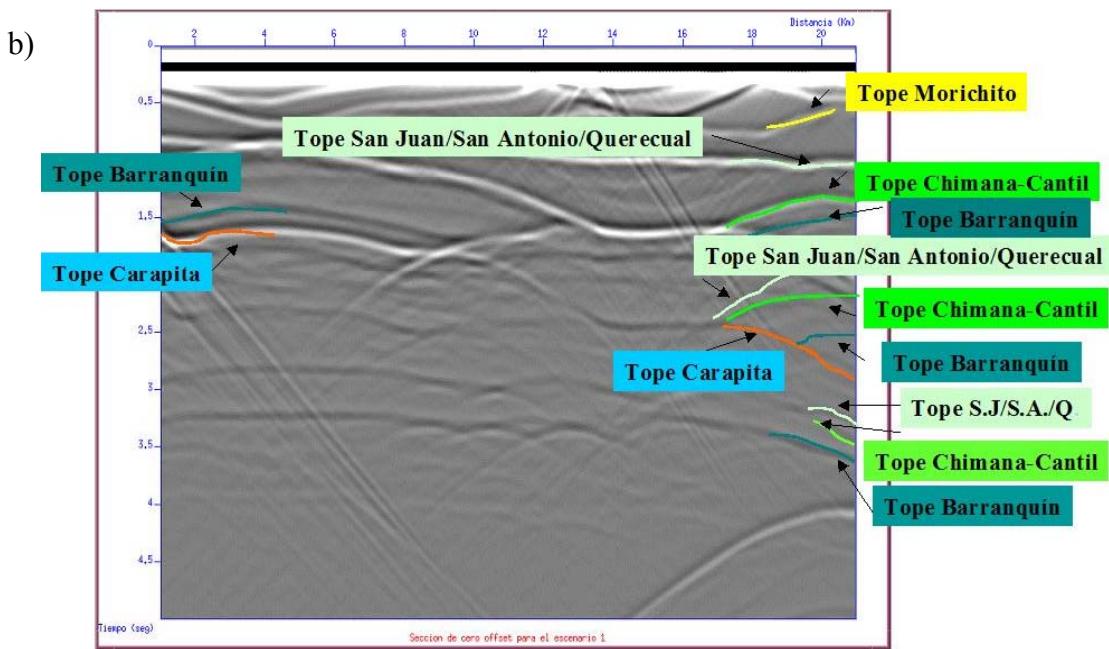
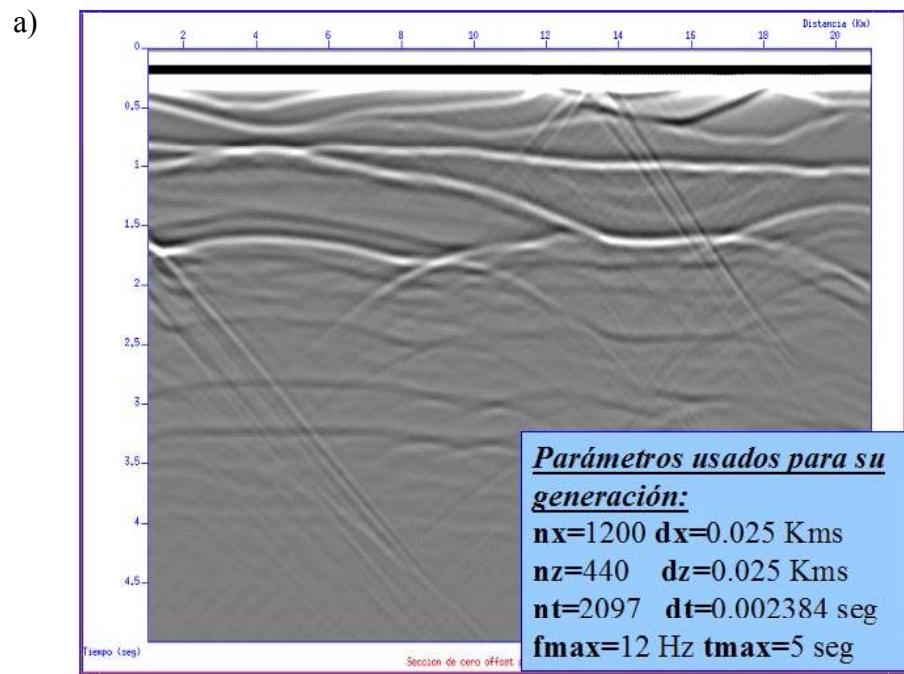
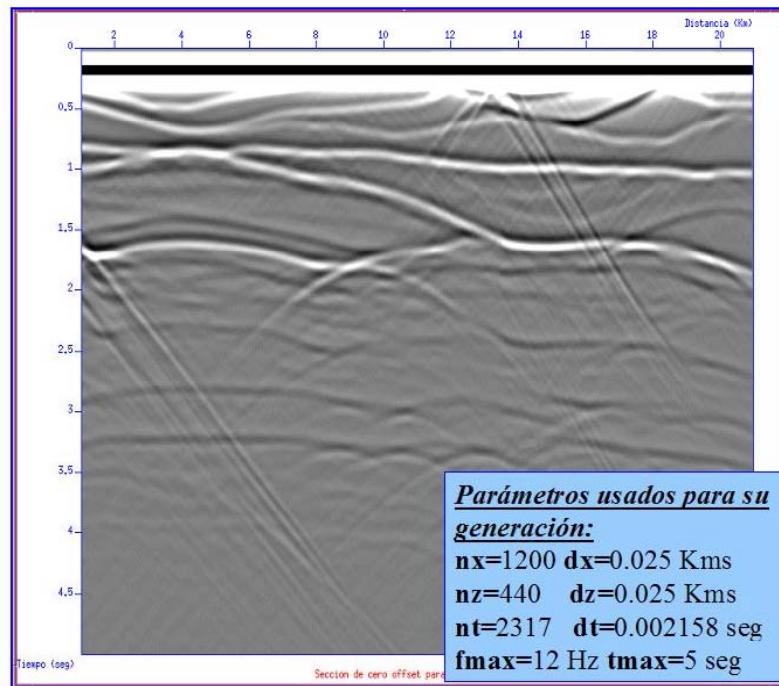


Fig. 2.11- Secciones de Cero Offset para el Escenario 1: Repetición de Querecual-Chimana-Cantil; a) Parámetros utilizados para la generación de la sección de cero offset, b) Identificación de los topes de las formacionales en la sección de cero offset.

a)



b)

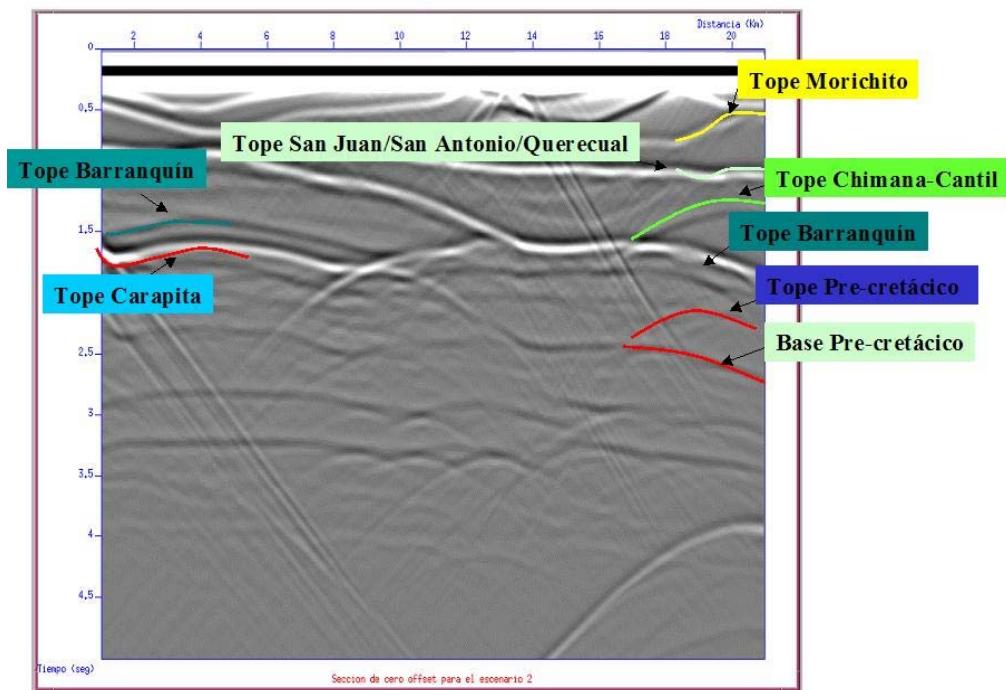
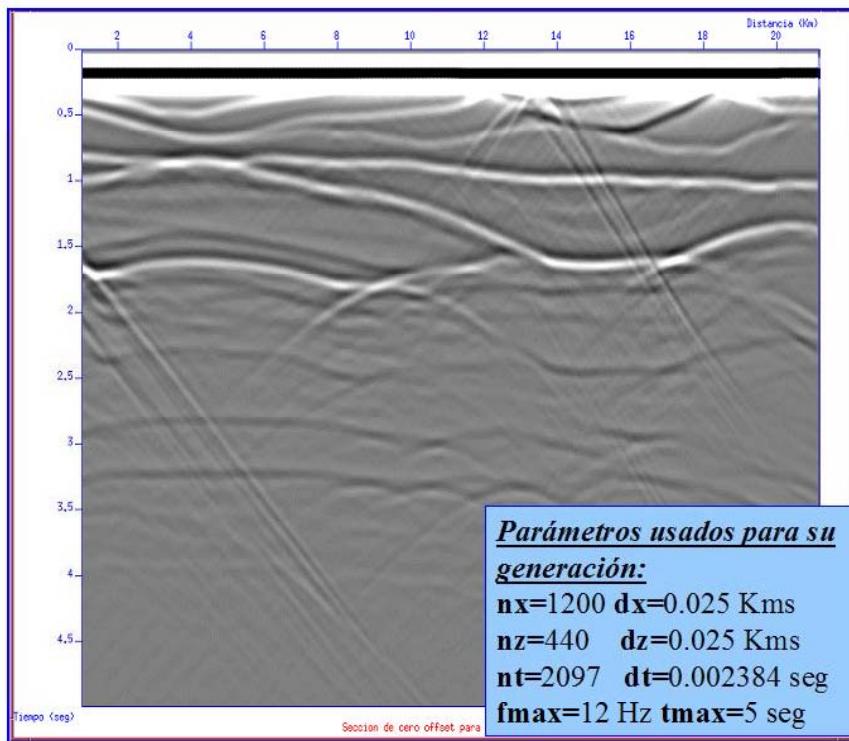


Fig. 2.12- Secciones de Cero Offset para el Escenario 2: Secuencia Pre-cretáctica; a) Parámetros utilizados para la generación de la sección de cero offset, b) Identificación de los topes de las formacionales en la sección de cero offset.

a)



b)

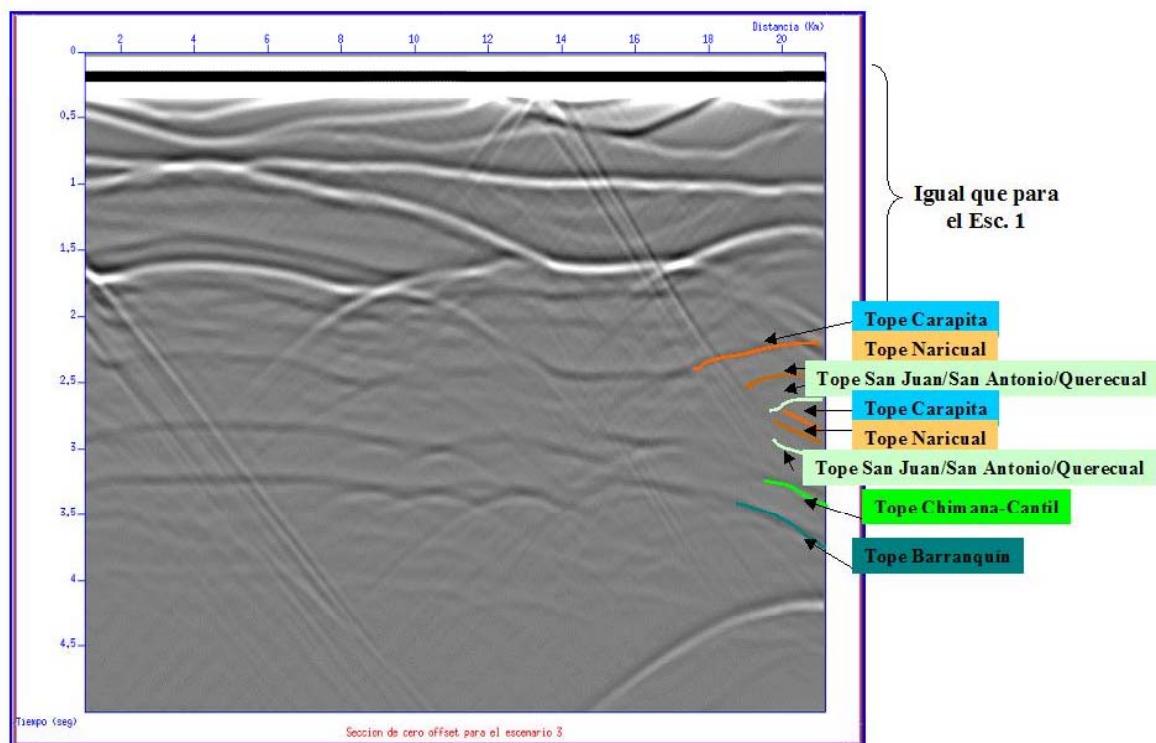


Fig. 2.13- Secciones de Cero Offset para el Escenario 3: Secuencia Terciaria; a) Parámetros utilizados para la generación de la sección de cero offset, b) Identificación de los topes de las formacionales en la sección de cero offset.

En las secciones de cero offset de las figuras 2.12, 2.13 se pudieron identificar claramente los topes formacionales para los escenarios 2 y 3, a diferencia del escenario 1 (Fig. 2.11) donde no se identificó el tope de Naricual, debido a los bajos contrastes de impedancia en el área de la cuña.

2.6.3 Simulación de Perfiles Sísmicos Verticales (VSP)

Otros sismogramas sintéticos generados con esta rutina son los perfiles sísmicos verticales (VSP) sintéticos, estos se basan en el mismo principio que el perfil sísmico vertical (VSP) real. Sin embargo, existen algunas simplificaciones tales como las referidas a la adquisición, como por ejemplo el hecho de que sólo se ejecuta un sólo disparo para todos los niveles de geófonos ó que el espaciamiento entre geófonos resulta ser mucho menor, que deben considerarse a la hora de simular. En los VSP simulados en este estudio se consideraron pozos de longitud igual a la profundidad total de los modelos, es decir 11 km.

El factor que permite distinguir entre la técnica de los perfiles sísmicos verticales (VSP) reales y otros métodos sísmicos de superficie, es que en estos se utilizan fuentes en superficie y receptores dentro de un pozo perforado y registran cada campo de onda ascendente y descendente. La fuerte y constante fuente está disponible para su uso sobre o cerca de la superficie, y el pozo proporciona un ambiente relativamente libre de ruido para el registro de los VSP.

En los estudios de VSP reales se utilizan fuentes en superficie (o cerca de la superficie) y los receptores se colocan en pozos dentro del subsuelo. Dependiendo de la alineación relativa de la fuente y la configuración de los receptores, los VSPs podrían en general clasificarse como VSP de offset cercano u offset lejano. En la Figura 2.14 se ilustra un poco mas acerca de la configuración mas frecuente de los estudios de VSP.

El término de VSP offset cercano o VSP cero offset (Cassell, 1984) se refiere a la configuración geométrica donde la localización de la fuente y los receptores están verticalmente alineados. La configuración de offset cercano se ilustra en la parte A de la figura 2.14. Los VSPs de offset cercano se usan típicamente como vínculos de la data sísmica en superficie con la geología

subterránea y para distinguir las reflexiones primarias de la superficie generada, y los múltiples. De manera similar la rutina sufmod2 genera los VSP.

Un VSP sintético es mucho más fácil y barato que un VSP real y puede utilizarse para correlacionar reflectores provenientes de la sísmica de superficie, si se tiene un claro conocimiento del modelo geológico y estructural del área de estudio (Rojas, 2001).

Una de las ventajas de los VSP es que al modelar se pueden separar las componentes de los campos de onda para su análisis detallado, en todas sus direcciones. Incluso se puede separar el campo de onda que se propaga hacia arriba y hacia abajo, lo que facilita la interpretación.

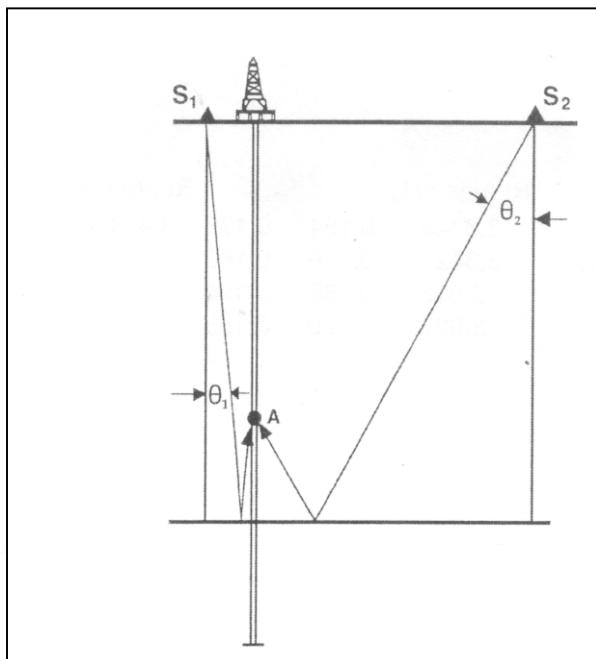


Fig. 2.14- Campo de estudio para los diseños de VSP. La fuente en superficie S1 está localizada en incidencia cero con respecto al geófono localizado en el pozo.

En total se modelaron tres VSP cero offset por cada escenario con la rutina Sufmod2, los cuales se dispararon sobre el área donde existe incertidumbre acerca de la secuencia estratigráfica presente, ubicada en el extremo derecho de los modelos; específicamente se colocaron pozos en 27, 28 y 29 Km, desde donde se dispararon.

En las Figuras 2.15, 2.16, 2.17 se presentan los resultados de la simulación de los perfiles sísmicos verticales (VSP) hecha sobre cada modelo de velocidades de los escenarios antes propuestos. En estos casos la discretización se realizó cada 15 m. La ondícula de Ricker utilizada posee una frecuencia dominante de 12.5 Hz. La geometría de adquisición consistió de 733 geófonos espaciados cada 15 m a lo largo del modelo.

La interpretación de los eventos sísmicos permitió verificar la factibilidad de cada uno de los modelos. En general se observaron la totalidad de los topes formacionales presentes en los modelos geológicos correspondientes a los tres escenarios como se observa en las figuras 2.15, 2.16, 2.17, por lo que no se pudo llegar a una conclusión acerca de cual escenario es el más probable, en términos de observación de los topes.

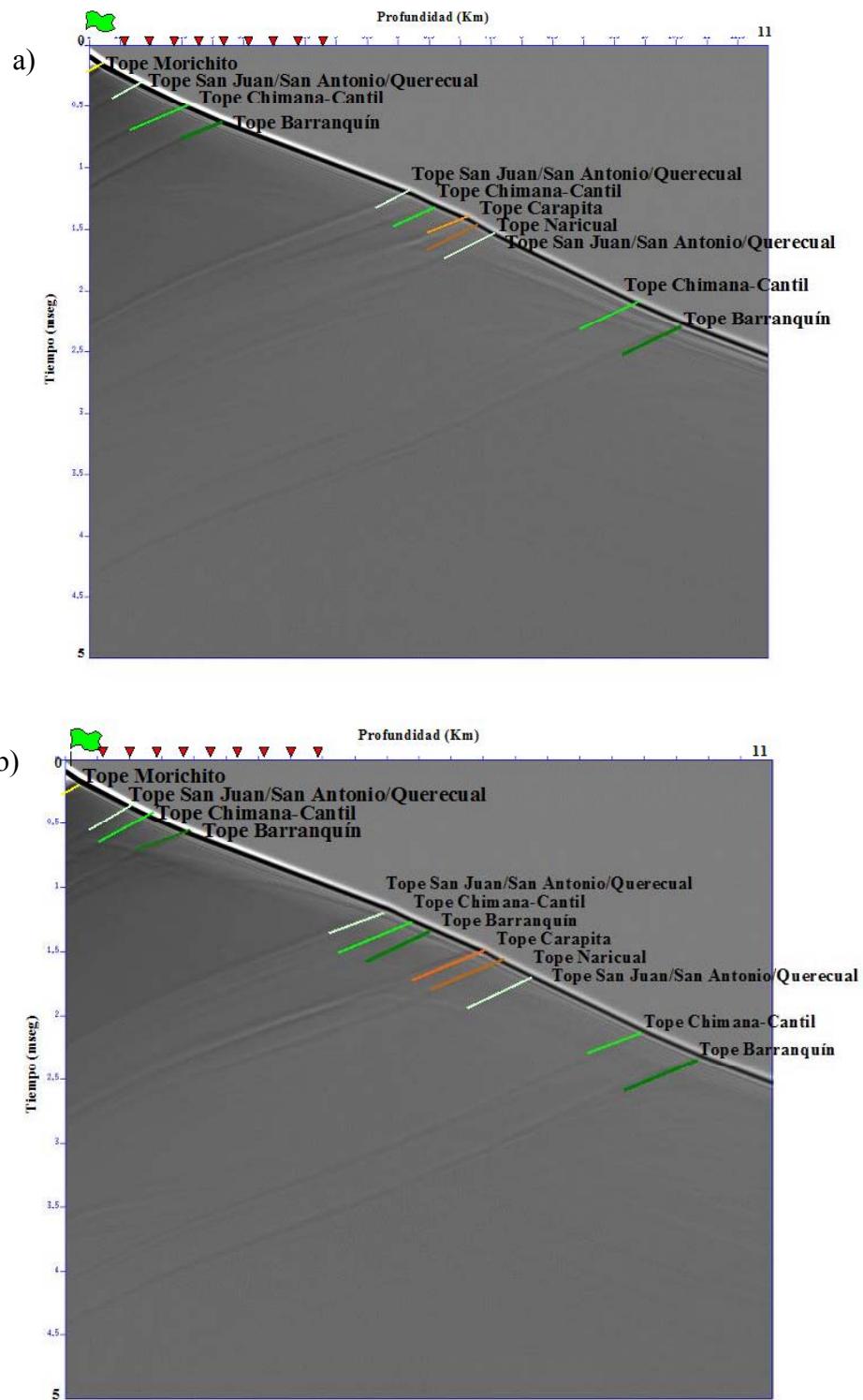


Fig. 2.15- Modelado de un VSP sobre el Escenario 1: Repetición de Querecual-Chimana-Cantil con fuente en a) 28 Km, y b) 29Km.

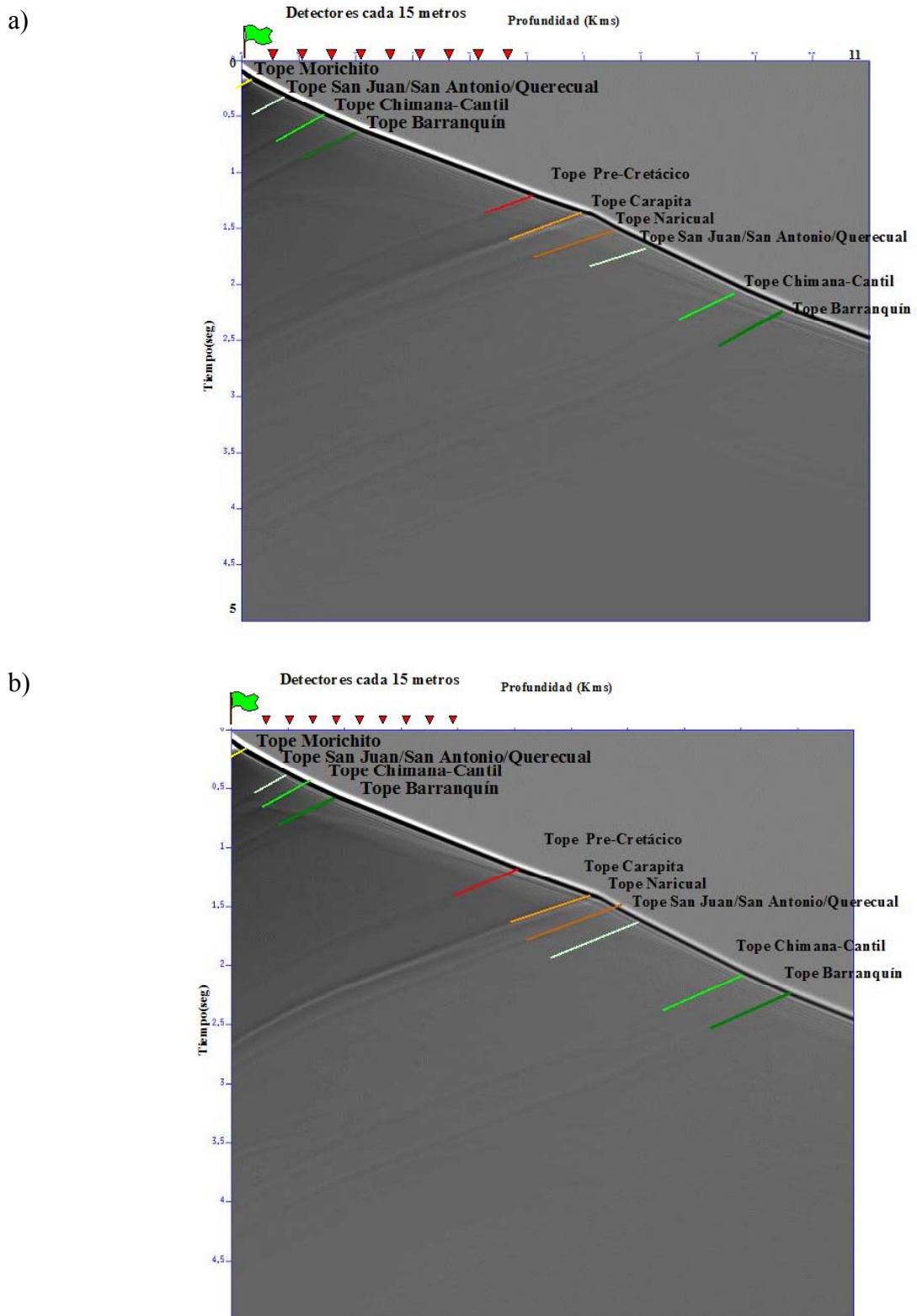


Fig. 2.16- Modelado de un VSP sobre el Escenario2: Secuencia Pre-cretácica con fuente en a) 28 Km, y b) 29Km.

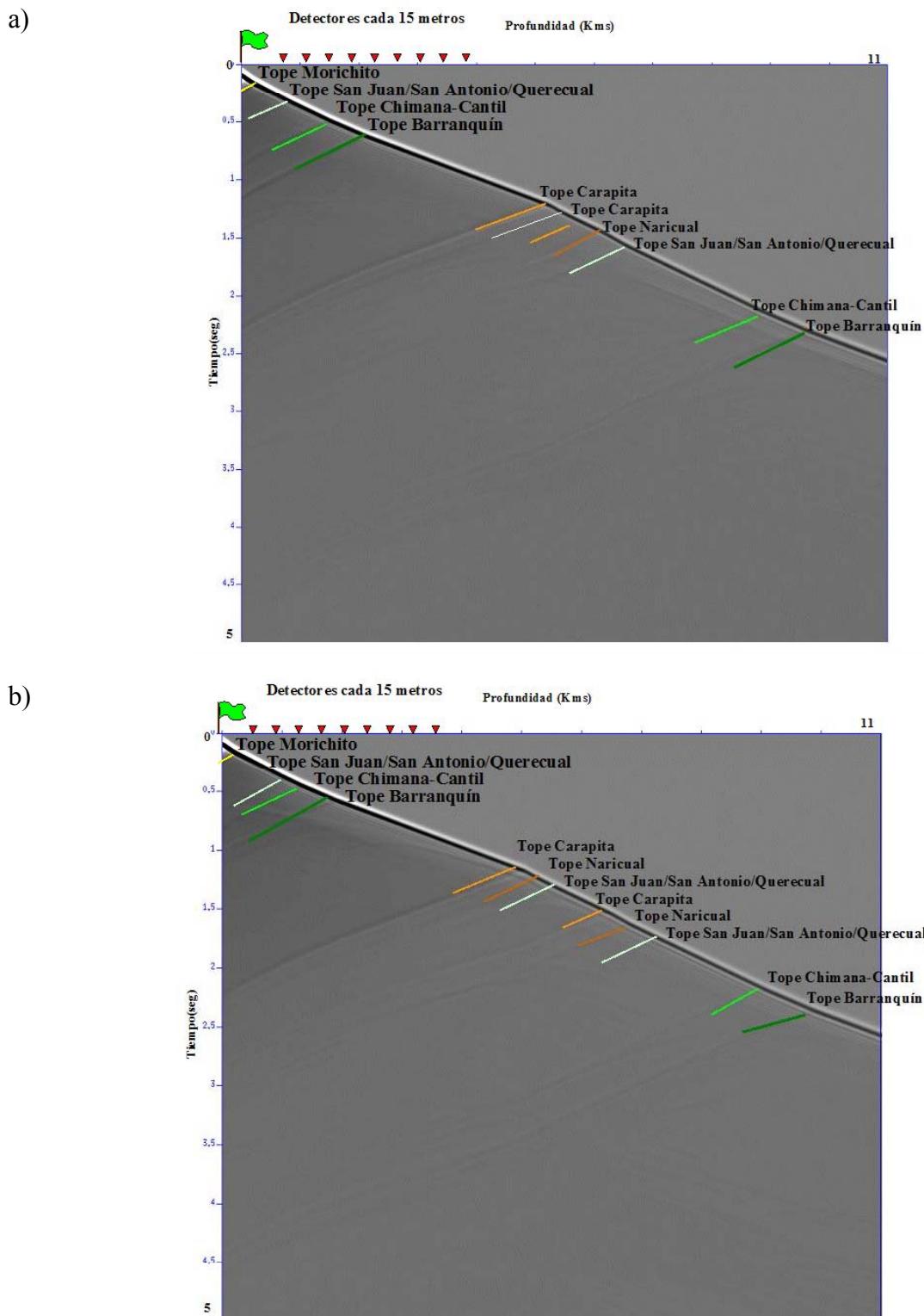


Fig. 2.17- Modelado de un VSP sobre el Escenario 3: Secuencia Terciaria con fuente en a) 28 Km, y b) 29Km.

Una vez obtenidos los perfiles sísmicos verticales (VSP) para cada modelo de velocidades de los tres escenarios, se elaboraron curvas t-z para cada uno de ellos donde se realizó la comparación entre la sísmica real y la obtenida a partir de esta herramienta. En la figura 2.18 donde se comparan los tiempos de viaje de la onda, especificando sólo para los VSP con fuente en 29 Km donde se observa con mayor claridad cada uno de los topes geológicos del área en estudio. A los tiempos de viaje se le corrigieron los retrasos en tiempo que poseía la ondícula de Ricker de entrada.

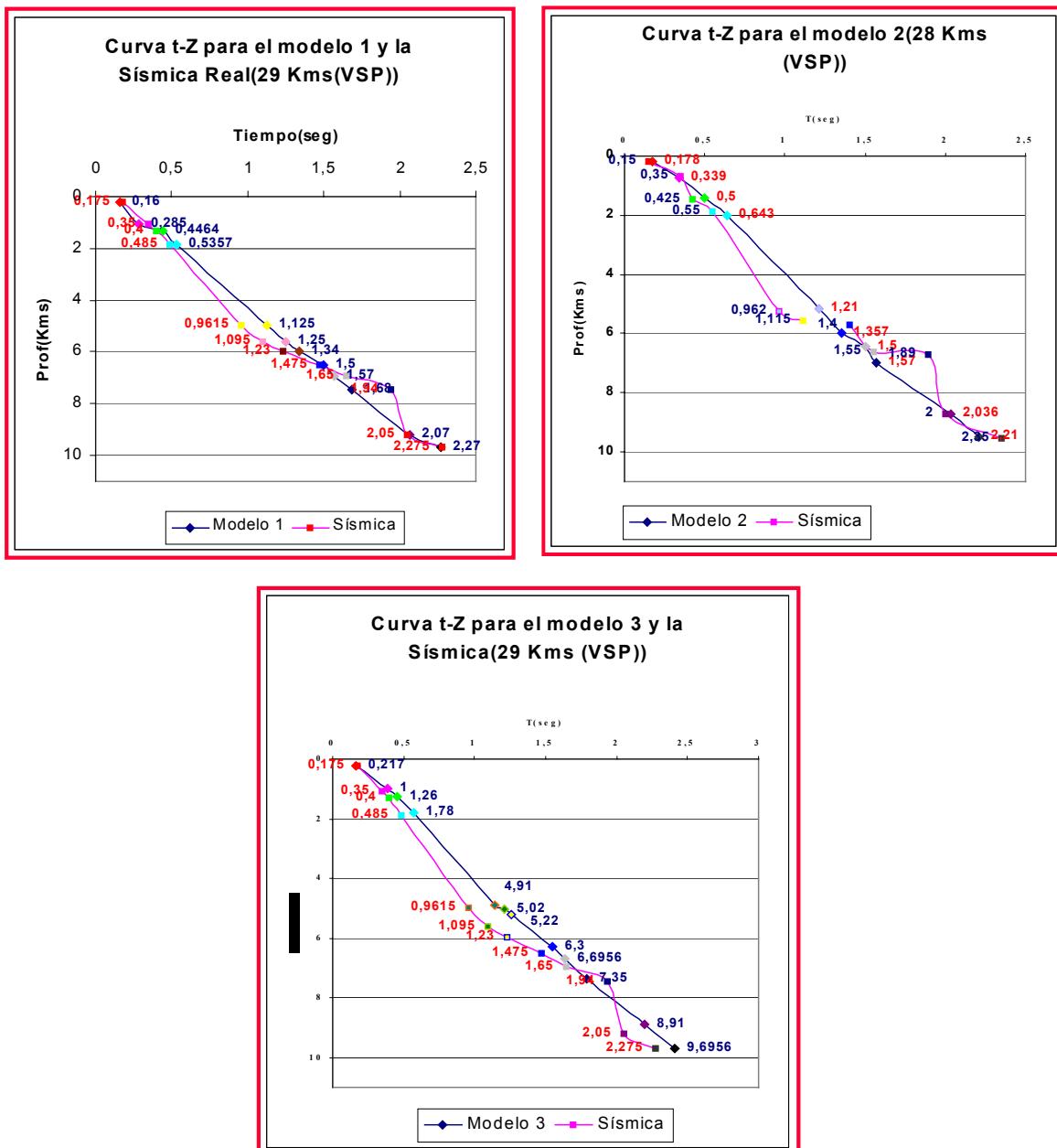


Fig. 2.18- Comparación de la sísmica real con la información obtenida de los VSP con respecto a los tiempos de viaje, para cada modelo de velocidades propuestos

Al analizar este conjunto de curvas se puede señalar que la información que mejor se ajusta a la data real correspondería para el caso de los VSP al escenario 1, debido a que presenta menores diferencias en términos de los tiempos de viaje con los datos de la sísmica real. Esta conclusión parcial a la que se ha llegado puede observarse con mayor claridad al realizar un estudio estadístico de la diferencia en tiempos de la sísmica real y la información obtenida de los perfiles sísmicos verticales, como se observa en las figuras 2.19 y 2.20.

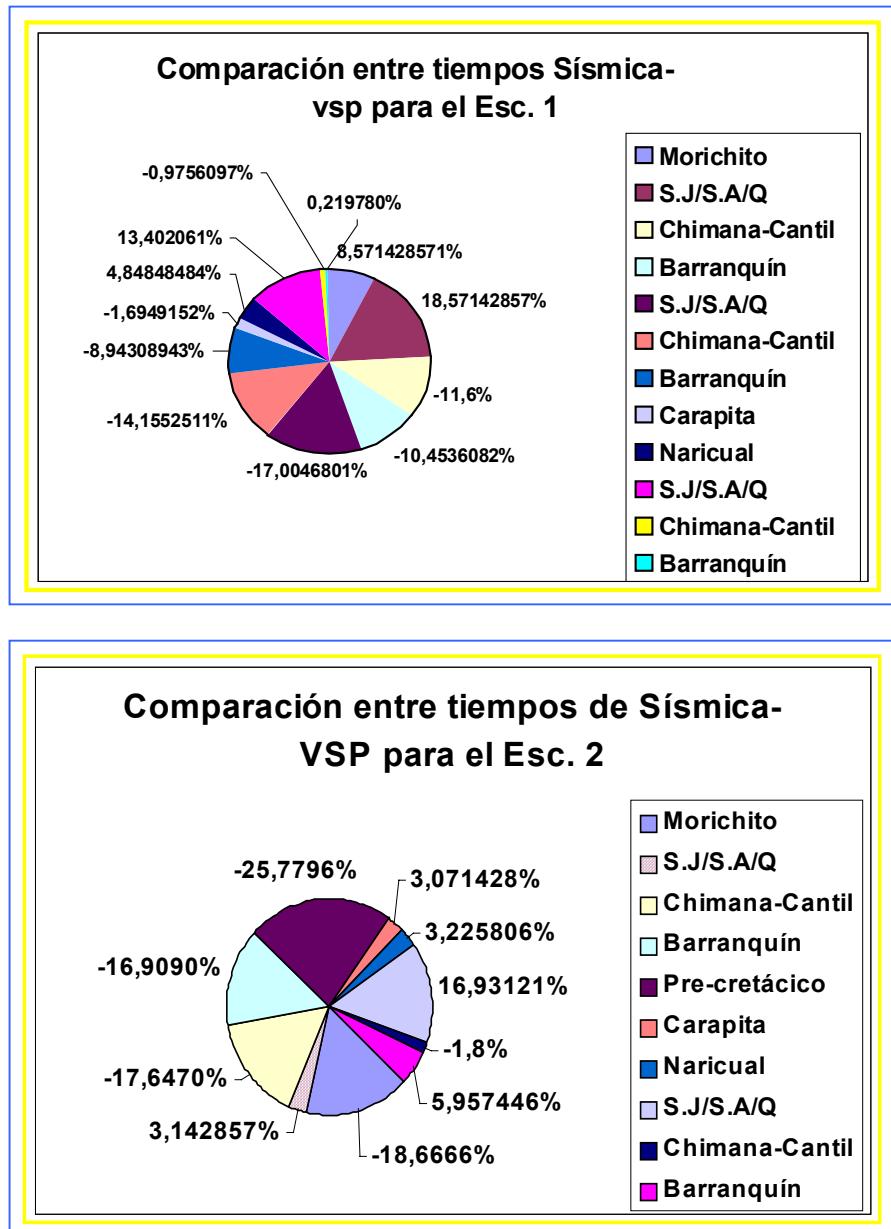


Fig. 2.19- Diferencia entre los tiempos de viaje de la sísmica real y la información obtenida de los VSP para a) el escenario 1, repetición de Querecual-Chimana-Cantil, b) escenario 2, Secuencia Precretáctica.

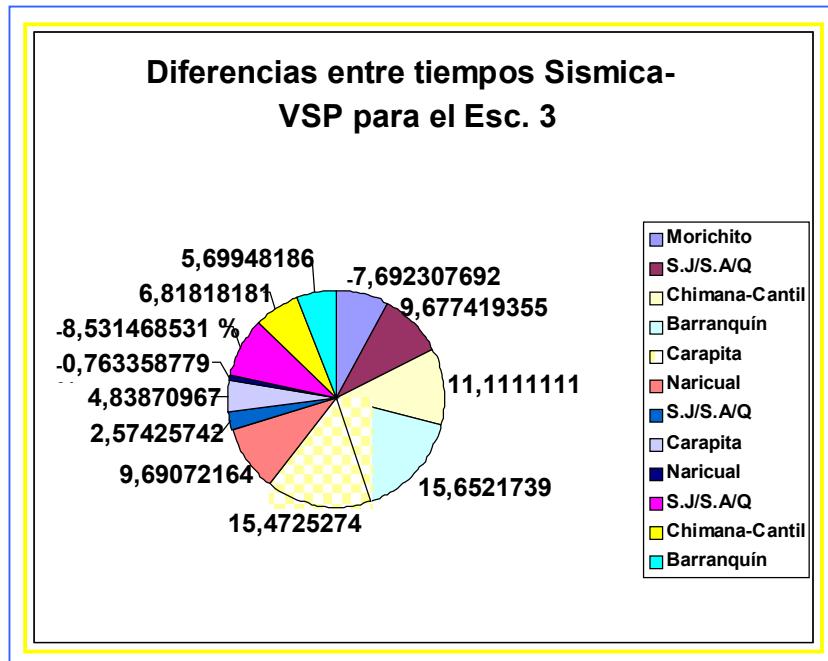


Fig. 2.20- Diferencia entre los tiempos de viaje de la sísmica real y la información obtenida de los VSP para el escenario 3, Secuencia Terciaria.

