

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO DE PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN PARA UN
LEVANTAMIENTO DE SÍSMICA 3D EN LA ZONA NORTE DE LA COSTA
ORIENTAL DEL LAGO DE MARACAIBO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Rivero V. Carlos
Para optar al Título de
Ingeniero Geofísico

Caracas, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO DE PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN PARA UN
LEVANTAMIENTO DE SÍSMICA 3D EN LA ZONA NORTE DE LA COSTA
ORIENTAL DEL LAGO DE MARACAIBO**

Tutor Académico: Prof. Vincenzo De Lisa

Tutor Industrial: Ing. Manuel Rincón

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Rivero V. Carlos
Para optar al Título de
Ingeniero Geofísico

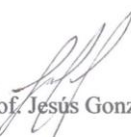
Caracas, 2013

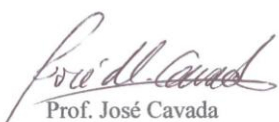
Caracas, noviembre de 2013

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado, presentando por la Bachiller **CARLOS ARTURO RIVERO VERA**, titulado:

**DISEÑO DE PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN PARA UN
LEVANTAMIENTO DE SÍSMICA 3D EN LA ZONA NORTE DE LA
COSTA ORIENTAL DEL LAGO.**

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


Prof. Jesús González
Jurado


Prof. José Cavada
Jurado


Prof. Vincenzo de Lisa
Tutor Académico

Rivero V. Carlos

**DISEÑO DE PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN PARA UN
LEVANTAMIENTO DE SISMICA 3D EN LA ZONA NORTE DE LA COSTA
ORIENTAL DEL LAGO DE MARACAIBO**

Tutor Académico: Prof. Vincenzo De Lisa. Tutor Industrial: Ing. Manuel Rincón. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería de Geología, Minas y Geofísica. Año 2013,

Palabras Claves: Sísmica -3D, adquisición sísmica, diseño sísmico, modelaje sísmico, trazado de rayo, cobertura, Costa Oriental del Lago

Resumen: Se procedió a diseñar los parámetros de adquisición de un levantamiento sísmico 3D en un área de exploración terrestre de la Costa Oriental de Lago de Maracaibo; se estimaron cada uno de los parámetros de la adquisición, se evaluaron los escenarios del diseño a través del modelado sísmico y se analizó el impacto económico de cada propuesta evaluada tomando en cuenta que esta cuenca posee una geología compleja en la que los últimos trabajos investigativos manejan la teoría de tectónica de lodos. La metodología del trabajo inició con una recopilación de todos los datos a los cuales se le aplicó un control de calidad, fueron estimadas la frecuencia máxima, dominante (50 hz) y la función de velocidades; parámetro usado posteriormente para el cálculo del bin donde el valor óptimo fue de 25 x 25 m. Los parámetros de offset máximo (> 6500 m) y mínimo (< 900 m) fueron calculados a través del estudio de rayo crítico y offset asociados al estiramiento NMO, realizado en el programa OMNI al igual que las plantillas del diseño. El modelo de velocidades fue elaborado en GOCAD, necesario para el trazado de rayo. Los 2 diseños finales fueron analizados a través del diagrama de rosas, palitos, araña, conteo de trazas vs offset y otros análisis innovadores como: stack analysis, unique fold, redundant fold, k_x vs k_y . Por último el trazado de rayo se elaboró en el programa MESA del cual se obtuvieron los mapas de cobertura CRP. Los estudios permitieron determinar que ambos diseños poseen buena cobertura y que el primer diseño posee un mejor muestreo de la zona tanto de offset como de azimuth, el segundo diseño posee una desviación estándar de la amplitud mayor al primero por lo que tiene riesgo a adquirir mayor footprint y el análisis económico muestra que el segundo diseño tiene un menor costo.

DEDICATORIA

*A la flor más bella
que me cuida desde el cielo,
mi abuela Rosa.*

Carlos Arturo Rivero Vera

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser mi guía, mi inspiración, por darme sabiduría, tenacidad, responsabilidad, en cada una de mis metas propuesta, por no abandonarme en los peores momentos, con Dios todo sin El nada.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, más que una universidad fue un hogar que me brindo todas las herramientas necesarias para desempeñarme y lograr mis sueños, nunca olvidare lo orgulloso que se siente formar parte de la casa que vence las sombras.