2.6.4 Simulación de Componentes Verticales del Sismograma (“Shot Gathers”)

Uno de los productos de los levantamientos sísmicos de reflexión es un Shot Gathers, el cual resulta ser una sección sísmica proveniente de combinar trazas de sismogramas que poseen una fuente común. En este tipo de sección se observa el patrón hiperbólico de las curvas reflejadas, donde las múltiples hipérbolas existentes indican los pulsos de ondas reflejados a partir de una sucesión de bordes de capas (Robinson y Coruh, 1988).

Los Shot Gathers Sintéticos se simularon tomando múltiples geófonos en una línea, ubicados para recibir las ondas producidas por una fuente, que en este caso fue una fuente impulsiva de onda compresional. En total se modelaron 20 secciones de este tipo para cada escenario, es decir se dispararon cada kilómetro a partir de los 10 km de distancia del modelo; aun cuando las secciones de interés corresponden a las ubicaciones de fuente de 27, 28 y 29 km.

A continuación se observan los resultados de los disparos simulados para cada escenario (Fig. 2.21, 2.22, 2.23). Se observa la ubicación de los receptores, los cuales se encuentran espaciados

cada 20 m. En total se simuló la presencia de alrededor de 1999 receptores ubicados a cada lado de la fuente, con un offset mínimo de 0 m y un offset máximo de 20 km. Se empleó una ondícula de Ricker con un contenido de frecuencia dominante de 12.5 Hz.

Al igual que en el caso de los VSP, la interpretación de los eventos sísmicos permitió verificar la factibilidad de cada uno de los modelos. Sin embargo, el análisis en este tipo de registro resulta ser un poco más complicado, produciendo resultados de baja confiabilidad, pues para la identificación de los topes deben tomarse en cuenta los tiempos de incidencia normal, los cuales no son fácilmente identificables. Asimismo, las imágenes visualizadas no constituyen una ayuda para esta identificación, observándose reflexiones bastante débiles. Sin embargo es de hacer notar que a estas visualizaciones se les aplicó una función de ganancia de tal forma que los resultados obtenidos son los mejores posibles.

Considerando estas limitaciones se derivaron los análisis de los “Shot Gathers”. A diferencia de las secciones de cero offset y los VSP no se observaron los topes formacionales en su totalidad. Para el escenario 1 en la sección disparada con una fuente ubicada en 27 km, no se observaron los topes correspondientes a las formaciones Chimana-Cantil 2 y Barranquín 2. En las secciones disparadas con fuentes a 28 y 29 Km no se observaron los topes de Barranquín2, Carapita y Naricual.

En el caso del Escenario 2 se observaron la mayoría de los topes para las tres secciones disparadas (27, 28 y 29 Km), incluso los presentes en la cuña, a excepción del tope de las formaciones San Juan/San Antonio/Querecual, las cuales se encuentran agrupadas como una única unidad estratigráfica. En el caso del Escenario 3 en las secciones disparadas con fuentes ubicadas en 27 y 29 Km no se observó el tope correspondiente a la formación Naricual 1. En las secciones disparadas con una fuentes a 28 Km no se observaron los topes de Naricual 1, San Juan/San Antonio/Querecual 2 y 3.

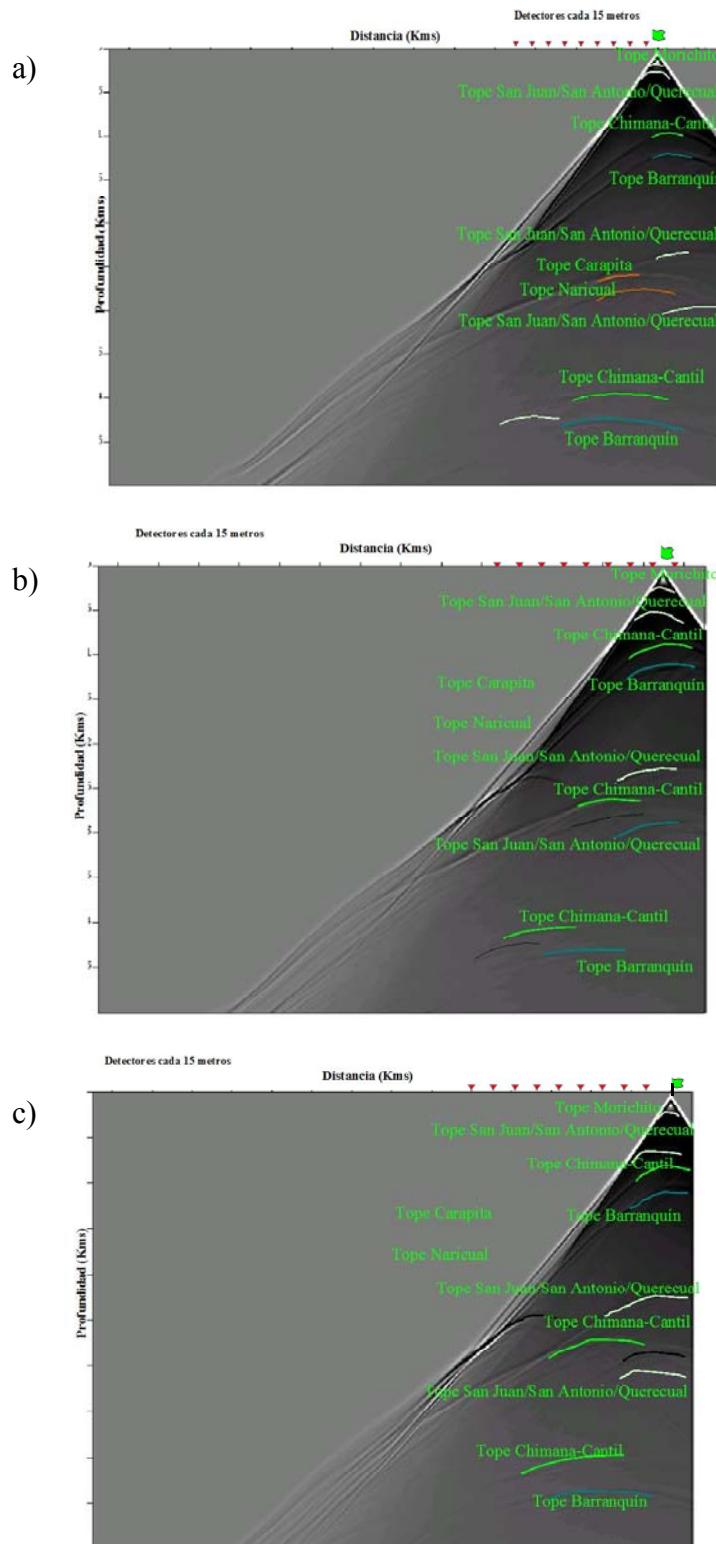


Fig. 2.21- Modelado de Shot Gathers sobre el Escenario 1: Repetición de Querecual-Chimana-Cantil con fuente en a) 27 Km, y b) 28Km, y c)29Km.

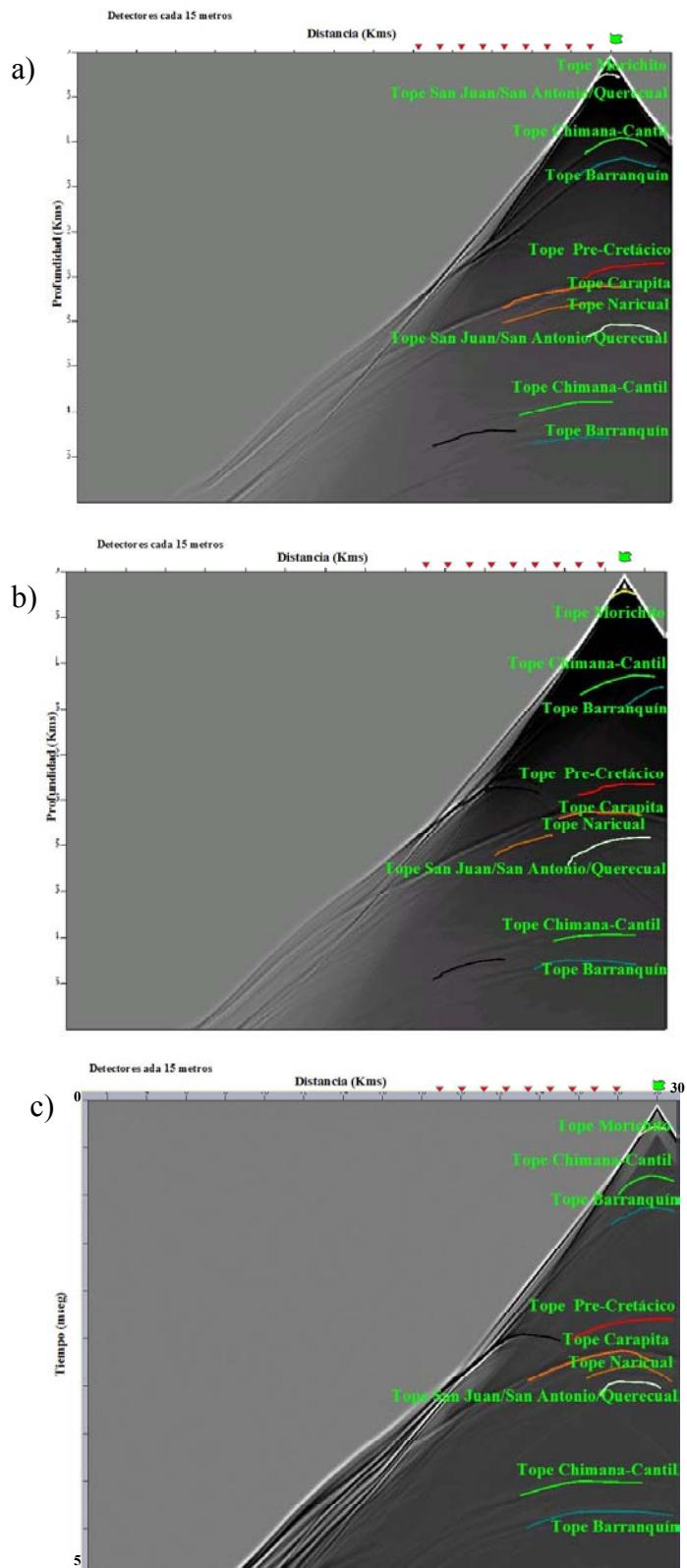


Fig. 2.22- Modelado de Shot Gathers sobre el Escenario 2: Secuencia Pre-cretácea con fuente en
a) 27 Km, y b) 28Km, y c)29Km.

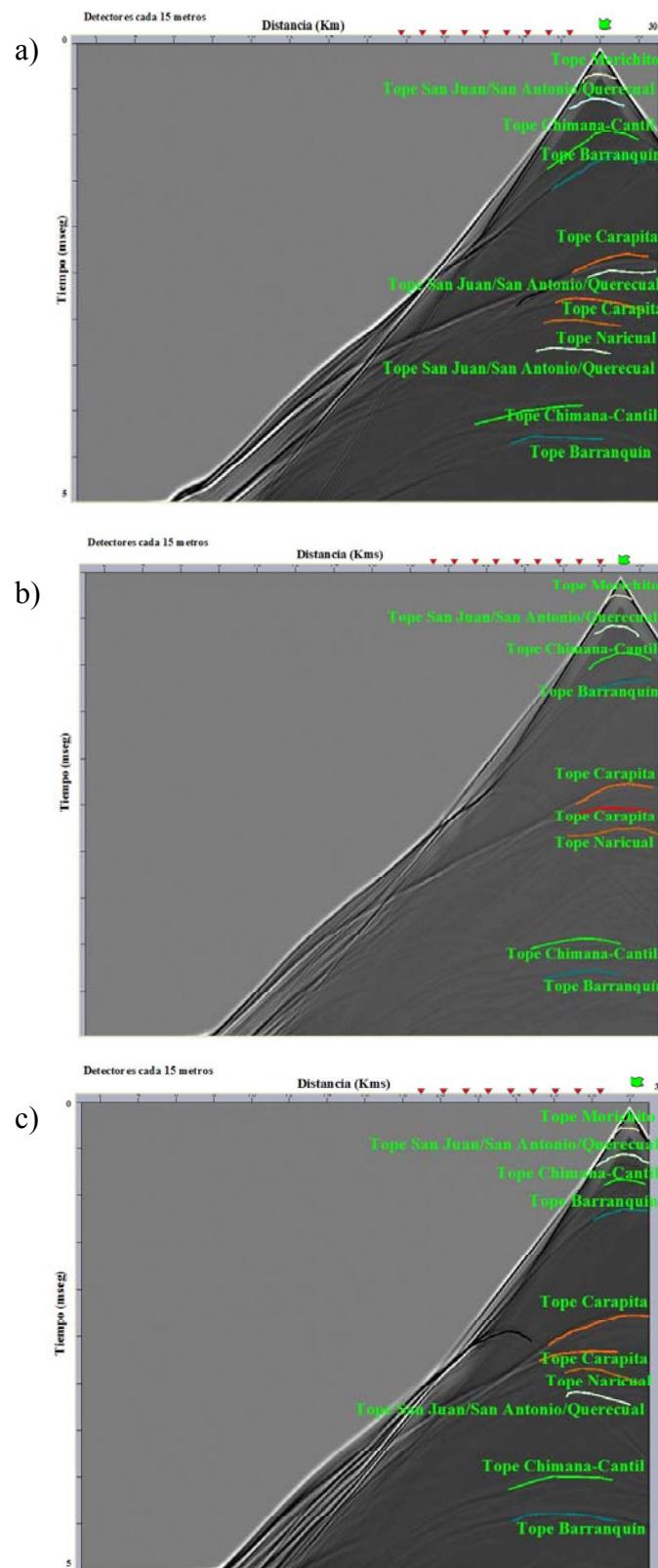


Fig. 2.23- Modelado de Shot Gathers sobre el Escenario 3: Secuencia Terciaria con fuente en a) 27 Km, y b) 28Km, y c)29Km

A través de estas observaciones, se puede concluir que los “Shot Gathers” son los que menos favorecen a la identificación de los topes formacionales presentes en las secciones sintéticas, siendo estos últimos más útiles en la definición de estructuras (Fagin, 1991).

Los Shot Gathers permitieron observar la complejidad estructural presente en los modelos, a través de ciertas reflexiones en las que los ápices de las hipérbolas no se encontraban alineados con la mayoría de estos. Esto sugiere que son eventos que se registraron por detectores más lejanos. Un ejemplo de esto puede ser visto en las figuras 2.21 y 2.22 donde se puede observar una hipérbola con un ápice centrado a los 23 km de distancia y a un tiempo de aproximadamente 2.5 s, el cual se cree que proviene de la estructura semejante al corrimiento de Pirital por debajo de la capa espesa de Barranquín entre los 20 y 27 km de distancia y a una profundidad de alrededor de los 5 km. Esto nos indica que los Shot Gathers permiten observar la complejidad estructural de una determinada área, además de que al propagarse los frentes de onda a través del subsuelo, la energía de propagación de las mismas disminuye con la profundidad, por lo que no se identificaron en su totalidad los topes formacionales más profundos de nuestros modelos.

Una vez obtenido los Shot Gathers para cada modelo de velocidades de los tres escenarios, se elaboraron al igual que para los VSP, curvas t-z para cada uno de ellos donde se realizó la comparación entre la sísmica real y la obtenida a partir de esta herramienta. En la figura 2.24, se comparan los tiempos de viaje de la onda, especificado solo para los Shot Gathers con fuente en 29 km, donde se observa con mayor claridad cada uno de los topes geológicos del área en estudio.

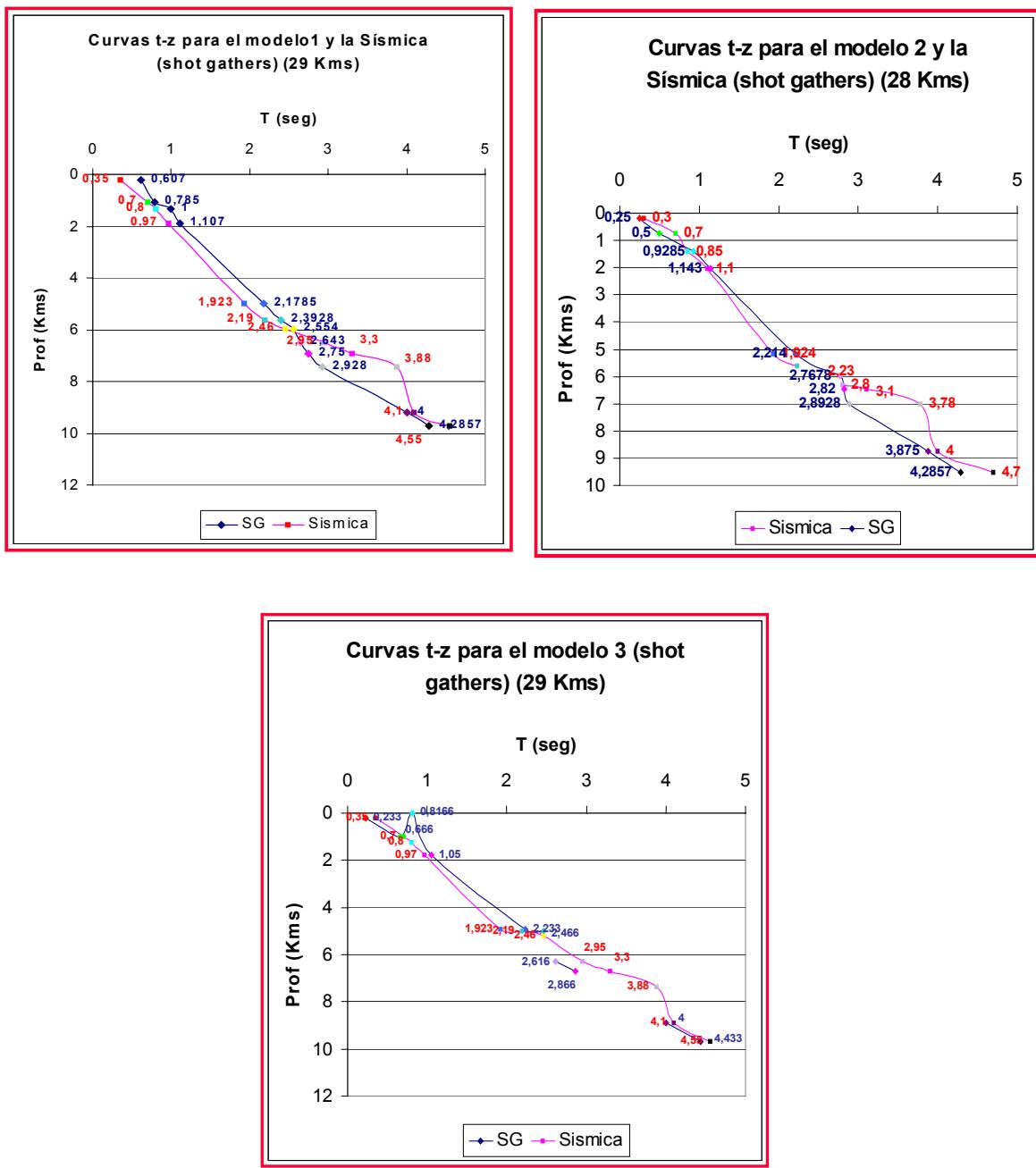


Fig. 2.24- Comparación de la sísmica real con la información obtenida de los Shot Gathers con respecto a los tiempos de viaje, para cada modelo de velocidades propuestos

Al analizar este conjunto de curvas podemos señalar que la información que mejor se ajusta a la data real, en el área de la cuña y los topes por debajo de ésta correspondería, al igual que los VSP, al escenario 1. El escenario 3 por su parte, para este caso, se presenta una gran diferencia en cuanto a los tiempos de viaje. Esto puede evidenciarse con mayor claridad, al realizar un estudio estadístico de la diferencia en tiempos de la sísmica real y la información obtenida de los perfiles sísmicos verticales, como se observa en las figuras 2.25 y 2.26.

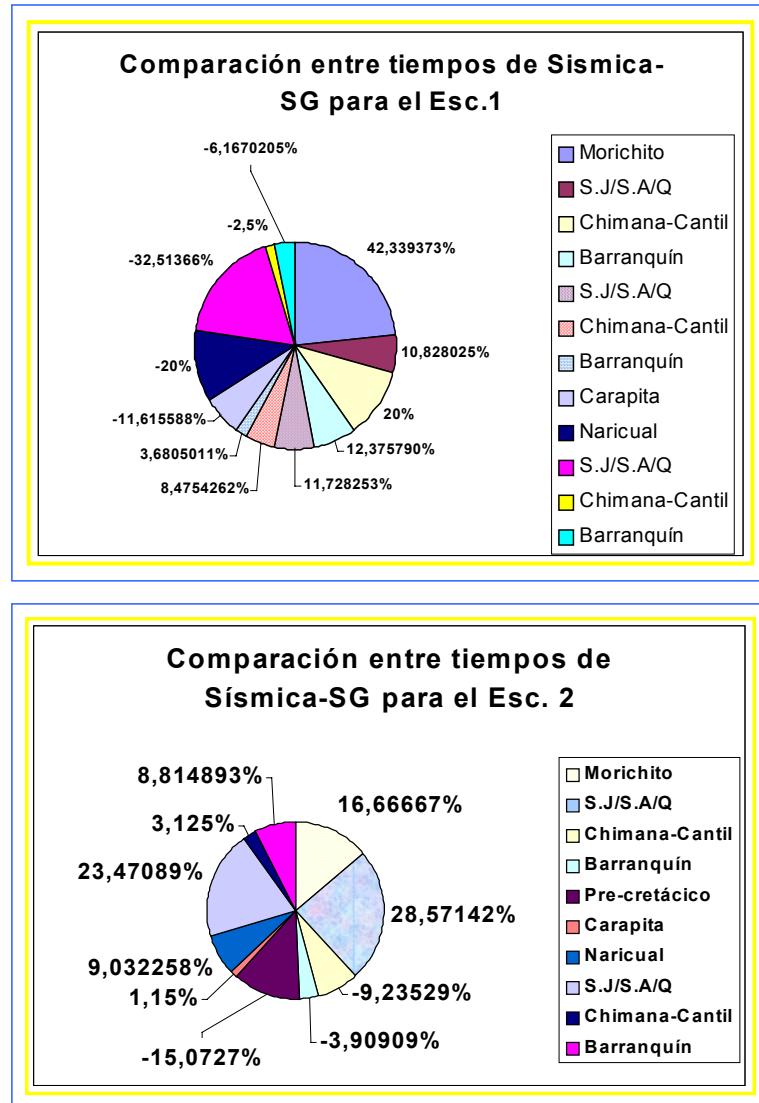


Fig. 2.25- Diferencia entre los tiempos de viaje de la sísmica real y la información obtenida de los Shot Gathers para a) el escenario 1, repetición de Querecual-Chimana-Cantil, b) escenario 2, Secuencia Precretácea.

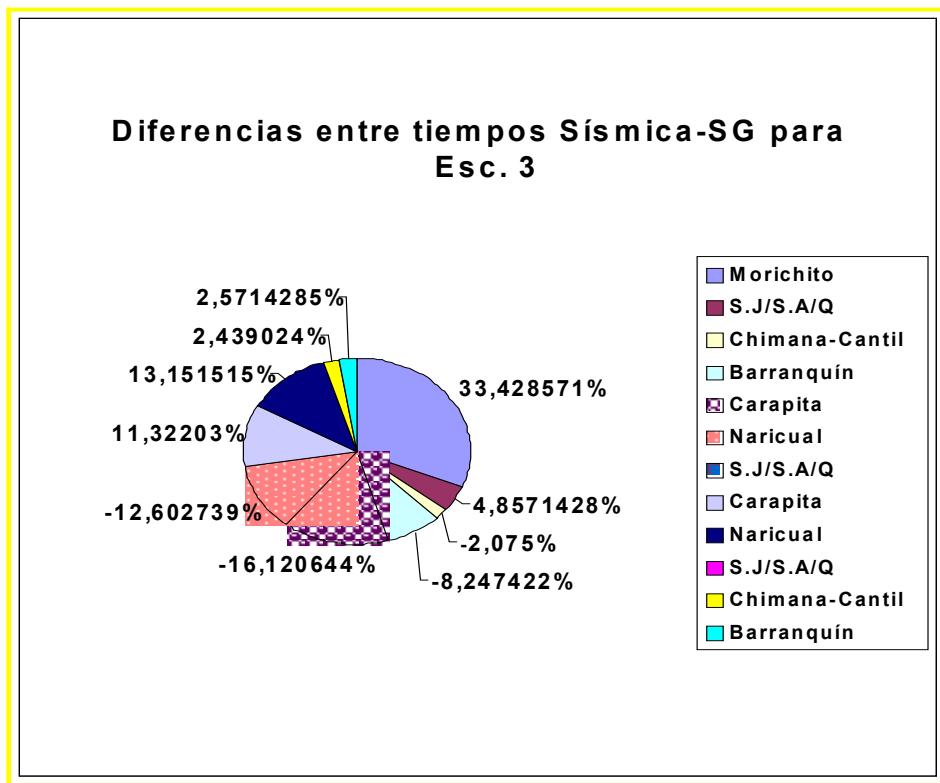


Fig. 2.26- Diferencia entre los tiempos de viaje de la sísmica real y la información obtenida de los Shot Gathers para el escenario 3, Secuencia Terciaria

2.7 Revisión de los modelos de velocidades

Para complementar el estudio, solo en el área de la cuña se realizaron las comparaciones de los modelos de velocidades, haciendo uso del Check-shot y el VSP del pozo MAC-1X. En la siguiente tabla (Fig. 2.27) se ilustra la comparación en términos de velocidades para cada modelo, con sus respectivos ajustes. Los contrastes de velocidades en esta área son muy pequeños, por lo cual, al observar el área de la cuña en la sísmica real, se identificó un paquete donde se diferencia con claridad sólo tope y base, donde están contenidos los topes de las formaciones de interés. Por ello, la dificultad del análisis para este caso. De acuerdo con esto, el escenario que mejor se ajusta a la sísmica real en términos de velocidades es el escenario 1.

Tabla 1 Comparación de velocidades, haciendo uso del Check-shot y el VSP
del pozo MAC-1X

Modelo 1			
velocidades (ft/seg)			
Capas	Modelo recibido	VSP y CS	Ajuste
SJ/SA/Q	13497,4	13585	14444
Chimana-Cantil	15000	15089	16002
Barranquín	17198		
Modelo 2			
velocidades (ft/seg)			
Capas	Modelo recibido	VSP y CS	Ajuste
Pre-cretácico	18996	15015	15429,54
Modelo 3			
velocidades (ft/seg)			
Capas	Modelo recibido	VSP y CS	Ajuste
Carapita	11499,5	14814	14793
Naricual	12998,7	14241	14739
SJ/SA/Q	13497,4	16709	17229

2.8 Generación de Sismogramas Sintéticos

Los sismogramas sintéticos se generaron para realizar la calibración entre la sísmica y la información de los topes geológicos obtenidos de las correlaciones estratigráficas. Es decir, con los sismogramas sintéticos se les puede asignar nombres geológicos a la sísmica. Se elaboraron sismogramas sintéticos para cada escenario propuesto y se realizó la comparación con la sísmica, de manera que permitiera concluir cual era el escenario más probable. El proceso de cálculo del sismograma sintético se ilustra en la figura 2.27. Para ello se requieren la velocidad del medio, la densidad y la ondícula que va a convolucionarse con el coeficiente de reflexión para obtener el sintético.

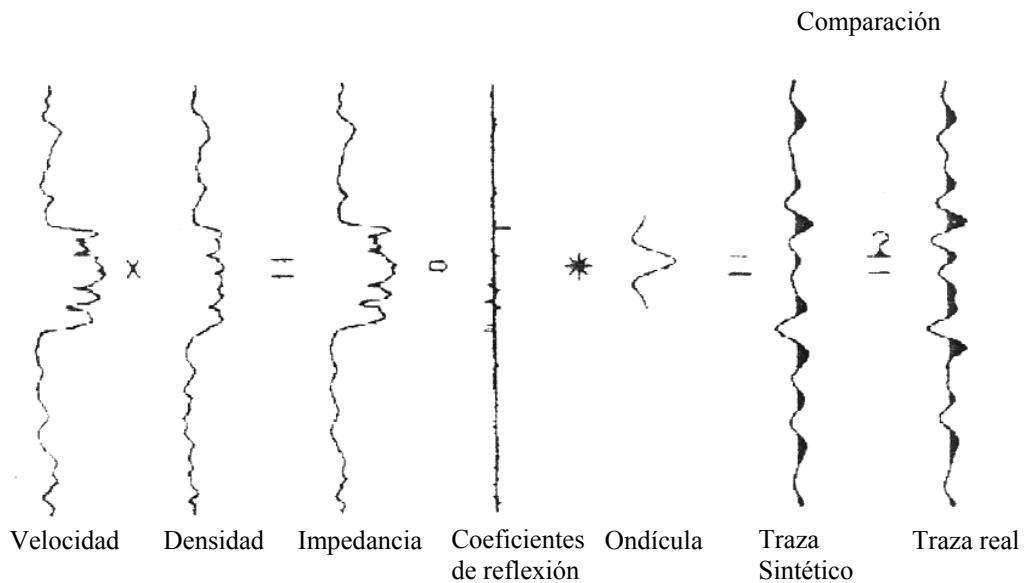


Fig. 2.27- Procesos de cálculo del sismograma sintético

La información de la velocidad y la densidad del medio contribuyen en gran medida en la producción de los sintéticos. La densidad puede estimarse aproximadamente a partir de los registros sónicos. En este caso se tomó una densidad igual a 1 gr/cm³, usando los modelos de velocidades de cada escenario, y por otra parte la densidad de la corteza que es de 2.3 gr/ cm³ para los registros de pozo, debido a que no se contó con ningún registro de densidad. Es precisamente la velocidad y densidad, los datos de entrada para la generación de los sintéticos.

Se realizó una operación de multiplicación entre la ondícula de velocidad y densidad para obtener la impedancia acústica. Seguidamente se realizó la conversión para obtener los coeficientes de reflexión. A cada interface se le asoció un coeficiente de reflexión dado por la siguiente ecuación,

$$R_0 = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \quad (2.28)$$

donde $I = \rho v$, esta cantidad se conoce como impedancia acústica. A cada R_0 se le asignó un tiempo apropiado para crear las series de coeficientes de reflexiones, que no son más que contrastes de impedancia, $R(t)$, como se observa en la figura 2.28, generadas para cada escenario propuesto. Estos contrastes de impedancia en el área de la cuña suelen ser muy pequeños, lo que

dificulta la observación de los topes geológicos en el sismograma sintético al compararlo con la sísmica.

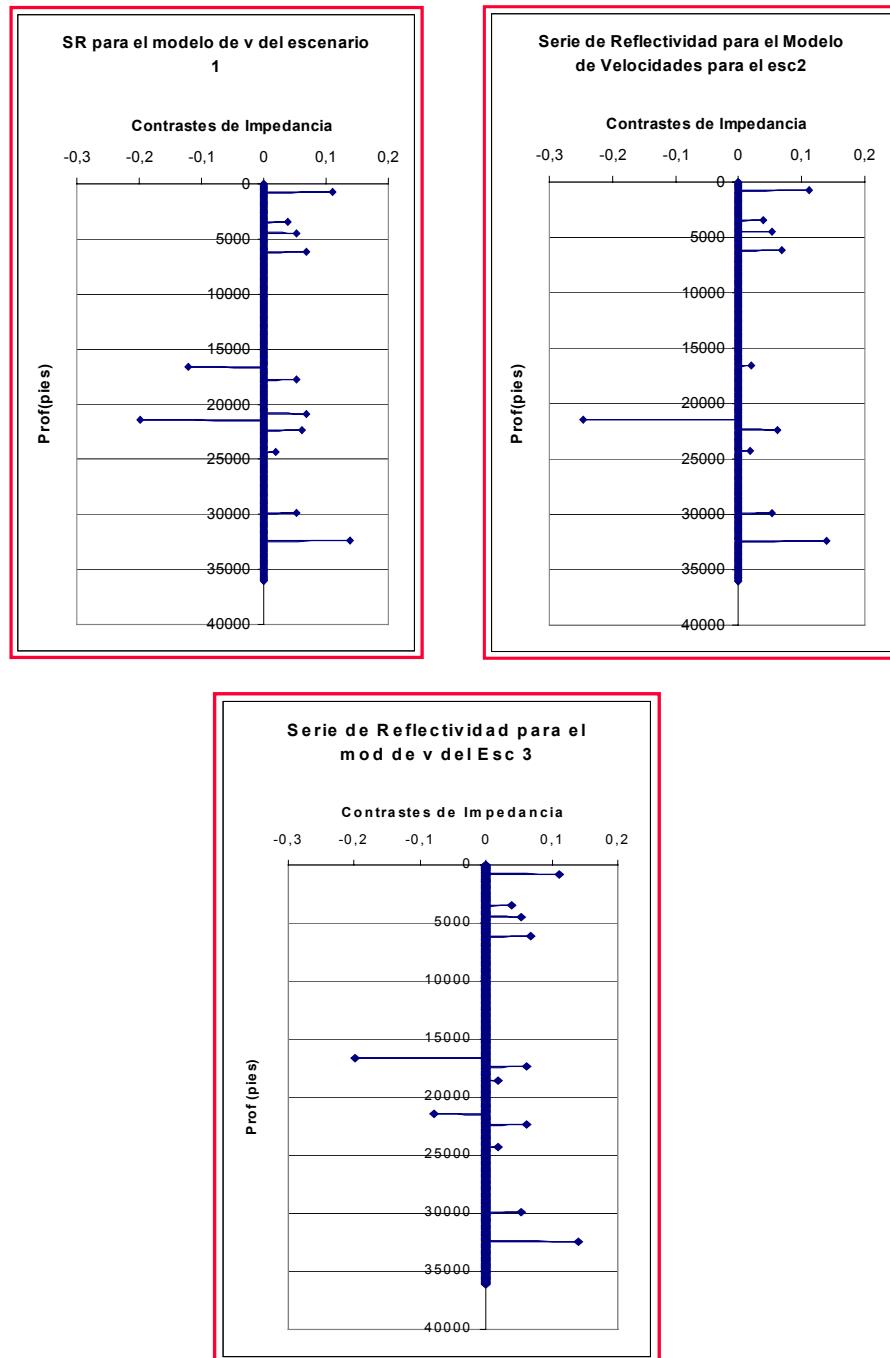


Fig. 2.28- Contraste de impedancia para los tres modelos de velocidades con una frecuencia dominante de 6 Hz.

Otro aspecto importante tomado en cuenta para la generación de los sismogramas sintéticos es la frecuencia dominante, la cual se obtuvó mediante la siguiente ecuación,

$$f_{\text{dom}} = \frac{f_{\min} - f_{\max}}{2} \quad (2.29)$$

Esta frecuencia se seleccionó tomando en cuenta la frecuencia que se utilizó para la generación de las secciones sintéticas que corresponde a la ondícula de Ricker, la cual, para las secciones de cero offset es de 6 Hz, y para los VSP y los Shot Gathers es de 12.5 Hz, utilizada con los modelos de velocidades de cada escenario. Por otra parte, para los registros de pozo se utilizaron frecuencias de 29 Hz, 6Hz y 13 Hz, determinadas de una manera aleatoria mediante un conjunto de pruebas. De allí que se determinó que los mejores resultados se obtuvieron con frecuencias superiores a los 29 Hz, donde se observó una mejor correlación de la sísmica con los sintéticos.

De igual manera la frecuencia puede ser obtenida a partir del espectro de fase y amplitud, como es el caso de la ondícula extraída de la línea ET88A17V, como se observa en al figura 2.29.

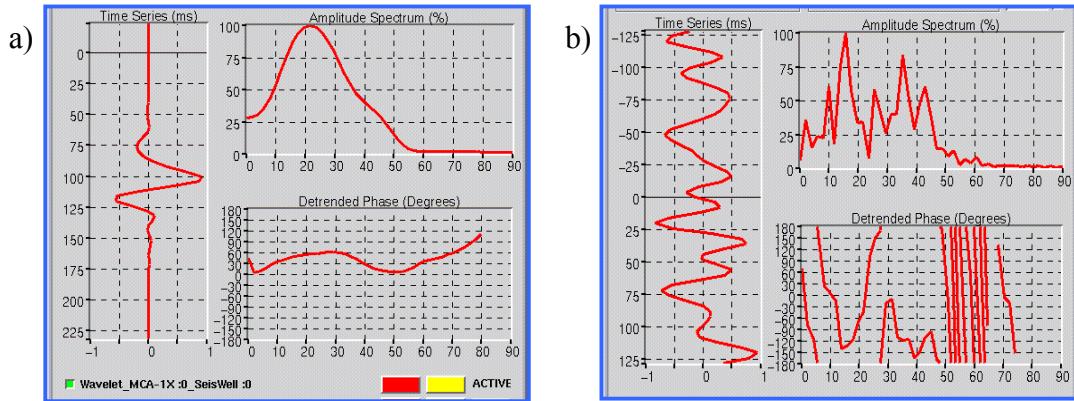


Fig. 2.29- Espectro de fase, Amplitud y ondícula extraída de la línea ET88A17V usando a) el programa Seiswell y b) Wiener-Levinson

Ahora el trabajo consiste en escoger la ondícula para realizar la convolución con las series de reflectividades o contrastes de impedancia, $R(t)$, que en este caso corresponde con la ondícula de Ricker y la extraída de la línea ET88A17V. La convolución viene dada por la siguiente integral,

$$g(t) * f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) f(t - \tau) d\tau \quad (2.30)$$

donde $*$ denota convolución. Cuando realizamos esta operación obtenemos la anatomía de la traza sísmica, dada por la siguiente ecuación,

$$T(t) = R(t) * w(t) \quad (2.31)$$

donde $T(t)$ es la traza sísmica como una función de tiempo de reflexiones, $R(t)$ son las series de reflectividades y $w(t)$ es la ondícula.

La traza final generada es lo que se llama sismograma sintético. Se generó un sismograma sintético para cada modelo de velocidades para una ondícula de Ricker de frecuencias de 6 Hz y 12.5 Hz, usando una densidad de 1 gr/cm³ (Figura 2.30 y 2.31). De igual manera, usando los registros de pozo y asumiendo una densidad de 2.3 gr/cm³ se obtuvieron los sintéticos para una ondícula de Ricker de fase mínima de 29 Hz, 6 Hz y 13 Hz; y para las ondículas extraídas de la línea ET88A17V usando un filtro de Seiswell y Wiener-Levinson, esto con el objetivo de comparar los datos del pozo con la información obtenida a partir de los modelos de velocidades. (Fig. 2.32, 2.33, 2.34)

Para los sismogramas sintéticos generados reproduciendo la misma ondícula que la rutina Sufdmod2, se observó que el retraso en tiempo afectaba la ubicación de los eventos en tiempo y por ende en profundidad. Para la ondícula de $f_{max}=25$ Hz existe un Corrimiento de alrededor de 1301 pies (397 mts), para el caso de la de $f_{max}=12$ Hz el corrimiento fue de alrededor de 2699 pies (823 mts).

La reproducción de los sismogramas sintéticos para las frecuencias dominantes modeladas en el "seismic unix" y de los sismogramas sintéticos para las ondículas extraídas de la sísmica, permitió observar por un lado que las frecuencias usadas difieren de la ideal, para reproducir un resultado semejante al sismograma sintético usando el pozo y la ondícula extraída de la sísmica. Por el otro lado, permitió determinar esta frecuencia ideal (alrededor de 29 Hz), asimismo se observó la pérdida de gran cantidad de eventos debido a la resolución existente al considerar las

frecuencias de 25 Hz y 6 Hz, aun cuando se observó una buena correspondencia al comparar las ubicaciones y presencia de los topes geológicos importantes.

Se nota el efecto de considerar distintos valores de densidades para generar los sintéticos en cada uno de los resultados obtenidos, por un lado una densidad de 1 g/cm^3 (modelado en SU), y por el otro la densidad de la corteza ($2,3 \text{ g/cm}^3$), la cual se utilizó debido a que no se poseía un registro de densidad. Por su parte, el uso de la segunda opción demostró producir resultados más reales. Hay que señalar que en los sismogramas sintéticos usando los registros de pozo, se tuvo inconvenientes con los topes de las formaciones, por lo cual, sólo pudieron observarse los topes de las formaciones comunes para los tres modelos.

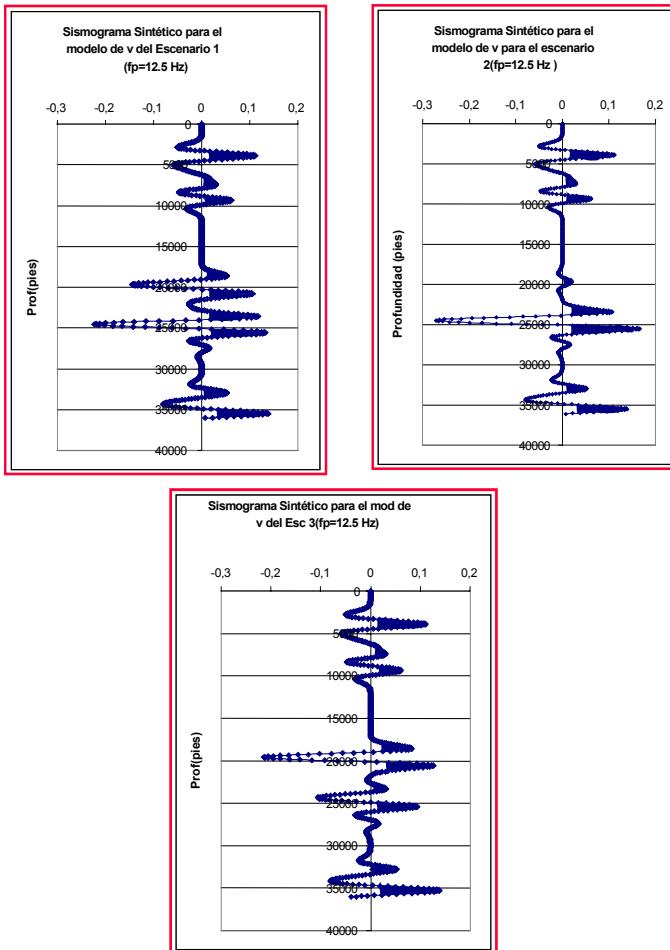


Fig. 2.30- Sismogramas Sintéticos de los modelos de velocidades de los tres escenarios, utilizando una ondícula de Ricker a 12.5 Hz, y densidad de 1 gr/cm^3 .

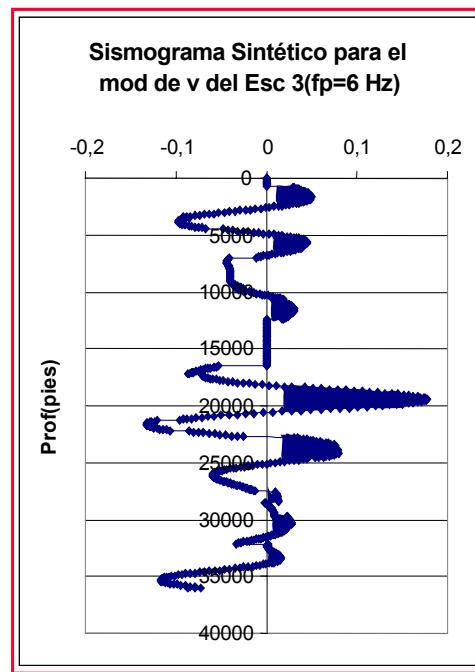
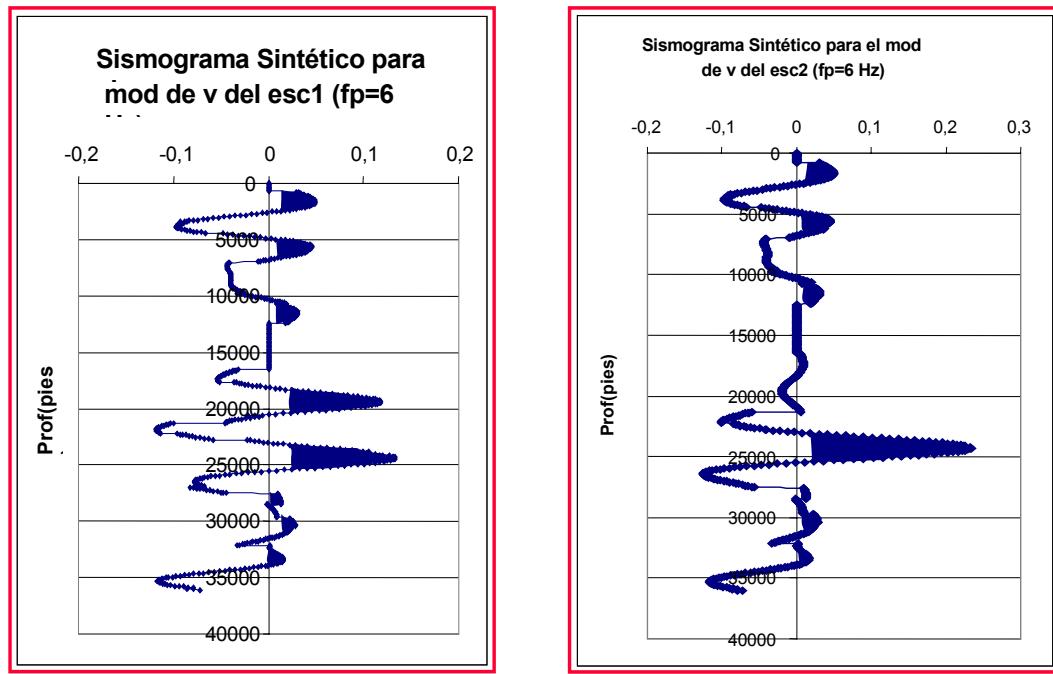


Fig. 2.31- Sismogramas Sintéticos de los modelos de velocidades de los tres escenarios propuestos, utilizando una ondícula de Ricker a 6 Hz, y densidad de 1 gr/cm³.

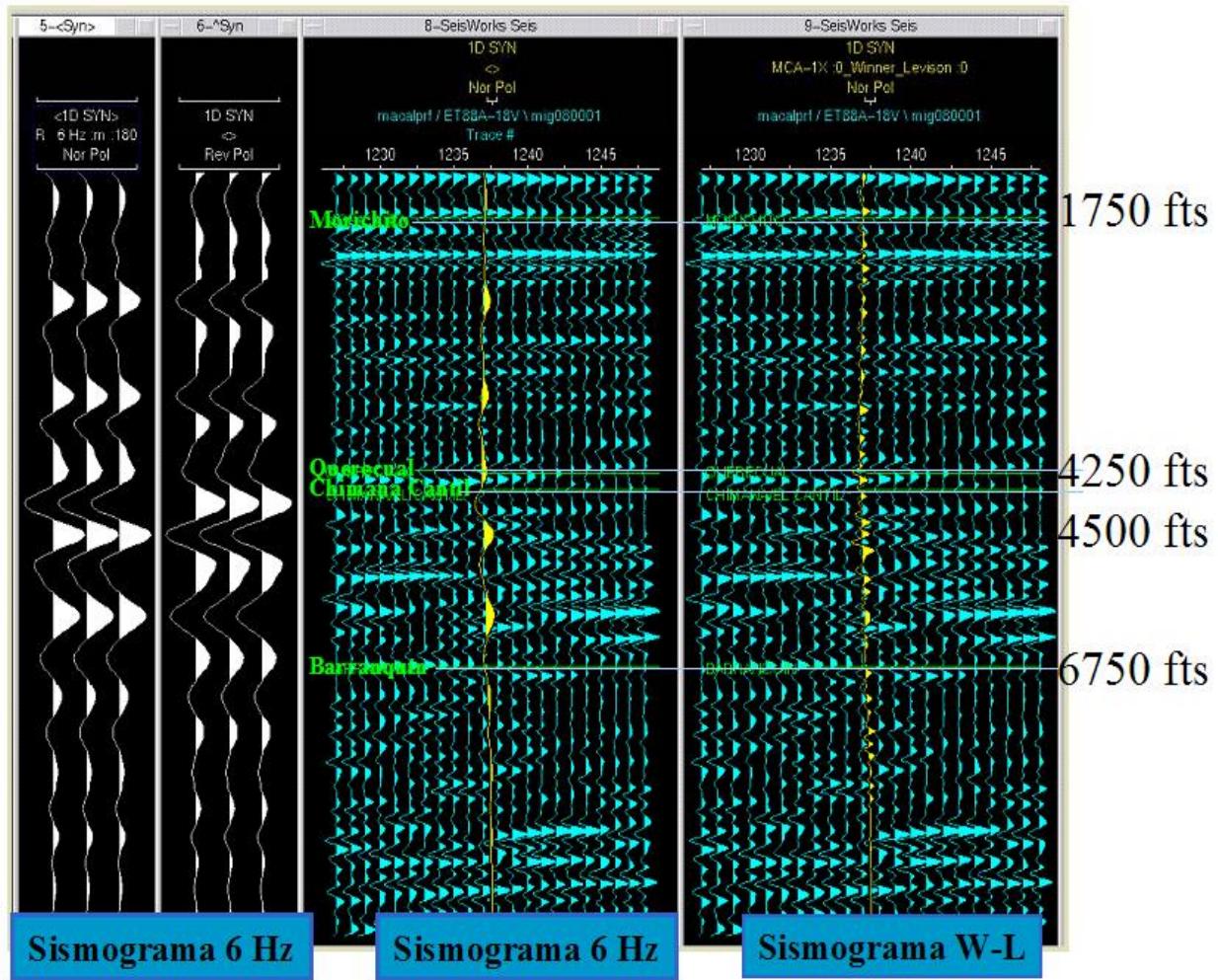


Fig. 2.32- Sismogramas Sintéticos de los modelos de velocidades de los tres escenarios propuestos, utilizando una ondícula de Ricker a 6 Hz, y densidad de 2.3gr/cm³.

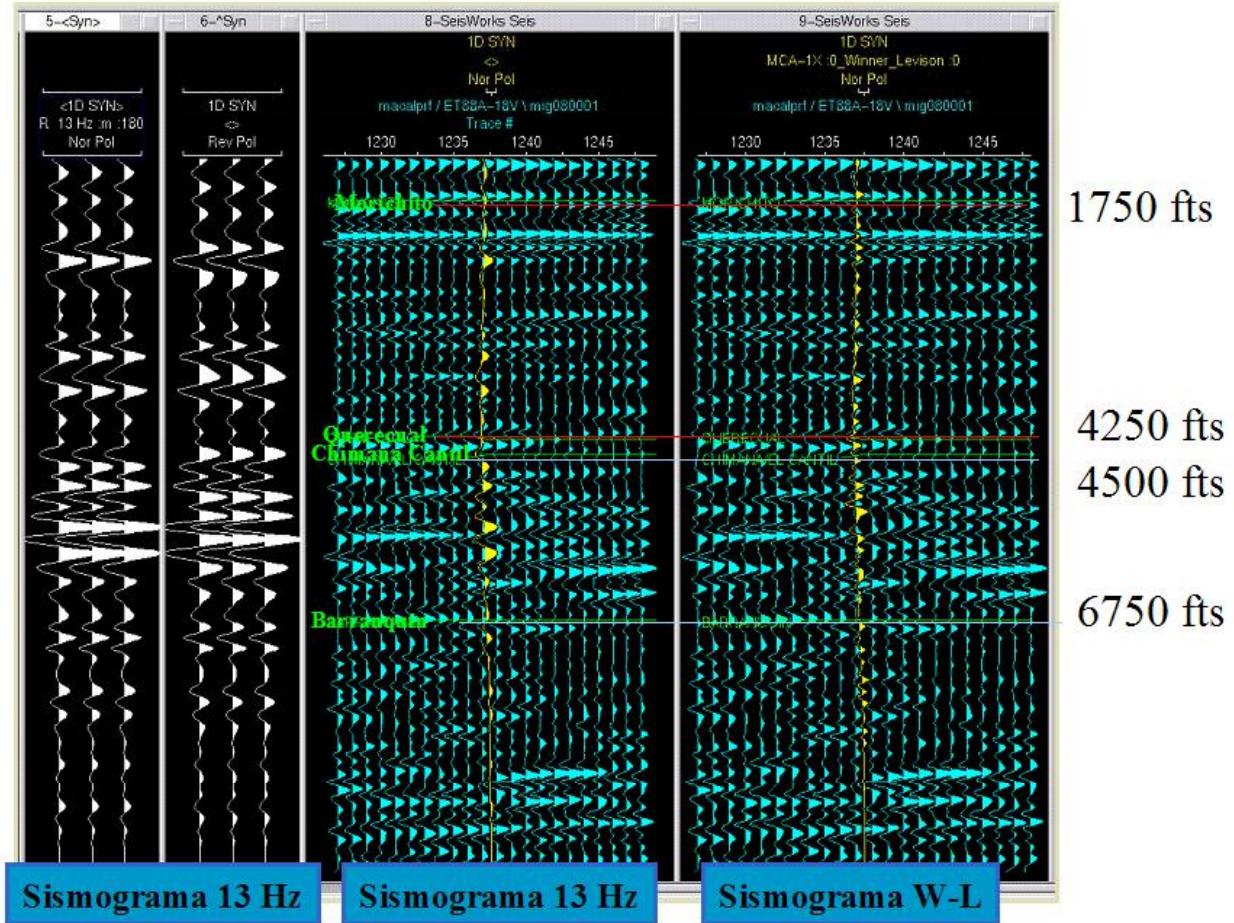


Fig. 2.33- Sismogramas Sintéticos de los modelos de velocidades de los tres escenarios propuestos, utilizando una ondícula de Ricker a 13 Hz, y densidad de 2.3 gr/cm^3 .

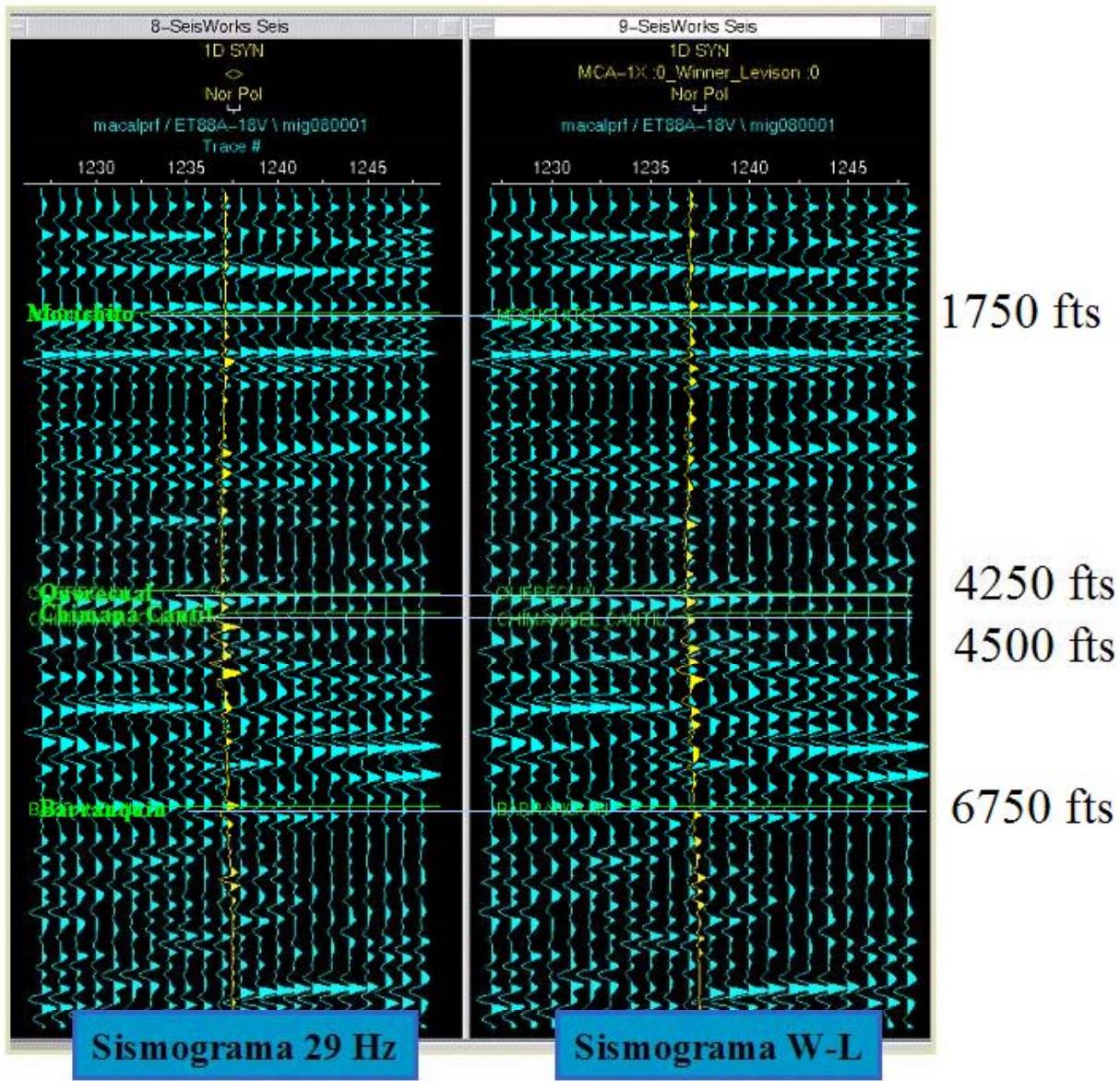


Fig. 2.34- Sismogramas Sintéticos de los modelos de velocidades de los tres escenarios propuestos, utilizando una ondícula de Ricker a 29 Hz, y densidad de 2.3gr/cm³.

2.9 Identificación sobre la sísmica real de reflectores fuertes

Para culminar la investigación se realizó la búsqueda de los reflectores fuertes sobre la sísmica real para luego determinar cual de los modelos propuestos se ajusta a esta realidad. Esto permitió dar una conclusión definitiva acerca de la escogencia del modelo en profundidad.

La sísmica considerada es la correspondiente a la línea 2D ET86A-39, y a dos líneas arbitrarias del levantamiento Tácata 3D. Se habla de tres líneas pues la sección completa sobre las cuales se hicieron las interpretaciones, que produjeron los modelos propuestos, se conforma de estas líneas.

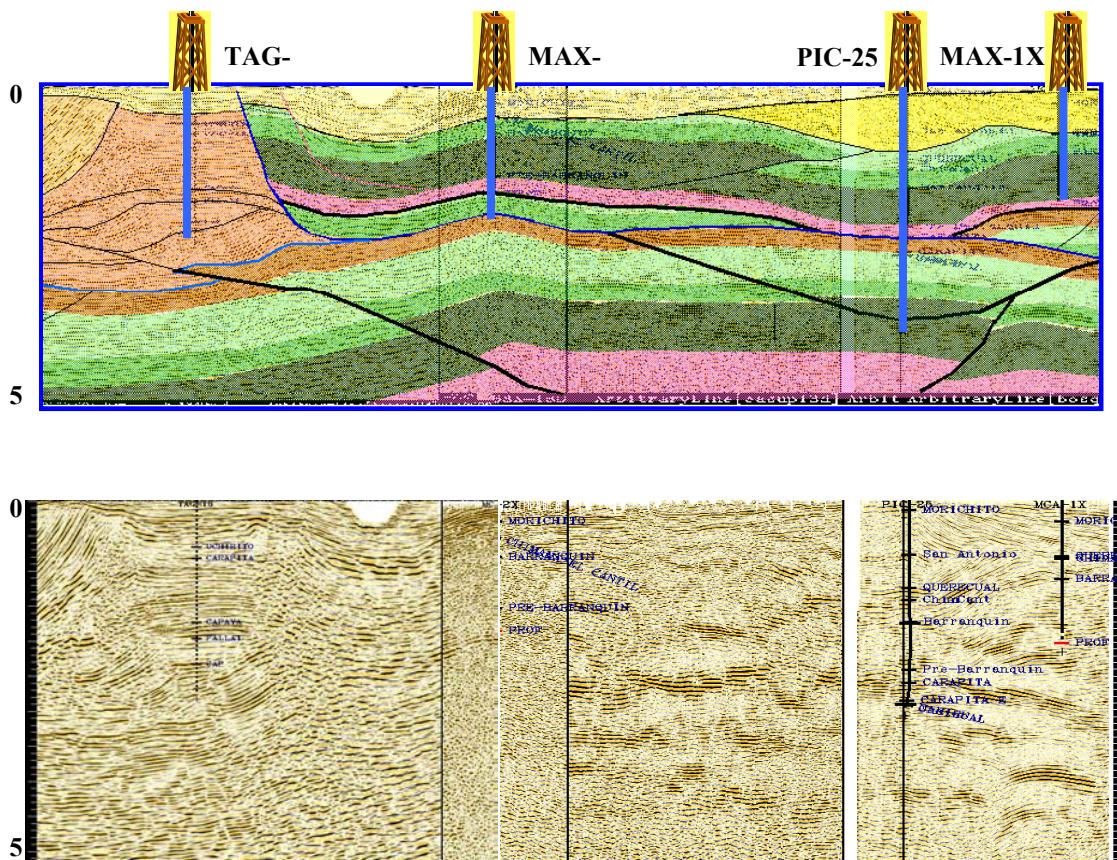


Fig. 2.35- Sección sísmica correspondiente a las líneas ET86A39 y a dos líneas arbitrarias del levantamiento sísmico Tacata 3D. Junto con la interpretación geológica-estructural de dicha línea.

En principio, se recibió otra interpretación de la misma línea, que permitió la identificación de los topes de las formaciones en cada modelo de velocidades. Seguidamente, se recibió la interpretación observada en la figura 2.35, permitiendo comprobar y cuestionar el modelo proveniente de la misma.

Sobre esta sísmica se realizó entonces la identificación de los reflectores fuertes o de interés, tomando como guía cada tope formacional observado por cada uno de los pozos dados. Se identificaron gran parte de los reflectores en la sísmica, en la área de la cuña por su parte, se identificaron igualmente muchos reflectores fuertes. Estos modelos poseen una buena correspondencia, sin embargo en los escenarios propuestos el espesor de la cuña es menor que en la sísmica. Todo este análisis nos lleva a concluir que el escenario más probable y que se ajusta mejor a la sísmica real, es el escenario 3 que corresponde a la secuencia terciaria.

3 CAPITULO III

3.1 Parámetros de adquisición para el diseño de un levantamiento sísmico 3D

La finalidad de la sísmica de reflexión ya sea bidimensional o tridimensional es muestrear el campo de ondas reflejadas con el fin de preservar las frecuencias que se juzguen necesarias y reconstruir la geometría del subsuelo. La sísmica 3D es el método por medio del cual el subsuelo de una zona es muestreada, procesada y por ultimo interpretada como un todo, volumétricamente hablando, con el objeto de tener un modelo en tres dimensiones. Es por ello, que se debe comenzar con el estudio y diseño de los levantamientos sísmicos 3D, los cuales nos permitirán obtener el modelo en tres dimensiones.

Se puede pensar que el proceso de diseñar un levantamiento sísmico 3D es como un sistema de dos pasos. El primer paso es el que se llama pre-diseño, formado por una colección de cálculos, algunos físicos y otros financieros, cuyos resultados conducen al segundo paso del diseño.

Entre los cálculos del diseño previo podemos incluir la tasa de muestreo, offset cercano y el offset lejano, el tamaño del compartimiento de CMP, la distancia de migración, la cobertura, la imagen del área, el costo del levantamiento, y otras estimaciones financieras del proyecto.

El segundo paso, detalles del diseño, involucran términos tales como tipo de fuente y receptor, arreglo de fuentes y receptores, espaciamiento entre fuentes, líneas de fuente, receptores y líneas de receptores, es decir, la logística.

Se necesita establecer de manera fácil y clara porque se realiza un estudio 3D. Estos objetivos mas bien se toman en cuenta durante el proceso de planificación. Algunos programas mas bien planifican, registran, procesan e interpretan los resultados en un tiempo deliberado. Mas de estas razones para un registro 3D se señalan en la figura 3.1.

Exploración

Estructura

Definición de fallas

Estratigrafía

Domos de sales

Oferta de concesiones

Conversión tiempo a profundidad

Financiamiento bancario

3D

Explotación

Caracterización de pozos

Monitoreo de pozos

Perforación horizontal

Inversión

Fig. 3.1- Objetivos de un diseño 3D

El factor costo, como se ha dicho anteriormente, también juega un papel muy importante en la toma de decisiones acerca de los gastos del levantamiento sísmico 3D. Esto va a depender del área sobre la cual se realice el levantamiento, la disponibilidad de los equipos y la complejidad de la geografía.

Existen numerosas presentaciones de estrategias desarrolladas para un estudio 3D. Uno tiene que establecer cual de estas características son importantes en el área de estudio en un selecto orden de acuerdo con el tipo de diseño. Cada diseño podría describirse usando la siguiente secuencia de despliegues:

- a) Levantamiento a escala completa
- b) Un acercamiento del levantamiento
- c) Distribución de offset cercano
- d) Distribución de offset lejano
- e) Distribución de offset por cada compartimiento de CMP
- f) Distribución de azimuth por cada compartimiento de CMP

En este trabajo se han propuesto tres tipos de diseño (Ortogonal, Diagonal y Ladrillo). El análisis de los levantamientos se realizó utilizando el programa Mesa Core de Green Mountain Geophysics.

Las secciones siguientes muestran el flujo de trabajo utilizado en la evaluación de resultados en forma detallada. Este flujo de trabajo se resume en el gráfico de la figura 3.2. Sin embargo, se concentra en la parte de diseño en planta, conociendo el objetivo a iluminar, y el efecto de los obstáculos superficiales, a la hora de realizar todos los cálculos pertinentes para cada uno de los diseños de los levantamientos.

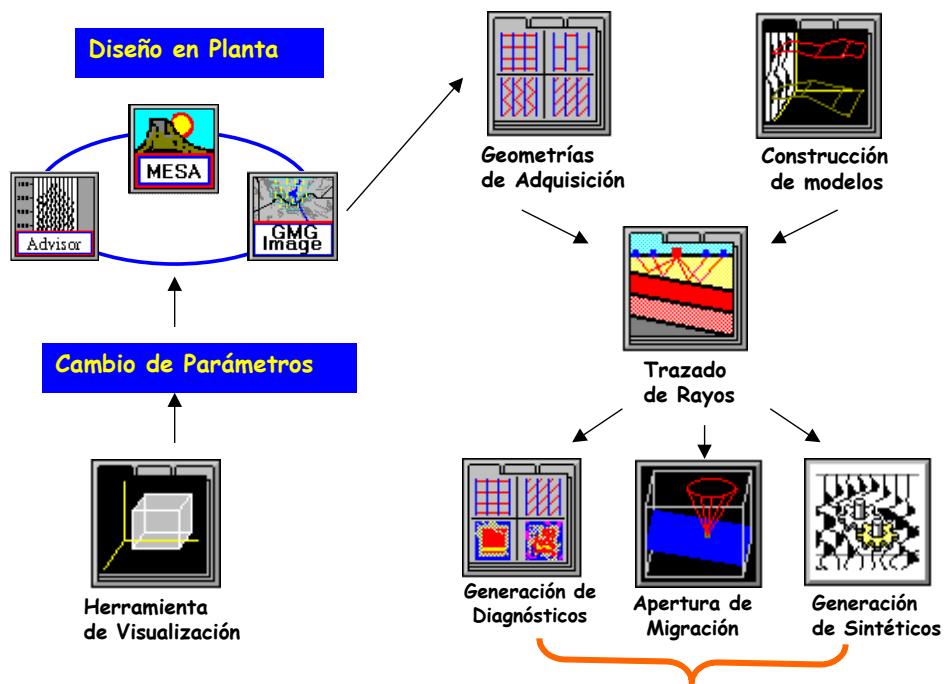


Fig. 3.2- Flujo de trabajo para el modelado sísmico 3D

3.2 Definiciones de términos 3D

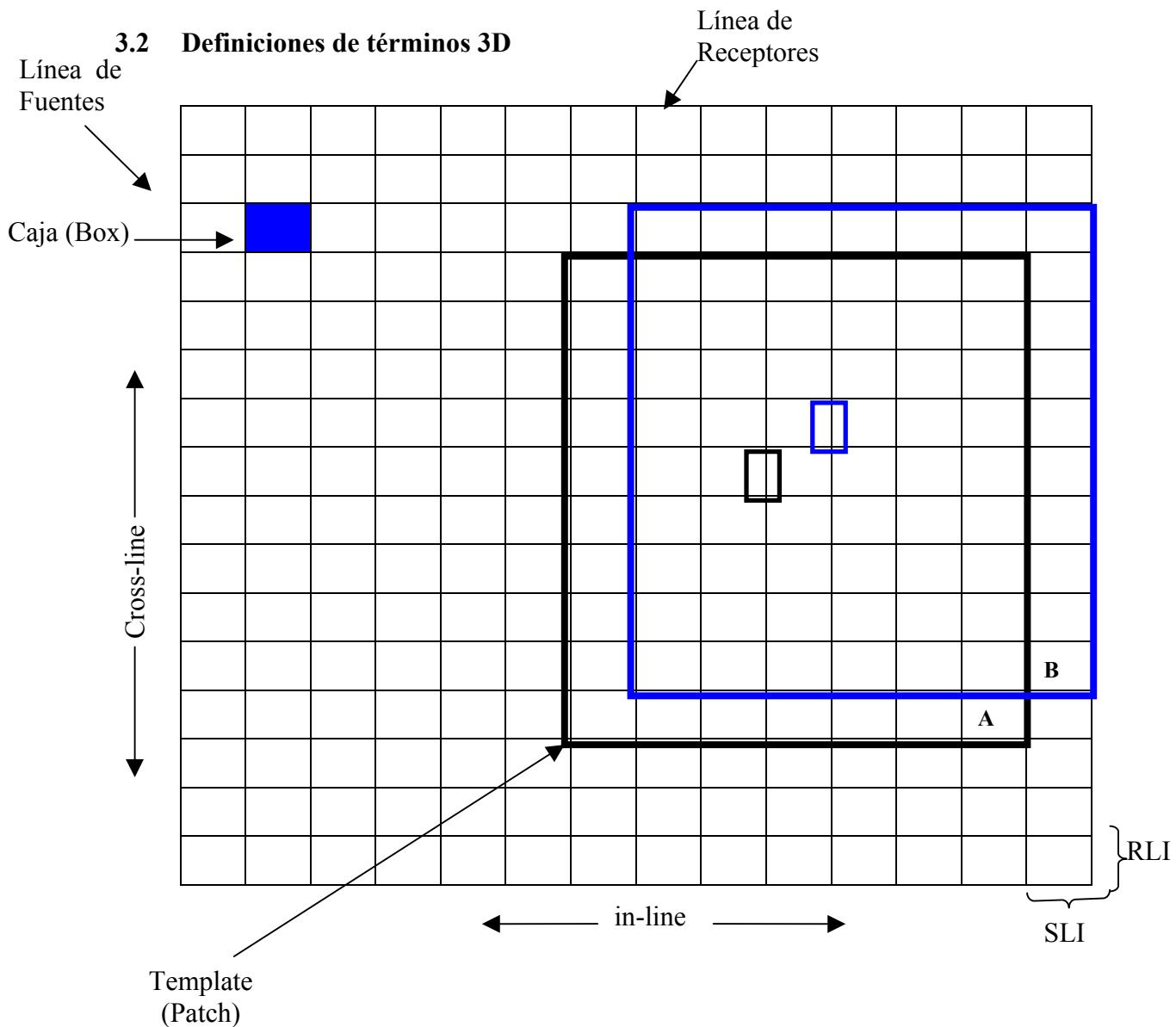


Fig. 3.3- Términos utilizados en un estudio 3D

- 1) **Caja (Box, también llamada celda unitaria):** en los estudios 3D ortogonales, este término se aplica para un área limitada por dos líneas de fuentes adyacentes y dos líneas de receptores adyacentes. La celda unitaria normalmente representa el área más pequeña de un estudio 3D que contiene un estudio estadístico completo (dentro de un área de full cobertura). En un estudio ortogonal, el punto medio del compartimiento (bin) esta localizado exactamente en el centro de la celda unitaria, aportando contribuciones de muchos pares de fuente-receptor; la corta distancia trazada perteneciente al compartimiento (bin) tendrá un largo desplazamiento mínimo

en todo el estudio. En otras palabras, de todos los mínimos desplazamientos (offset mínimo) en todos los compartimientos (bin) de CMP, el desplazamiento mínimo u offset mínimo en el compartimiento (bin) en el centro de la celda unitaria tendrá un gran X_{min} .

- 2) **Compartimiento de CMP (o Bin):** una pequeña área rectangular que normalmente tendrá dimensiones $(SI/2)*(RI/2)$. Todos los puntos medios que tienen una posición inferior en esta área, o compartimiento (bin), se supone que para pertenecer a algún punto medio común (Fig. 3.3). En otras palabras, todas las trazas que están en esta posición en algún compartimiento (bin) podrían agruparse por CMP y contribuir a la cobertura del compartimiento (bin).
- 3) **Dirección Cross-line:** es la dirección perpendicular a las líneas receptoras.
- 4) **Cobertura (Fold):** es la cantidad de veces que se muestra o ilumina un bin. En 3D se define como la cobertura In-line por la cobertura Cross-line. Es el número de puntos medios que se agrupan dentro de un compartimiento (bin) de CMP.
- 5) **Dirección In-line:** es la dirección paralela a las líneas receptoras.
- 6) **Puntos Medios:** es el punto localizado exactamente en la mitad, entre la localización de una fuente y un receptor.
- 7) **Area o parche (Patch):** es la unidad básica de un levantamiento Sísmico 3D. Es el patrón por el cual va a ser hecho un levantamiento sísmico e indica el número de canales activos, el cual va a tener una cierta cantidad de disparos asociados. Los parámetros de patch depende de la fuente utilizada (dinamita o vibradores).
- 8) **Línea de Receptores:** es una línea a lo largo de la cual los receptores se colocan fuera en intervalos regulares. La separación entre las líneas de estaciones de receptores (intervalo de receptores, RI) es normalmente igual a dos veces la dimensión de la línea del cubo de CMP. Regularmente, el campo de grabación de los cables se coloca a lo largo de estas líneas, mientras los geófonos están dispuestos de esa manera. La distancia entre líneas receptoras sucesivas es comúnmente referida como el intervalo entre líneas receptoras (o RLI). El método de colocar fuera la fuente y las líneas receptoras puede variar, pero la geometría mas bien obedece a simples directrices.
- 9) **Ángulo de dispersión:** asumiendo la presencia de un punto de dispersión (punto de difracción) a profundidad, el ángulo de dispersión es el ángulo entre la vertical de la trayectoria del rayo por debajo de la dispersión de la fuente y la trayectoria del rayo por encima de la dispersión de los receptores.

- 10) **Relación señal-ruido:** es la relación de la energía de la señal sobre la energía del ruido. Usualmente abreviada con S/N.
- 11) **Línea de fuentes:** es una línea a lo largo de la cual se tienen puntos de fuente (dinamita o puntos de vibración) que están a un intervalo regular. La separación entre líneas de fuente (intervalo de fuente, SI) es usualmente igual a dos veces la dimensión de puntos medios comunes en la dirección del cruce de las líneas. Esta geometría asegura que los puntos medios asociados con cada punto fuente podrían caer exactamente en un punto medio a una distancia de estos asociados con previos puntos de fuente sobre la línea. La distancia entre las líneas de fuente sucesivas es usualmente llamada intervalo entre líneas fuentes (o SLI). SLI y SI determinan la densidad del punto fuente (o SD, punto fuente por Kilometro cuadrado).
- 12) **Densidad del punto fuente:** SD es el número de puntos fuentes/Km² o puntos fuentes/mi². Junto con el número de canales, NC y el tamaño del cubo de CMP, SD para determinar la cobertura.
- 13) **Cubo Superior:** este término se aplica para un grupo de cubos de CMP vecinos. Los grupos de cubos son todo el tiempo usados para determinar la velocidad, las soluciones de estática residual, atenuación de múltiples y algún algoritmo de atenuación del ruido.
- 14) **Extensión (Swath):** Este término ha sido usado con diferentes significados en la industria. Las líneas de receptores se colocan paralelas entre sí y su distancia es uniforme, mientras que las líneas de fuentes se colocan perpendiculares a las líneas receptoras. Un swath es igual al ancho del área sobre el cual la estación fuente está registrando, sin llegar a la intersección entre las líneas de receptores y fuentes. La característica principal de los swaths es que con el uso de este método se puede grabar varias líneas receptoras al mismo tiempo. El número de líneas a grabarse va a depender del offset máximo requerido y el número de canales disponibles para la grabación.
- 15) **Plantilla (Template):** es un área particular de receptores en la cual un número de puntos fuentes es registrado. Estos puntos fuentes tal vez pueden estar dentro o fuera del área. En la ecuación de la forma:

$$\text{Template} = \text{Área} + \text{Punto de fuente asociado}.$$

- 16) **CDP:** Punto común de profundidad.
- 17) **CMP:** Punto medio de profundidad.

- 18) **Máxima Ordenada (Offset Máximo)**: depende de la estrategia de disparo y el tamaño del área. Es la distancia entre la fuente y el receptor más alejado dentro del área, el cual influye en el número de canales. (Objetivo más profundo).
- 19) **Mínima Ordenada (Offset Mínimo)**: es la distancia entre la fuente y el primer receptor. (Objetivo más somero).
- 20) **Offset**: es la distancia existente entre la fuente y el receptor, es la distancia la cual se separa una fuente o un receptor de su posición teórica.
- 21) **Tamaño del Bin**: es la mínima unidad, en la cual, se discretiza el área a levantar y se define como la mitad de la distancia que hay entre los receptores por la mitad de la distancia que hay entre disparos.

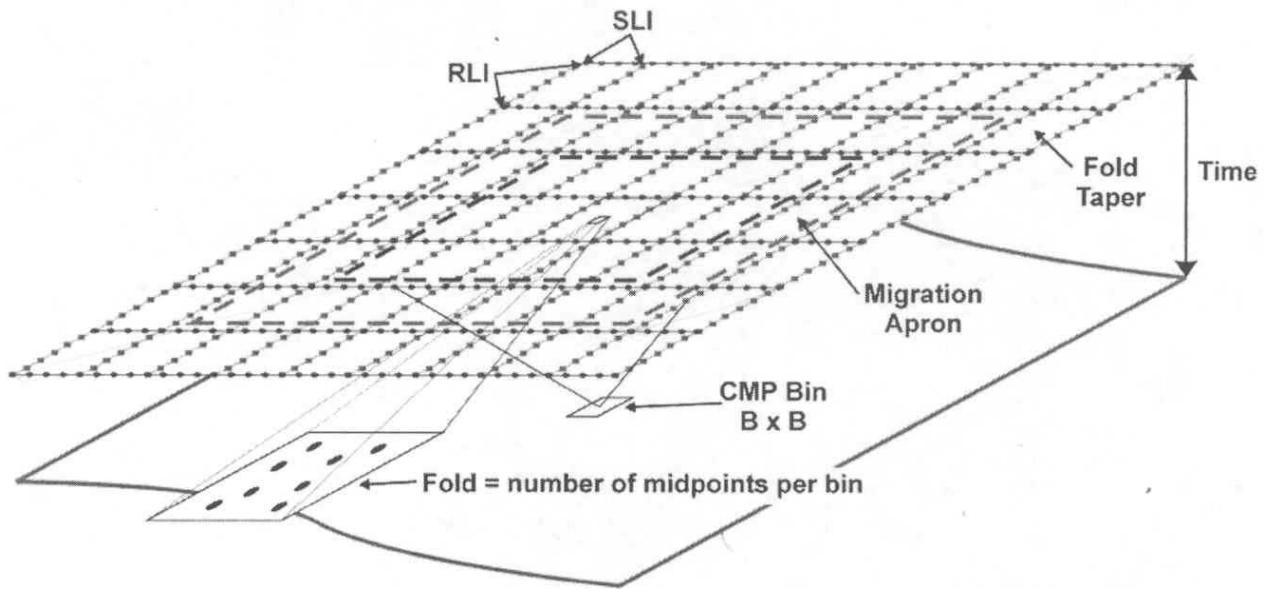


Fig. 3.4- Manejo de términos en los bordes de un levantamiento sísmico 3D

3.3 Planificación y diseño

El diseño de un levantamiento sísmico depende de muchos parámetros de entrada y ciertas limitaciones que hacen de estos todo un arte. Se deben determinar valores como cobertura, tamaño del bin, offset mínimo, offset máximo, apertura de migración, entre otros. Todos estos parámetros son necesarios para diseñar un estudio 3D de un área determinada.

Los parámetros utilizados para cada uno de los levantamientos sísmicos propuestos (con geometría ortogonal, diagonal y tipo ladrillo) se presentan a continuación:

3.3.1 Cobertura

La cobertura es la cantidad de veces que se graba un bin. La cobertura controla la relación señal/ruido. En nuestro caso, la cobertura utilizada es de 35 y fue tomada a partir de estudios previos realizados en zonas adyacentes al área de estudio. A partir de esto, se comenzaron a determinar los demás parámetros que permitieron la construcción de los levantamientos con sus correspondientes geometrías.

Sabiendo que la cobertura total es de 35, se puede determinar la cobertura inline y crossline. Para ello, se cuenta con las siguientes fórmulas:

$$\text{Cobertura crossline} = \frac{\text{NL}}{2} \quad (3.1)$$

donde NL es el número de líneas receptoras, que para este caso se utilizaron 10 líneas de receptores, sustituyendo este valor en la ecuación (3.1),

$$\text{Cobertura crossline} = \frac{10}{2} = 5 \quad (3.2)$$

Partiendo de la fórmula que nos permite obtener la cobertura total (Ec. 3.3),

$$\text{Cobertura total} = \text{Cobertura inline} \times \text{Cobertura crossline} \quad (3.3)$$

despejamos entonces la cobertura inline,

$$\text{Cobertura inline} = \frac{\text{Cobertura total}}{\text{Cobertura crossline}} \quad (3.4)$$

$$\text{Cobertura inline} = \frac{35}{5} = 7 \quad (3.5)$$

3.3.2 Tamaño del bin

El tamaño del bin es el área sobre la cual, las trazas se apilan; y se define como la mitad de la distancia que hay entre los receptores por la mitad de la distancia que hay entre disparos. La selección del tamaño del bin y la cobertura van de la mano, ya que, la cobertura es una función cuadrática de la longitud de un lado del bin (Fig. 3.5). Esta relación se observa en la siguiente fórmula de cobertura,

$$\text{Cobertura} = SD \times NC \times B^2 \times U \quad (3.6)$$

donde SD es el número de puntos de fuente por unidad de área, NC el número de canales, B es el tamaño del bin (por bins cuadrado), y U es un factor de conversión (10^{-6} para m/Km^2).