A mi tutor industrial el Ing. Manuel Rincon, una excelente persona ,gracias por aceptar este reto y guiarme en cada paso para lograr vencerlo con el mayor de los éxitos, al profesor Vincenzo de Liza por aceptar ser mi tutor académico y brindarme su apoyo y conocimiento cuando fue necesario.

A los Ingenieros Malave, Numa, por su gran apoyo y colaboración para conmigo en todo momento, mi gran respeto y mi alta estima y Rosalyn, Carolina y mi madrina y madre adoptivas que en ningún momento dejaron de ayudarme, apoyarme y aconsejarme doy gracias a Dios por ponerlas en mi camino. Al licenciado Javier y Milly por su colaboración y ayuda en todo momento.

A mis padres José y Roxana sin ustedes no hubiese logrado ser lo que soy hoy en día, gracias por la vida, la educación, los valores, consejos, enseñanzas y gracias a ustedes hoy en día soy Ingeniero geofísico, los amo. A mi hermano por su apoyo y colaboración en cada momento que se lo pedí, mis tíos y tías Franco, Eli; Mari y Carlos por siempre cuidarme y estar pendiente de mí.

A el Ingeniero y amigo Luis Sierralta, gracias por todo, por ser excelente amigo, persona, por ser excelente ser humano, faltaran texto para agradecerte toda tu colaboración, guía, ayuda, enseñanza para conmigo durante el cumplimiento de esta meta, muchas gracias Luis.

A mis amigos Cesar y Airam, más que amigos mis hermanos que sin importar los problemas siempre estuvieron ahí, siempre valorare y recordare cada momento que viví con ustedes, cada chiste, cada burla, cada comentario que hizo del día más agradable y que no, también. A mi amiga Luzbeida siempre será una gran amiga, te adoro y desde el inicio de esta aventura estuviste conmigo. Simon y Luisely los conocimos a mitad de camino pero el cariño hacia ustedes es como si los conociera desde el primer día de la carrera, gracias por soportarme, quererme y explicarme (

seinsertan risas) los adoro saimon y mi achirula gracias por dejarme vivir con ustedes todos esos momentos y por último y no menos importante Sinay y Jesus (primo) porque sin tu ayuda y apoyo esto no hubiese sido esto posible.

A la Sra Morela, María teresa y Ana María por cada almuerzo que compartimos muchas gracias.

A todos mis profesores del ciclo básico de Ingeniería en Cagua y de la Escuela de geología minas y geofísica por contribuir en mi formación profesional y personal.

A la Gerencia de exploraciones geofísicas y geodésicas de PDVSA Occidente 5 de Julio por permitirme realizar mi Trabajo Especial de Grado y a todo su personal por las colaboraciones prestadas.

Gracias a todos

ÍNDICE

	Página
RESUMEN.....	III
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VI
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIX
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1-Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Justificación.....	3
1.4 Ubicación del área	4
1.5 Antecedentes	5
1.5.1 Levantamiento sísmico zo-91c	5
1.5.2 Levantamiento LBV-95C	6
1.5.3 Levantamiento ONE-97C-1	8
1.5.4 Levantamiento BAC-97C-3D.....	10
1.5.6 Proyecto Tigre - Pueblo Viejo, estudios regionales del sistema petrolífero exploración:	11
CAPÍTULO II	13
Marco geológico.....	13

2.1 Geología regional	13
2.1.1 Características estructurales regionales	14
2.1.2 Evolución tectónica de la cuenca del Lago de Maracaibo	17
2.1.3 Pre – Triásico:	17
2.1.5 Jurásico – Cretácico	18
2.1.6 Paleoceno – Eoceno	19
2.1.7 Eoceno – Oligoceno	20
2.1.8 Oligoceno – Mioceno	21
2.1.9 Mioceno Tardío - Plioceno	21
2.2 Geología local	22
2.2.1 Evolución tectónica	22
2.2.2 Características estructurales	24
2.2.3 Estratigrafía del área	31
2.2.4 Descripción de los objetivos geológicos	36
CAPÍTULO III	39
MARCO TEÓRICO	39
3.1 Método sísmico	39
3.2 Sísmica de reflexión	41
3.3 Adquisición sísmica	44
3.3.1 Adquisición sísmica 2D	45
3.3.2 Levantamiento sísmico 3D	46
3.3.3 Footprint:	48
3.4 Elementos del diseño de sísmica 3D	49
3.4.1 Líneas receptoras	49
3.4.2 Líneas fuentes	49
3.4.3 Densidad de disparo	49
3.4.4 Dirección in-line	50