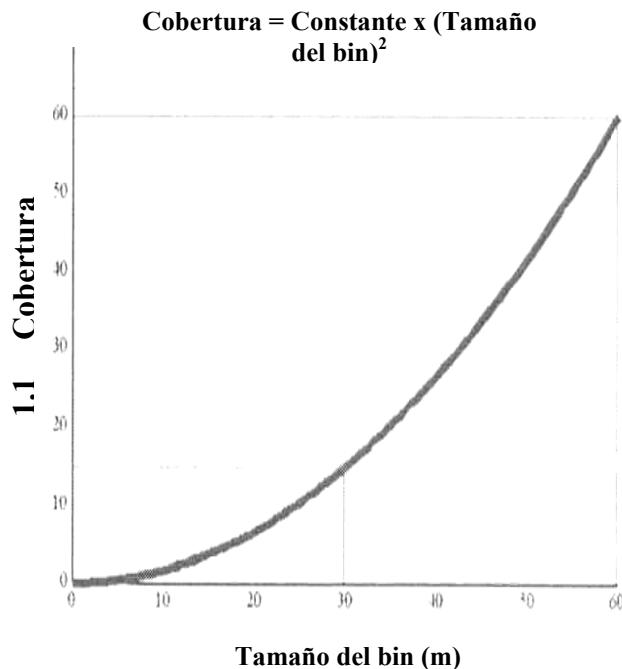


Fig. 3.5 Cobertura versus tamaño del bin

Existen diferentes maneras de determinar el tamaño del bin. La más común es la siguiente,

$$\text{Tamaño del bin} = \frac{RI}{2} \times \frac{SI}{2} \quad (3.7)$$

sabiendo que SI es el intervalo entre fuentes y RI es el intervalo entre receptores, que para este caso es igual a 50 m para ambos casos. Por lo tanto, el tamaño del bin es igual a,

$$\text{Tamaño del bin} = \frac{50m}{2} \times \frac{50m}{2} = 25m \times 25m \quad (3.8)$$

Por otra parte, se puede determinar el tamaño del bin despejándolo de la fórmula (3.4),

$$B^2 = \frac{\text{Cobertura}}{SD \times NC} \quad (3.9)$$

tomando en cuenta la relación anterior mostrada en la gráfica de la figura 3.5, se puede decir que el tamaño del bin para una cobertura de 35 es de $50m^2$, lo cual se ha comprobado con la fórmula (3.6).

3.3.3 Determinación del tamaño del bin grid

Para un estudio 3D, el bin es una construcción básica de bloques. El tamaño del bin depende del tamaño del objetivo, y necesita una determinada resolución espacial y económica.

El teorema básico de muestreo nos permite aplicar una fórmula para el bin grid:

$$B = \frac{V}{2 \cdot f_{max} \cdot \text{Sen}(b)} \quad (3.10)$$

donde B es el muestreo espacial, f_{max} es la frecuencia máxima sin aliasing, b es la máxima profundidad del objetivo en grados, y V la velocidad interválica.

3.3.4 Espaciamiento entre líneas de fuente

Si la cobertura y el número de canales se conocen, como en este caso, es más sencillo calcular los demás parámetros para completar el diseño del levantamiento. Uno de estos parámetros que podría ser estimado, es el número de disparos requeridos por kilómetros cuadrados, tomando en cuenta el tamaño del bin antes calculado, la cobertura dada y el número de canales.

La fórmula que nos permite calcular este parámetro es la siguiente,

$$SD = \frac{Cobertura \times 10^6}{NC \times B^2} \quad (3.11)$$

donde SD es el número de disparos por Km^2 , NC es el número de canales en campo, y B es el tamaño del bin. Sabiendo que NC es igual a 1260, B es 25m y la cobertura es de 35, sustituimos en la fórmula (3.11) y determinamos el valor de SD ,

$$SD = \frac{35 \times 10^6}{1260 \times (25)^2} = 44 \text{ fuentes/Km}^2 \quad (3.12)$$

Una vez determinado el número de disparos por Km^2 , se puede obtener otro parámetro importante, como lo es el espaciamiento entre líneas de fuentes, dado por la siguiente fórmula:

$$SLI = \frac{1}{2B \times SD \times U} \quad (3.13)$$

sustituyendo los valores conocidos en la fórmula (3.13), obtenemos el valor de SLI (Separación entre líneas de fuentes),

$$SLI = \frac{1}{2(25m) \times 44 \times 10^{-6}} = 450m \quad (3.14)$$

De igual manera, existen otras fórmulas que nos permiten calcular este valor, entre estas tenemos la de cobertura inline (Ec. 3.14),

$$\text{Cobertura inline} = \frac{NR \times RI}{2 \times SLI} \quad (3.15)$$

de donde despejamos SLI , y sustituimos los valores conocidos, sabiendo que NR es el número de receptores y es igual a 126 receptores, RI es el intervalo entre receptores y es igual a 50m, y la cobertura inline es de 7.

$$SLI = \frac{NR \times RI}{2 \times \text{Cobertura}}$$

$$SLI = \frac{126 \times 50m}{2 \times 7} = 450m \quad (3.16)$$

3.3.5 Espaciamiento entre líneas receptoras

El cálculo del espaciamiento entre las líneas receptoras requiere del conocimiento de las dimensiones del patch, para evitar el rayado observado en los mapas de cobertura. El intervalo entre líneas receptoras se calculó como,

$$RLI = \frac{X_r \times X_s}{NC \times 2B} \quad (3.17)$$

donde X_r es la dimensión del patch inline y X_s es la dimensión del patch crossline, estos valores se obtuvieron de la siguiente manera,

$$X_r = \frac{NC \times 2B}{NL} \quad (3.18)$$

$$X_r = \frac{1260 \times 2(25m)}{10} = 6300m$$

y

$$X_s = 0.8X_r \quad (3.19)$$

$$X_s = 0.8(6300m) = 5040m$$

donde el 0.8 corresponde al radio de espectro de los ejes del patch. Esto nos permite optimizar el área donde se registran las trazas y determinar el número de canales necesarios para el levantamiento.

Una vez obtenidos estos valores, se sustituyen en la fórmula (3.16) y se determina el valor de *RLI* (Separación entre líneas receptoras),

$$RLI = \frac{6300m \times 5040m}{1260 \times 2(25m)} = 504m \quad (3.20)$$

que por simplicidad y requerimiento del programa se approximó a 500m.

3.3.6 Offset Mínimo

En el centro de la caja del bin, formado por dos líneas de receptores adyacentes y dos líneas de fuentes adyacentes, se tiene el largo del offset mínimo. El offset mínimo corresponde a la diagonal de esta caja (Fig. 3.6)

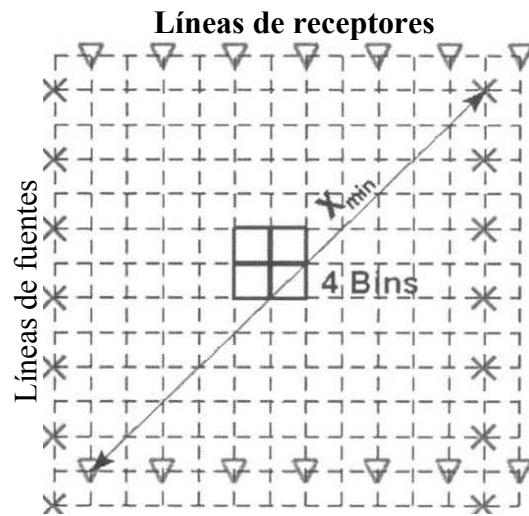


Fig. 3.6- Definición del offset mínimo con el cambio de una línea de estaciones por el medio de la esquina de la caja

El offset mínimo está determinado por la siguiente fórmula:

$$X_{min} = \sqrt{RLI^2 + SLI^2}$$

$$X_{min} = \sqrt{(500m)^2 + (450m)^2} = 673m \quad (3.21)$$

3.3.7 Offset Máximo

El offset máximo requerido depende de la profundidad del objetivo. Existen diversas maneras de determinar el valor del offset máximo, a continuación se presentan dos de las más comunes.

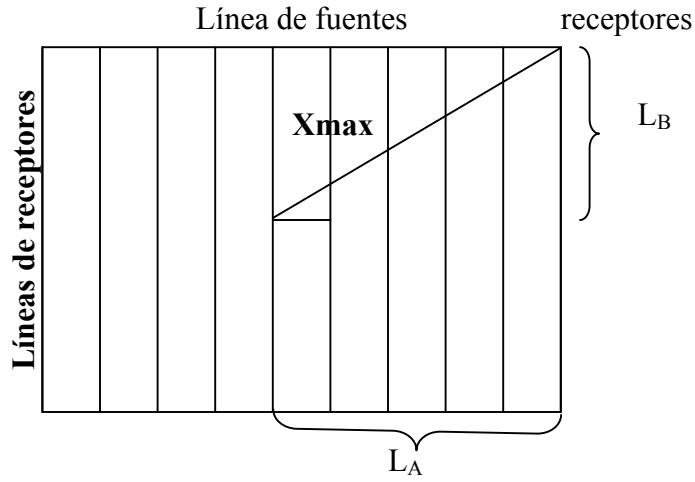
Primeramente tenemos la fórmula para calcular el offset máximo tomando en cuenta las dimensiones del patch:

$$X_{max} \geq \frac{1}{2} \sqrt{X_r^2 + X_s^2}$$

$$X_{max} \geq \frac{1}{2} \sqrt{(6300m)^2 + (5040m)^2} \quad (3.22)$$

$$X_{max} \geq 4034m$$

Otro método, que se ha empleado para determinar el valor del offset máximo es de manera gráfica.



Ahora bien, de acuerdo con el siguiente esquema se debe determinar el valor de L_A y L_B , para poder determinar mediante el teorema de Pitágoras el valor del X_{max} , de la siguiente manera:

$$L_A = RLI \times \text{Solapamiento entre líneas} \quad (3.23)$$

$$L_A = 500m \times 5 = 2500m$$

y

$$L_B = \left\{ \left(\frac{NR}{2} \right) \times SI \right\} - \Delta x \quad (3.24)$$

$$L_B = \left\{ \left(\frac{126}{2} \right) \times 50m \right\} - 25m = 3100m$$

donde Δx es la mitad del intervalo entre receptores. Entonces X_{max} está dado por,

$$X_{max} \geq \sqrt{L_A^2 + L_B^2} \quad (3.25)$$

$$X_{max} \geq \sqrt{(2500m)^2 + (3100m)^2}$$

$$X_{max} \geq 4002m$$

Se puede observar una pequeña diferencia entre ambos valores obtenidos. Esto se debe a los diferentes criterios utilizados para determinar este valor, sin embargo la diferencia no es tan grande y el offset máximo se mantiene entre los 4000 m.

3.3.8 Cobertura estrecha

Otro factor importante que debe considerarse para calcular la cobertura es la cobertura estrecha. Este parámetro describe el área alrededor del área de full cobertura, donde se fortalece la cobertura. El ancho de esta franja no es necesariamente similar en la dirección inline y crossline, es por ello que necesitan calcularse por separado, de la siguiente manera:

$$Taper_{in} = \left(\frac{Cobertura_{in}}{2} - 0.5 \right) \times SLI \quad (3.26)$$

$$Taper_{cross} = \left(\frac{Cobertura_{cross}}{2} - 0.5 \right) \times RLI$$

En este caso, el patch es de 10 x 126, por lo tanto el estrechamiento es:

$$\begin{aligned} Taper_{in} &= \left(\frac{7}{2} - 0.5 \right) \times 450m = 1350m \\ Taper_{cross} &= \left(\frac{5}{2} - 0.5 \right) \times 500m = 1000m \end{aligned} \quad (3.27)$$

3.3.9 Apertura de migración

La migración es necesaria para colocar en profundidad los horizontes y fallas en su posición apropiada en el substituto. La apertura de migración es el intervalo horizontal en los bordes de la zona a prospectar, el cual debe grabarse para garantizar la adecuada migración de los eventos de interés. Existen varios criterios para determinar la apertura de migración. Estos son: apertura de migración definida por el buzamiento, apertura de migración definida por la zona de Fresnel y la apertura de migración definida por la energía de difracción.

3.3.9.1 Apertura de migración definida por el buzamiento

En un medio de velocidad constante, los horizontes en profundidad requieren de una apertura de migración aproximada, determinada a partir de la siguiente fórmula,

$$MA = Z \cdot \tan \theta \quad (3.28)$$

$$MA = 5454m \cdot \tan(20^\circ) = 1985m$$

donde MA es la apertura de migración, Z la profundidad, y θ el ángulo de buzamiento (del verdadero reflector). Esta ecuación se utiliza cuando se dispone de un mapa estructural del tope del objetivo geológico, como es nuestro caso.

3.3.9.2 Apertura de migración definida por la zona de Fresnel

La zona de Fresnel es el área de un reflector, desde el cual la energía reflejada puede alcanzar un detector con alguna otra energía reflejada desde dentro del área (Sheriff, 1991). En la figura 3.7, el viaje de la energía desde una fuente en S al punto O en el subsuelo llega a la superficie en un tiempo $t_o = 2 \times Z_o \div V_{ave}$. La energía reflejada desde un punto A o A' podría alcanzar el receptor en un punto O en un tiempo $t_l = 2[(Z_o \div V_{ave}) + (\lambda \div 4 V_{ave})]$.

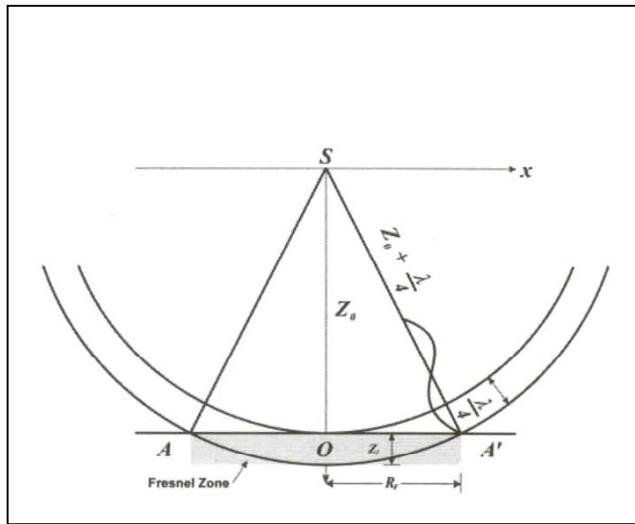


Fig. 3.7- Zona de Fresnel

El disco reflectante AA' se llama la primera zona de Fresnel (Sheriff, 1991). El radio de la zona de Fresnel R_F de incidencia vertical puede aproximarse como,

$$R_F = \left(\left(Z_o + \frac{\lambda}{4} \right)^2 - Z_o^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{Z_o \times \lambda}{2} + \frac{\lambda^2}{16} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.29)$$

la cual podría también aproximarse a,

$$R_F \cong \left(\frac{Z_o \times \lambda}{2} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{t_o \times V_{ave}}{2} \times \frac{V_{ave}}{2f_{dom}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.30)$$

o

$$R_F \cong \frac{1}{2} V_{ave} \left(\frac{t_o}{f_{dom}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.31)$$

donde f_{dom} es la frecuencia dominante considerada. El radio de aspectro está dado por,

$$R_F = 275m \quad (3.32)$$

Un estudio 3D podría entonces estar constituido por tres zonas (Figura 3.8). La primera (la más profunda) es la zona dominada por el intérprete. Todas las trazas que están situadas en esta zona podrían considerarse como full cobertura y full migración. En esta imagen del área el intérprete podría limitar el estudio y usar la básica interpretación geológica. La segunda zona (central) es un corredor alrededor de la zona más profunda (imagen). Teóricamente este corredor es igual a la apertura de migración. La tercera zona (la más externa) es un corredor alrededor de la zona central. El ancho de esta zona es la cobertura estrecha. En este corredor, la adquisición planifica la localización de las fuentes y receptores para asegurar la full cobertura en la zona central.

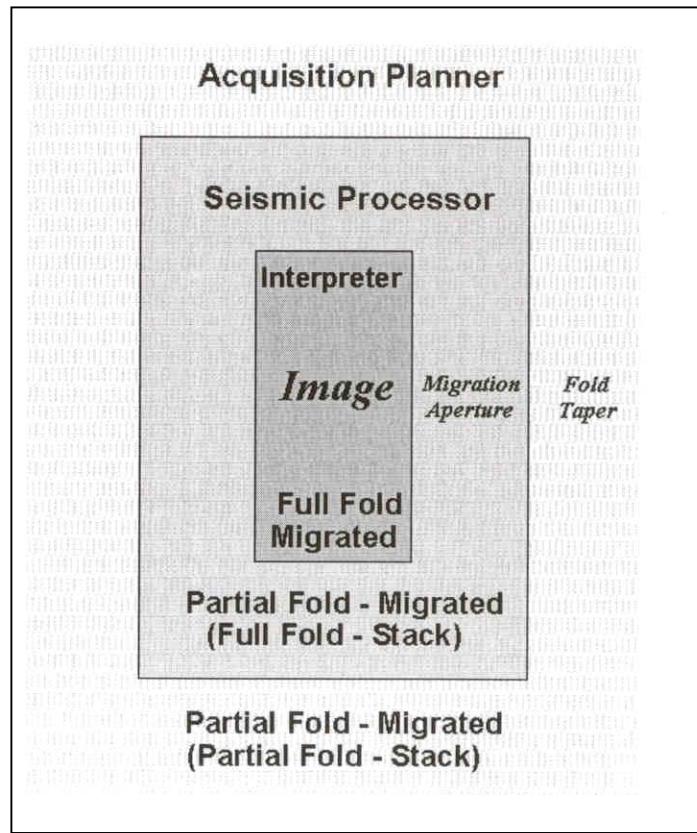


Fig. 3.8- Adquisición de tres zonas del modelo teórico

Entonces la apertura de migración total viene dada por la siguiente inecuación,

$$(FT_{cross} + FZ) \angle \text{Apertura de migracióm total} \angle (FT_{in} + MA) \quad (3.33)$$

donde FT_{cross} es la cobertura estrecha crossline, FT_{in} es la cobertura estrecha inline, FZ el radio de la zona de Fresnel y MA es al apertura de migración. Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación (3.32) tenemos,

$$\begin{aligned} (1000m + 275m) \angle \text{Apertura de migración total} \angle (1350m + 1985m) \\ 1275m \angle \text{Apertura de migración total} \angle 3335m \end{aligned} \quad (3.34)$$

Se tomó el promedio entre ambos resultados para obtener una apertura de migración, dando como resultado un valor igual a 2305 m.

3.4 Diseños en planta de los levantamientos sísmicos 3D

A continuación se realizará una breve descripción de los diseños de los levantamientos sísmicos 3D que se utilizaron para este estudio:

~ Ortogonal: Generalmente, las líneas de fuentes y receptores se colocan de manera ortogonal entre ellas. Los receptores cubren una gran área. Este tipo de diseño es referido como un patch (Fig. 3.9a, b). Esta geometría es particularmente simple y de fácil adquisición. Las líneas de disparo son continuas durante todo el levantamiento. En un diseño ortogonal, la línea de receptores activos forma un patch rectangular circundante a cada localización de puntos fuentes; creando una serie de despliegues en cruz que se superponen unos con otros. El patch frecuentemente tiene el largo del eje en la dirección de la línea (in-line). Dependiendo del espaciamiento entre las líneas receptoras, el radio de espectro de los ejes del patch esta usualmente entre 0.6 y 1. Un radio de espectro cercano a 0.85, es usualmente aceptable. Los puntos de fuente son colocados en el centro del patch, aunque no es necesario.

En nuestro caso, el arreglo ortogonal, tiene las líneas de receptores orientadas en la dirección este-oeste y las líneas de fuentes en la dirección norte-sur (Fig. 3.9a, b). Este arreglo es fácil de colocar en campo. Usualmente, todos los puntos de fuentes adyacentes entre las líneas de receptores se registran, entonces el patch de receptores avanza sobre una o más líneas, y el proceso se repite progresivamente hasta que se completa el tendido y el objetivo del estudio. En la figura 3.9c se muestra la distribución de offset mínimo para un diseño ortogonal. El offset mínimo para un bin particular es muy pequeño para la intersección entre las líneas y se incrementa hacia el centro del bin. La distribución de offset es buena (dependiendo del número de canales en el registro del patch), pero se deteriora hacia el centro del bin donde los offset cortos están ausentes (Fig 3.9d). La serie de offset en paralelo de los bins, muestra una tendencia distinta hacia el patrón de offset limitado en el montón, lo cual podría resultar en severas huellas de adquisición a niveles de superficie (Fig. 3.9e). La desventaja es que el máximo-mínimo offset puede ser muy grande y existen cambios abruptos de la distribución de offset bin a bin. La distribución de azimuth, para este arreglo ortogonal es uniforme a lo largo y ancho del registro del patch usado (Fig. 3.9f).

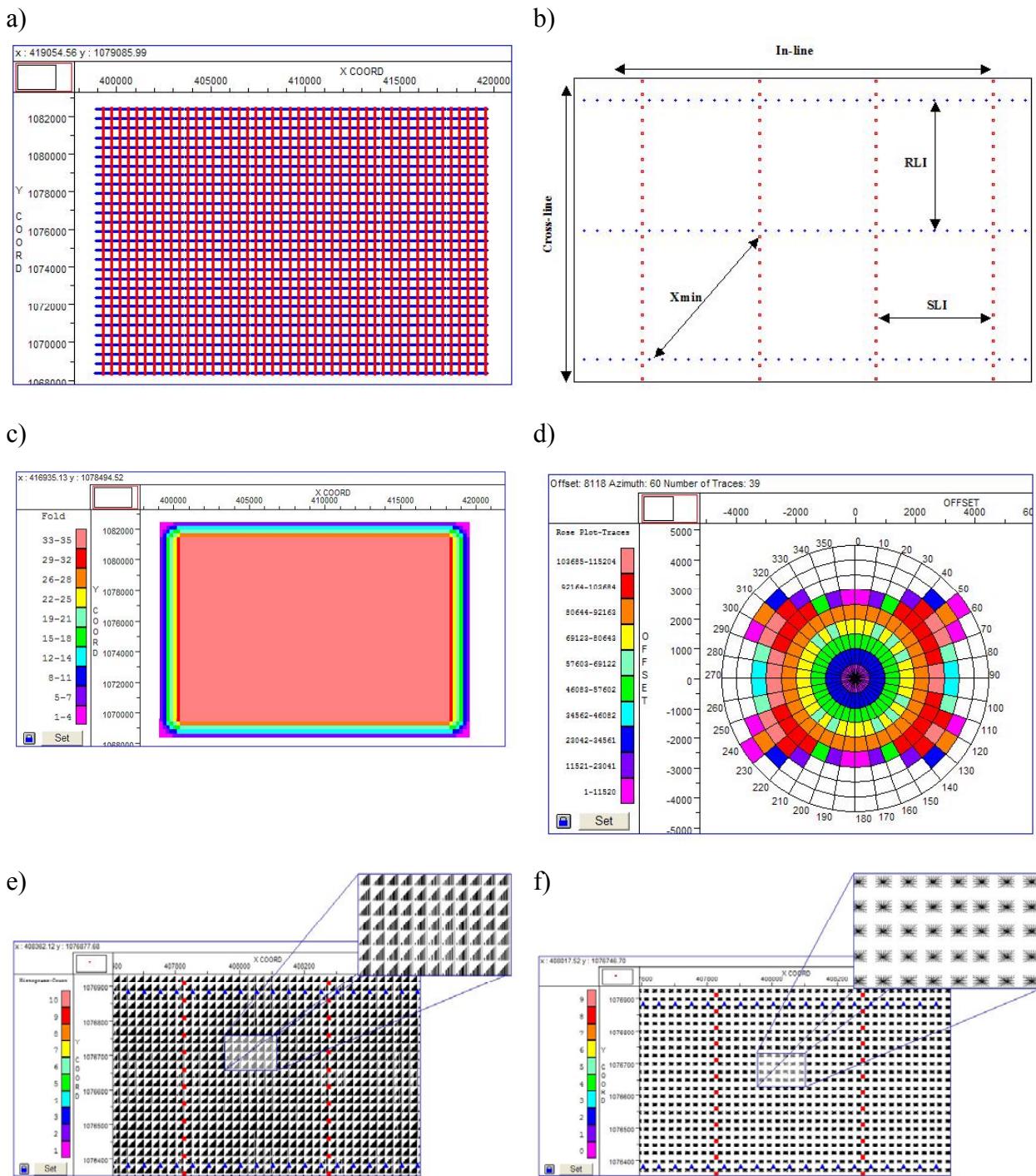


Fig. 3.9- Diseño ortogonal; a)Levantamiento sísmico 3D, b)Acercamiento del levantamiento, c)Distribución de cobertura, d)Muestreo global de offset y azimuts, e)Distribución de offset por cada bin, f)Distribución de azimuts por cada bin.

~ Ladrillo (brick): El diseño tipo ladrillo (Fig. 3.10a, b) se desarrolló en un intento por mejorar la distribución de offset de un diseño ortogonal. Los grupos de fuentes que se encuentran alternados entre las líneas receptoras se mueven, de tal forma, que quedan en el medio de una línea. Por lo tanto, sólo en este caso la separación entre líneas de fuente es exactamente la mitad de la separación entre líneas de fuente de un diseño ortogonal, lo que es igual a 225 m. La distribución de offset en este tipo de diseño es superior que el de tipo ortogonal. El máximo-mínimo offset es mejor que el ortogonal. La desventaja es que existe cambio abrupto de la distribución de offset bin a bin y problemas a la hora de la adquisición.

Si uno considera un bin típico como el definido anteriormente para el ortogonal, entonces se podría mostrar que la medida del offset mínimo es significativamente menor que en un diseño ortogonal, asumiendo el intervalo entre líneas de fuentes y receptores (Fig. 3.10c). El offset mínimo en un diseño tipo ladrillo depende sobre todo del espaciamiento entre líneas. El diseño tipo ladrillo permite un incremento en el intervalo de las líneas receptoras sobre el diseño ortogonal, lo que se hizo precisamente para este estudio, sin incrementar el offset mínimo. Si los puntos de fuentes y receptores son offset que interceptan a las líneas, el offset mínimo es ligeramente pequeño (aproximadamente $\frac{1}{2}$ bin). De la misma forma, este tipo de diseño permite mejorar la distribución de azimuth para un patch rectangular (Fig. 3.10f).

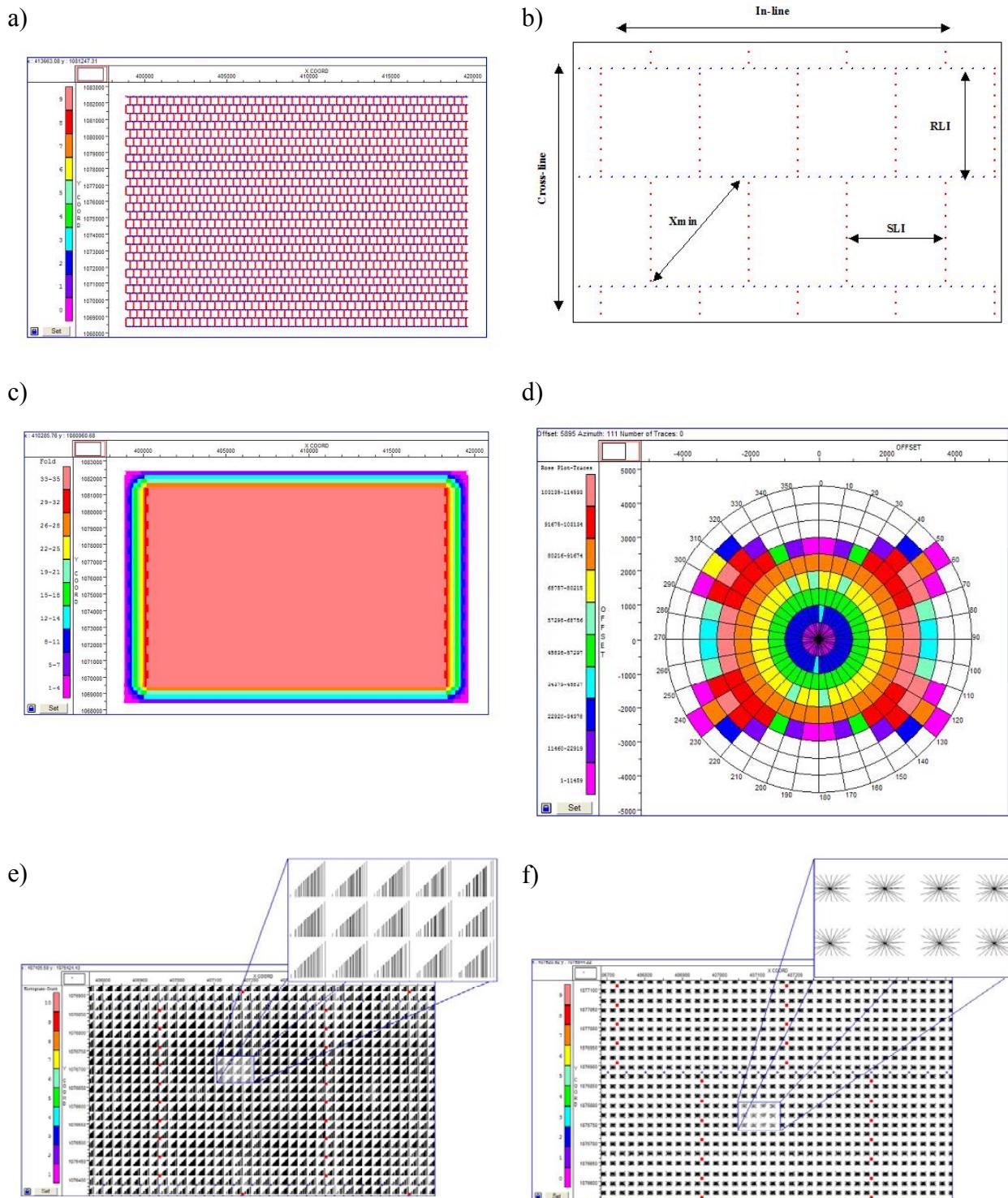


Fig. 3.10- Diseño ladrillo; a)Levantamiento sísmico 3D, b)Acercamiento del levantamiento, c)Distribución de cobertura, d)Muestreo global de offset y azimuts, e)Distribución de offset por cada bin, f) Distribución de azimuts por cada bin.

~ Inclinado o diagonal: Este tipo de diseño se realiza para beneficiar la distribución de offset bin a bin del diseño tipo ladrillo. En un diseño de este tipo se debe tener cuidado cuando se decide la medida del intervalo entre estaciones en la línea, para evitar las huellas en los mapas de cobertura.

Asumiendo un intervalo entre estaciones de 50 m, los puntos de fuente podrían tener un factor elástico o de esfuerzo de:

$$\frac{50\text{m}}{\cos 45^\circ} = \frac{50\text{m}}{0.707} = 71\text{m}$$

Con este esfuerzo, el tamaño del bin de 25 mx25 m puede mantenerse, y los puntos medios caen en el centro del bin. Con un patch de azimuth estrecho, se construye la cobertura rápidamente alrededor de los bordes del estudio en la dirección cross-line. La figura 3.11c muestra la distribución de offset mínimo. La posición del offset mínimo cambia con el ángulo de la línea y el intervalo entre las mismas. La distribución de offset para un ángulo de 45° es bien dispersa, con pocos offsets duplicados (Fig. 3.11d, e). Entre las desventajas tenemos que nuevamente el máximo-mínimo offset puede ser muy grande. Por su parte, la distribución de azimuth es también buena, sin embargo esto depende del número de líneas receptoras en el patch (Fig. 3.11f).

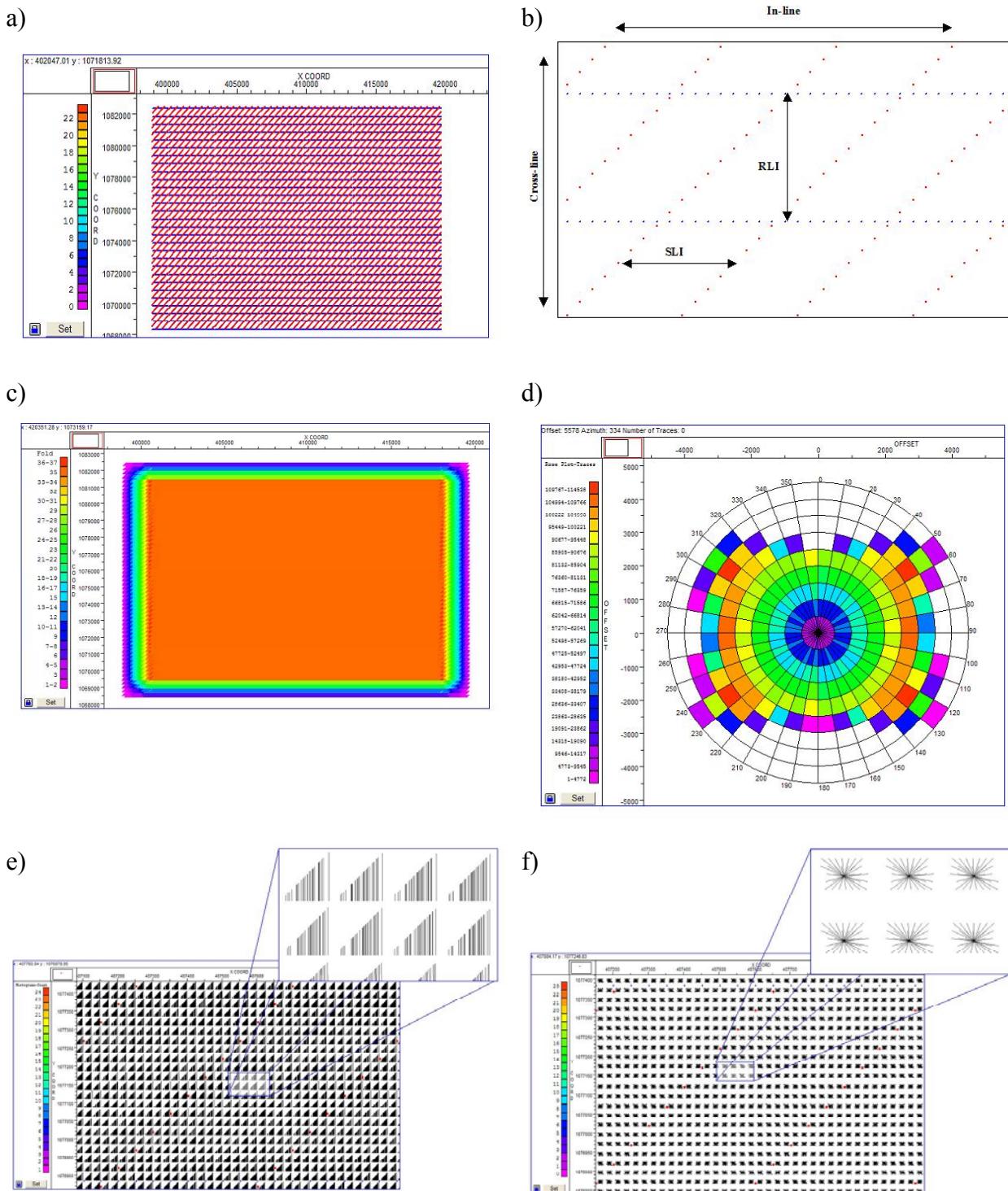


Fig. 3.11- Diseño Diagonal; a)Levantamiento sísmico 3D, b)Acercamiento del levantamiento, c)Distribución de cobertura, d)Muestreo global de offset y azimuts, e)Distribución de offset por cada bin, f)Distribución de azimuts por cada bin.

3.5 Factores que influyen en el Diseño de un proyecto 3D:

- ~ Estructural: debe basarse en datos obtenidos previamente de la sísmica 2D, como buzamiento de la estructura a prospectar, información sobre las velocidades, orientación de las trazas estructurales, calidad de la formación extraída de la cobertura.
- ~ Estratigráfico: es un objetivo más pequeño que el estructural. Está asociado con buzamientos pequeños y puede localizarse en áreas de buen contraste acústico. Permite tener resolución, difracción de las anomalías y orientación del estudio.

3.6 Levantamiento Sísmico 3D

Se diseñaron tres levantamientos sísmicos para el área de Macal, con diferencias básicas en la disposición de las fuentes y receptores, como hemos dicho anteriormente. Entre los obstáculos más importantes figura la presencia de ríos que se indican como zonas de exclusión (fuentes y detectores desactivados). Estas zonas de exclusión tienen un gran impacto en los mapas de cobertura en planta, a parte de los problemas logísticos que facilitan las geometrías aquí propuestas. A continuación, se describirá brevemente el impacto de estas zonas en cada uno de los atributos para los tres levantamientos sísmicos propuestos.

3.6.1 Levantamiento sísmico con geometría ortogonal

Este levantamiento sísmico se muestra en la figura 3.12. Esta geometría ortogonal indica las líneas de fuente orientadas en la dirección norte-sur y las líneas de receptores en la dirección este-oeste.

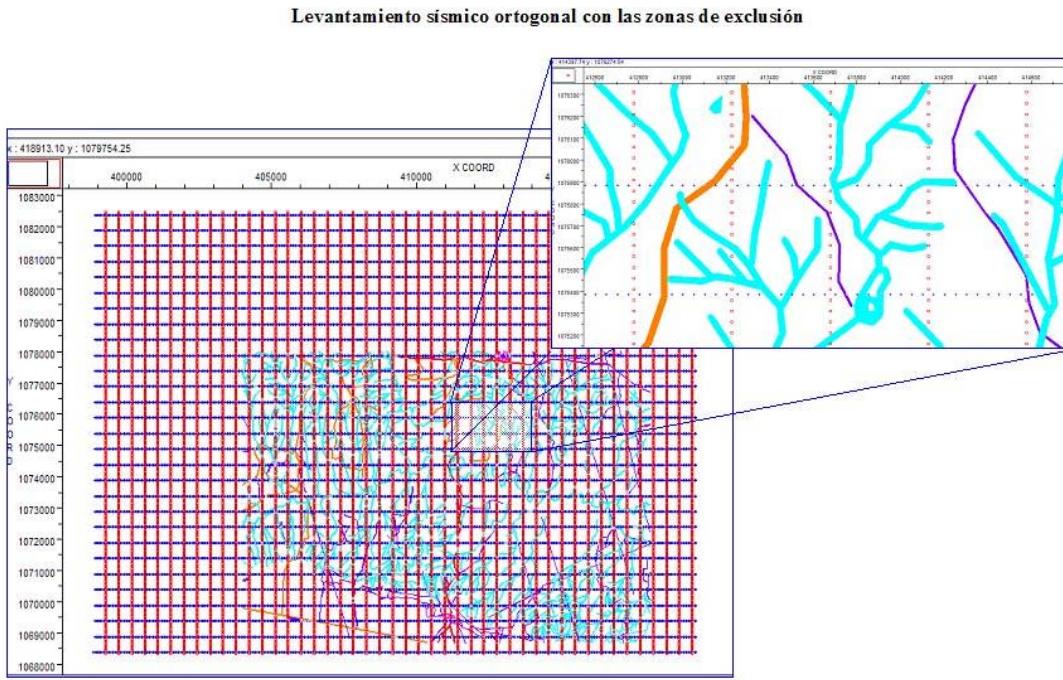


Fig. 3.12- Levantamiento sísmico con geometría ortogonal donde se incluyen las zonas de exclusión. En el acercamiento se observa las fuentes y detectores desactivados.

La figura 3.12. muestra la reducción en el número de fuentes y detectores utilizados en el diseño. De acuerdo con esto, los atributos del levantamiento se ven afectados. En la figura 3.14 se muestra la distribución de cobertura, de offset y azimuth derivados para este levantamiento, y la respuesta a la intervención de las zonas de exclusión en el mismo.

La distribución de offset cercanos muestra muy poca tendencia a los “footprints” o huellas de adquisición. La distribución de offset lejanos es muy parecido al levantamiento diagonal. En general, la distribución de offset y azimuth por cada bin es buena (Fig. 3.14e, f). La distribución de offset y azimuth en el gráfico polar o diagrama de rosa offset/azimuth es restringido, especialmente en los azimuth preferenciales norte-sur (Fig. 3.14d).

Esta geometría muestra una disminución de la multiplicidad de cobertura, en el área donde se encuentran los obstáculos superficiales como son los ríos y sembradíos.

La figura 3.13 muestra un resumen de los parámetros que caracterizan este tipo de diseño.