	Página
3.4.5 Dirección cross-line	50
3.4.6 Box o caja	50
3.4.7 CMP Bin o Bin	50
3.4.8 Super bin	51
3.4.9 Patch:	51
3.4.10 Salvo	52
3.4.11 Template	52
3.4.12 Swath	52
3.4.13 Roll-along	53
3.4.15 Fold o cobertura:	58
3.4.16 Apertura de migración:	60
3.4.17 Fold taper:	62
3.4.18 Resolución:	64
3.4.19 Aliasing espacial y temporal.....	66
3.4.20 Relación señal ruido (S/N):.....	67
3.4.21 Tamaño de bin	68
3.5 Atributos de un diseño sísmico.	71
3.5.1 Bin display.	71
3.5.2 Análisis de cobertura:	71
3.5.3 Distribución de offset.....	71
3.5.4 Distribución de azimuth.....	72
3.5.5 Diagrama de palitos	73
3.5.6 Diagrama de rosa:	74
3.6 Modelado sísmico.....	75
3.6.1 Trazado de rayo	76
CAPÍTULO IV	79
Marco metodológico.....	79

4.1 Recopilación de la información.....	81
4.2 Revisión de los datos.....	83
4.3.1 Generación de ventanas de espectro de frecuencia.....	88
4.4 Estimación de la función de velocidades.....	90
4.5 Estimación de los buzamientos en el área.....	93
4.6 Cálculo del tamaño del bin.....	94
4.7 Cálculo del offset mínimo y máximo.....	95
4.8 Cálculo de parámetros del diseño.....	99
4.8.1 Cálculo de la longitud de líneas receptoras y líneas fuentes.....	99
4.8.2 Cálculo del intervalo entre receptores y fuentes.....	100
4.8.3 Cálculo del número de receptores por líneas.....	101
4.8.4 Cálculo de la cobertura.....	101
4.9 Orientación de las líneas receptoras y fuentes.....	104
4.10 Cálculo de la apertura migración.....	105
4.11 Generación del modelo de velocidades.....	107
4.12 Creación de las plantillas de diseño.....	110
4.13 Creación del modelo geológico.....	113
4.14 Modelado sísmico por trazado de rayos.....	116
4.14.1 Parámetros de iluminación.....	117
4.12.2 Parámetro de búsqueda de rayos.....	117
CAPÍTULO V.....	120
Resultados y análisis.....	120
5.1 Estimación de frecuencia máxima.....	120
5.2 Función de velocidades.....	123
5.3 Análisis del buzamiento de las estructuras.....	124

	Página
5.4 Selección del tamaño de bin	129
5.4.1 Resolución vertical	129
5.4.2 Resolución horizontal	129
5.5 Determinación del offset máximo y mínimo.....	131
5.5.1 Estudio de rayo crítico	131
5.5.2 Estudio por estiramiento NMO.....	135
5.6 Orientación de las líneas receptoras y fuentes.....	138
5.7 Definición de los diseños finales.....	142
5.8 Análisis de cobertura	146
5.9 Análisis del gráfico de araña	149
5.10 Análisis del diagrama de rosa.....	152
5.11 Análisis de la distribución de offset	154
5.12 Análisis del estudio trazas vs offset	156
5.13 Análisis de estudio unique fold y redundence fold	159
5.14. Análisis del estudio de atenuación por número de ondas.....	164
5.15 Análisis del estudio respuesta del apilado (stack analysis)	166
5.16 Análisis de los mapas de cobertura CRP.....	169
5.17 Análisis económico	178
CAPÍTULO VI.....	180
Conclusiones	180
Recomendaciones	183
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	184