Station Information		Source Information																											
Station Lines:	29	Shot Lines:	46																										
Total Stations:	12065	Total Shots Points:	13018																										
Live Stations:	12065	Live Shot Points:	13018																										
Unused Stations:	0	Fired Shots:	13018																										
Station Spacing:	50.00 ft	Shot Spacing:	50.00 ft																										
Line Spacing:	500.00 ft	Line Spacing:	450.00 ft																										
Total Length:	113.98 mi	Order Length:	Not Calculated																										
Station Density:	1146.87 /sq. mi	Total Length	122.84 mi																										
Graphical Density:	Not Calculated	Shot Point Density:	1237.46 /sq. mi																										
Survey Size Information																													
X-Extent:	20800.00 ft	Template Size Information																											
Y-Extent:	14100.00 ft	Areal Extents:		Min Channels:	326	Bin Grid	10.55 sq. mi	Max Channels:	1260	Graphical	Not Calculated	Bin Size		<input type="button" value="Calculate Extents Graphically"/>		Bin Width:	25.00			Bin Height:	25.00			<input type="button" value="OK"/>	<input type="button" value="Print"/>			<input type="button" value="Help"/>	
Areal Extents:		Min Channels:	326																										
Bin Grid	10.55 sq. mi	Max Channels:	1260																										
Graphical	Not Calculated	Bin Size																											
<input type="button" value="Calculate Extents Graphically"/>		Bin Width:	25.00																										
		Bin Height:	25.00																										
		<input type="button" value="OK"/>	<input type="button" value="Print"/>																										
		<input type="button" value="Help"/>																											

Fig. 3.13- Resumen de los parámetros utilizados en el levantamiento sísmico ortogonal

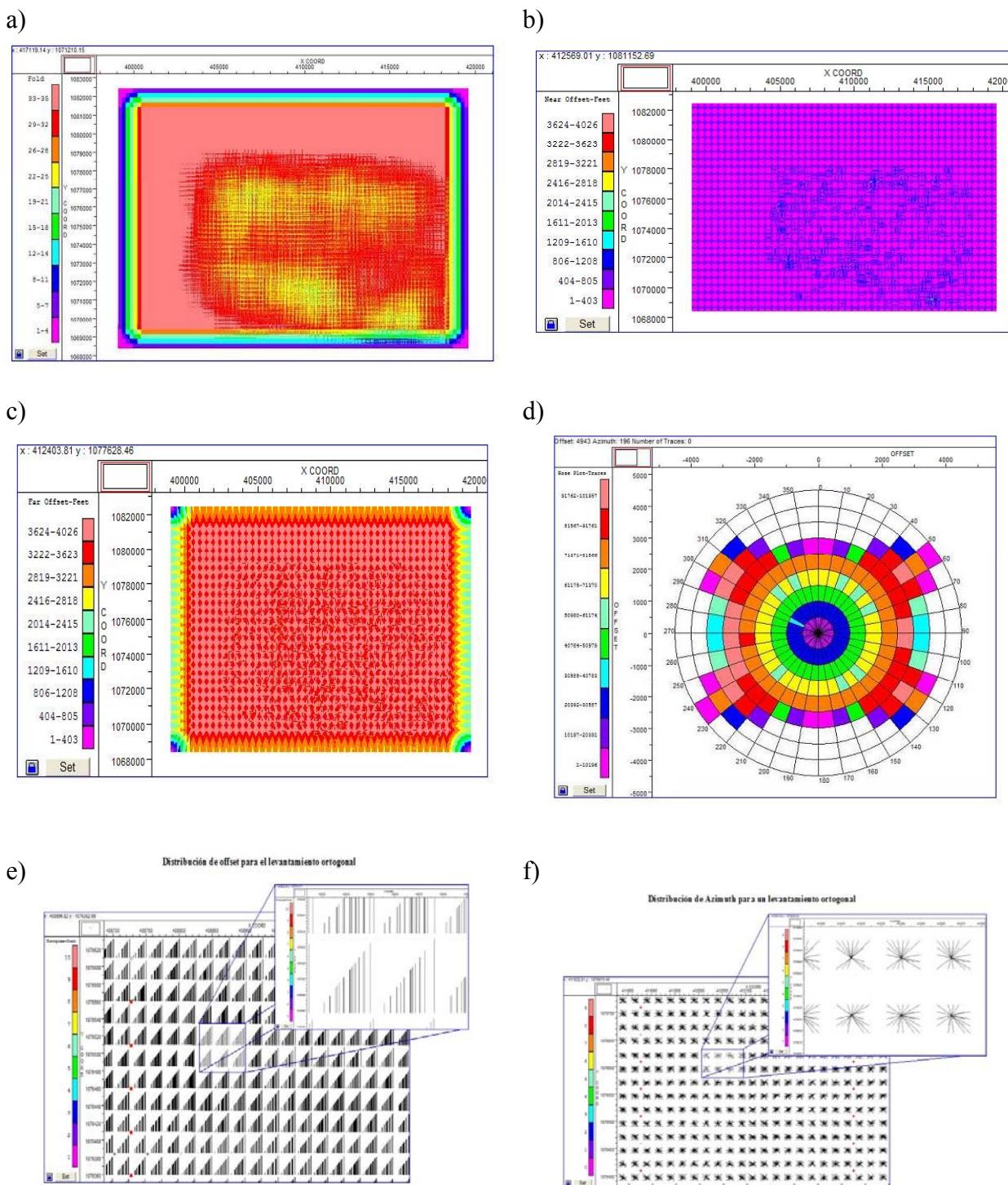


Fig. 3.14- Diseño Ortogonal con la influencia de las zonas de exclusión; a)Mapa de cobertura, b)Distribución de offset cercano, c)Distribución de offset lejano, d)Muestreo global de offset y azimuts, e)Distribución de offset por cada bin, f)Distribución de azimuts por cada bin.

3.6.2 Levantamiento sísmico con geometría diagonal

En la figura 3.15 se muestra el levantamiento sísmico con geometría diagonal, y al igual que en el diseño anterior, se incluyen los obstáculos más importantes dentro del área como son la presencia de ríos que se indican como zonas de exclusión. Como se mencionó anteriormente, estas zonas ocasionan un gran impacto en la distribución de la cobertura, y por consiguiente en los demás atributos del levantamiento, sumado a los problemas de logística. La disposición de las líneas de fuentes en diagonal (45 grados con la horizontal) produce una distribución de offset balanceada en el diseño en planta.

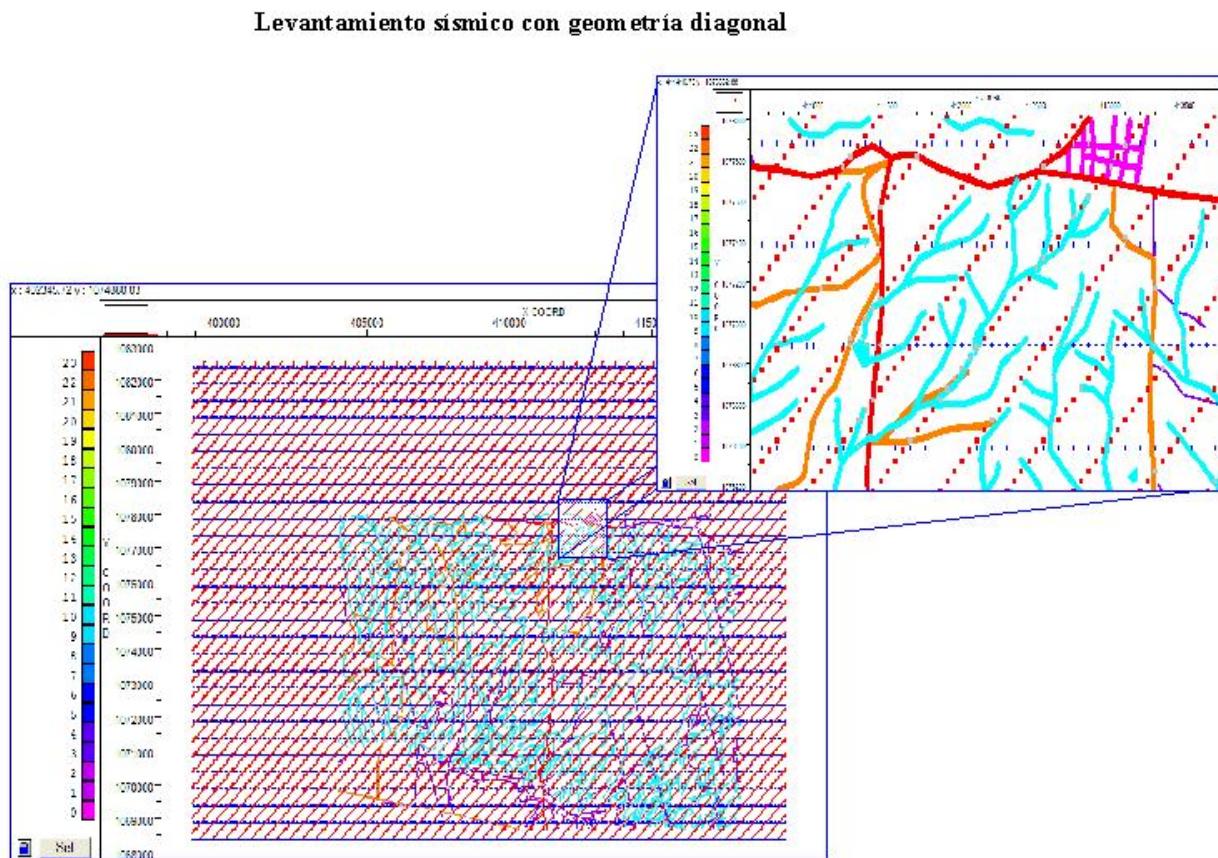


Fig. 3.15- Levantamiento sísmico con geometría diagonal donde se incluyen las zonas de exclusión. En el acercamiento se observan los detectores y fuentes desactivados.

Seguidamente, se muestran los diferentes atributos del levantamiento, como son: la distribución de cobertura, distribución de offset y distribución de azimuth (Fig. 3.17).

La distribución de cobertura presenta una disminución significativa de la multiplicidad (Fig. 3.17a).

En la figura 3.17e se puede observar cierta ausencia de offset cercanos que no es común en todo el levantamiento, por otra parte hay una buena distribución de offset lejanos. Sin embargo esto puede ocasionar problemas en los análisis de velocidades, atenuación de múltiples y pérdida de los datos. La distribución de offset cercanos muestra menos tendencias a las huellas de adquisición.

La distribución de azimuth también es muy buena aunque existe cierta preferencia en la dirección norte-sur, como en las anteriores geometrías (Fig. 3.17f). En el diagrama de rosa o gráfico polar se observa que la distribución es uniforme, casi todos en la misma dimensión, pero persiste la preferencia este-oeste, igual que en las geometrías tipo ladrillo. La distribución de offset lejanos por su parte, es muy parecida al diseño ortogonal, conservando cierta uniformidad en todo el levantamiento.

Los principales parámetros de esta geometría se muestran en la figura 3.16, estos se determinan mediante por el programa “Mesa Core 6.2”.

Información estadística del levantamiento sísmico diagonal

Station Information <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Station Lines:</td><td>29</td></tr> <tr><td>Total Stations:</td><td>12065</td></tr> <tr><td>Live Stations:</td><td>11442</td></tr> <tr><td>Unused Stations:</td><td>623</td></tr> <tr><td>Station Spacing:</td><td>50.00 ft</td></tr> <tr><td>Linc Spacing:</td><td>500.00 ft</td></tr> <tr><td>Total Length:</td><td>103.60 mi</td></tr> <tr><td>Station Density:</td><td>1144.08 /sq. mi</td></tr> <tr><td>Graphical Density:</td><td>Not Calculated</td></tr> </table> Survey Size Information <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>X-Extent:</td><td>20300.14 ft</td></tr> <tr><td>Y-Extent:</td><td>14134.26 ft</td></tr> <tr><td>Areal Extents:</td><td></td></tr> <tr><td> Bin Grid</td><td>10.57 sq. mi</td></tr> <tr><td> Graphical</td><td>Not Calculated</td></tr> <tr><td colspan="2"><input type="button" value="Calculate Extents Graphically"/></td></tr> </table>	Station Lines:	29	Total Stations:	12065	Live Stations:	11442	Unused Stations:	623	Station Spacing:	50.00 ft	Linc Spacing:	500.00 ft	Total Length:	103.60 mi	Station Density:	1144.08 /sq. mi	Graphical Density:	Not Calculated	X-Extent:	20300.14 ft	Y-Extent:	14134.26 ft	Areal Extents:		Bin Grid	10.57 sq. mi	Graphical	Not Calculated	<input type="button" value="Calculate Extents Graphically"/>		Source Information <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Shot Lines:</td><td>77</td></tr> <tr><td>Total Shots Points:</td><td>13110</td></tr> <tr><td>Live Shot Points:</td><td>12477</td></tr> <tr><td>Fired Shots:</td><td>12477</td></tr> <tr><td>Shot Spacing:</td><td>70.71 ft</td></tr> <tr><td>Linc Spacing:</td><td>318.20 ft</td></tr> <tr><td>Order Length:</td><td>Not Calculated</td></tr> <tr><td>Total Length:</td><td>169.39 mi</td></tr> <tr><td>Shot Point Density:</td><td>1243.17 /sq. mi</td></tr> <tr><td>Graphical Density:</td><td>Not Calculated</td></tr> </table> Template Size Information <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Min Channels:</td><td>330</td></tr> <tr><td>Max Channels:</td><td>1257</td></tr> </table> Bin Size <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Bin Width:</td><td>25.00</td></tr> <tr><td>Bin Height:</td><td>25.00</td></tr> </table>	Shot Lines:	77	Total Shots Points:	13110	Live Shot Points:	12477	Fired Shots:	12477	Shot Spacing:	70.71 ft	Linc Spacing:	318.20 ft	Order Length:	Not Calculated	Total Length:	169.39 mi	Shot Point Density:	1243.17 /sq. mi	Graphical Density:	Not Calculated	Min Channels:	330	Max Channels:	1257	Bin Width:	25.00	Bin Height:	25.00
Station Lines:	29																																																										
Total Stations:	12065																																																										
Live Stations:	11442																																																										
Unused Stations:	623																																																										
Station Spacing:	50.00 ft																																																										
Linc Spacing:	500.00 ft																																																										
Total Length:	103.60 mi																																																										
Station Density:	1144.08 /sq. mi																																																										
Graphical Density:	Not Calculated																																																										
X-Extent:	20300.14 ft																																																										
Y-Extent:	14134.26 ft																																																										
Areal Extents:																																																											
Bin Grid	10.57 sq. mi																																																										
Graphical	Not Calculated																																																										
<input type="button" value="Calculate Extents Graphically"/>																																																											
Shot Lines:	77																																																										
Total Shots Points:	13110																																																										
Live Shot Points:	12477																																																										
Fired Shots:	12477																																																										
Shot Spacing:	70.71 ft																																																										
Linc Spacing:	318.20 ft																																																										
Order Length:	Not Calculated																																																										
Total Length:	169.39 mi																																																										
Shot Point Density:	1243.17 /sq. mi																																																										
Graphical Density:	Not Calculated																																																										
Min Channels:	330																																																										
Max Channels:	1257																																																										
Bin Width:	25.00																																																										
Bin Height:	25.00																																																										
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Print"/> <input type="button" value="Help"/>																																																											

Fig. 3.16- Resumen de los parámetros utilizados en el levantamiento sísmico diagonal

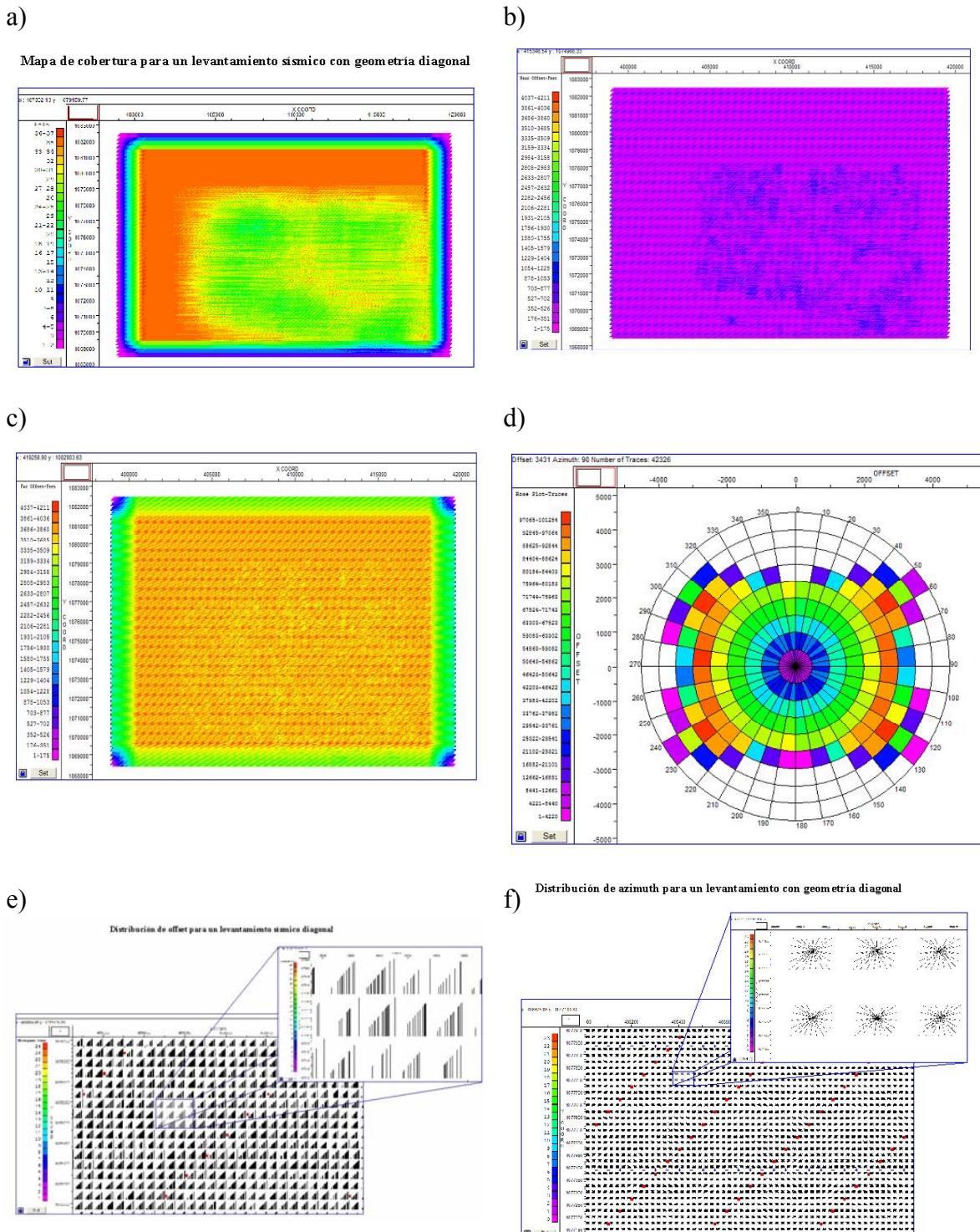


Fig. 3.17- Diseño Diagonal con la influencia de las zonas de exclusión; a) Distribución de Cobertura, b)Distribución de offset cercano, c)Distribución de offset lejano, d)Muestreo global de offset y azimuth, e)Distribución de offset por cada bin, f)Distribución de azimuth por cada bin.

3.6.3 Levantamiento sísmico con geometría tipo ladrillo

En la figura 3.18 se muestra un levantamiento sísmico con geometría tipo ladrillo, donde se señalan las zonas de exclusión (fuentes y detectores son desactivados). En este tipo de diseño tipo ladrillo, los grupos de fuentes que se encuentran alternados entre las líneas receptoras se mueven, de tal forma, que quedan en el medio de una línea. La distribución de offset en este tipo de diseño es superior que el de tipo ortogonal. La cobertura para este tipo de diseño tiene una multiplicidad que se mantiene igual al del diseño ortogonal, entre 25 y 32 (Fig. 3.20a)

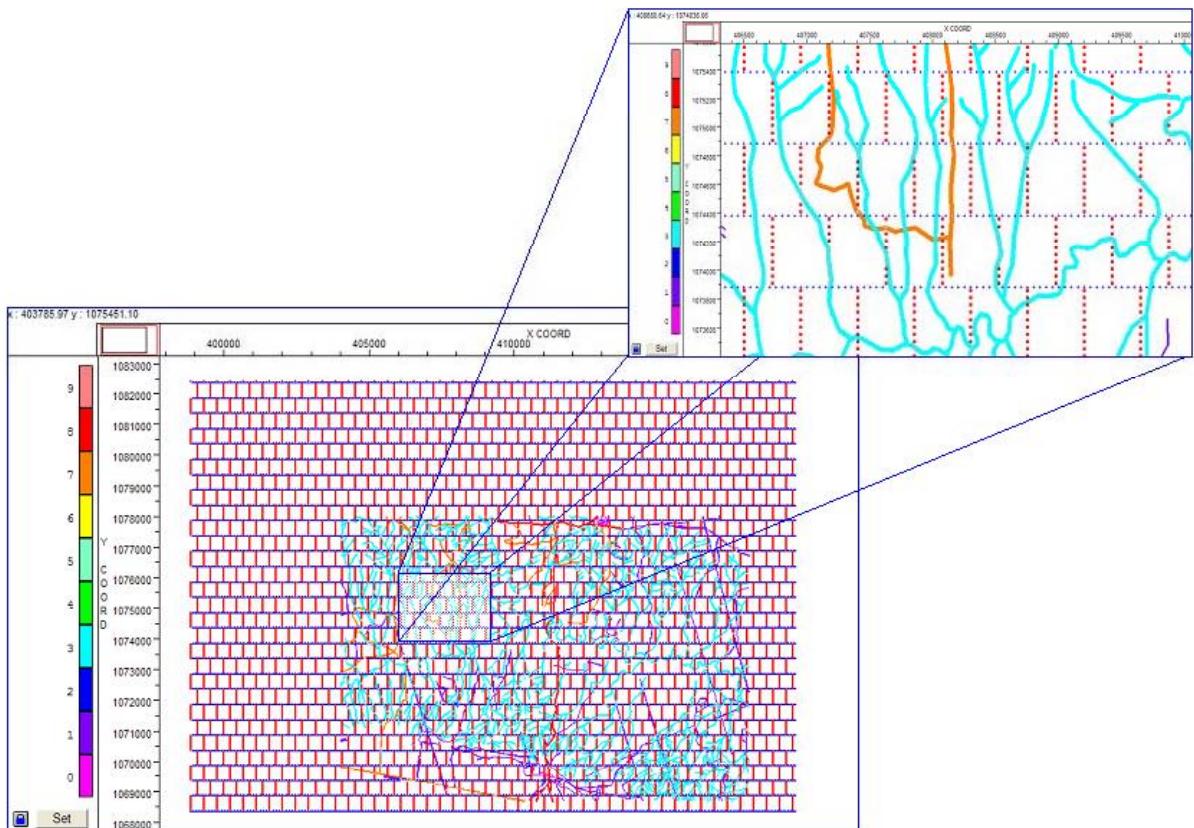


Fig. 3.18- Levantamiento sísmico con geometría tipo ladrillo donde se incluyen las zonas de exclusión. En el acercamiento se observan los detectores y fuentes desactivados

Esta geometría tipo ladrillo muestra las líneas de fuente orientadas, al igual que en el ortogonal, en la dirección norte-sur. Sin embargo, existe la diferencia de que las líneas de fuente están dispuestas como ladrillos, colocadas en la mitad del espaciamiento entre líneas de fuente del anterior diseño ortogonal, mientras que las líneas de receptores conservan su posición original como en el ortogonal.

La distribución de cobertura, offset y azimuth para este levantamiento se muestran en la figura 3.20. En estos gráficos se nota que existen algunos inconvenientes con esta geometría. Existe una disminución de la multiplicidad de la cobertura parecida al diseño ortogonal, justo en la zona afectada por los obstáculos (ríos y sembradíos). Esta multiplicidad varía entre los 5 y 35 (Fig.3.20a).

En este tipo de geometría existe la ausencia de offset cercanos (Fig. 3.20e), por lo cual se presentan pequeñas huellas de adquisición al igual que en el diseño ortogonal. Al no incluir todos los offsets cercanos, se pierden los datos someros aunque esto en este caso no es problemático, debido a que nuestro objetivo de estudio se encuentra a profundidad. Pueden presentarse variaciones de velocidades y anomalías en tiempo. Sin embargo, la distribución de offset es superior a la geometría ortogonal. En cuanto a los offsets lejanos, ésta difiere mucho de la geometría ortogonal y diagonal, mostrando menos uniformidad, en cuanto a la escala de valores de los offsets lejanos para esta geometría son superiores a las geometrías ortogonal y diagonal.

Existe una buena distribución de azimuth (Fig. 3.20f) en todas las direcciones, la cual se repite a lo largo de todo el levantamiento. Sin embargo, en el diagrama de rosa o gráfico polar se puede observar la dirección preferencial este-oeste, y la ausencia de offsets lejanos en la dirección norte-sur (Fig.3.20d).

En la figura 3.19 se muestra el resumen de los parámetros del levantamiento sísmico con geometría tipo ladrillo.

Station Information		Source Information	
Station Lines:	29	Shot Lines:	93
Total Stations:	12065	Total Shots Points:	13067
Live Stations:	11442	Live Shot Points:	12453
Unused Stations:	623	Fired Shots:	12453
Station Spacing:	50.00 ft	Shot Spacing:	50.00 ft
Line Spacing:	500.00 ft	Line Spacing:	225.00 ft
Total Length:	103.60 mi	Order Length:	Not Calculated
Station Density:	1153.00 /sq. mi	Total Length	221.70 mi
Graphical Density:	Not Calculated	Shot Point Density:	1248.76 /sq. mi
Survey Size Information			
X-Extent:	20800.00 ft	Template Size Information	
Y-Extent:	14025.00 ft	Min Channels:	315
Areal Extents:		Max Channels:	1257
Bin Grid	10.50 sq. mi	Bin Size	
Graphical	Not Calculated	Bin Width:	25.00
Calculate Extents Graphically		Bin Height:	25.00
		OK	Print
			Help

Fig. 3.19 - Resumen de los parámetros utilizados en el levantamiento sísmico tipo ladrillo

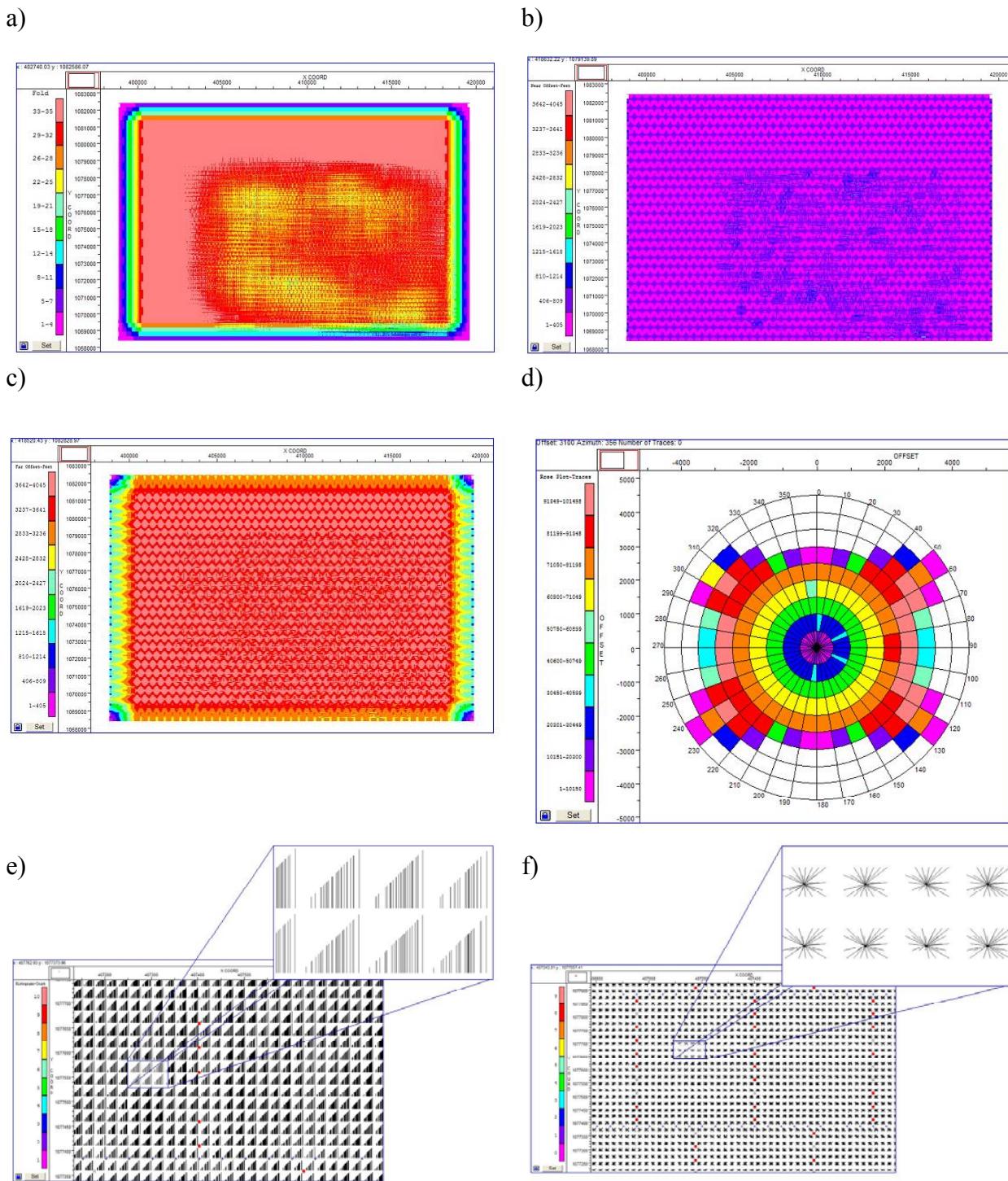


Fig. 3.20- Diseño tipo ladrillo con influencia de las zonas de exclusión; a)Mapa de cobertura, b)Distribución de offset cercanos, c)Distribución de offset lejanos, d)Muestreo global de offset y azimuts, e)Distribución de offset por cada bin, f)Distribución de azimuts por cada bin.

De acuerdo con este análisis, la geometría que mejor se ajusta en términos de costo y logística, es el diseño tipo diagonal, el cual nos permitiría una mejor iluminación del área de acuerdo con las características que ésta presenta, debido a que se trata de análisis exploratorio. Sin embargo, cabe destacar que el diseño con geometría tipo ladrillo sería una opción favorable en cuanto a diagnósticos se refiere, esperando un buena respuesta sísmica del subsuelo. La limitación para este tipo de diseño se presenta en términos de costos, los cuales aumentan por la disposición de fuentes y receptores en el área.

4 CAPITULO IV

4.1 Conclusiones y Recomendaciones

En este trabajo se ha aplicado una metodología de modelado sísmico y geológico cuyos resultados pueden utilizarse para la escogencia de parámetros óptimos de adquisición en el área de Macal. Se generaron un sin número de registros sintéticos, sobre un área estructuralmente compleja de gran importancia para la prospección de hidrocarburos. Mediante el código de modelado sísmico 2D se simulo de la ecuación de onda acústica por diferencias finitas, el cual representa de la manera mas real la propagación de la onda en medios estructuralmente complejos y de los cuales se tiene poco conocimiento de sus propiedades físicas, aun cuando el mismo resulta limitativo en cuanto al tiempo de cómputo. El modelado sísmico por lo tanto, constituye una gran herramienta a la hora de verificar la feabilidad de un modelo propuesto para un área determinada en la que existe incertidumbre.

La aplicación de esta metodología sobre el área de Macal permitió demostrar su utilidad y aplicabilidad en zonas complejas, ayudando de una forma preliminar a determinar la secuencia estratigráfica existente por debajo del pozo perforado sobre el prospecto Macal, a través de la generación de las respuestas sísmicas correspondientes a cada uno de los escenarios propuestos, las cuales fueron estableciendo así algunas conclusiones que ayudarán a determinar esta secuencia estratigráfica.

Durante el modelado sísmico se presentaron ciertos inconvenientes, como el efecto de las difracciones en los registros sintéticos. Esto se solucionó con el suavizado por mínimos cuadrados del modelo de velocidades. El hecho de que el área de interés se encuentre hacia el borde del modelo, ocasionó también otros inconvenientes, por lo cual, hubo que manipular los parámetros de las zonas de absorción y las condiciones de borde dentro del programa de modelado sísmico 2D. Esto acompañado de los contrastes de velocidad e impedancia los cuales son muy pequeños en el área de la cuña, lo que no permite una buena identificación de los horizontes que en ésta se encuentra.

Se pudo obtener la imagen de cero offset para cada uno de los modelos propuestos reproduciendo exactamente el modelo geológico para estos tres escenarios, donde se observó la complejidad estructural del área de estudio. Por otra parte, se generaron las imágenes de los perfiles sísmicos verticales (VSP), los cuales, fueron de gran utilidad para comparar y verificar en tiempo y profundidad la posición de los reflectores de interés en el modelo estructural.

En el caso de los Shot Gathers, no fue posible la observación de todos los topes en los 3 modelos. En el caso del escenario 1 no se observaron los topes de Carapita y Naricual, en el caso del escenario 2 San Juan/San Antonio/Querecual 1 y en el caso del escenario 3, Naricual 1 no se identificó. Esto se debe a que los Shot Gathers permiten observar en detalle es la complejidad estructural del modelo, lo cual, se observa claramente en el desfasaje en un tiempo aproximado de 2 segundos (4 ó 5 km), que señala la inclinación y presencia del corrimiento. Estas hipérbolas llevan una secuencia paralela hasta los 2 segundos antes mencionados.

La generación de sismogramas sintéticos permitió observar el efecto producido por el retraso en tiempo de la ondícula, la influencia de la densidad en su cálculo, así como el efecto que tiene la frecuencia en la perdida de la resolución. La determinación de la frecuencia ideal para generar secciones modeladas más reales también fue posible generando los sismogramas sintéticos. Asimismo, la credibilidad de los modelos de velocidades utilizados para generar los modelos pudo ser cuestionada al comparar sus sismogramas sintéticos con el del pozo, observando también su correspondencia con la sísmica. En general, estos sismogramas sintéticos demostraron que los horizontes de interés se reproducen por el modelado, aun cuando como se dijo hay pérdida de resolución debido a la baja frecuencia usada para modelar.

El efecto de considerar distintos valores de densidades para generar los sintéticos pudo ser observado. Por un lado se consideró una densidad de 1 gr/cm³ (modelado en SU), por el otro la densidad de la corteza (2,3 gr/cm³). La segunda opción demostró producir resultados más reales.

El análisis realizado sobre las curvas t-z, donde se compararon las resultantes del modelado con las extraídas de la sísmica real, nos señala que el escenario mas probable en términos de los

tiempos de viaje resulta ser el primer escenario. Se llega a esta conclusión pues las diferencias entre sísmica-modelo resultaron ser menores. Es importante destacar que de lo modelado, los VSP, y los Shot Gathers indicaron al Escenario 1 como el más probable, a diferencia de las secciones de cero offset que señalaron al tercero como el más probable, fijando el análisis en el área de la cuña.

En cuanto a las velocidades, en términos de semejanza con los VSP y los Check Shot, el escenario 1 es el más probable.

La sísmica real (ET86A-39) presenta una resolución suficiente como para detectar los topes formacionales que se encuentran en la cuña, que constituye la zona de interés ($l/4=82$ m, 91 m, 104 m, respectivamente)

Sobre la base de estos análisis realizados podemos decir, que el escenario 3, correspondiente a la secuencia terciaria, resulta ser el más factible; sin embargo puede decirse que la proposición de este escenario como el más probable es soportado por otros estudios, los cuales, no son presentados en este trabajo, el cual debe ser sometido a ciertas consideraciones que llevaran a la realización de nuevos estudios que permitan su verificación o modificación.

Los diseños en planta de los levantamientos sísmicos 3D, por su parte nos han permitido realizar un estudio detallado de la disposición de las fuentes y receptores antes de ir a campo, tomando en cuenta el objetivo del estudio, y el efecto de los obstáculos superficiales.

Entre las recomendaciones tenemos:

1. Modelar con una frecuencia dominante de 29 Hz, la cual resulta ser la frecuencia que produce sismogramas que se correlacionan bien con la sísmica.
2. Realización de Modelos iniciales uniformes, los cuales permitirían obtener mejores respuestas a la hora de modelar, pues se tendrían modelos mucho más suaves.

3. Analizar los cálculos de offset máximo y su efecto en la iluminación adecuada del objetivo
4. Comparar los diseños en planta con los diseños en el subsuelo y de acuerdo con esto determinar cual es el más factible en términos de costo e iluminación.

5 BIBLIOGRAFÍA

- Aki, K., Richards, P.G., 1980. *Quantitative Seismology. Theory and Methods.* Vol II, Freeman, San Francisco.
- Azuaje, V., *Análisis de patrones de adquisición y de una multilínea en datos del levantamiento experimental MACAL 99.* Abril, 200. USB.
- Carcione, et. al., *Model based simulation for survey planning and optimization.* SEG International Exposition and Sixty-Ninth Annual Meeting. Houston, Texas. Octubre 31-Noviembre 5, 1999.
- Cerquone, H., 1990. *Estudio Comparativo de los levantamientos sísmicos del Norte de Monagas.* Trabajo especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Inédito.
- Fagin, S., 1991. *Seismic Modeling of Geologic Structures, Applications to Exploration Problems.* Society of Exploration Geophysicists.
- Hale, D., 1993, *Sufdmod User's Manual*, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- Hale, D., y Cohen, J.K., 1991, *Triangulated models of the Earths subsurface: Center for Wave Phenomena Report*, CWP-107, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- Hinds, R., *VSP interpretive processing: theory and practice.* Tulsa, Okla: Bob A. Hardage, 1996.
- Holdberg, O., 1987, *Computational Aspects of the Choice of Operatr and Sampling interval for Numerical Diffrentiation in Large-Scale Simulation of Wave Phenomena: Geophysical Prospecting*, 35, 629-655.
- Kaiser, S., 1957, *Numerical Analysis.* McGRAW-HILL Book Company, Inc., 38-104.

Ramos, et. al. , *Trabajo experimental sobre el Corrimiento de Pirital, Norte de Monagas.* VI Congreso Venezolano de Geofísica. Caracas 15-18, 1992.

Lang, P., 1988. *Guide to 3D Acquisition. Land Operations.* SL, Geosource Apendice, 23p.

Liner, C. and Underwood, W., 1999. *3D Seismic design for linear v(z) media.* Geophysics, Vol. 64, No 2.

Marschall, R., 1984. *3D Data Acquisition: Which effort is needed.* 2da edición Dallas, SEG-PRAKLA, 41p.

Morao, H., 1991. *Diseño de parámetros de adquisición sísmica 3D terrestre: El Tejero edo. Monagas,* Universidad Central de Venezuela.

Qin, F., Luo, Y., Olsen, K., Cai, W., and Schuster, G., 1992. *Finite difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts.* Geophysics, Vol. 57, No 3.

Steeple, D., 1998, *Near-Surface Seismology.* Short Course. Society of Exploration Geophysicists and the Near-Surface Geophysics Section of the SEG.

Stone, D., 1994, *Designing Surveys in Two and Three Dimensions.* Society of Exploration Geophysicists.

Vermeer, Gijs J.O, 1990. *Seismic Wavefield Sampling.* Geophysical References, Vol 4. Edited by Michael R. Cooper.

Yilmaz, O., 1987. *Seismic Data Processing.* Society of Exploration Geophysicists.

Simmons, J.W y Guttmann J. M. *States, Waves and Photons: a Modern Introduction to Light.* Addison Wesley Pub.com.

Skily, Richards P.G., 1980. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. Freemann & Company N.Y.

Rojas, E., 2002, *Optimización de parámetros de adquisición mediante el uso integrado del modelo geológico y sísmico: Un estudio 2.5 D en el Oriente de Venezuela*, Universidad Simón Bolívar.

Virieux, J., 1984, *Sh-Wave Propagation in Heterogeneous Media: Velocity-Stress Finite-Difference Method*. Geophysics, 49, 1933-1957.

Virieux, J., 1986, *P-Sv Wave Propagation in Heterogeneous Media: Velocity-Stress Finite-Difference Method*. Geophysics, 51, 889-901.

6 APÉNDICES

6.1 Apéndices I

TRIMODEL - make a triangulated sloth (1/velocity^2) model

```
trimodel >modelfile [optional parameters]
```

Optional Parameters:

xmin=0.0	minimum horizontal coordinate (x)
xmax=1.0	maximum horizontal coordinate (x)
zmin=0.0	minimum vertical coordinate (z)
zmax=1.0	maximum vertical coordinate (z)
xedge=	x coordinates of an edge
zedge=	z coordinates of an edge
sedge=	sloth along an edge
kedge=	array of indices used to identify edges
normray	0:do not generate parameters 1: does it
normface	specify which interface to shoot rays
nrays	number of locations to shoot rays
sfill=	x, z, x0, z0, s00, dsdx, dsdz to fill a
region	
densfill=	x, z, dens to fill a region
qfill=	x, z, Q-factor to fill a region
maxangle=5.0	maximum angle (deg) between adjacent
edge segments	

Notes:

More than set of xedge, zedge, and sedge parameters may be specified, but the numbers of these parameters must be equal.

Within each set, vertices will be connected by fixed edges.

Edge indices in the k array are used to identify edges specified by the x and z parameters. The first k index corresponds to the first set of x and z parameters, the second k index corresponds to the second set, and so on.

After all vertices and their corresponding sloth values have been inserted into the model, the optional sfill parameters are used to fill closed regions bounded by fixed edges.

Let (x, z) denote any point inside a closed region. Sloth inside

this region is determined by $s(x, z) = s00 + (x - x0) * dsdx + (z - z0) * dsdz$.

The (x, z) component of the sfill parameter is used to identify
a
closed region.