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Fig. 1.1 Ubicación del área de estudio..	5
Fig. 1.2 líneas sísmicas del proyecto Zulia Oriental 1991	6
Fig. 1.3 líneas sísmicas del proyecto Lagunillas-Bachaquero 1995	7
Fig. 1.4 Estación sismográfica terrestre – 24 geófonos.	8
Fig. 1.5 Ubicación del proyecto Oro Negro 2D 1997	9
Fig. 1.6 Estacado de las líneas sísmica del proyecto Oro Negro 2D 1997 ¡Error!
Marcador no definido.	
Fig. 1.7 Distribución del proyecto Bachaquero 3D en el área.	10
Fig. 1.8: Modelo geológico mostrando lengua diapirica y su relación con la fallas listricas..	12
Fig. 2.1 Ubicación de la cuenca del lago de Maracaibo	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 2.2. Corte estructural NW-SE a través de la cuenca de Maracaibo, desde los Andes Merideños hasta la Serranía de Perijá.....	14
Fig. 2.3 Esquema de la falla de Icotea.	16
Fig. 2.4 Ubicación de la zona de estudio durante la fase de rifting o apertura oceánica entre Triásico – Jurásico	18
Fig. 2.5 Ubicación de la zona de estudio durante la formación de la cuenca retroarco entre el Jurásico y Cretácico.	19
Fig. 2.6 Ubicación de la zona de estudio durante la el emplazamiento de las napas de Lara entre el Cretácico hasta el presente.	22
Fig. 2.7: Sección idealizada- conceptual a través de los alineamientos estructurales de Ceuta, Mene Grande, Motatán y Burro negro.....	24
Fig. 2.8 La línea sísmica ZO-97C-01 revela la presencia de un diapiro asociado a la movilización del lodo de la Fm. Colón.....	26

Fig. 2.9: Ubicación relativa de los principales elementos estructurales que afectan el área.....	27
--------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Página

Fig. 2.10: Secciones a trazos de líneas sísmicas norte-sur a través de la estructura de Burro Negro – Paují.....	29
Fig. 2.11. Modelo conceptual tridimensional que muestra la posible relación entre las fallas de Pueblo Viejo, Valera y Burro Negro.	30
Fig. 2.12 Sección estratigráfica indicando los datos de pozos utilizados para la correlación estratigráfica de las unidades sísmicas.	32
Fig. 2.13: Perfil A localizado en el norte de la Costa Oriental del Lago en la dirección de transporte tectónico. La unidad resaltada en verde representa la Formación Colón.....	34
Fig. 2.14. Ubicación e interpretación de las secciones NE-C-0 hasta la NE-C-4.	35
Fig. 2.15: Columna estratigráfica de la Cuenca de Maracibo	37
Fig. 3.1 Conversión de una onda incidente P donde la cantidad de energía de las ondas incidentes se reparte entre las ondas reflejadas, las refractadas y la absorción natural del terreno.	40
Fig. 3.2 . Aplicación del principio de Huygens a la reflexión (A) y la refracción (B). Tomado de	40
Fig. 3.3. Esquema básico de la emisión y recepción de los rayos reflejados en las distintas capas reflectoras..	41
Fig. 3.4. Rayo reflejado que se origina para ángulos de incidencia pequeños. Las ondas rebotan sobre el techo de la segunda capa.....	42
Fig. 3.5. Esquema del recorrido de los rayos reflejados y obtención de la traza CMP..	43
Fig. 3.6. Agrupación suma de todas las reflexiones de un mismo CMP para obtener una traza CMP e imagen sísmica del terreno (sección sísmica)..	44

Fig. 3.7. Representación general de un levantamiento sísmico 2D y su vista en planta	45
Fig. 3.8 Ejemplo de adquisición de footprint.....	48
Fig. 3.9. Disposición de las líneas de tiro y líneas receptoras.....	50
Página	
Fig. 3.10. Ilustración de la Caja o Box, Bin y Super Bin.....	51
Fig. 3.11. Ilustración del Patch y Salvo.	52
Fig. 3.12. Ilustración de Swath y del Template.....	53
Fig. 3.13. Desplazamiento de un template en un levantamiento.....	54
Fig. 3.14. Ilustración del inline offset, cross- line offset, y offset máximo.	55
Fig. 3.15. Diagrama representativo del offset mínimo.	56
Fig. 3.16. Distribución de offset.....	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 3.17. Suma de trazas de un mismo Bin forman la cobertura por fin en un levantamiento.....	59
Fig. 3.18. Se muestra la hipérbola colapsada y representación gráfica de la apertura migración..	62
Fig. 3.19. Diagrama de full-fold área y fold taper en un diseño de adquisición.	63
Fig. 3.20. Áreas de un levantamiento sísmico 3D.....	64
Fig. 3.21. Relación entre la velocidad, frecuencia, longitud de onda y profundidad. 65	
Fig. 3.22. Ilustración de la zona de Fresnel.....	66
Fig. 3.23 Número de ondas de Nyquist. Plano (f,k) donde existe un numero de onda máximo donde la energía es nula para frecuencia mayores a f_{max}	69
Fig. 3.24. Disposición de los elementos perteneciente al diseño de parámetros de la adquisición sísmica 3D.	70
Fig. 3.25. Distribución de offset y azimuth para un CMP bin.	72
Fig. 3.26. Ilustración del diagrama de araña en un conjunto de bines.	73
Fig. 3.27 Ejemplo de diagrama de palitos (stick diagram).	73
Fig. 3.28 Ejemplo del diagrama de rosa.....	74
Fig. 3.29 Trazado de rayos elaborado en el programa Mesa	78

Fig. 4.1 Esquema de la metodología de trabajo empleado durante el desarrollo del proyecto	80
-------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Página

Fig. 4.2 Distribución de los pozos en el área, se encuentra clasificados por su calidad de datos.....	84
Fig. 4.3 Distribución de los pozos y líneas 2D seleccionadas para el desarrollo del proyecto de diseño.	85
Fig. 4.4 Distribución de los objetivos para el estudio. Los de color amarillo que se encuentra hacia el norte los clasificados como prospectos y los dos del sur clasificado leads.....	87
Fig. 4.5 Ejemplo de ventana de frecuencia calculada para la región somera de la línea Lbl-95c.....	89
Fig. 4.6 Ejemplo de la Corrección de un pseudo-sónico por el registro checkshot para el pozo LS1387	91
Fig. 4.7 Ejemplo del suavizado por mediana móvil para el pozo ls1387. En rojo se observa como la mediana de 100 y 200 mantienen los picos abruptos.	92
Fig. 4.8 Ejemplo del cálculo de los mapas de buzamientos para al superficie Colon con el programa OMNI.....	94
Fig. 4.9 Perfil del modelo geológico usado para la estimación del offset máximo y mínimo	96
Fig. 4.10 Estiramiento NMO en la zona este del modelo.	97
Fig. 4.11 Estiramiento NMO en la zona este del modelo.	97
Fig. 4.12 Estudio de rayo crítico en la superficie EI1 para la estimación del offset máximo	98
Fig. 4.13 Parámetros a calcular en el diseño	100
Fig. 4.14 Ejemplo de estudio de buzamientos realizado en la superficie EM1	105
Fig. 4.15 Mapa de tendencia de apertura migración de la superficie EI1	106