6.2 Apéndice II

.265,19.847,20.461,21.301,22.367,23.369,23.984,24.404,24.954,25.
569,26.668,27.573\28.316,28.801,29.318,29.673,29.932,30.000\

zedge=00.740,00.815,00.909,00.940,00.909,00.940,00.878,00.846,00
.784,00.815,00.878,01.035,01.160,01.160,01.066,00.972,00.909,00
.815,00.784,00.752\00.878,01.035,01.097,01.160,01.066,01.066\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\
4
xedge=00.000,00.164,00.855,01.435,01.794,02.098,02.319,02.153,02
.651,03.175,03.562,04.086,04.556,05.136,05.413,05.799,06.324,06
.932,07.540,08.368\09.142,09.942,10.772,11.572,12.125,12.732,13.3
68,15.329,16.075,16.738,17.484,18.451,19.279,20.192,21.048,21.79
4,22.539,22.456,23.008,23.589\24.114,24.887,25.550,26.241,27.014
,27.539,28.174,28.892,29.362,29.887,30.000\

zedge=00.354,00.354,00.299,00.299,00.299,00.326,00.354,00.575,00
.575,00.658,00.658,00.658,00.630,00.519,00.519,00.630,00.796,01
.072,01.293,01.402\01.402,01.293,01.127,00.961,00.851,00.768,00.7
40,00.989,01.127,01.182,01.209,01.265,01.320,01.402,01.679,01.95
5,02.120,02.259,02.452,02.452\02.369,02.313,02.176,02.038,01.845
,01.623,01.486,01.348,01.348,01.348,01.348\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000
,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\
5
xedge=05.413,06.573,07.594,07.954,07.954,08.368,09.059,09.915,10
.688,11.297,12.070,12.595,13.037,13.755,14.390,15.412,16.268,17.
070,18.064,18.893\19.804,20.522,21.048,21.599,21.959,21.876,22.2
91,22.733,23.561,24.528,25.246,26.020,26.820,27.318,27.925,28.72
7,29.252,29.721,29.942,30.000\

zedge=00.519,01.044,01.500,01.571,01.541,01.651,01.706,01.596,01
.458,01.376,01.209,01.209,01.182,01.265,01.376,01.513,01.623,01
.762,01.845,01.845\01.899,02.038,02.231,02.396,02.535,02.645,02.7
00,02.783,02.893,02.977,02.921,02.728,02.507,02.287,02.148,02.03
8,01.845,01.899,01.899,01.899\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000
,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000

```

00,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.00
0,00.000,00.000,00.000,00.000\

6
xedge=06.545,07.070,07.622,08.368,09.142,09.942,10.579,11.297,11
.849,12.457,13.064,13.810,14.556,15.275,15.826,16.489,17.263,17.
981,18.506,19.307\20.081,20.799,21.378,22.097,22.456\

zedge=03.335,03.667,03.915,04.136,04.218,04.164,04.080,04.025,03
.887,03.860,03.804,03.860,03.997,04.108,04.190,04.329,04.357,04.
494,04.577,04.798\05.047,05.240,05.408,05.544,05.598\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\

7
xedge=06.753,07.043,07.457,07.899,08.340,08.866,09.307,09.777,10
.302,10.827,11.462,11.987,12.485,12.871,13.313,13.948,14.529,15.
054,15.605,16.131\16.738,17.484,17.981,18.562,19.058,19.555,20.0
53,20.439,20.909,22.069\

zedge=03.694,03.887,04.053,04.246,04.329,04.439,04.411,04.357,04
.301,04.246,04.164,04.136,04.080,04.053,04.053,04.108,04.218,04.
246,04.329,04.439\04.550,04.605,04.660,04.798,04.964,05.102,05.1
84,05.323,05.433,05.598\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\

8
xedge=08.728,09.391,09.970,10.633,11.462,12.263,12.816,13.341,13
.976,14.666,15.550,16.241,17.014,17.733,18.368,18.920,19.362,19.
776\

zedge=05.460,05.405,05.433,05.295,05.212,05.074,05.019,05.047,05
.102,05.212,05.323,05.460,05.571,05.709,05.737,05.792,05.792,05.
792\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\

9
xedge=05.413,05.572,05.717,05.861,06.007,06.248,06.491,06.545,06
.753,06.926,07.216,07.700,08.183,08.728,09.006,09.731,10.274,10.
699,11.811,12.778\13.746,14.374,15.294,16.164,16.841,17.711,18.2
91,18.533,18.920,19.776,20.516,21.338,22.069,22.456,23.369,24.33

```



```

0,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000
,00.000\
12
xedge=07.264,07.361,08.377,09.392,10.699,11.713,12.730,14.035,14
.907,16.357,18.050,19.113,20.033,19.839,20.661,21.435,22.547,23.
756,25.063,26.320,27.094\28.109,28.932,28.883,29.270,29.851,30.0
00\
zedge=06.951,06.951,06.808,06.612,06.556,06.388,06.277,06.360,06
.444,06.640,06.752,06.780,06.668,06.556,06.500,06.444,06.416,06.
388,06.444,06.528,06.696\07.032,07.143,07.255,07.283,07.367,07.3
67\
sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.
000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
00\
13
xedge=00.000,00.109,00.661,01.159,01.738,02.402,03.286,03.811,04
.722,05.578,06.297,06.876,07.904\
zedge=07.503,07.503,07.503,07.503,07.447,07.447,07.393,07.393,07
.365,07.393,07.338,07.227,07.219\
sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
00\
14
xedge=00.000,00.164,00.634,01.214,01.684,02.457,03.147,03.839,04
.529,05.220,05.662,06.462,07.015,07.705,08.230,07.982,07.512,07.
401,07.264\
zedge=07.835,07.835,07.807,07.835,07.807,07.807,07.779,07.751,07
.751,07.751,07.696,07.696,07.641,07.531,07.447,07.254,07.089,07.
034,06.951\
sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
00\
15
xedge=00.000,00.066,00.068,01.812,03.331,04.722,06.015,07.502,08
.699,10.284,09.736,10.609,11.677,12.873,13.778,14.974,15.944,17.
236,18.335,19.208\20.372,21.148,21.794,22.990,22.829,23.702,24.6
72,25.383,26.158,25.964,26.449,26.578,27.321,28.129,29.130,29.87
3,30.000\
zedge=09.075,09.031,09.031,09.031,09.031,09.031,09.031,09.031,09.031,09
.031,08.750,08.343,08.250,08.062,07.968,07.968,08.031,08.093,08.

```

281,08.343,08.437\08.312,08.312,08.281,08.312,08.125,08.187,08.2
 18,08.281,08.343,08.437,08.562,08.437,08.687,08.843,09.156,09.40
 6,09.406\

 sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
 .000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.
 000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
 00,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.00
 0,00.000\
 16
 xedge=00.000,00.082,00.524,01.242,01.987,02.677,03.562,04.418,04
 .999,05.965,06.794,07.512,08.092,08.755,09.363,10.081,10.606,11.
 130,10.937,10.716\11.103,11.545,12.125,12.595,13.506,14.031,14.3
 90,14.859,15.301,15.771,16.379,16.821,17.595,18.534,19.473,20.05
 3,21.352,22.291,22.843,23.340\23.616,23.616,23.893,24.417,24.970
 ,25.191,25.467,25.771,26.020,26.213,26.544,26.959,27.429,27.650,
 27.953,28.257,28.643,29.003,29.334,29.638\29.998,30.000\

 zedge=10.153,10.153,10.153,10.153,10.153,10.153,10.098,10.042,10
 .042,09.988,09.988,09.960,09.905,09.905,09.794,09.684,09.628,09.
 573,09.380,09.104\09.076,08.966,08.911,08.911,08.883,08.883,08.9
 11,08.911,08.938,08.994,08.994,09.076,09.131,09.104,09.187,09.10
 4,09.159,09.215,09.104,09.022\09.022,08.855,08.883,08.966,08.994
 ,08.994,09.159,09.159,09.187,09.215,09.298,09.408,09.463,09.573,
 09.628,09.684,09.794,09.905,09.960,10.042\10.125,10.125\

 sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
 .000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.
 000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
 00,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000
 ,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,
 00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\
 17
 xedge=25.799,26.406,26.876,27.318,27.787,28.395,28.864,29.500,29
 .859,30.000\

 zedge=05.626,05.654,05.544,05.405,05.295,05.157,05.074,05.074,05
 .129,05.129\

 sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
 .000,00.000\
 18
 xedge=27.045,27.461,27.955,28.448,28.902,29.356,29.659,29.584,29
 .887,30.000\

```

zedge=05.796,05.671,05.547,05.485,05.360,05.422,05.391,05.578,05
.578,05.590\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000\
19      xedge=28.862,28.978,29.356,29.698,30.000\
zedge=06.459,06.420,06.326,06.295,06.295\
sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\
20      xedge=0.0,30.0 \
zedge=11.0,11.0\
sedge=0.0,0.0 \
kedge=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20\
sfill=00.000,00.000,0.0,0,01.000,0,0.0 \
sfill=02.296,00.409,0.0,0,03.048,0,0.0 \
sfill=10.000,00.200,0.0,0,03.048,0,0.0 \
sfill=04.000,00.600,0.0,0,03.810,0,0.0 \
sfill=13.400,00.700,0.0,0,03.810,0,0.0 \
sfill=22.000,00.680,0.0,0,03.810,0,0.0 \
sfill=14.000,00.760,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=24.000,01.500,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=06.000,01.300,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=18.000,01.500,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=08.000,03.000,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=22.000,03.500,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=24.000,04.000,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=08.000,04.200,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=18.000,04.800,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=08.000,05.000,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=16.000,05.000,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=10.000,05.500,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=16.000,05.800,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=08.000,06.700,0.0,0,03.962,0,0.0 \
sfill=20.000,06.200,0.0,0,03.962,0,0.0 \
sfill=08.000,07.500,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=06.283,06.707,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=00.000,07.600,0.0,0,03.962,0,0.0 \
sfill=04.000,07.600,0.0,0,03.962,0,0.0 \
sfill=00.000,07.300,0.0,0,03.505,0,0.0 \
sfill=04.000,07.300,0.0,0,03.505,0,0.0 \
sfill=08.000,06.000,0.0,0,03.505,0,0.0 \
sfill=20.000,06.000,0.0,0,03.505,0,0.0 \
sfill=00.000,10.000,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=00.000,10.155,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=00.000,08.000,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=00.000,01.000,0.0,0,03.657,0,0.0 \
sfill=02.000,01.000,0.0,0,03.657,0,0.0 \

```

```
sfill=28.000,05.500,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=29.000,05.600,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=29.500,06.600,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=29.000,06.300,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=29.000,05.300,0.0,0,04.114,0,0.0 \
>ff1~.dat

# Display X-windows graphics
sxplot <ff1~.dat -geom 1000x1000+0+0 \
        label1="Depth (km)" label2="Distance (km)" \
        title="Modelo Estructural de Macal 1X" tricolor=none
exit 0
```

6.3 Apéndice III

.265,19.847,20.461,21.301,22.367,23.369,23.984,24.404,24.954,25.
569,26.668,27.573\28.316,28.801,29.318,29.673,29.932,30.000\

zedge=00.740,00.815,00.909,00.940,00.909,00.940,00.878,00.846,00
.784,00.815,00.878,01.035,01.160,01.160,01.066,00.972,00.909,00
.815,00.784,00.752\00.878,01.035,01.097,01.160,01.066,01.066\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\
4
xedge=00.000,00.164,00.855,01.435,01.794,02.098,02.319,02.153,02
.651,03.175,03.562,04.086,04.556,05.136,05.413,05.799,06.324,06
.932,07.540,08.368\09.142,09.942,10.772,11.572,12.125,12.732,13.3
68,15.329,16.075,16.738,17.484,18.451,19.279,20.192,21.048,21.79
4,22.539,22.456,23.008,23.589\24.114,24.887,25.550,26.241,27.014
,27.539,28.174,28.892,29.362,29.887,30.000\

zedge=00.354,00.354,00.299,00.299,00.299,00.326,00.354,00.575,00
.575,00.658,00.658,00.658,00.630,00.519,00.519,00.630,00.796,01
.072,01.293,01.402\01.402,01.293,01.127,00.961,00.851,00.768,00.7
40,00.989,01.127,01.182,01.209,01.265,01.320,01.402,01.679,01.95
5,02.120,02.259,02.452,02.452\02.369,02.313,02.176,02.038,01.845
,01.623,01.486,01.348,01.348,01.348,01.348\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000
,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\
5
xedge=05.413,06.573,07.594,07.954,07.954,08.368,09.059,09.915,10
.688,11.297,12.070,12.595,13.037,13.755,14.390,15.412,16.268,17.
070,18.064,18.893\19.804,20.522,21.048,21.599,21.959,21.876,22.2
91,22.733,23.561,24.528,25.246,26.020,26.820,27.318,27.925,28.72
7,29.252,29.721,29.942,30.000\

zedge=00.519,01.044,01.500,01.571,01.541,01.651,01.706,01.596,01
.458,01.376,01.209,01.209,01.182,01.265,01.376,01.513,01.623,01
.762,01.845,01.845\01.899,02.038,02.231,02.396,02.535,02.645,02.7
00,02.783,02.893,02.977,02.921,02.728,02.507,02.287,02.148,02.03
8,01.845,01.899,01.899,01.899\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000
,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000

```

00,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.00
0,00.000,00.000,00.000,00.000\

6
xedge=06.545,07.070,07.622,08.368,09.142,09.942,10.579,11.297,11
.849,12.457,13.064,13.810,14.556,15.275,15.826,16.489,17.263,17.
981,18.506,19.307\20.081,20.799,21.378,22.097,22.456\

zedge=03.335,03.667,03.915,04.136,04.218,04.164,04.080,04.025,03
.887,03.860,03.804,03.860,03.997,04.108,04.190,04.329,04.357,04.
494,04.577,04.798\05.047,05.240,05.408,05.544,05.598\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\

7
xedge=06.753,07.043,07.457,07.899,08.340,08.866,09.307,09.777,10
.302,10.827,11.462,11.987,12.485,12.871,13.313,13.948,14.529,15.
054,15.605,16.131\16.738,17.484,17.981,18.562,19.058,19.555,20.0
53,20.439,20.909,22.069\

zedge=03.694,03.887,04.053,04.246,04.329,04.439,04.411,04.357,04
.301,04.246,04.164,04.136,04.080,04.053,04.053,04.108,04.218,04.
246,04.329,04.439\04.550,04.605,04.660,04.798,04.964,05.102,05.1
84,05.323,05.433,05.598\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\

8
xedge=08.728,09.391,09.970,10.633,11.462,12.263,12.816,13.341,13
.976,14.666,15.550,16.241,17.014,17.733,18.368,18.920,19.362,19.
776\

zedge=05.460,05.405,05.433,05.295,05.212,05.074,05.019,05.047,05
.102,05.212,05.323,05.460,05.571,05.709,05.737,05.792,05.792,05.
792\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\

9
xedge=05.413,05.572,05.717,05.861,06.007,06.248,06.491,06.545,06
.753,06.926,07.216,07.700,08.183,08.728,09.006,09.731,10.274,10.
699,11.811,12.778\13.746,14.374,15.294,16.164,16.841,17.711,18.2
91,18.533,18.920,19.776,20.516,21.338,22.069,22.456,23.369,24.33

```



```

0,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000
,00.000\
12
xedge=07.264,07.361,08.377,09.392,10.699,11.713,12.730,14.035,14
.907,16.357,18.050,19.113,20.033,19.839,20.661,21.435,22.547,23.
756,25.063,26.320,27.094\28.109,28.932,28.883,29.270,29.851,30.0
00\  

zedge=06.951,06.951,06.808,06.612,06.556,06.388,06.277,06.360,06
.444,06.640,06.752,06.780,06.668,06.556,06.500,06.444,06.416,06.
388,06.444,06.528,06.696\07.032,07.143,07.255,07.283,07.367,07.3
67\  

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.
000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
00\  

13
xedge=00.000,00.109,00.661,01.159,01.738,02.402,03.286,03.811,04
.722,05.578,06.297,06.876,07.904\  

zedge=07.503,07.503,07.503,07.503,07.447,07.447,07.393,07.393,07
.365,07.393,07.338,07.227,07.219\  

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
00\  

14
xedge=00.000,00.164,00.634,01.214,01.684,02.457,03.147,03.839,04
.529,05.220,05.662,06.462,07.015,07.705,08.230,07.982,07.512,07.
401,07.264\  

zedge=07.835,07.835,07.807,07.835,07.807,07.807,07.779,07.751,07
.751,07.751,07.696,07.696,07.641,07.531,07.447,07.254,07.089,07.
034,06.951\  

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
00\  

15
xedge=00.000,00.066,00.068,01.812,03.331,04.722,06.015,07.502,08
.699,10.284,09.736,10.609,11.677,12.873,13.778,14.974,15.944,17.
236,18.335,19.208\20.372,21.148,21.794,22.990,22.829,23.702,24.6
72,25.383,26.158,25.964,26.449,26.578,27.321,28.129,29.130,29.87
3,30.000\  

zedge=09.075,09.031,09.031,09.031,09.031,09.031,09.031,09.031,09.031,09
.031,08.750,08.343,08.250,08.062,07.968,07.968,08.031,08.093,08.

```



```

sfill=02.296,00.409,0.0,0,03.048,0,0.0 \
sfill=10.000,00.200,0.0,0,03.048,0,0.0 \
sfill=04.000,00.600,0.0,0,03.810,0,0.0 \
sfill=13.400,00.700,0.0,0,03.810,0,0.0 \
sfill=22.000,00.680,0.0,0,03.810,0,0.0 \
sfill=14.000,00.760,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=24.000,01.500,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=06.000,01.300,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=18.000,01.500,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=08.000,03.000,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=22.000,03.500,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=24.000,04.000,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=08.000,04.200,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=18.000,04.800,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=08.000,05.000,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=16.000,05.000,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=10.000,05.500,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=16.000,05.800,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=08.000,06.700,0.0,0,03.962,0,0.0 \
sfill=20.000,06.200,0.0,0,03.962,0,0.0 \
sfill=08.000,07.500,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=06.283,06.707,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=00.000,07.600,0.0,0,03.962,0,0.0 \
sfill=04.000,07.600,0.0,0,03.962,0,0.0 \
sfill=00.000,07.300,0.0,0,03.505,0,0.0 \
sfill=04.000,07.300,0.0,0,03.505,0,0.0 \
sfill=08.000,06.000,0.0,0,03.505,0,0.0 \
sfill=20.000,06.000,0.0,0,03.505,0,0.0 \
sfill=00.000,10.000,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=00.000,10.155,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=00.000,08.000,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=00.000,01.000,0.0,0,03.657,0,0.0 \
sfill=02.000,01.000,0.0,0,03.657,0,0.0 \
sfill=28.000,05.500,0.0,0,05.790,0,0.0 \
sfill=29.000,06.000,0.0,0,05.790,0,0.0 \
>ff2~.dat

# Display X-windows graphics
sxplot <ff2~.dat -geom 1000x1000+0+0 \
        label1="Depth (km)" label2="Distance (km)" \
        title="Modelo Estructural de Macal 1X" tricolor=none
exit 0

```

6.4 Apéndice IV

.265,19.847,20.461,21.301,22.367,23.369,23.984,24.404,24.954,25.
 569,26.668,27.573\28.316,28.801,29.318,29.673,29.932,30.000\

 zedge=00.740,00.815,00.909,00.940,00.909,00.940,00.878,00.846,00.
 .784,00.815,00.878,01.035,01.160,01.160,01.066,00.972,00.909,00.
 815,00.784,00.752\00.878,01.035,01.097,01.160,01.066,01.066\

 sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.
 .000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.
 000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\
 4
 xedge=00.000,00.164,00.855,01.435,01.794,02.098,02.319,02.153,02.
 .651,03.175,03.562,04.086,04.556,05.136,05.413,05.799,06.324,06.
 932,07.540,08.368\09.142,09.942,10.772,11.572,12.125,12.732,13.3
 68,15.329,16.075,16.738,17.484,18.451,19.279,20.192,21.048,21.79
 4,22.539,22.456,23.008,23.589\24.114,24.887,25.550,26.241,27.014
 ,27.539,28.174,28.892,29.362,29.887,30.000\

 zedge=00.354,00.354,00.299,00.299,00.299,00.326,00.354,00.575,00.
 .575,00.658,00.658,00.658,00.630,00.519,00.519,00.630,00.796,01.
 072,01.293,01.402\01.402,01.293,01.127,00.961,00.851,00.768,00.7
 40,00.989,01.127,01.182,01.209,01.265,01.320,01.402,01.679,01.95
 5,02.120,02.259,02.452,02.452\02.369,02.313,02.176,02.038,01.845
 ,01.623,01.486,01.348,01.348,01.348,01.348\

 sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.
 .000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.
 000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000
 ,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\
 5
 xedge=05.413,06.573,07.594,07.954,07.954,08.368,09.059,09.915,10.
 .688,11.297,12.070,12.595,13.037,13.755,14.390,15.412,16.268,17.
 070,18.064,18.893\19.804,20.522,21.048,21.599,21.959,21.876,22.2
 91,22.733,23.561,24.528,25.246,26.020,26.820,27.318,27.925,28.72
 7,29.252,29.721,29.942,30.000\

 zedge=00.519,01.044,01.500,01.571,01.541,01.651,01.706,01.596,01.
 .458,01.376,01.209,01.209,01.182,01.265,01.376,01.513,01.623,01.
 762,01.845,01.845\01.899,02.038,02.231,02.396,02.535,02.645,02.7
 00,02.783,02.893,02.977,02.921,02.728,02.507,02.287,02.148,02.03
 8,01.845,01.899,01.899,01.899\

 sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.
 .000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000
 ,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000

```

00,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.00
0,00.000,00.000,00.000,00.000\

6
xedge=06.545,07.070,07.622,08.368,09.142,09.942,10.579,11.297,11
.849,12.457,13.064,13.810,14.556,15.275,15.826,16.489,17.263,17.
981,18.506,19.307\20.081,20.799,21.378,22.097,22.456\

zedge=03.335,03.667,03.915,04.136,04.218,04.164,04.080,04.025,03
.887,03.860,03.804,03.860,03.997,04.108,04.190,04.329,04.357,04.
494,04.577,04.798\05.047,05.240,05.408,05.544,05.598\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\

7
xedge=06.753,07.043,07.457,07.899,08.340,08.866,09.307,09.777,10
.302,10.827,11.462,11.987,12.485,12.871,13.313,13.948,14.529,15.
054,15.605,16.131\16.738,17.484,17.981,18.562,19.058,19.555,20.0
53,20.439,20.909,22.069\

zedge=03.694,03.887,04.053,04.246,04.329,04.439,04.411,04.357,04
.301,04.246,04.164,04.136,04.080,04.053,04.053,04.108,04.218,04.
246,04.329,04.439\04.550,04.605,04.660,04.798,04.964,05.102,05.1
84,05.323,05.433,05.598\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\

8
xedge=08.728,09.391,09.970,10.633,11.462,12.263,12.816,13.341,13
.976,14.666,15.550,16.241,17.014,17.733,18.368,18.920,19.362,19.
776\

zedge=05.460,05.405,05.433,05.295,05.212,05.074,05.019,05.047,05
.102,05.212,05.323,05.460,05.571,05.709,05.737,05.792,05.792,05.
792\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000\

9
xedge=05.413,05.572,05.717,05.861,06.007,06.248,06.491,06.545,06
.753,06.926,07.216,07.700,08.183,08.728,09.006,09.731,10.274,10.
699,11.811,12.778\13.746,14.374,15.294,16.164,16.841,17.711,18.2
91,18.533,18.920,19.776,20.516,21.338,22.069,22.456,23.369,24.33

```



```

0,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000
,00.000\
12
xedge=07.264,07.361,08.377,09.392,10.699,11.713,12.730,14.035,14
.907,16.357,18.050,19.113,20.033,19.839,20.661,21.435,22.547,23.
756,25.063,26.320,27.094\28.109,28.932,28.883,29.270,29.851,30.0
00\  

zedge=06.951,06.951,06.808,06.612,06.556,06.388,06.277,06.360,06
.444,06.640,06.752,06.780,06.668,06.556,06.500,06.444,06.416,06.
388,06.444,06.528,06.696\07.032,07.143,07.255,07.283,07.367,07.3
67\  

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.
000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
00\  

13
xedge=00.000,00.109,00.661,01.159,01.738,02.402,03.286,03.811,04
.722,05.578,06.297,06.876,07.904\  

zedge=07.503,07.503,07.503,07.503,07.447,07.447,07.393,07.393,07
.365,07.393,07.338,07.227,07.219\  

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
00\  

14
xedge=00.000,00.164,00.634,01.214,01.684,02.457,03.147,03.839,04
.529,05.220,05.662,06.462,07.015,07.705,08.230,07.982,07.512,07.
401,07.264\  

zedge=07.835,07.835,07.807,07.835,07.807,07.807,07.779,07.751,07
.751,07.751,07.696,07.696,07.641,07.531,07.447,07.254,07.089,07.
034,06.951\  

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
00\  

15
xedge=00.000,00.066,00.068,01.812,03.331,04.722,06.015,07.502,08
.699,10.284,09.736,10.609,11.677,12.873,13.778,14.974,15.944,17.
236,18.335,19.208\20.372,21.148,21.794,22.990,22.829,23.702,24.6
72,25.383,26.158,25.964,26.449,26.578,27.321,28.129,29.130,29.87
3,30.000\  

zedge=09.075,09.031,09.031,09.031,09.031,09.031,09.031,09.031,09.031,09
.031,08.750,08.343,08.250,08.062,07.968,07.968,08.031,08.093,08.

```

281,08.343,08.437\08.312,08.312,08.281,08.312,08.125,08.187,08.2
 18,08.281,08.343,08.437,08.562,08.437,08.687,08.843,09.156,09.40
 6,09.406\

 sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
 .000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.
 000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
 00,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.00
 0,00.000\
 16
 xedge=00.000,00.082,00.524,01.242,01.987,02.677,03.562,04.418,04
 .999,05.965,06.794,07.512,08.092,08.755,09.363,10.081,10.606,11.
 130,10.937,10.716\11.103,11.545,12.125,12.595,13.506,14.031,14.3
 90,14.859,15.301,15.771,16.379,16.821,17.595,18.534,19.473,20.05
 3,21.352,22.291,22.843,23.340\23.616,23.616,23.893,24.417,24.970
 ,25.191,25.467,25.771,26.020,26.213,26.544,26.959,27.429,27.650,
 27.953,28.257,28.643,29.003,29.334,29.638\29.998,30.000\

 zedge=10.153,10.153,10.153,10.153,10.153,10.153,10.098,10.042,10
 .042,09.988,09.988,09.960,09.905,09.905,09.794,09.684,09.628,09.
 573,09.380,09.104\09.076,08.966,08.911,08.911,08.883,08.883,08.9
 11,08.911,08.938,08.994,08.994,09.076,09.131,09.104,09.187,09.10
 4,09.159,09.215,09.104,09.022\09.022,08.855,08.883,08.966,08.994
 ,08.994,09.159,09.159,09.187,09.215,09.298,09.408,09.463,09.573,
 09.628,09.684,09.794,09.905,09.960,10.042\10.125,10.125\

 sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
 .000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.
 000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
 00,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.00
 0,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000
 ,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,
 00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000\
 17
 xedge=25.799,26.406,26.876,27.318,27.787,28.395,28.864,29.500,29
 .859,30.000,30.000\

 zedge=05.626,05.654,05.544,05.405,05.295,05.157,05.074,05.074,05
 .129,05.129,05.128\

 sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
 .000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.0
 00,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.00
 0,00.000,00.000,00.000\00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000
 ,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000\
 18
 xedge=27.014,27.433,27.964,28.594,29.125,29.512,29.706,29.657,29
 .851,30.000\

```

zedge=05.784,05.605,05.437,05.325,05.270,05.298,05.325,05.409,05
.437,05.500\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000,00.000\
19
xedge=27.469,27.626,27.964,28.496,29.029,29.464,29.464,29.851,30
.000\

zedge=06.024,05.968,05.773,05.605,05.577,05.605,05.717,05.773,05
.780\

sedge=00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00.000,00
.000\
20      xedge=0.0,30.0 \
      zedge=11.0,11.0\
      sedge=0.0,0.0 \
kedge=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20\
      sfill=00.000,00.000,0.0,0,01.000,0,0.0 \
      sfill=02.296,00.409,0.0,0,03.048,0,0.0 \
      sfill=10.000,00.200,0.0,0,03.048,0,0.0 \
      sfill=04.000,00.600,0.0,0,03.810,0,0.0 \
      sfill=13.400,00.700,0.0,0,03.810,0,0.0 \
      sfill=22.000,00.680,0.0,0,03.810,0,0.0 \
      sfill=14.000,00.760,0.0,0,04.114,0,0.0 \
      sfill=24.000,01.500,0.0,0,04.114,0,0.0 \
      sfill=06.000,01.300,0.0,0,04.572,0,0.0 \
      sfill=18.000,01.500,0.0,0,04.572,0,0.0 \
      sfill=08.000,03.000,0.0,0,05.242,0,0.0 \
      sfill=22.000,03.500,0.0,0,05.242,0,0.0 \
      sfill=24.000,04.000,0.0,0,05.242,0,0.0 \
      sfill=08.000,04.200,0.0,0,04.114,0,0.0 \
      sfill=18.000,04.800,0.0,0,04.114,0,0.0 \
      sfill=08.000,05.000,0.0,0,04.572,0,0.0 \
      sfill=16.000,05.000,0.0,0,04.572,0,0.0 \
      sfill=10.000,05.500,0.0,0,05.242,0,0.0 \
      sfill=16.000,05.800,0.0,0,05.242,0,0.0 \
      sfill=08.000,06.700,0.0,0,03.962,0,0.0 \
      sfill=20.000,06.200,0.0,0,03.962,0,0.0 \
      sfill=08.000,07.500,0.0,0,04.114,0,0.0 \
      sfill=06.283,06.707,0.0,0,04.572,0,0.0 \
      sfill=00.000,07.600,0.0,0,03.962,0,0.0 \
      sfill=04.000,07.600,0.0,0,03.962,0,0.0 \
      sfill=00.000,07.300,0.0,0,03.505,0,0.0 \
      sfill=04.000,07.300,0.0,0,03.505,0,0.0 \
      sfill=08.000,06.000,0.0,0,03.505,0,0.0 \

```

```

sfill=20.000,06.000,0.0,0,03.505,0,0.0 \
sfill=00.000,10.000,0.0,0,04.572,0,0.0 \
sfill=00.000,10.155,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=00.000,08.000,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=00.000,01.000,0.0,0,03.657,0,0.0 \
sfill=02.000,01.000,0.0,0,03.657,0,0.0 \
sfill=29.000,05.100,0.0,0,05.242,0,0.0 \
sfill=27.500,05.800,0.0,0,03.962,0,0.0 \
sfill=29.000,06.300,0.0,0,04.114,0,0.0 \
sfill=28.000,05.400,0.0,0,03.505,0,0.0 \
sfill=29.000,05.200,0.0,0,03.505,0,0.0 \
>ff3~.dat

# Display X-windows graphics
sxplot <ff3~.dat -geom 1000x1000+0+0\
        label1="Depth (km)" label2="Distance (km)" \
        title="Modelo Estructural de Macal 1X" tricolor=none
exit 0

```

6.5 Apéndice V

```
#include "par.h"
#include "su.h"
#include "segy.h"

/****** self documentation
*****
char *sdoc[ ] = {
",
",
" SUFDMOD2 - Finite-Difference MODeling (2nd order) for acoustic
wave equation",
",
",
" sufdmod2 <vfile >wfile nx= nz= tmax= xs= zs= [optional
parameters]      ",
",
",
" Required Parameters:
",
" <vfile           file containing velocity[nx][nz]
",
" >wfile           file containing waves[nx][nz] for time
steps      ,
" nx=              number of x samples (2nd dimension)
",
" nz=              number of z samples (1st dimension)
",
" xs=              x coordinates of source
",
" zs=              z coordinates of source
",
" tmax=            maximum time
",
",
",
",
" Optional Parameters:
",
" nt=1+tmax/dt    number of time samples (dt determined
for stability) ,
" mt=1             number of time steps (dt) per output time
step   ,
"
",
" dx=1.0           x sampling interval
",
```

```

" fx=0.0                      first x sample
",
" dz=1.0                       z sampling interval
",
" fz=0.0                      first z sample
",
"
",
" fmax = vmin/(10.0*h)    maximum frequency in source wavelet
",
" fpeak=0.5*fmax            peak frequency in ricker wavelet
",
"
",
" dfile=                      input file containing density[nx][nz]
",
" vsx=                        x coordinate of vertical line of
seismograms      ,
" hsz=                        z coordinate of horizontal line of
seismograms      ,
" vsfile=                     output file for vertical line of
seismograms[nz][nt] ,
" hsfile=                     output file for horizontal line of
seismograms[nx][nt] ,
" ssfile=                     output file for source point
seismograms[nt]      ,
" verbose=0                  =1 for diagnostic messages, =2 for more
",
"
",
" ,
" abs=1,1,1,1                 Absorbing boundary conditions on
top,left,bottom,right",
"                                     sides of the model.
",
" ,
"                               =0,1,1,1 for free surface condition on the top
",
"
",
" ,
" ...PML parameters.....
",
" pml_max=1000.0              PML absorption parameter
",
" ,
" pml_thick=0                 half-thickness of pml layer (0 = do not
use PML) ,
"
",
"
```

```

" Notes:
",
" This program uses the traditional explicit second order
differencing ",
" method.
",
"
",
" Two different absorbing boundary condition schemes are
available. The ",
" first is a traditional absorbing boundary condition scheme
created by ",
" Hale, 1990. The second is based on the perfectly matched layer
(PML) ",
" method of Berenger, 1995.
",
"
",
NULL} ;

/*
* Authors: CWP:Dave Hale
*           CWP:modified for SU by John Stockwell, 1993.
*           CWP:added frequency specification of wavelet: Craig
Artley, 1993
*           TAMU:added PML absorbing boundary condition:
*                   Michael Holzrichter, 1998
*
* References: (Hale's absorbing boundary conditions)
* Clayton, R. W., and Engquist, B., 1977, Absorbing boundary
conditions
* for acoustic and elastic wave equations, Bull. Seism. Soc.
Am., 6,
*           1529-1540.
*
* Clayton, R. W., and Engquist, B., 1980, Absorbing boundary
conditions
* for wave equation migration, Geophysics, 45, 895-904.
*
* Hale, D., 1990, Adaptive absorbing boundaries for finite-
difference
* modeling of the wave equation migration, unpublished report
from the
* Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
*
* Richtmyer, R. D., and Morton, K. W., 1967, Difference methods
for

```

```

* initial-value problems, John Wiley & Sons, Inc, New York.
*
* Thomee, V., 1962, A stable difference scheme for the mixed
boundary problem
* for a hyperbolic, first-order system in two dimensions, J.
Soc. Indust.
* Appl. Math., 10, 229-245.
*
* Toldi, J. L., and Hale, D., 1982, Data-dependent absorbing
side boundaries,
* Stanford Exploration Project Report SEP-30, 111-121.
*
* References: (PML boundary conditions)
* Jean-Pierre Berenger, ``A Perfectly Matched Layer for the
Absorption of
* Electromagnetic Waves,'` Journal of Computational Physics,
vol. 114,
* pp. 185-200.
*
* Hastings, Schneider, and Broschat, ``Application of the
perfectly
* matched layer (PML) absorbing boundary condition to elastic
wave
* propagation,'` Journal of the Acoustical Society of America,
* November, 1996.
*
* Allen Taflove, ``Electromagnetic Modeling: Finite Difference
Time
* Domain Methods'', Baltimore, Maryland: Johns Hopkins
University Press,
* 1995, chap. 7, pp. 181-195.
*
*
* Trace header fields set: ns, delrt, tracl, tracr, offset, d1,
d2,
*                                sdepth, trid
*/
***** end self doc *****/
#define ABS0      1
#define ABS1      1
#define ABS2      1
#define ABS3      1

/* Prototypes for PML absorbing boundary conditions */
static void pml_init (int nx, int nz, float dx,
                      float dz, float dt, float **dvv);

```

```

static void pml_absorb (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
                      float **dvv, float **od, float **pm, float **p, float
**pp,
                      int *abs);

/* PML related global variables */
float pml_max;
int pml_thick;
int pml_thickness;

float **cax_b, **cax_r;
float **cbx_b, **cbx_r;
float **caz_b, **caz_r;
float **cbz_b, **cbz_r;
float **dax_b, **dax_r;
float **dbx_b, **dbx_r;
float **daz_b, **daz_r;
float **dbz_b, **dbz_r;

float **ux_b, **ux_r;
float **uz_b, **uz_r;
float **v_b, **v_r;
float **w_b, **w_r;

float dvv_0, dvv_1, dvv_2, dvv_3;
float sigma, sigma_ex, sigma_ez, sigma_mx, sigma_mz;

/* Prototypes for finite differencing */
void ptsrc (float xs, float zs,
            int nx, float dx, float fx,
            int nz, float dz, float fz,
            float dt, float t, float fmax, float fpeak, float tdelay,
            float **s);
void exsrc (int ns, float *xs, float *zs,
            int nx, float dx, float fx,
            int nz, float dz, float fz,
            float dt, float t, float fmax, float **s);
void tstep2 (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
             float **dvv, float **od, float **s,
             float **pm, float **p, float **pp, int *abs);

/* Globals for trace manipulation */
segy cubetr;      /* data cube traces */
segy srctr;       /* source seismogram traces */
segy horiztr;     /* horizontal line seismogram traces */

```

```

segy verttr;      /* vertical line seismogram traces */

int
main(int argc, char **argv)
{
    int ix,iz,it,is;          /* counters */
    int nx,nz,nt,mt;          /* x,z,t,tsizes */

    int verbose;               /* is verbose? */
    int nxs;                   /* number of source x coordinates
*/                                /* number of source y coordinates
*/                                /* total number of sources
ns=nxs=nxz */

    int vs2;                   /* depth in samples of horiz rec
line */
    int hs1;                   /* horiz sample of vert rec line
*/
    float fx;                  /* first x value */
    float dx;                  /* x sample interval */

    float fz;                  /* first z value */
    float dz;                  /* z sample interval */
    float h;                   /* minumum spatial sample
interval */

    float hsz;                 /* z position of horiz receiver
line */
    float vsx;                 /* x position of vertical
receiver line */

    float dt;                  /* time sample interval */
    float fmax;                /* maximum temporal frequency
allowable */
    float fpeak;               /* peak frequency of ricker
wavelet */
    float tdelay=0.;           /* time delay of source beginning
*/

    float vmin;                /* minimum wavespeed in vfile */
    float vmax;                /* maximum wavespeed in vfile */

    float dmin;                /* minimum density in dfile */
    float dmax;                /* maximum density in dfile */

```

```

float tmax;                      /* maximum time to compute */
    float t;                      /* time */
    float *xs;                    /* array of source x coordinates
*/
    float *zs;                    /* array of source z coordinates
*/
    int *ixs;                     /* array of source x sample
locations */
    int *izs;                     /* array of source z sample
locations */
    float **s;                    /* array of source pressure
values */
    float **dvv;                  /* array of velocity values from
vfile */
    float **od;                   /* array of density values from
dfile */

/* pressure field arrays */
float **pm;                      /* pressure field at t-dt */
float **p;                        /* pressure field at t */
float **pp;                       /* pressure field at t+dt */
float **ptemp;                   /* temp pressure array */

/* output data arrays */
float **ss;                      /* source point seismogram array
*/
    float **hs;                   /* seismograms from horiz
receiver line */
    float **vs;                   /* seismograms from vert receiver
line */

/* file names */
char *dfile="";                  /* density file name */
char *vsfile="";                 /* vert receiver seismogram line
file name */
char *hsfile="";                 /* horiz receiver seismogram line
file name */
char *ssfile="";                 /* source point seismogram file
name */

/* input file pointers */
FILE *velocityfp=stdin;          /* pointer to input velocity data
*/
    FILE *densityfp;              /* pointer to input density data
file */

/* output file pointers */

```

```

        FILE *hseisfp=NULL;      /* pointer to output horiz rec
line file */
        FILE *vseisfp=NULL;      /* pointer to output vert rec
line file */
        FILE *sseisfp=NULL;      /* pointer to source point seis
output file */

/* SEGY fields */
long tracl=0;                      /* trace number within a line */
long tracr=0;                      /* trace number within a reel */

/* Absorbing boundary conditions related stuff*/
int abs[4];                         /* absorbing boundary cond. flags
*/
int nabs;                           /* number of values given */

/* hook up getpar to handle the parameters */
initargs(argc,argv);
requestdoc(0);

/* get required parameters */
/* get dimensions of model, maximum duration */
if (!getparint("nx",&nx)) err("must specify nx!");
if (!getparint("nz",&nz)) err("must specify nz!");
if (!getparffloat("tmax",&tmax)) err("must specify
tmax!");

/* get source information, coordinates */
nxs = countparval("xs");
nzs = countparval("zs");
if (nxs!=nzs)
    err("number of xs = %d must equal number of zs =
%d",
           nxs,nzs);
ns = nxs;

if (ns==0) err("must specify xs and zs!");
xs = alloc1ffloat(ns);
zs = alloc1ffloat(ns);
ixs = alloc1int(ns);
izs = alloc1int(ns);
getparffloat("xs",xs);
getparffloat("zs",zs);

/* Get absorbing boundary information */
nabs = countparval("abs");
if (nabs==4) {