Fig. 4.16 Mapa de tendencia de apertura migración para la superficie Colón.....	107
Fig. 4.17 Zonas de velocidades creadas para los pozos utilizados en la investigación	108
Fig. 4.18 Creación de las regiones estructurales para el modelo de velocidades.....	109
Página	
Fig. 4.19: Vista lateral del modelo de velocidades obtenido para la zona de estudio.	109
Fig. 4.20 Vista de la ventana del asistente de diseño del programa OMNI.	110
Fig. 4.21 Ventana de selección del polígono del diseño en el programa OMNI.	112
Fig. 4.22 En la parte derecha de la imagen el “scrip” de análisis en el programa OMNI. En la parte izquierda de la imagen vemos las opciones de los distintos análisis que ofrece el programa	113
Fig. 4.23 Interpolación de las superficies realizada en el programa SURFER con espaciamiento de 500 m.....	114
Fig. 4.24: Modelos geológico generado en el programa MESA para el trazado de rayos.....	115
Fig. 4.25. Ejemplo del mapa de velocidad media obtenido para la región limitada entre la superficie EI4 y EI1	116
Fig. 4.26 Parámetros de iluminación (delta theta y delta phi)..	117
Fig. 4.27 Trazado de rayos realizado en el programa MESA. Del lado derecho se encuentra el correspondiente al diseño 1 y al lado izquierdo diseño 2.....	118
Fig. 4.28 Ventana para el cálculo de atributos del trazado de rayos en el programa MESA	119
Fig. 5.1 Espectro de frecuencia para una ventana somera de la línea lbv95.....	121
Fig. 5.2 Espectro de frecuencia para una ventana profunda (nivel objetivo) en la línea lbv95	121
Fig. 5.3 Espectro de frecuencia para una ventana somera de la línea ZO-91C.....	122
Fig. 5.4 Espectro de frecuencia para una ventana profunda (nivel objetivo) en la línea ZO-91C	122

Fig. 5.5 Gráfica con los check-shot de los pozos utilizados en la investigación.	123
Fig. 5.6 Gráfica de la función de velocidades obtenida	124
Fig. 5.7 Mapa de distribución de los buzamientos de la superficie EM1.	125
Fig. 5.8 Mapa de distribución de los buzamientos de la superficie EI4.....	126

Página

Fig. 5.9 Mapa de distribución de los buzamientos de la superficie EI1.....	127
Fig. 5.10 Mapa de distribución de los buzamientos de la superficie Colón.....	128
Fig. 5.11 Estudio de rayo crítico para offset mínimo.....	131
Fig. 5.12: Estudio de rayo crítico en la zona oeste del modelo, para la estimación del offset máximo.	133
Fig. 5.13 Estudio de rayo crítico en la zona central del modelo, para la estimación del offset máximo.	134
Fig. 5.14 Estiramiento NMO de 20% y 30% al extremo oeste del perfil	135
Fig. 5.15 Estiramiento NMO de 20% y 30% al extremo oeste del perfil	137
Fig. 5.16 Desplazamiento CMP-CRP en el modelo.....	138
Fig. 5.17 Distribución azimutal de los buzamientos de las estructuras en la superficie EM1.	139
Fig. 5.18 Distribución azimutal de los buzamientos de las estructuras en la superficie EI4.....	140
Fig. 5.19 Distribución azimutal de los buzamientos de las estructuras en la superficie EI1.....	141
Fig. 5.20 Distribución azimutal de los buzamientos de las estructuras en la superficie Colón.....	142
Fig. 5.21 Pre-plots del diseño con cobertura inferior a 60.....	143
Fig. 5.22 Pre-plot de 14 líneas receptoras y offset mínimo levemente superior al necesario	144
Fig. 5.23 Diseño 1 que consta de 14 líneas receptoras y offset mínimo optimizado	145
Fig. 5.24 Diseño 2 de 16 líneas receptoras para un mayor número de fuentes y receptores	145

Fig. 5.25 Mapa de cobertura CMP obtenida para el diseño 1	147
Fig. 5.26 Mapa de cobertura CMP obtenida para el diseño 2	148
Fig. 5.27 Gráfico de araña obtenido para el diseño 1.....	149
Fig. 5.28 Gráfico de araña obtenido para el diseño 2.....	150
	Página
Fig. 5.29 Diagrama de rosas obtenido para el diseño 1	152
Fig. 5.30 Diagrama de rosas obtenido para el diseño 2.	153
Fig. 5.31 Estudio de distribución de offset para el diseño 1, se señala con el círculo rojo traza con redundancia 4.....	154
Fig. 5.32 Estudio de distribución de offset para el diseño 2, se señala con el círculo rojo traza con redundancia 4.....	155
Fig. 5.33 Gráfico de conteo de trazas vs offset obtenido para el diseño 1	157
Fig. 5.34 Gráfico de conteo de trazas vs offset obtenido para el diseño 1	158
Fig. 5.35 Estudio de unique fold (fold único) obtenido en el diseño 1	159
Fig. 5.36 Estudio de unique fold (fold único) obtenido en el diseño 2.....	160
Fig. 5.37 Estudio de redundant fold (fold redundante) obtenido en el diseño 1	161
Fig. 5.38 Estudio de redundant fold (fold redundante) obtenido en el diseño 2.....	162
Fig. 5.39 Análisis de la atenuación por número de onda obtenido para el diseño 1, se marca en el círculo rojo la atenuación que se produce en el bin	164
Fig. 5.40 Análisis de la atenuación por número de onda obtenido para el diseño 2, se marca en el círculo rojo la atenuación que se produce en el bin	165
Fig. 5.41 Respuesta de apilado obtenida para el diseño 1.....	166
Fig. 5.42 Respuesta de apilado obtenida para el diseño 2.....	167
Fig. 5.43 Grafico de tiempo vs desviación de estándar de la amplitud calculado a partir de la respuesta de apilado. El grafico de la derecha pertenece al diseño 1 y el de la izquierda al diseño 2.....	168
Fig. 5.44 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI4 en el diseño 1.	170
Fig. 5.45 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI1 en el diseño 1.	171
Fig. 5.46 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI4 en el diseño 2.	172

Fig. 5.47 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI1 en el diseño 2..	173
Fig. 5.48 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI4,	174
Fig. 5.49 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI1	175

Página

Fig. 5.50 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI4	176
Fig. 5.51 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI1	177

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Inventario elaborado para los pozos de la zona del área de diseño, se muestra los registros existentes por cada pozo en el área.....	82
Tabla 4.2 Rango de prioridad según acumulación de crudos para los objetivos clasificados como prospecto	87
Tabla 4.3 Rango de prioridad según acumulación de crudos para los objetivos clasificados como leads	88
Tabla 4.4 Orientación de levantamientos previos	104
Tabla 5.1 Datos de la frecuencia máxima necesaria para resolver 100 ft.	129
Tabla 5.2 Propuesta de tamaños de bin para distintas profundidades de los topes en el área de estudio	130
Tabla 5.3 Verificación del bin de 25 m en los topes EM2 y EM1	130
Tabla 5.4 Verificación del bin de 25 m en los topes EI4.	130
Tabla 5.5 Rangos de offset mínimo para el estudio de rayo crítico.....	132
Tabla 5.6 Rango de offset máximo para el estudio de rayo crítico.....	134
Tabla 5.7 Parámetros calculado para el diseño del área de estudio	143
Tabla 5.8 Mediana y promedio de la desviación estándar de la amplitud obtenida para ambos diseños	168
Tabla 5.9 Tabla de costos asociados a cada diseño.....	179

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1-Planteamiento del problema

La cuenca de Maracaibo está ubicada en la zona noroeste de Venezuela, ocupa una superficie de 50.000 km². Sus límites son la falla de Oca al norte, la serranía de Trujillo en el este, los Andes de Mérida en el sureste, y las serranías de Perijá y Los Micolones en el oeste. Esta cuenca, tal como se conoce hoy, empezó a formarse en el Mioceno; cuando ocurrió el levantamiento de estas cadenas montañosas (Talukdar S, Marcano F, 1994).

El área que hoy ocupa la cuenca de Maracaibo sufrió tres fases tectónicas de grandes consecuencias: la fase de “*rifting*” o formación de fosas tectónicas, durante el Triásico-Jurásico; la fase de margen continental pasivo, desde el Neocomiense hasta el Campaniense y la fase del margen continental activo, que abarcó desde el Maastrichtiense hasta el presente, (Talukdar S, Marcano F, 1994) por lo que podemos hablar de una cuenca con una historia estructural compleja.

Según Pestman P. *et al*, (1998), es considerada una de las cuencas más petrolíferas a nivel mundial y en Petróleos de Venezuela División Occidente la actividad llevada a cabo por la Gerencia de Proyectos de Estudios Exploratorios durante el año 2010, estuvo concentrada en la revisión, identificación y maduración de nuevas oportunidades para incorporar y actualizar la Base de Recursos de Exploración; además de proponer levantamientos sísmicos y localizaciones exploratorias, que permitan soportar proyectos a corto y mediano plazo, con el fin de proveer los volúmenes de hidrocarburos requeridos, donde la adquisición de datos sísmicos se ve dificultada por la complejidad estructural de la zona norte de la Costa Oriental del Lago.