```

```

        getparint( "abs" , abs );
} else {
    abs[0] = ABS0;
    abs[1] = ABS1;
    abs[2] = ABS2;
    abs[3] = ABS3;

    if ( !((nabs==4) || (nabs==0)) )
        warn( "Number of abs %d, using
abs=1,1,1,1",nabs );
}

/* get optional parameters */
if (!getparint("nt",&nt)) nt = 0;
if (!getparint("mt",&mt)) mt = 1;
if (!getparffloat("dx",&dx)) dx = 1.0;
if (!getparffloat("fx",&fx)) fx = 0.0;
if (!getparffloat("dz",&dz)) dz = 1.0;
if (!getparffloat("fz",&fz)) fz = 0.0;

if (!getparffloat("pml_max",&pml_max)) pml_max = 1000.0;
if (!getparint("pml_thick",&pml_thick)) pml_thick = 0;
pml_thickness = 2 * pml_thick;

/* source coordinates in samples */
for (is=0 ; is < ns ; ++is) {
    ixs[is] = NINT( ( xs[is] - fx )/dx );
    izs[is] = NINT( ( zs[is] - fz )/dx );
}

/* z-coorinate of horizontal line of detectors */
if (!getparffloat("hsz",&hsz)) hsz = 0.0;
hs1 = NINT( (hsz - fz)/dz );

/* x-coordinate of vertical line of detectors */
if (!getparffloat("vsx",&vsx)) vsx = 0.0;
vs2 = NINT((vsx - fx)/dx );

if (!getparint("verbose",&verbose)) verbose = 0;

/* Input and output file information */
getparstring( "dfile",&dfile);
getparstring( "hsfile",&hsfile);
getparstring( "vsfile",&vsfile);
getparstring( "ssfile",&ssfile);

/* allocate space */

```

```

s = alloc2float(nz,nx);
dvv = alloc2float(nz,nx);
od = alloc2float(nz,nx);
pm = alloc2float(nz,nx);
p = alloc2float(nz,nx);
pp = alloc2float(nz,nx);

/* read velocities */
fread(dvv[0],sizeof(float),nx*nz,velocityfp);

/* determine minimum and maximum velocities */
vmin = vmax = dvv[0][0];
for (ix=0; ix<nx; ++ix) {
    for (iz=0; iz<nz; ++iz) {
        vmin = MIN(vmin,dvv[ix][iz]);
        vmax = MAX(vmax,dvv[ix][iz]);
    }
}

/* determine mininum spatial sampling interval */
h = MIN(ABS(dx),ABS(dz));

/* determine time sampling interval to ensure stability
*/
dt = h/(2.0*vmax);

/* determine maximum temporal frequency to avoid
dispersion */
if (!getparffloat("fmax", &fmax))
fmax = vmin/(10.0*h);

/* compute or set peak frequency for ricker wavelet */
if (!getparffloat("fpeak", &fpeak))      fpeak = 0.5*fmax;

/* determine number of time steps required to reach
maximum time */
if (nt==0) nt = 1+tmax/dt;

/* if requested, open file and allocate space for
seismograms */
/* ... horizontal line of seismograms */
if (*hsfile!=='\0') {
    if((hseisfp=fopen(hsfile,"w"))==NULL)
        err("cannot open hsfile=%s",hsfile);
    hs = alloc2float(nt,nx);
} else {
    hs = NULL;
}

```

```

}

/* ... vertical line of seismograms */
if (*vsfile!='\0') {
    if((vseisfp=fopen(vsfile,"w"))==NULL)
        err("cannot open vsfile=%s",vsfile);
    vs = alloc2float(nt,nz);
} else {
    vs = NULL;
}

/* ... seismograms at the source point */
if (*ssfile!='\0') {
    if((sseisfp=fopen(ssfile,"w"))==NULL)
        err("cannot open ssfile=%s",ssfile);
    ss = alloc2float(nt,ns);
} else {
    ss = NULL;
}

/* if specified, read densities */
if (*dfile!='\0') {
    if((densityfp=fopen(dfile,"r"))==NULL)
        err("cannot open dfile=%s",dfile);
    if
(fread(od[0],sizeof(float),nx*nz,densityfp)!=nx*nz)
        err("error reading dfile=%s",dfile);
    fclose(densityfp);
    dmin = dmax = od[0][0];
    for (ix=0; ix<nx; ++ix) {
        for (iz=0; iz<nz; ++iz) {
            dmin = MIN(dmin,od[ix][iz]);
            dmax = MAX(dmax,od[ix][iz]);
        }
    }
}
/* if densities not specified or constant, make densities
= 1 */
if (*dfile=='\0' || dmin==dmax ) {
    for (ix=0; ix<nx; ++ix)
        for (iz=0; iz<nz; ++iz)
            od[ix][iz] = 1.0;
    dmin = dmax = 1.0;
}

/* compute density*velocity^2 and 1/density and zero time
slices */

```

```

        for (ix=0; ix<nx; ++ix) {
            for (iz=0; iz<nz; ++iz) {
                dvv[ix][iz] =
od[ix][iz]*dvv[ix][iz]*dvv[ix][iz];
                od[ix][iz] = 1.0/od[ix][iz];
                pp[ix][iz] = p[ix][iz] = pm[ix][iz] =
0.0;
            }
        }

/* if densities constant, free space and set NULL pointer */
if (dmin==dmax) {
    free2float(od);
    od = NULL;
}

/* if verbose, print parameters */
if (verbose) {
    warn("nx = %d", nx);
    warn("dx = %g", dx);
    warn("nz = %d", nz);
    warn("dz = %g", dz);
    warn("nt = %d", nt);
    warn("dt = %g", dt);
    warn("tmax = %g", tmax);
    warn("fmax = %g", fmax);
    warn("fpeak = %g", fpeak);
    warn("vmin = %g", vmin);
    warn("vmax = %g", vmax);
    warn("mt = %d", mt);
    warn("pml_max = %g", pml_max);
    warn("pml_half = %d", pml_thick);
    if (dmin==dmax) {
        warn("constant density");
    } else {
        warn("dfile=%s", dfile);
        warn("dmin = %g", dmin);
        warn("dmax = %g", dmax);
    }
}

if (pml_thickness > 0) pml_init (nx, nz, dx, dz, dt,
dvv);

```

```

/* loop ver time steps */
for (it=0,t=0.0; it<nt; ++it,t+=dt) {

    /* if verbose, print time step */
    if (verbose>1) warn("it=%d t=%g",it,t);

    /* update source function */
    if (ns==1)
        ptsrc(xs[0],zs[0],nx,dx,fx,nz,dz,fz,dt,t,
              fmax,fpeak,tdelay,s);
...skipping...
/* Copyright (c) Colorado School of Mines, 1999.*/
/* All rights reserved. */

/* SUFDMOD2: $Revision: 1.8 $ ; $Date: 1996/09/06 16:08:13 $
 */

#include "par.h"
#include "su.h"
#include "segy.h"

***** self documentation
*****
char *sdoc[ ] = {
"
",
" SUFDMOD2 - Finite-Difference MODeling (2nd order) for acoustic
wave equation",
"
",
",
" sufmod2 <vfile >wfile nx= nz= tmax= xs= zs= [optional
parameters]      ",
"
",
",
" Required Parameters:
",
" <vfile           file containing velocity[nx][nz]
",
" >wfile           file containing waves[nx][nz] for time
steps      ,
" nx=             number of x samples (2nd dimension)
",
" nz=             number of z samples (1st dimension)
",
" xs=             x coordinates of source
",

```

```

"  zs=                      z coordinates of source
",
"  tmax=                    maximum time
",
"
",
"  Optional Parameters:
",
"  nt=1+tmax/dt            number of time samples (dt determined for
stability),
"  mt=1                     number of time steps (dt) per output time
step  ",
"
",
"  dx=1.0                  x sampling interval
",
"  fx=0.0                  first x sample
",
"  dz=1.0                  z sampling interval
",
"  fz=0.0                  first z sample
",
"
",
"  fmax = vmin/(10.0*h)    maximum frequency in source wavelet
",
"  fpeak=0.5*fmax          peak frequency in ricker wavelet
",
",
"
",
"  dfile=                   input file containing density[nx][nz]
",
"  vsx=                     x coordinate of vertical line of
seismograms   ",
"  hsz=                     z coordinate of horizontal line of
seismograms   ",
"  vsfile=                  output file for vertical line of
seismograms[nz][nt],
"  hsfile=                  output file for horizontal line of
seismograms[nx][nt],
"  ssfile=                  output file for source point
seismograms[nt]   ",
"  verbose=0                =1 for diagnostic messages, =2 for more
",
"
",
"

```

```

" abs=1,1,1,1      Absorbing boundary conditions on
top,left,bottom,right",
"                                sides of the model.
",
"                                =0,1,1,1 for free surface condition on the top
",
"                                ...PML parameters....
",
" pml_max=1000.0          PML absorption parameter
",
" pml_thick=0           half-thickness of pml layer (0 = do not
use PML)",
"
",
" Notes:
",
" This program uses the traditional explicit second order
differencing",
" method.
",
" ,
"
",
" Two different absorbing boundary condition schemes are
available. The",
" first is a traditional absorbing boundary condition scheme
created by",
" Hale, 1990. The second is based on the perfectly matched layer
(PML)",
" method of Berenger, 1995.
",
" ,
"
",
NULL};

/*
 * Authors: CWP:Dave Hale
 *          CWP:modified for SU by John Stockwell, 1993.
 *          CWP:added frequency specification of wavelet: Craig
Artley, 1993
 *          TAMU:added PML absorbing boundary condition:
 *                  Michael Holzrichter, 1998
 *
 * References: (Hale's absorbing boundary conditions)
 * Clayton, R. W., and Engquist, B., 1977, Absorbing boundary
conditions

```

* for acoustic and elastic wave equations, Bull. Seism. Soc. Am., 6,
* 1529-1540.
*
* Clayton, R. W., and Engquist, B., 1980, Absorbing boundary conditions
* for wave equation migration, Geophysics, 45, 895-904.
*
* Hale, D., 1990, Adaptive absorbing boundaries for finite-difference
* modeling of the wave equation migration, unpublished report from the
* Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
*
* Richtmyer, R. D., and Morton, K. W., 1967, Difference methods for
* initial-value problems, John Wiley & Sons, Inc, New York.
*
* Thomee, V., 1962, A stable difference scheme for the mixed boundary problem
* for a hyperbolic, first-order system in two dimensions, J. Soc. Indust.
* Appl. Math., 10, 229-245.
*
* Toldi, J. L., and Hale, D., 1982, Data-dependent absorbing side boundaries,
* Stanford Exploration Project Report SEP-30, 111-121.
*
* References: (PML boundary conditions)
* Jean-Pierre Berenger, ``A Perfectly Matched Layer for the Absorption of
* Electromagnetic Waves'', Journal of Computational Physics, vol. 114,
* pp. 185-200.
*
* Hastings, Schneider, and Broschat, ``Application of the perfectly
* matched layer (PML) absorbing boundary condition to elastic wave
* propagation'', Journal of the Acoustical Society of America,
* November, 1996.
*
* Allen Taflove, ``Electromagnetic Modeling: Finite Difference Time
* Domain Methods'', Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University Press,
* 1995, chap. 7, pp. 181-195.

```

*
*
* Trace header fields set: ns, delrt, tracl, tracr, offset, d1,
d2,
*                                sdepth, trid
*/
***** end self doc *****/
#define ABS0      1
#define ABS1      1
#define ABS2      1
#define ABS3      1

/* Prototypes for PML absorbing boundary conditions */
static void pml_init (int nx, int nz, float dx,
                      float dz, float dt, float **dvv);
static void pml_absorb (int nx, float dx, int nz, float dz, float
dt,
                       float **dvv, float **od, float **pm, float **p, float
**pp,
                       int *abs);

/* PML related global variables */
float pml_max;
int pml_thick;
int pml_thickness;

float **cax_b, **cax_r;
float **cbx_b, **cbx_r;
float **caz_b, **caz_r;
float **cbz_b, **cbz_r;
float **dax_b, **dax_r;
float **dbx_b, **dbx_r;
float **daz_b, **daz_r;
float **dbz_b, **dbz_r;

float **ux_b,   **ux_r;
float **uz_b,   **uz_r;
float **v_b,    **v_r;
float **w_b,    **w_r;

float dvv_0, dvv_1, dvv_2, dvv_3;
float sigma, sigma_ex, sigma_ez, sigma_mx, sigma_mz;

/* Prototypes for finite differencing */
void ptsrc (float xs, float zs,

```

```

        int nx, float dx, float fx,
        int nz, float dz, float fz,
        float dt, float t, float fmax, float fpeak, float tdelay,
float **s);
void exsrc (int ns, float *xs, float *zs,
            int nx, float dx, float fx,
            int nz, float dz, float fz,
            float dt, float t, float fmax, float **s);
void tstep2 (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
            float **dvv, float **od, float **s,
            float **pm, float **p, float **pp, int *abs);

/* Globals for trace manipulation */
seg_y cubetr;      /* data cube traces */
seg_y srctr;       /* source seismogram traces */
seg_y horiztr;     /* horizontal line seismogram traces */
seg_y verttr;      /* vertical line seismogram traces */

int
main(int argc, char **argv)
{
    int ix,iz,it,is;           /* counters */
    int nx,nz,nt,mt;          /* x,z,t,tsizes */

    int verbose;               /* is verbose? */
    int nxs;                   /* number of source x coordinates
*/
    int nzs;                   /* number of source y coordinates
*/
    int ns;                    /* total number of sources
ns=nxs=nxz */

    int vs2;                   /* depth in samples of horiz rec
line */
    int hsl;                   /* horiz sample of vert rec line
*/
    float fx;                  /* first x value */
    float dx;                  /* x sample interval */

    float fz;                  /* first z value */
    float dz;                  /* z sample interval */
    float h;                   /* minumum spatial sample
interval */

    float hsz;                 /* z position of horiz receiver
line */

```

```

        float vsx;                      /* x position of vertical
receiver line */

        float dt;                       /* time sample interval */
        float fmax;                     /* maximum temporal frequency
allowable */
        float fpeak;                    /* peak frequency of ricker
wavelet */
        float tdelay=0.;                /* time delay of source beginning
*/
        float vmin;                     /* minimum wavespeed in vfile */
        float vmax;                     /* maximum wavespeed in vfile */

        float dmin;                     /* minimum density in dfile */
        float dmax;                     /* maximum density in dfile */

        float tmax;                     /* maximum time to compute */
        float t;                         /* time */
        float *xs;                      /* array of source x coordinates
*/
        float *zs;                      /* array of source z coordinates
*/
        int *ixs;                       /* array of source x sample
locations */
        int *izs;                       /* array of source z sample
locations */
        float **s;                      /* array of source pressure
values */
        float **dvv;                    /* array of velocity values from
vfile */
        float **od;                     /* array of density values from
dfile */

/* pressure field arrays */
        float **pm;                     /* pressure field at t-dt */
        float **p;                      /* pressure field at t */
        float **pp;                     /* pressure field at t+dt */
        float **ptemp;                  /* temp pressure array */

/* output data arrays */
        float **ss;                     /* source point seismogram array
*/
        float **hs;                     /* seismograms from horiz
receiver line */
        float **vs;                     /* seismograms from vert receiver
line */

```

```

/* file names */
char *dfile="";           /* density file name */
char *vsfile="";           /* vert receiver seismogram line
file name */
char *hsfile="";           /* horiz receiver seismogram line
file name */
char *ssfile="";           /* source point seismogram file
name */

/* input file pointers */
FILE *velocityfp=stdin;   /* pointer to input velocity data
*/
FILE *densityfp;          /* pointer to input density data
file */

/* output file pointers */
FILE *hseisfp=NULL;       /* pointer to output horiz rec
line file */
FILE *vseisfp=NULL;       /* pointer to output vert rec
line file */
FILE *sseisfp=NULL;       /* pointer to source point seis
output file */

/* SEGY fields */
long tracl=0;             /* trace number within a line */
long tracr=0;             /* trace number within a reel */

/* Absorbing boundary conditions related stuff*/
int abs[4];               /* absorbing boundary cond. flags
*/
int nabs;                 /* number of values given */

/* hook up getpar to handle the parameters */
initargs(argc,argv);
requestdoc(0);

/* get required parameters */
/* get dimensions of model, maximum duration */
if (!getparint("nx",&nx)) err("must specify nx!");
if (!getparint("nz",&nz)) err("must specify nz!");
if (!getparfloat("tmax",&tmax)) err("must specify
tmax!");

/* get source information, coordinates */
nxs = countparval("xs");
nzs = countparval("zs");
if (nxs!=nzs)

```

```

        err( "number of xs = %d must equal number of zs =
%d" ,
                nxs,nzs);
ns = nxs;

if (ns==0) err("must specify xs and zs!");
xs = alloc1float(ns);
zs = alloc1float(ns);
ixs = alloc1int(ns);
izs = alloc1int(ns);
getparffloat("xs",xs);
getparffloat("zs",zs);

/* Get absorbing boundary information */
nabs = countparval("abs");
if (nabs==4) {
    getparint("abs", abs);
} else {
    abs[0] = ABS0;
    abs[1] = ABS1;
    abs[2] = ABS2;
    abs[3] = ABS3;

    if (!((nabs==4) || (nabs==0)))
        warn("Number of abs %d, using
abs=1,1,1,1",nabs);
}

/* get optional parameters */
if (!getparint("nt",&nt)) nt = 0;
if (!getparint("mt",&mt)) mt = 1;
if (!getparffloat("dx",&dx)) dx = 1.0;
if (!getparffloat("fx",&fx)) fx = 0.0;
if (!getparffloat("dz",&dz)) dz = 1.0;
if (!getparffloat("fz",&fz)) fz = 0.0;

if (!getparffloat("pml_max",&pml_max)) pml_max = 1000.0;
if (!getparint("pml_thick",&pml_thick)) pml_thick = 0;
pml_thickness = 2 * pml_thick;

/* source coordinates in samples */
for (is=0 ; is < ns ; ++is) {
    ixs[is] = NINT( ( xs[is] - fx )/dx );
    izs[is] = NINT( ( zs[is] - fz )/dx );
}

/* z-coorinate of horizontal line of detectors */

```

```

if (!getparffloat("hsz",&hsz)) hsz = 0.0;
hs1 = NINT( (hsz - fz)/dz );

/* x-coordinate of vertical line of detectors */
if (!getparffloat("vsx",&vsx)) vsx = 0.0;
vs2 = NINT((vsx - fx)/dx );

if (!getparint("verbose",&verbose)) verbose = 0;

/* Input and output file information */
getparstring("dfile",&dfile);
getparstring("hsfile",&hsfile);
getparstring("vsfile",&vsfile);
getparstring("ssfile",&ssfile);

/* allocate space */
s = alloc2float(nz,nx);
dvv = alloc2float(nz,nx);
od = alloc2float(nz,nx);
pm = alloc2float(nz,nx);
p = alloc2float(nz,nx);
pp = alloc2float(nz,nx);

/* read velocities */
fread(dvv[0],sizeof(float),nx*nz,velocityfp);

/* determine minimum and maximum velocities */
vmin = vmax = dvv[0][0];
for (ix=0; ix<nx; ++ix) {
    for (iz=0; iz<nz; ++iz) {
        vmin = MIN(vmin,dvv[ix][iz]);
        vmax = MAX(vmax,dvv[ix][iz]);
    }
}

/* determine mininum spatial sampling interval */
h = MIN(ABS(dx),ABS(dz));

/* determine time sampling interval to ensure stability */
dt = h/(2.0*vmax);

/* determine maximum temporal frequency to avoid
dispersion */
if (!getparffloat("fmax", &fmax)) fmax =
vmin/(10.0*h);

```

```

/* compute or set peak frequency for ricker wavelet */
if (!getparffloat("fpeak", &fpeak))      fpeak = 0.5*fmax;

/* determine number of time steps required to reach
maximum time */
if (nt==0) nt = 1+tmax/dt;

/* if requested, open file and allocate space for
seismograms */
/* ... horizontal line of seismograms */
if (*hsfile!='\0') {
    if((hseisfp=fopen(hsfile,"w"))==NULL)
        err("cannot open hsfile=%s",hsfile);
    hs = alloc2float(nt,nx);
} else {
    hs = NULL;
}

/* ... vertical line of seismograms */
if (*vsfile!='\0') {
    if((vseisfp=fopen(vsfile,"w"))==NULL)
        err("cannot open vsfile=%s",vsfile);
    vs = alloc2float(nt,nz);
} else {
    vs = NULL;
}

/* ... seismograms at the source point */
if (*ssfile!='\0') {
    if((sseisfp=fopen(ssfile,"w"))==NULL)
        err("cannot open ssfile=%s",ssfile);
    ss = alloc2float(nt,ns);
} else {
    ss = NULL;
}

/* if specified, read densities */
if (*dfile]!='\0') {
    if((densityfp=fopen(dfile,"r"))==NULL)
        err("cannot open dfile=%s",dfile);
    if
(fread(od[0],sizeof(float),nx*nz,densityfp)!=nx*nz)
        err("error reading dfile=%s",dfile);
    fclose(densityfp);
    dmin = dmax = od[0][0];
    for (ix=0; ix<nx; ++ix) {
        for (iz=0; iz<nz; ++iz) {

```

```

                dmin = MIN(dmin,od[ix][iz]);
                dmax = MAX(dmax,od[ix][iz]);
            }
        }
    }

/* if densities not specified or constant, make densities
= 1 */
if (*dfile=='\0' || dmin==dmax ) {
    for (ix=0; ix<nx; ++ix)
        for (iz=0; iz<nz; ++iz)
            od[ix][iz] = 1.0;
    dmin = dmax = 1.0;
}

/* compute density*velocity^2 and 1/density and zero time
slices */
for (ix=0; ix<nx; ++ix) {
    for (iz=0; iz<nz; ++iz) {
        dvv[ix][iz] =
od[ix][iz]*dvv[ix][iz]*dvv[ix][iz];
        od[ix][iz] = 1.0/od[ix][iz];
        pp[ix][iz] = p[ix][iz] = pm[ix][iz] =
0.0;
    }
}

/* if densities constant, free space and set NULL pointer
*/
if (dmin==dmax) {
    free2float(od);
    od = NULL;
}

/* if verbose, print parameters */
if (verbose) {
    warn("nx = %d",nx);
    warn("dx = %g",dx);
    warn("nz = %d",nz);
    warn("dz = %g",dz);
    warn("nt = %d",nt);
    warn("dt = %g",dt);
    warn("tmax = %g",tmax);
    warn("fmax = %g",fmax);
    warn("fpeak = %g",fpeak);
    warn("vmin = %g",vmin);
    warn("vmax = %g",vmax);
}

```

```

        warn( "mt = %d",mt );
        warn( "pml_max = %g",pml_max );
        warn( "pml_half = %d",pml_thick );
        if (dmin==dmax) {
            warn( "constant density" );
        } else {
            warn( "dfile=%s",dfile );
            warn( "dmin = %g",dmin );
            warn( "dmax = %g",dmax );
        }
    }

    if (pml_thickness > 0) pml_init (nx, nz, dx, dz, dt,
dvv);

/* loop ver time steps */
for (it=0,t=0.0; it<nt; ++it,t+=dt) {

    /* if verbose, print time step */
    if (verbose>1) warn("it=%d t=%g",it,t);

    /* update source function */
    if (ns==1)
        ptsrc(xs[0],zs[0],nx,dx,fx,nz,dz,fz,dt,t,
              fmax,fpeak,tdelay,s);
    else
        exsrc(ns,xs,zs,nx,dx,fx,nz,dz,fz,dt,t,fmax,s);

    /* do one time step */
    tstep2(nx,dx,nz,dz,dt,dvv,od,s,pm,p,pp,abs);

    /* write waves */
    if (it%mt==0) {

        /* set selected trace header fields for
all traces */
        cubetr.sx = xs[0];
        cubetr.sdepth = zs[0];
        cubetr.trid = 30 ;
        cubetr.ns = nz ;
        cubetr.d1 = dz ;
        cubetr.d2 = dx ;
    }
}

```

```

        /* account for delay in source starting
time */
        cubetr.delrt = - 1000.0 * tdelay;

        tracl = 0 ;

        /* set selected trace header fields trace
by trace */
        for (ix=0 ; ix < nx ; ++ix) {
            ++tracl;
            ++tracr;

            cubetr.offset = ix * dx - xs[0];
            cubetr.tracl = (int) tracl;
            cubetr.tracr = (int) tracr;

            for (iz=0 ; iz < nz ; ++iz) {
                cubetr.data[iz] =
pp[ix][iz];
            }
        /* output traces of data cube */
        fputtr(stdout, &cubetr);
    }

/* if requested, save horizontal line of
seismograms */
if (hs!=NULL) {
    for (ix=0; ix<nx; ++ix)
        hs[ix][it] = pp[ix][hs1];
}

/* if requested, save vertical line of
seismograms */
if (vs!=NULL) {
    for (iz=0; iz<nz; ++iz)
        vs[iz][it] = pp[vs2][iz];
}

/* if requested, save seismograms at source
locations */
if (ss!=NULL) {
    for (is=0; is<ns; ++is)
        ss[is][it] =
pp[ixs[is]][izs[is]];
}

```

```

        /* roll time slice pointers */
        ptemp = pm;
        pm = p;
        p = pp;
        pp = ptemp;
    }

/* if requested, write horizontal line of seismograms */
if (hs!=NULL) {

    horiztr.sx = xs[0];
    horiztr.sdepth = zs[0];
    horiztr.trid = 1;
    horiztr.ns = nt ;
    horiztr.dt = 1000000 * dt ;
    horiztr.d2 = dx ;

    /* account for delay in source starting time */
    horiztr.delrt = -1000.0 * tdelay ;

    tracl = tracr = 0;
    for (ix=0 ; ix < nx ; ++ix){
        ++trac1;
        ++tracr;

        /* offset from first source location */
        horiztr.offset = ix * dx - xs[0];

        horiztr.tracl = (int) tracl;
        horiztr.tracr = (int) tracr;

        for (it = 0 ; it < nt ; ++it){
            horiztr.data[it] = hs[ix][it];
        }
    }

    fputtr(hseisfp , &horiztr);
}

fclose(hseisfp);
}

/* if requested, write vertical line of seismograms */
if (vs!=NULL) {

    verttr.trid = 1;
    verttr.ns = nt ;

```

```

verttr.sx = xs[0];
verttr.sdepth = zs[0];
verttr.dt = 1000000 * dt ;
verttr.d2 = dx ;
/* account for delay source starting time */
verttr.delrt = -1000.0 * tdelay ;

trac1 = tracr = 0;
for (iz=0 ; iz < nz ; ++iz){
    ++trac1;
    ++tracr;

    /* vertical line implies offset in z */
    verttr.offset = iz * dz - zs[0];

    verttr.trac1 = (int) trac1;
    verttr.tracr = (int) tracr;

    for (it = 0 ; it < nt ; ++it){
        verttr.data[it] = vs[iz][it];
    }

    fputtr(vseisfp , &verttr);
}

fclose(vseisfp);
}

/* if requested, write seismogram at source position */
if (ss!=NULL) {

    srctr.trid = 1;
    srctr.ns = nt ;
    srctr.dt = 1000000 * dt ;
    srctr.d2 = dx ;
    srctr.delrt = -1000.0 * tdelay ;

    trac1 = tracr = 0;
    for (is=0 ; is < ns ; ++is){
        ++trac1;
        ++tracr;

        srctr.sx = xs[is];
        srctr.sdepth = zs[is];
        srctr.trac1 = (int) trac1;
        srctr.tracr = (int) tracr;
}

```

```

        for (it = 0 ; it < nt ; ++it){
            srctr.data[it] = ss[is][it];
        }

        fputtr(sseisfp , &srctr);
    }

    fclose(sseisfp);
}

/* free space before returning */
free2float(s);
free2float(dvv);
free2float(pm);
free2float(p);
free2float(pp);

if (od!=NULL) free2float(od);
if (hs!=NULL) free2float(hs);
if (vs!=NULL) free2float(vs);
if (ss!=NULL) free2float(ss);

return EXIT_SUCCESS;
}

void exsrc (int ns, float *xs, float *zs,
            int nx, float dx, float fx,
            int nz, float dz, float fz,
            float dt, float t, float fmax, float **s)
*****
*****exsrc - update source pressure function for an extended source
*****Input:
ns                  number of x,z coordinates for extended source
xs                  array[ns] of x coordinates of extended source
zs                  array[ns] of z coordinates of extended source
nx                  number of x samples
dx                  x sampling interval
fx                  first x sample
nz                  number of z samples
dz                  z sampling interval
fz                  first z sample
dt                  time step (ignored)

```

```

t           time at which to compute source function
fmax       maximum frequency

Output:
s           array[nx][nz] of source pressure at time t+dt
*****
***** Author: Dave Hale, Colorado School of Mines, 03/01/90
*****
***** */
{
    int ix,iz,ixv,izv,is;
    float sigma,tbias,ascale,tscale,ts,xn,zn,
          v,xv,zv,dxdv,dzdv,xvn,zvn,amp,dv,dist,distprev;
    static float *vs,(*xsd)[4],(*zsd)[4];
    static int made=0;

    /* if not already made, make spline coefficients */
    if (!made) {
        vs = alloc1float(ns);
        xsd = (float(*)[4])alloc1float(ns*4);
        zsd = (float(*)[4])alloc1float(ns*4);
        for (is=0; is<ns; ++is)
            vs[is] = is;
        cmonot(ns,vs,xs,xsd);
        cmonot(ns,vs,zs,zsd);
        made = 1;
    }

    /* zero source array */
    for (ix=0; ix<nx; ++ix)
        for (iz=0; iz<nz; ++iz)
            s[ix][iz] = 0.0 *dt ;

    /* compute time-dependent part of source function */
    sigma = 0.25/fmax;
    tbias = 3.0*sigma;
    ascale = -exp(0.5)/sigma;
    tscale = 0.5/(sigma*sigma);
    if (t>2.0*tbias) return;
    ts = ascale*(t-tbias)*exp(-tscale*(t-tbias)*(t-tbias));

    /* loop over extended source locations */
    for (v=vs[0],distprev=0.0,dv=1.0; dv!=0.0;
         distprev=dist,v+=dv) {

```

```

        /* determine x(v), z(v), dx/dv, and dz/dv along
source */
        intcub(0,ns,vs,xsd,1,&v,&xv);
        intcub(0,ns,vs,zsd,1,&v,&zv);
        intcub(1,ns,vs,xsd,1,&v,&dxdv);
        intcub(1,ns,vs,zsd,1,&v,&dzdv);

        /* determine increment along extended source */
        if (dxdv==0.0)
            dv = dz/ABS(dzdv);
        else if (dzdv==0.0)
            dv = dx/ABS(dxdv);
        else
            dv = MIN(dz/ABS(dzdv),dx/ABS(dxdv));
        if (v+dv>vs[ns-1]) dv = vs[ns-1]-v;
        dist =
dv*sqrt(dzdv*dzdv+dx*dx)/sqrt(dx*dx+dz*dz);

        /* determine source amplitude */
        amp = (dist+distprev)/2.0;

        /* let source contribute within limited distance
*/
        xvn = (xv-fx)/dx;
        zvn = (zv-fz)/dz;
        ixv = NINT(xvn);
        izv = NINT(zvn);
        for (ix=MAX(0,ixv-3); ix<=MIN(nx-1,ixv+3); ++ix)
{
            for (iz=MAX(0,izv-3); iz<=MIN(nz-
1,izv+3); ++iz) {
                xn = ix-xvn;
                zn = iz-zvn;
                s[ix][iz] += ts*amp*exp(-xn*xn-
zn*zn);
            }
        }
}

/* prototype of subroutine used internally */
static float ricker (float t, float fpeak);

void ptsrc (float xs, float zs,
            int nx, float dx, float fx,
            int nz, float dz, float fz,

```

```

        float dt, float t, float fmax, float fpeak, float tdelay,
float **s)
/*********************************************
*****
ptsrc - update source pressure function for a point source
*****
*****
Input:
xs                  x coordinate of point source
zs                  z coordinate of point source
nx                  number of x samples
dx                  x sampling interval
fx                  first x sample
nz                  number of z samples
dz                  z sampling interval
fz                  first z sample
dt                  time step (ignored)
t                   time at which to compute source function
fmax                maximum frequency (ignored)
fpeak               peak frequency

Output:
tdelay              time delay of beginning of source function
s                  array[nx][nz] of source pressure at time t+dt
*****
*****
Author:  Dave Hale, Colorado School of Mines, 03/01/90
*****
*****
*/
{
    int ix,iz,ixs,izs;
    float ts,xn,zn,xsn,zsn;

    /* zero source array */
    for (ix=0; ix<nx; ++ix)
        for (iz=0; iz<nz; ++iz)
            s[ix][iz] = 0.0 * dt*fmax;

    /* compute time-dependent part of source function */
    /* fpeak = 0.5*fmax;  this is now getparred */

    tdelay = 1.0/fpeak;
    if (t>2.0*tdelay) return;
    ts = ricker(t-tdelay,fpeak);

    /* let source contribute within limited distance */
    xsn = (xs-fx)/dx;
}

```

```

        zsn = (zs-fz)/dz;
        ixs = NINT(xsn);
        izes = NINT(zsn);
        for (ix=MAX(0,ixs-3); ix<=MIN(nx-1,ixs+3); ++ix) {
            for (iz=MAX(0,izes-3); iz<=MIN(nz-1,izes+3); ++iz)
{
                xn = ix-xsn;
                zn = iz-zsn;
                s[ix][iz] = ts*exp(-xn*xn-zn*zn);
}
}
}

static float ricker (float t, float fpeak)
/***********************
*****ricker - Compute Ricker wavelet as a function of time
*****ricker - Compute Ricker wavelet as a function of time
*****Input:
t                  time at which to evaluate Ricker wavelet
fpeak              peak (dominant) frequency of wavelet
*****Notes:
The amplitude of the Ricker wavelet at a frequency of 2.5*fpeak
is
approximately 4 percent of that at the dominant frequency fpeak.
The Ricker wavelet effectively begins at time t = -1.0/fpeak.
Therefore,
for practical purposes, a causal wavelet may be obtained by a
time delay
of 1.0/fpeak.
The Ricker wavelet has the shape of the second derivative of a
Gaussian.
*****Author:  Dave Hale, Colorado School of Mines, 04/29/90
******/
{
    float x,xx;

    x = PI*fpeak*t;
    xx = x*x;
    /* return (-6.0+24.0*xx-8.0*xx*xx)*exp(-xx); */
    /* return PI*fpeak*(4.0*xx*x-6.0*x)*exp(-xx); */
}

```

```

        return exp(-xx)*(1.0-2.0*xx);
    }

/* 2D finite differencing subroutine */

/* functions declared and used internally */
static void star1 (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
                   float **dvv, float **od, float **s,
                   float **pm, float **p, float **pp);
static void star2 (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
                   float **dvv, float **od, float **s,
                   float **pm, float **p, float **pp);
static void star3 (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
                   float **dvv, float **od, float **s,
                   float **pm, float **p, float **pp);
static void star4 (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
                   float **dvv, float **od, float **s,
                   float **pm, float **p, float **pp);
static void absorb (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
                    float **dvv, float **od, float **pm, float **p, float
**pp,
                    int *abs);

void tstep2 (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
             float **dvv, float **od, float **s,
             float **pm, float **p, float **pp, int *abs)
*****
*****
One time step of FD solution (2nd order in space) to acoustic
wave equation
*****
*****
Input:
nx          number of x samples
dx          x sampling interval
nz          number of z samples
dz          z sampling interval
dt          time step
dvv         array[nx][nz] of density*velocity^2
od          array[nx][nz] of 1/density (NULL for constant
density=1.0)
s           array[nx][nz] of source pressure at time t+dt
pm          array[nx][nz] of pressure at time t-dt
p           array[nx][nz] of pressure at time t

Output:
pp          array[nx][nz] of pressure at time t+dt

```

```
*****
***** Notes:
This function is optimized for special cases of constant
density=1 and/or
equal spatial sampling intervals dx=dz. The slowest case is
variable
density and dx!=dz. The fastest case is density=1.0 (od==NULL)
and dx==dz.
*****
***** Author: Dave Hale, Colorado School of Mines, 03/13/90
*****
***** /
{
    /* convolve with finite-difference star (special cases
for speed) */
    if (od!=NULL && dx!=dz) {
        star1(nx,dx,nz,dz,dt,dvv,od,s,pm,p,pp);
    } else if (od!=NULL && dx==dz) {
        star2(nx,dx,nz,dz,dt,dvv,od,s,pm,p,pp);
    } else if (od==NULL && dx!=dz) {
        star3(nx,dx,nz,dz,dt,dvv,od,s,pm,p,pp);
    } else {
        star4(nx,dx,nz,dz,dt,dvv,od,s,pm,p,pp);
    }

    /* absorb along boundaries */
    if (pml_thickness == 0) {
        absorb(nx,dx,nz,dz,dt,dvv,od,pm,p,pp,abs);
    } else {
        pml_absorb(nx,dx,nz,dz,dt,dvv,od,pm,p,pp,abs);
    }
}

/* convolve with finite-difference star for variable density and
dx!=dz */
static void star1 (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
                  float **dvv, float **od, float **s,
                  float **pm, float **p, float **pp)
{
    int ix,iz;
    float xscale1,zscale1,xscale2,zscale2;

    /* determine constants */
    xscale1 = (dt*dt)/(dx*dx);
    zscale1 = (dt*dt)/(dz*dz);
```

```

xscale2 = 0.25*xscale1;
zscale2 = 0.25*zscale1;

/* do the finite-difference star */
for (ix=1; ix<nx-1; ++ix) {
    for (iz=1; iz<nz-1; ++iz) {
        pp[ix][iz] = 2.0*p[ix][iz]-pm[ix][iz] +
                      dvv[ix][iz]*(
                          od[ix][iz]*(

xscale1*(

p[ix+1][iz]+

p[ix-1][iz]-
2.0*p[ix][iz]

) +
zscale1*(

p[ix][iz+1]+

p[ix][iz-1]-
2.0*p[ix][iz]

)
)

) +
(

xscale2*(

od[ix+1][iz]-
1][iz]) *

(p[ix+1][iz]-
1][iz])

)
+
zscale2*(

od[ix][iz+1]-
od[ix][iz-1])*

(p[ix][iz+1]-
1))

)
}

```

```

                )
            ) +
            s[ix][iz];
        }
    }

/* convolve with finite-difference star for variable density and
dx==dz */
static void star2 (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
                  float **dvv, float **od, float **s,
                  float **pm, float **p, float **pp)
{
    int ix,iz;
    float scale1,scale2;

    if ( dx != dz )
        warn( "ASSERT FAILED: dx != dz in star2" );
    /* determine constants */
    scale1 = (dt*dt)/(dx*dx);
    scale2 = 0.25*scale1;

    /* do the finite-difference star */
    for (ix=1; ix<nx-1; ++ix) {
        for (iz=1; iz<nz-1; ++iz) {
            pp[ix][iz] = 2.0*p[ix][iz]-pm[ix][iz] +
                          dvv[ix][iz]*(
                            od[ix][iz]*(

p[ix+1][iz]+
p[ix-1][iz]+
p[ix][iz+1]+
p[ix][iz-1]-

4.0*p[ix][iz]
)
)
+
(
scale2*(

(od[ix+1][iz]-
od[ix-1][iz]) *

```

```

(p[ix+1][iz]-
 1][iz]) +
(od[ix][iz+1]-
od[ix][iz-1]) *
(p[ix][iz+1]-
 1))
)
)
) +
s[ix][iz];
}
}

/* convolve with finite-difference star for density==1.0 and
dx!=dz */
static void star3 (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
float **dvv, float **od, float **s,
float **pm, float **p, float **pp)
{
    int ix,iz;
    float xscale,zscale;

    if ( od != ((float **) NULL) )
        warn("ASSERT FAILED: od != NULL in star3");
    /* determine constants */
    xscale = (dt*dt)/(dx*dx);
    zscale = (dt*dt)/(dz*dz);

    /* do the finite-difference star */
    for (ix=1; ix<nx-1; ++ix) {
        for (iz=1; iz<nz-1; ++iz) {
            pp[ix][iz] = 2.0*p[ix][iz]-pm[ix][iz] +
dvv[ix][iz]*(
xscale*(
p[ix+1][iz]+
p[ix-1][iz]-
2.0*p[ix][iz]
) +
zscale*(
p[ix][iz+1]+

```

```

                p[ix][iz-1]-
                2.0*p[ix][iz]
            )
        ) +
    s[ix][iz];
}
}

/* convolve with finite-difference star for density==1.0 and
dx==dz */
static void star4 (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
    float **dvv, float **od, float **ss,
    float **pm, float **p, float **pp)
{
    int ix,iz;
    float scale;

    /* determine constants */
    if ( od != ((float **) NULL) )
        warn( "ASSERT FAILED: od != NULL in star4" );
    if ( dz != dx )
        warn( "ASSERT FAILED: dz != dx in star4" );
    scale = (dt*dt)/(dx*dz);

    /* do the finite-difference star */
    for (ix=1; ix<nx-1; ++ix) {
        for (iz=1; iz<nz-1; ++iz) {
            pp[ix][iz] = 2.0*p[ix][iz]-pm[ix][iz] +
                scale*dvv[ix][iz]*(
                    p[ix+1][iz]+
                    p[ix-1][iz]+
                    p[ix][iz+1]+
                    p[ix][iz-1]-
                    4.0*p[ix][iz]
                ) +
            s[ix][iz];
        }
    }
}

static void absorb (int nx, float dx, int nz, float dz, float dt,
    float **dvv, float **od, float **pm, float **p, float
**pp,
    int *abs)
/*********************
```

absorb - absorbing boundary conditions

Input:

nx number of samples in x direction
dx spatial sampling interval in x direction
nz number of samples in z direction
dz spatial sampling interval in z direction
dt time sampling interval
dvv array of velocity values from vfile
od array of density values from dfile
pm pressure field at time t-1
p pressure field at time t
pp pressure field at t+dt
abs flag indicating to absorb or not to absorb

Notes:

This method is an improvement on the method of Clayton and Engquist, 1977 and 1980. The method is described in Hale, 1990.

References:

Clayton, R. W., and Engquist, B., 1977, Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations, Bull. Seism. Soc. Am., 6, 1529-1540.

Clayton, R. W., and Engquist, B., 1980, Absorbing boundary conditions for wave equation migration, Geophysics, 45, 895-904.

Hale, D., 1990, Adaptive absorbing boundaries for finite-difference modeling of the wave equation migration, unpublished report from the Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.

Richtmyer, R. D., and Morton, K. W., 1967, Difference methods for initial-value problems, John Wiley & Sons, Inc, New York.

Thomee, V., 1962, A stable difference scheme for the mixed boundary problem

for a hyperbolic, first-order system in two dimensions, J. Soc. Indust.
Appl. Math., 10, 229-245.

Toldi, J. L., and Hale, D., 1982, Data-dependent absorbing side
boundaries,
Stanford Exploration Project Report SEP-30, 111-121.

```
*****
***** Author: CWP: Dave Hale 1990 *****
***** *****/
{
    int ix,iz;
    float
ov,ovs,cosa,beta,gamma,dpdx,dpdz,dpdt,dpdxs,dpdzs,dpdts;

/* solve for upper boundary */
iz = 1;
for (ix=0; ix<nx; ++ix) {

    if (abs[0]!=0) {

        if (od!=NULL)
            ovs =
1.0/(od[ix][iz]*dvv[ix][iz]);
        else
            ovs = 1.0/dvv[ix][iz];
        ov = sqrt(ovs);
        if (ix==0)
            dpdx = (p[1][iz]-p[0][iz])/dx;
        else if (ix==nx-1)
            dpdx = (p[nx-1][iz]-p[nx-
2][iz])/dx;
        else
            dpdx = (p[ix+1][iz]-p[ix-
1][iz])/(2.0*dx);
        dpdt = (pp[ix][iz]-pm[ix][iz])/(2.0*dt);
        dpdxs = dpdx*dpdx;
        dpdts = dpdt*dpdt;
        if (ovs*dpdts>dpdxs)
            cosa = sqrt(1.0-
dpdxs/(ovs*dpdts));
        else
            cosa = 0.0;
```

```

        beta = ov*dz/dt*cosa;
        gamma = (1.0-beta)/(1.0+beta);

        pp[ix][iz-1] = gamma*(pp[ix][iz]-
p[ix][iz-1])+p[ix][iz];
    } else {
        pp[ix][iz-1] = 0.0;
    }
}

/* extrapolate along left boundary */
ix = 1;
for (iz=0; iz<nz; ++iz) {
    if (abs[1]!=0) {
        if (od!=NULL)
            ovs =
1.0/(od[ix][iz]*dvv[ix][iz]);
        else
            ovs = 1.0/dvv[ix][iz];
        ov = sqrt(ovs);
        if (iz==0)
            dpdz = (p[ix][1]-p[ix][0])/dz;
        else if (iz==nz-1)
            dpdz = (p[ix][nz-1]-p[ix][nz-
2])/dz;
        else
            dpdz = (p[ix][iz+1]-p[ix][iz-
1])/(2.0*dz);
        dpdt = (pp[ix][iz]-pm[ix][iz])/(2.0*dt);
        dpdzs = dpdz*dpdz;
        dpdts = dpdt*dpdt;
        if (ovs*dpdts>dpdzs)
            cosa = sqrt(1.0-
dpdzs/(ovs*dpdts));
        else
            cosa = 0.0;

        beta = ov*dx/dt*cosa;
        gamma = (1.0-beta)/(1.0+beta);
        pp[ix-1][iz] = gamma*(pp[ix][iz]-p[ix-
1][iz])+p[ix][iz];
    } else {
        pp[ix-1][iz] = 0.0;
    }
}

```

```

/* extrapolate along lower boundary */
iz = nz-2;
for (ix=0; ix<nx; ++ix) {
    if (abs[2]!=0) {
        if (od!=NULL)
            ovs =
1.0/(od[ix][iz]*dvv[ix][iz]);
        else
            ovs = 1.0/dvv[ix][iz];
        ov = sqrt(ovs);
        if (ix==0)
            dpdx = (p[1][iz]-p[0][iz])/dx;
        else if (ix==nx-1)
            dpdx = (p[nx-1][iz]-p[nx-
2][iz])/dx;
        else
            dpdx = (p[ix+1][iz]-p[ix-
1][iz])/(2.0*dx);
        dpdt = (pp[ix][iz]-pm[ix][iz])/(2.0*dt);
        dpdxs = dpdx*dpdx;
        dpdts = dpdt*dpdt;
        if (ovs*dpdts>dpdxs)
            cosa = sqrt(1.0-
dpdxs/(ovs*dpdts));
        else
            cosa = 0.0;

        beta = ov*dz/dt*cosa;
        gamma = (1.0-beta)/(1.0+beta);

        pp[ix][iz+1] = gamma*(pp[ix][iz]-
p[ix][iz+1])+p[ix][iz];
    } else {
        pp[ix][iz+1] = 0.0;
    }
}

/* extrapolate along right boundary */
ix = nx-2;
for (iz=0; iz<nz; ++iz) {
    if (abs[3]!=0) {
        if (od!=NULL)
            ovs =
1.0/(od[ix][iz]*dvv[ix][iz]);
        else
            ovs = 1.0/dvv[ix][iz];
        ov = sqrt(ovs);

```

```

        if (iz==0)
            dpdz = (p[ix][1]-p[ix][0])/dz;
        else if (iz==nz-1)
            dpdz = (p[ix][nz-1]-p[ix][nz-
2])/dz;
        else
            dpdz = (p[ix][iz+1]-p[ix][iz-
1])/(2.0*dz);
        dpdt = (pp[ix][iz]-pm[ix][iz])/(2.0*dt);
        dpdzs = dpdz*dpdz;
        dpdts = dpdt*dpdt;
        if (ovs*dpdts>dpdzs)
            cosa = sqrt(1.0-
dpdzs/(ovs*dpdts));
        else
            cosa = 0.0;

        beta = ov*dx/dt*cosa;
        gamma = (1.0-beta)/(1.0+beta);
        pp[ix+1][iz] = gamma*(pp[ix][iz]-
p[ix+1][iz])+p[ix][iz];
    } else {
        pp[ix+1][iz] = 0.0;
    }
}

/*

```

pml_absorb uses the perfectly matched layer absorbing boundary condition.

The PML formulation is specialized to the acoustic case.

References:

Jean-Pierre Berenger, ``A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves,'' *Journal of Computational Physics*, vol. 114, pp. 185-200.

Hastings, Schneider, and Broschat, ``Application of the perfectly matched layer (PML) absorbing boundary condition to elastic wave propagation,'' *Journal of the Acoustical Society of America*, November, 1996.

Allen Taflove, ``Electromagnetic Modeling: Finite Difference
 Time
 Domain Methods'', Baltimore, Maryland: Johns Hopkins
 University Press,
 1995, chap. 7, pp. 181-195.

The PML ABC is implemented by extending the modeled region on the bottom and right sides and treating the modeled region as periodic.

In the extended region, the differential equations of PML are modeled. The extension is accomplished by using additional arrays which record the state in the extended regions. The result is a nasty patchwork of arrays. (It is possible to use the PML differential equations to model the absorbing and non-absorbing regions. This greatly simplifies things at the expense of memory.)

The size of the new arrays and the location of their (0,0) element in the coordinate space of the main p arrays are:

Array	Size	Location of [0][0] with respect to p
[0][0]		
ux_b	(nx+pml, pml+2)	(0, nz-1)
uz_b	"	"
dax_b	"	"
dbx_b	"	"
daz_b	"	"
dbz_b	"	"
ux_r	(pml+2, nz)	(nx-1, 0)
uz_r	"	"
dax_r	"	"
dbx_r	"	"
daz_r	"	"
dbz_r	"	"
v_b	(nx+pml, pml+3)	(0, nz-1.5)
cax_b	"	"
cbx_b	"	"
w_b	(nx+pml, pml+2)	(-0.5, nz-1)
caz_b	"	"
cbz_b	"	"

```

v_r      (pml+2, nz)      (nx-1, -0.5)
cax_r    "           "
cbx_r    "           "

w_r      (pml+3, nz)      (nx-1.5, 0 )
caz_r    "           "
cbz_r    "           "

*/
static void pml_absorb (int nx, float dx, int nz, float dz, float
dt,
                      float **dvv, float **od, float **pm, float **p, float
**pp,
                      int *abs)
{
    int ix, iz, jx, jz;

    /* Calculate v for bottom pad above and below main domain */

    for (ix=0, jz=pml_thickness+2; ix<nx; ++ix) {
        v_b [ix][ 0] = cax_b [ix][ 0] * v_b [ix][ 0] +
                        cbx_b [ix][ 0] * (ux_b [ix][ 0] + uz_b
[ix][ 0]
                                         -((abs[2]!=0) ? p [ix][nz-
2] : 0.0));

        v_b [ix][jz] = cax_b [ix][jz] * v_b [ix][jz] +
                        cbx_b [ix][jz] * (((abs[0]!=0) ? p [ix][
1] : 0.0)
                                         -ux_b [ix][jz-1] - uz_b
[ix][jz-1]);
    }

    /* Calculate v for bottom pad above and below right pad */

    for (ix=nx, jx=1, jz=pml_thickness+2; ix<nx+pml_thickness;
++ix, ++jx) {
        v_b [ix][ 0] = cax_b [ix][ 0] * v_b [ix][ 0] +
                        cbx_b [ix][ 0] * (ux_b [ix][ 0] + uz_b
[ix][ 0]
                                         -ux_r [jx][nz-2] - uz_r
[jx][nz-2]);

        v_b [ix][jz] = cax_b [ix][jz] * v_b [ix][jz] +

```

```

cbx_b [ix][jz] * (ux_r [jx][    1] + uz_r
[jx][    1]
                -ux_b [ix][jz-1] - uz_b
[ix][jz-1]);
}

/* Calculate v for main part of bottom pad */

for (ix=0; ix<nx+pml_thickness; ++ix) {
    for (iz=1; iz<pml_thickness+2; ++iz) {
        v_b [ix][iz] = cax_b [ix][iz] * v_b [ix][iz] +
                      cbx_b [ix][iz] * (ux_b [ix][iz]) + uz_b
[ix][iz]
                -ux_b [ix][iz-1] - uz_b
[ix][iz-1]);
    }
}

/* Calculate w for left edge of bottom pad */

for (iz=0, ix=nx+pml_thickness-1; iz<pml_thickness+2; ++iz) {
    w_b [ 0][iz] = caz_b [ 0][iz] * w_b [ 0][iz] +
                   cbz_b [ 0][iz] * (ux_b [ix][iz] + uz_b
[ix][iz]
                -ux_b [ 0][iz] - uz_b [
0][iz]);
}

/* Calculate w for main part of bottom pad */

for (ix=1; ix<nx+pml_thickness; ++ix) {
    for (iz=0; iz<pml_thickness+2; ++iz) {
        w_b [ix][iz] = caz_b [ix][iz] * w_b [ix][iz] +
                      cbz_b [ix][iz] * (ux_b [ix-1][iz] + uz_b
[ix-1][iz]
                -ux_b [ix ][iz] - uz_b
[ix ][iz]));
    }
}

/* Calculate v along top and bottom edge of right pad */

```

```

    for (ix=0, jx=nx-1, jz=pml_thickness; ix<pml_thickness+2;
++ix, ++jx) {
        if (jx == nx+pml_thickness) jx = 0;

        v_r [ix][ 0 ] = cax_r [ix][ 0 ] * v_r [ix][ 0 ] +
                         cbx_r [ix][ 0 ] * (ux_r [ix][ 0 ] + uz_r
[ix][ 0 ]
                                         -ux_b [jx][jz] - uz_b
[jx][jz]);

        v_r [ix][nz-1] = cax_r [ix][nz-1] * v_r [ix][nz-1] +
                         cbx_r [ix][nz-1] * (ux_b [jx][ 0 ] + uz_b
[jx][ 0 ]
                                         -ux_r [ix][nz-2] - uz_r
[ix][nz-2]);
    }

/* Calculate v in rest of right pad */

for (ix=0; ix<pml_thickness+2; ++ix) {
    for (iz=1; iz<nz-1; ++iz) {
        v_r [ix][iz] = cax_r [ix][iz] * v_r [ix][iz] +
                         cbx_r [ix][iz] * (ux_r [ix][iz] + uz_r
[ix][iz]
                                         -ux_r [ix][iz-1] - uz_r
[ix][iz-1]);
    }
}

/* Calculate w along left and right sides of right pad */

for (iz=0, jx=pml_thickness+2; iz<nz; ++iz) {
    w_r [ 0 ][iz] = caz_r [ 0 ][iz] * w_r [ 0 ][iz] +
                     cbz_r [ 0 ][iz] * (((abs[3]!=0) ? p [nx-
2][iz] : 0.0)
                                         -ux_r [ 0 ][iz] - uz_r [
0 ][iz]);

    w_r [jx][iz] = caz_r [jx][iz] * w_r [jx][iz] +
                     cbz_r [jx][iz] * (ux_r [jx-1][iz] + uz_r
[jx-1][iz]
                                         -((abs[1]!=0) ? p [1][iz] :
0.0));
}

```

```

/* Calculate w in main part of right pad */

for (ix=1; ix<pml_thickness+2; ++ix) {
    for (iz=0; iz<nz; ++iz) {
        w_r [ix][iz] = caz_r [ix][iz] * w_r [ix][iz] +
                        cbz_r [ix][iz] * (ux_r [ix-1][iz] + uz_r
[ix-1][iz]
                                         -ux_r [ix ][iz] - uz_r
[ix ][iz]);
    }
}

/* Calculate ux and uz in bottom pad */

for (ix=0; ix<nx+pml_thickness-1; ++ix) {
    for (iz=0; iz<pml_thickness+2; ++iz) {
        ux_b [ix][iz] = dax_b [ix][iz] * ux_b [ix ][iz] +
                        dbx_b [ix][iz] * (w_b [ix][iz ] - w_b
[ix+1][iz]);
    }
}

for (ix=nx+pml_thickness-1, iz=0; iz<pml_thickness+2; ++iz) {
    ux_b [ix][iz] = dax_b [ix][iz] * ux_b [ix ][iz] +
                    dbx_b [ix][iz] * (w_b [ix][iz ] - w_b [
0][iz]);
}

for (ix=0; ix<nx+pml_thickness; ++ix) {
    for (iz=0; iz<pml_thickness+2; ++iz) {
        uz_b [ix][iz] = daz_b [ix][iz] * uz_b [ix][iz ] +
                        dbz_b [ix][iz] * (v_b [ix][iz+1] - v_b
[ix][iz ]);
    }
}

/* Calculate ux and uz in right pad */

for (ix=0; ix<pml_thickness+2; ++ix) {
    for (iz=0; iz<nz; ++iz) {
        ux_r [ix][iz] = dax_r [ix][iz] * ux_r [ix ][iz] +
                        dbx_r [ix][iz] * (w_r [ix ][iz] - w_r
[ix+1][iz]);
    }
}

```

```

for (ix=0; ix<pml_thickness+2; ++ix) {
    for (iz=0; iz<nz-1; ++iz) {
        uz_r [ix][iz] = daz_r [ix][iz] * uz_r [ix][iz] +
                         dbz_r [ix][iz] * (v_r [ix][iz+1] - v_r
[ix][iz]);
    }
}

for (ix=0, iz=nz-1, jx=nx-1; ix<pml_thickness+2; ++ix, ++jx) {
    if (jx == nx+pml_thickness) jx = 0;

    uz_r [ix][ 0] = uz_b [jx][pml_thickness+1];
    uz_r [ix][iz] = uz_b [jx][ 0];
}
}

/* Update top and bottom edge of main grid with new field
values */

for (ix=0, jz=pml_thickness+1; ix<nx; ++ix) {
    if (abs [0] != 0) pp [ix][ 0] = ux_b [ix][jz] + uz_b
[ix][jz];
    if (abs [2] != 0) pp [ix][nz-1] = ux_b [ix][ 0] + uz_b
[ix][ 0];
}

/* Update left and right edges of main grid with new field
values */

for (iz=1, jx=pml_thickness+1; iz<nz-1; ++iz) {
    if (abs [1] != 0) pp [ 0][iz] = ux_r [jx][iz] + uz_r
[jx][iz];
    if (abs [3] != 0) pp [nx-1][iz] = ux_r [ 0][iz] + uz_r [
0][iz];
}
}

static void pml_init (int nx, int nz, float dx, float dz, float
dt, float **dvv)
{
    int ix, iz;

    /* Allocate arrays for pad on right */

    cax_r = alloc2float (nz, pml_thickness+2);

```

```

cbx_r = alloc2float (nz, pml_thickness+2);
caz_r = alloc2float (nz, pml_thickness+3);
cbz_r = alloc2float (nz, pml_thickness+3);
dax_r = alloc2float (nz, pml_thickness+2);
dbx_r = alloc2float (nz, pml_thickness+2);
daz_r = alloc2float (nz, pml_thickness+2);
dbz_r = alloc2float (nz, pml_thickness+2);

ux_r   = alloc2float (nz, pml_thickness+2);
uz_r   = alloc2float (nz, pml_thickness+2);
v_r    = alloc2float (nz, pml_thickness+2);
w_r    = alloc2float (nz, pml_thickness+3);

/* Zero out arrays for pad on right */

for (ix=0; ix<pml_thickness+2; ++ix) {
    for (iz=0; iz<nz; ++iz) {
        ux_r [ix][iz] = uz_r [ix][iz] = 0.0;
        v_r   [ix][iz] = w_r   [ix][iz] = 0.0;

        cax_r [ix][iz] = cbx_r [ix][iz] = 0.0;
        caz_r [ix][iz] = cbz_r [ix][iz] = 0.0;
        dax_r [ix][iz] = dbx_r [ix][iz] = 0.0;
        daz_r [ix][iz] = dbz_r [ix][iz] = 0.0;
    }
}
/* Zero out extra bit on right pad */

for (ix=pml_thickness+2, iz=0; iz<nz; ++iz) {
    caz_r [ix][iz] = cbz_r [ix][iz] = 0.0;
    w_r   [ix][iz] = 0.0;
}

/* Allocate arrays for pad on bottom */

cax_b = alloc2float (pml_thickness+3, nx + pml_thickness);
cbx_b = alloc2float (pml_thickness+3, nx + pml_thickness);
caz_b = alloc2float (pml_thickness+2, nx + pml_thickness);
cbz_b = alloc2float (pml_thickness+2, nx + pml_thickness);
dax_b = alloc2float (pml_thickness+2, nx + pml_thickness);
dbx_b = alloc2float (pml_thickness+2, nx + pml_thickness);
daz_b = alloc2float (pml_thickness+2, nx + pml_thickness);
dbz_b = alloc2float (pml_thickness+2, nx + pml_thickness);

ux_b   = alloc2float (pml_thickness+2, nx + pml_thickness);

```

```

uz_b = alloc2float (pml_thickness+2, nx + pml_thickness);
v_b = alloc2float (pml_thickness+3, nx + pml_thickness);
w_b = alloc2float (pml_thickness+2, nx + pml_thickness);

/* Zero out arrays for pad on bottom */

for (ix=0; ix<nx+pml_thickness; ++ix) {
    for (iz=0; iz<pml_thickness+2; ++iz) {
        ux_b [ix][iz] = uz_b [ix][iz] = 0.0;
        v_b [ix][iz] = w_b [ix][iz] = 0.0;

        cax_b [ix][iz] = cbx_b [ix][iz] = 0.0;
        caz_b [ix][iz] = cbz_b [ix][iz] = 0.0;
        dax_b [ix][iz] = dbx_b [ix][iz] = 0.0;
        daz_b [ix][iz] = dbz_b [ix][iz] = 0.0;
    }
}

/* Zero out extra bit on bottom pad */

for (ix=0, iz=pml_thickness+2; ix<nx+pml_thickness; ++ix) {
    cax_b [ix][iz] = cbx_b [ix][iz] = 0.0;
    v_b [ix][iz] = 0.0;
}

/* Initialize cax & cbx arrays */

for (ix=0; ix<pml_thickness+2; ++ix) {
    for (iz=0; iz<nz; ++iz) {
        sigma_ez = 0.0;

        cax_r [ix][iz] = (2.0 - (sigma_ez * dt)) / (2.0 +
(sigma_ez * dt));
        cbx_r [ix][iz] = (2.0 * dt / dz) / (2.0 +
(sigma_ez * dt));
    }
}

for (ix=0; ix<nx+pml_thickness; ++ix) {
    for (iz=0; iz<pml_thickness+3; ++iz) {
        if ((iz == 0) || (iz == pml_thickness + 2)) {
            sigma_ez = 0.0;
        } else {
            sigma_ez = pml_max * 0.5 * (1.0 - cos (2*PI*(iz-
0.5)/(pml_thickness+1)));
        }
    }
}

```

```

    }

        cax_b [ix][iz] = (2.0 - (sigma_ez * dt)) / (2.0 +
(sigma_ez * dt));
        cbx_b [ix][iz] = (2.0 * dt / dz) / (2.0 +
(sigma_ez * dt));
    }
}

/* Initialize caz & cbz arrays */

for (ix=0; ix<pml_thickness+3; ++ix) {
    for (iz=0; iz<nz; ++iz) {
        if ((ix == 0) || (ix == pml_thickness+2)) {
            sigma_ex = 0.0;
        } else {
            sigma_ex = pml_max * 0.5 * (1.0 - cos (2*PI*(ix-
0.5)/(pml_thickness+1)));
        }

        caz_r [ix][iz] = (2.0 - (sigma_ex * dt)) / (2.0 +
(sigma_ex * dt));
        cbz_r [ix][iz] = (2.0 * dt / dz) / (2.0 +
(sigma_ex * dt));
    }
}
for (ix=0; ix<nx+pml_thickness; ++ix) {
    for (iz=0; iz<pml_thickness+2; ++iz) {
        if (ix == 0) {
            sigma_ex = pml_max * 0.5 * (1.0 - cos
(2*PI*(0.5)/(pml_thickness+1)));
        } else if (ix < nx) {
            sigma_ex = 0.0;
        } else {
            sigma_ex = pml_max * 0.5 * (1.0 - cos (2*PI*(ix-
nx+0.5)/(pml_thickness+1)));
        }

        caz_b [ix][iz] = (2.0 - (sigma_ex * dt)) / (2.0 +
(sigma_ex * dt));
        cbz_b [ix][iz] = (2.0 * dt / dz) / (2.0 +
(sigma_ex * dt));
    }
}
/* Initialize right pad's dax dbx, daz, & dbz arrays */

```

```

for (ix=0; ix<pml_thickness+2; ++ix) {
    for (iz=0; iz<nz; ++iz) {

        /* Determine sigma_mx and sigma_mz */

        if ((ix == 0) || (ix == pml_thickness+1)) {
            sigma_mx = 0.0;
        } else {
            sigma_mx = pml_max * 0.5 * (1.0 - cos
(2*PI*(ix)/(pml_thickness+1)));
        }

        sigma_mz = 0.0;

        /* Determine velocity, interpolate */

        if (ix == 0) {
            dvv_0 = sqrt (dvv [nx-1][iz]);
        } else if (ix == pml_thickness+1) {
            dvv_0 = sqrt (dvv [      0][iz]);
        } else {
            dvv_0 = sqrt (dvv [nx-1][iz]);
            dvv_1 = sqrt (dvv [      0][iz]);

            dvv_0 = ((ix) * dvv_1 + (1+pml_thickness-ix)*dvv_0);
            dvv_0 /= (pml_thickness+1);
        }

        dvv_0 = dvv_0 * dvv_0;

        dax_r [ix][iz] = (2.0 - (sigma_mx * dt)) / (2.0 +
(sigma_mx * dt));
        dbx_r [ix][iz] = (2.0 * dt * dvv_0 / dx) / (2.0 +
(sigma_mx * dt));

        daz_r [ix][iz] = (2.0 - (sigma_mz * dt)) / (2.0 +
(sigma_mz * dt));
        dbz_r [ix][iz] = (2.0 * dt * dvv_0 / dz) / (2.0 +
(sigma_mz * dt));
    }
}

/* Initialize bottom pad's dax, dbx, daz, & dbz arrays */

```

```

for (ix=0; ix<nx+pml_thickness; ++ix) {
    for (iz=0; iz<pml_thickness+2; ++iz) {

        /* Determine sigma_mx and sigma_mz */

        if (ix < nx) {
            sigma_mx = 0.0;
        } else {
            sigma_mx = pml_max * 0.5 * (1.0 - cos (2*PI*(ix-
nx+1)/(pml_thickness+1)));
        }

        if ((iz == 0) || (iz == pml_thickness+1)) {
            sigma_mz = 0.0;
        } else {
            sigma_mz = pml_max * 0.5 * (1.0 - cos
(2*PI*(iz)/(pml_thickness+1)));
        }

        /* Determine velocity, interpolate */

        if (ix < nx) {
            if (iz == 0) {
                dvv_0 = sqrt (dvv [ix][nz-1]);
            } else if (iz == pml_thickness+1) {
                dvv_0 = sqrt (dvv [ix][ 0]);
            } else {
                dvv_0 = sqrt (dvv [ix][nz-1]);
                dvv_1 = sqrt (dvv [ix][ 0]);

                dvv_0 = ((iz) * dvv_1 + (1+pml_thickness-
iz)*dvv_0);
                dvv_0 /= (pml_thickness+1);
            }
        } else {
            if (iz == 0) {
                dvv_0 = sqrt (dvv [nx-1][nz-1]);
                dvv_1 = sqrt (dvv [ 0][nz-1]);
            } else if (iz == pml_thickness+1) {
                dvv_0 = sqrt (dvv [nx-1][ 0]);
                dvv_1 = sqrt (dvv [ 0][ 0]);
            } else {
                dvv_2 = sqrt (dvv [nx-1][nx-1]);
                dvv_3 = sqrt (dvv [nx-1][ 0]);
                dvv_0 = ((iz) * dvv_3 + (1+pml_thickness-
iz)*dvv_2);
            }
        }
    }
}

```

```

dvv_0 /= (pml_thickness+1);

dvv_2 = sqrt (dvv [0][nx-1]);
dvv_3 = sqrt (dvv [0][    0]);

dvv_1 = ((iz) * dvv_3 + (1+pml_thickness-
iz)*dvv_2);
    dvv_1 /= (pml_thickness+1);
}

dvv_0 = ((ix-nx+1) * dvv_1 + (nx+pml_thickness-
ix)*dvv_0);
    dvv_0 /= (pml_thickness+1);
}

dvv_0 = dvv_0 * dvv_0;

dax_b [ix][iz] = (2.0 - (sigma_mx * dt)) / (2.0 +
(sigma_mx * dt));
    dbx_b [ix][iz] = (2.0 * dt * dvv_0 / dx) / (2.0 +
(sigma_mx * dt));

daz_b [ix][iz] = (2.0 - (sigma_mz * dt)) / (2.0 +
(sigma_mz * dt));
    dbz_b [ix][iz] = (2.0 * dt * dvv_0 / dz) / (2.0 +
(sigma_mz * dt));
}
}
}
```

6.6 Apéndice VI

```
c     programa diferencia finita 2d Acustico
c     This programs is writen for Elieser Perez
c     October 19, 2001.
c
c     integer nx,nz,xs,xz,tmax,vsx,hsz,verbose

character filein*40,file(830,3)*10,sismograma*165

      call system('clear')
write(*,*) 'numero de fuentes'
read(*,*) nsrc
write(*,*) 'input file'
read(*,'(a)') filein
open(1,file=filein)
do i=1,nsrc
  read(1,'(a5,2x,a5,x,a)')file(i,1),file(i,2),file(i,3)
  sismograma='sufdmod2< ff2~uni >pepe nx=1200 nz=440 dz=0.025
+ dx=0.025 mt=100000 zs='//file(i,3)//' tmax=5 fx=0.0 fz=0.0
+ verbose=1 pml_thick=60 ssfile=
+//file(i,1)//' xs='//file(i,2)
  write(*,*) sismograma
  call system (sismograma)
enddo

write(*,*) 'hola'

end
```

6.7 Apéndice VII

```
c     programa diferencia finita 2d Acustico
c     This programs is writen for Elieser Perez
c     October 19, 2001.
c
integer nx,nz,xs,xz,tmax,vsx,hsz,verbose

character filein*40,file(830,3)*10,sismograma*165

      call system('clear')
write(*,*) 'numero de fuentes'
read(*,*) nsrc
write(*,*) 'input file'
read(*,'(a)') filein
open(1,file=filein)
do i=1,nsrc
  read(1,'(a8,2x,a6,x,a)')file(i,1),file(i,2),file(i,3)
  sismograma='sufdmod2< ff3~uni >pepe nx=1200 nz=440 dz=0.025
+ dx=0.025 mt=100000 zs='//file(i,3)//' tmax=5 fx=0.0 fz=0.0
+ verbose=1 pml_thick=60 hsfile=
+//file(i,1)//' xs='//file(i,2)
  write(*,*) sismograma
  call system (sismograma)
enddo

write(*,*) 'hola'

end
```

6.8 Apéndice VIII

```
c     programa diferencia finita 2d Acustico
c     This programs is writen for Elieser Perez
c     October 19, 2001.
c
c     integer nx,nz,xs,xz,tmax,vsx,hsz,verbose

character filein*40,file(830,3)*10,sismograma*165

      call system('clear')
      write(*,*) 'numero de fuentes'
      read(*,*) nsrc
      write(*,*) 'input file'
      read(*,'(a)') filein
      open(1,file=filein)
      do i=1,nsrc
        read(1,'(a2,2x,a5,x,a)')file(i,1),file(i,2),file(i,3)
        sismograma='sufdmod2< ff31~uni >pepe nx=2000 nz=733
dz=0.015
+ dx=0.015 mt=100000 zs='//file(i,3)//' tmax=5 fx=0.0 fz=0.0
+ verbose=1 pml_thick=60 vsfile=
+//file(i,1)//' xs='//file(i,2)
      write(*,*) sismograma
      call system (sismograma)
      enddo

      write(*,*) 'hola'

      end
```

6.9 Apéndice IX

TRISEIS - Gaussian beam synthetic seismograms for a sloth model

```
triseis <modelfile>seisfile xs= zs= xg= zg= [optional  
parameters]
```

Required Parameters:

xs=	x coordinates of source surface
zs=	z coordinates of source surface
xg=	x coordinates of receiver surface
zg=	z coordinates of receiver surface

Optional Parameters:

ns=1	number of sources uniformly distributed along s surface
ds=	increment between source locations (see notes below)
fs=0.0	first source location (relative to start of s surface)
ng=101	number of receivers uniformly distributed along g surface
dg=	increment between receiver locations (see notes below)
fg=0.0	first receiver location (relative to start of g surface)
dgds=0.0	change in receiver location with respect to source location
krecord=1	integer index of receiver surface (see notes below)
kreflect=-1	integer index of reflecting surface (see notes below)
prim	=1, only single-reflected rays are considered =0, only direct hits are considered
bw=0	beamwidth at peak frequency
nt=251	number of time samples
dt=0.004	time sampling interval
ft=0.0	first time sample
nangle=101	number of ray takeoff angles
fangle=-45	first ray takeoff angle (in degrees)
langle=45	last ray takeoff angle (in degrees)
reftrans=0	=1 complex refl/transm. coefficients considered =0 add noncausal attenuation
atten=0	=1 add noncausal attenuation =2 add causal attenuation
lscale=	if defined restricts range of extrapolation
fpeak=0.1/dt	peak frequency of ricker wavelet
aperture=	maximum angle of receiver aperture

NOTES:

Only rays that terminate with index krecord will contribute to the

synthetic seismograms at the receiver (x_g, z_g) locations. The source and receiver locations are determined by cubic spline interpolation of the specified (x_s, z_s) and (x_g, z_g) coordinates. The default source location increment (d_s) is determined to span the source surface defined by (x_s, z_s). Likewise for d_g .

6.10 Apéndice X

Propagación de Ondas Sísmicas

Los métodos sísmicos de prospección utilizan diversos tipos de fuentes (explosivos, camiones vibroseis, entre otros) para generar ondas sísmicas en puntos determinados. En otros lugares, usando geófonos y otros instrumentos, se determina el momento de llegada de la energía refractada o reflejada por las discontinuidades en las formaciones rocosas. Estas técnicas producen perfiles sísmicos de refracción o de reflexión, según el tipo de fenómeno registrado. En las prospecciones sísmicas de petróleo, las técnicas avanzadas de generación de señal se combinan con sistemas sofisticados de registro digital y de cinta magnética para un mejor análisis de los datos.

La ecuación de movimiento tiene soluciones que describen la propagación de ondas. Estas soluciones corresponden con los tipos de ondas elásticas: ondas compresionales y de corte (ondas P y S, respectivamente). En las ondas longitudinales (P) o de compresión, la dirección de movimiento de las partículas es la misma que la propagación de la onda, mientras que en las ondas transversales (S) o de corte, la dirección del movimiento de las partículas en el interior del medio forma un ángulo recto con la dirección de propagación de la onda (Fig. 2.1 y 2.2).

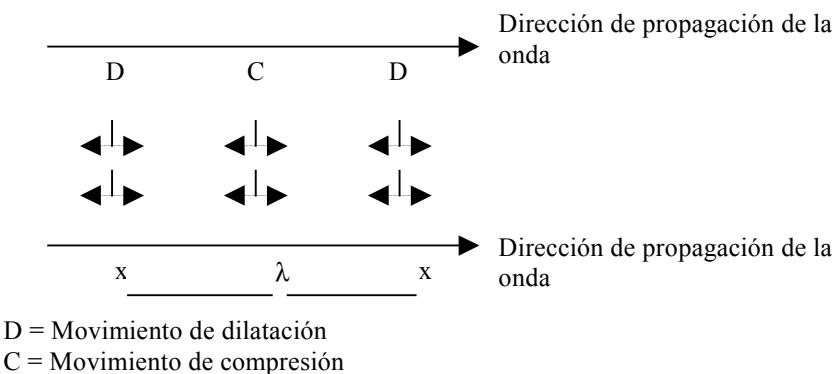


Fig. 6.1- Movimiento de compresión y dilatación de una onda P

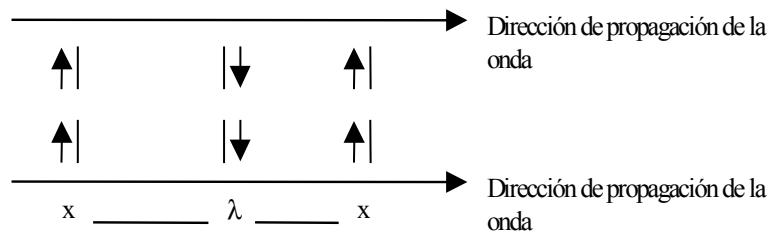


Fig. 6.2- Dirección de propagación de una onda S

Por otra parte, si se considera solamente el efecto de una superficie libre sobre la propagación de las ondas, aparecen las ondas superficiales cuya energía es atrapada inmediatamente por debajo de la superficie de la tierra: las ondas Rayleigh y las ondas Love.

Se considera un modelo simple, con una fuente localizada en la superficie de un medio isotrópico (V_p y V_s son constantes), al disparar se observa la propagación de las ondas por el medio, figura 2.3.

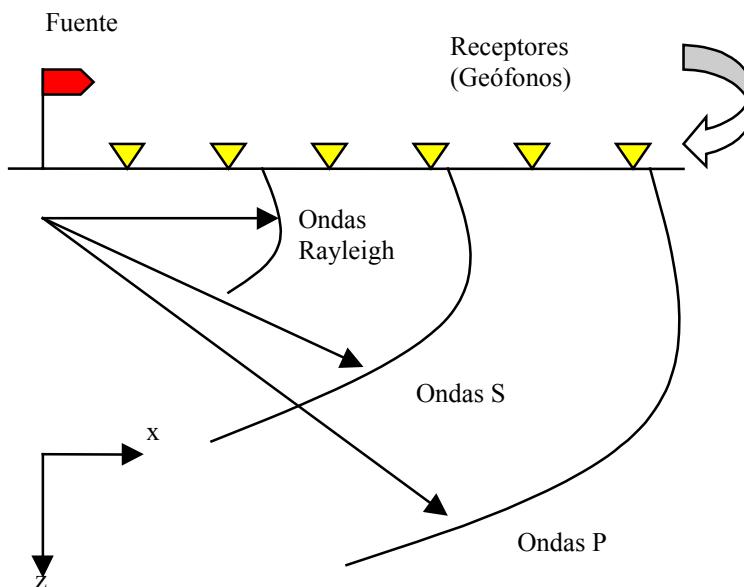


Fig. 6.3- Rayos y Frentes de ondas que se propagan en una interface

El medio actúa como una especie de filtro que solo permite el paso de determinadas frecuencias. En la medida en que los frentes de onda se propagan por el medio, las frecuencias más altas son absorbidas o dispersadas con mayor facilidad que las frecuencias bajas, por lo cual, al propagarse las ondas sus componentes son de más bajas frecuencias y de mayor amplitud, es decir, se atenúan.

Una de las características importantes de las ondas sísmicas es la amplitud, la cual junto con los tiempos de llegada permiten evaluar ciertas características del medio.

La attenuación puede explicarse en los medios reales por dos procesos: dispersivos y disipativos. Los procesos dispersivos (difracción) están relacionados con la energía sísmica dispersa que emana de una discontinuidad abrupta de un tipo de roca. Es particularmente común donde las fallas cortan interfases reflectantes, mientras que el fenómeno de disipación se rige por la absorción debido a los efectos elásticos residuales y por los mecanismos de fricción interna (Méndez, 1996)

Leyes que rigen la Propagación de Ondas Sísmicas

Principio de Fermat

Un rayo real moviéndose de un punto a otro sigue aquella trayectoria que produce tiempo mínimo en su recorrido. Si el medio es homogéneo los rayos sísmicos son rectos. Si el medio no es homogéneo, los rayos son curvas de tiempo mínimo.

Principio de Huyghens

Todos los puntos de un frente de ondas se pueden considerar como centros emisores de ondas secundarias que se extienden en todas las direcciones. Si el frente de ondas es homogéneo, éste es esférico.

Refracción: Ley de Snell

La ley de Snell nos dice que:

$$\frac{V_1 p}{\operatorname{Sen} \theta} = \frac{V_1 s}{\operatorname{Sen} \gamma} = \frac{V_2 p}{\operatorname{Sen} \alpha} = \frac{V_2 s}{\operatorname{Sen} \beta} \quad (2.1)$$

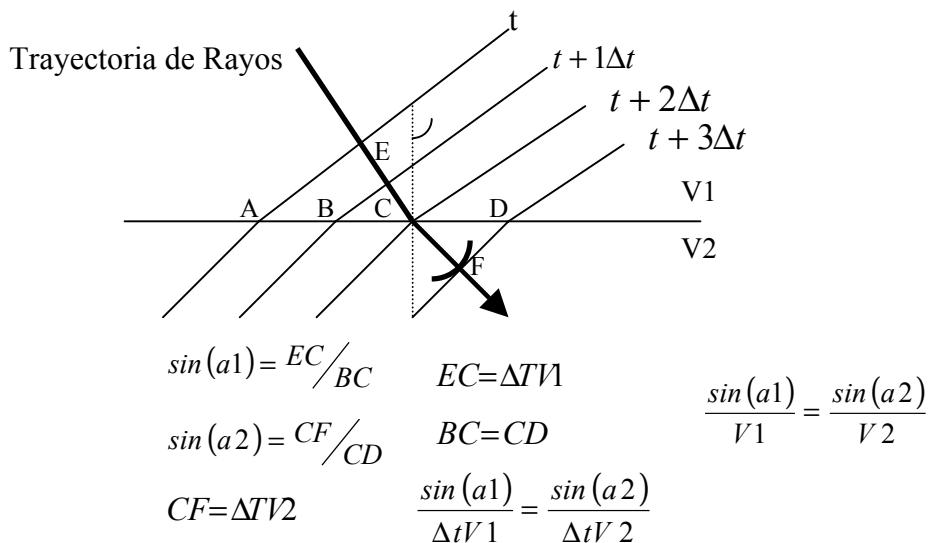


Fig. 6.4- Deducción de la Ley de Snell's

Cuando el ángulo de incidencia, a_1 en la figura 2.8, es 90 grados, no hay transmisión de la onda dentro del medio subyacente, sino refracción pura. Sustituyendo los 90 grados para a_2 , en la ecuación de la figura 2.4 (Ec. 2.2), se deduce este ángulo crítico de incidencia como:

$$\frac{\sin(a_1)}{V_1} = \frac{\sin(a_2)}{V_2} \quad (2.2)$$

$$\sin(\text{acrítico}) = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.3)$$