Se puede considerar la Costa Oriental del Lago como una zona de transición entre la Cuenca del Lago de Maracaibo y la Cuenca de Falcón, en la cual existe una elevada incertidumbre en el modelo estratigráfico de la zona.

Hasta la fecha se han adquirido sísmica terrestre 3D que abarca un área aproximada de 715Km² y líneas sísmicas 2D de 1000 Km aproximadamente. La planificación de proyectos de adquisición futuros, ayudarán a disminuir este rango de incertidumbre y marcan el inicio de futuras localizaciones exploratorias en la zona.

Dentro de la industria petrolera con el método sísmico de reflexión, se puede definir la geometría, disposición y localización de las estructuras geológicas presentes en el subsuelo, las cuales, dado un sistema petrolífero adecuado, puedan funcionar como trampas de hidrocarburos. Este método se ve sujeto a la adquisición de los datos y que éste sea diseñado de tal forma que se cumplan con los parámetros requeridos para iluminar de forma satisfactoria el objetivo del estudio. Por lo antes expuesto elaborar una eficiente metodología de evaluación y un diseño de parámetros de adquisición 3D se hace fundamental para facilitar el proceso de recolección de datos, su futuro procesamiento e interpretación y lograr construir una imagen con geometría y disposición de los estratos en el subsuelo.

Cordson, A., Galbraith, M. y Peirce, J. (2000) proponen parámetros que son importantes considerar al momento de elaborar un diseño de adquisición sísmica, en donde la definición de un objetivo profundo debe ser la de mayor influencia, y directamente a este están relacionados los parámetros más significantes del levantamiento como: rango de offsets (distancias fuente-receptor), intervalo entre estaciones receptoras, intervalo de muestreo, y cobertura de área de estudio; así como estos, los parámetros de resolución también deben ser tomados en cuenta dentro de los factores a considerar al inicio de un proyecto sísmico.

El presente trabajo de investigación se pretende proponer un diseño óptimo para la adquisición de datos en la zona norte de la Costa Oriental del Lago, para que los resultados obtenidos sean de excelente calidad; tomando en cuenta la complejidad

estructural de la zona y sumado a esto la presencia de estructuras diapíricas que dificulta la resolución sísmica (Benguigui y Páez A, 2006). Esto contribuye con el desarrollo y validación del modelo geológico existente para el área de Zulia Oriental, permitiendo madurar y documentar las oportunidades exploratorias dentro de la base de los recursos de exploración, tener un portafolio de oportunidades en el corto y mediano plazo, ayudar a la incorporación de reservas que apalanquen la actividad de perforación y producción de la nación, teniendo presentes la minimización de costos operativos y el impacto ambiental.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar los parámetros de adquisición de un levantamiento sísmico 3D en un área exploratoria terrestre de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Estimar los parámetros de adquisición apropiados para la iluminación de los objetivos geológicos del área de estudio.
2. Evaluar los escenarios de diseños propuestos a través del modelado sísmico directo.
3. Analizar el impacto económico en cada una de las propuestas evaluadas.
4. Seleccionar el diseño óptimo en base a la evaluación técnica económica realizada.

1.3 Justificación

El presente trabajo especial de grado (T.E.G) es importante por ser un requerimiento necesario previo a la fase de adquisición sísmica debido a que la sísmica de reflexión es el método geofísico más usado a nivel mundial para la exploración de hidrocarburos. Por consiguiente la elaboración de un adecuado diseño de los parámetros de adquisición sísmica 3D se hace indispensable. En esta investigación, se

aportara información de carácter exploratorio con lo cual se desea mitigar la incertidumbre presente en el área norte de la Costa Oriental del Lago.

Adicionalmente este trabajo dará continuidad a los proyectos de sísmica 3D generados por Petróleos de Venezuela (PDVSA) concentrados en la revisión, identificación y maduración de nuevas oportunidades para incorporar y actualizar la Base de Recursos de Exploración en la zona norte de la Costa Oriental del Lago.

Sumado a esto, el presente trabajo también es necesario, debido a que en líneas sísmicas 2D de campañas de adquisición sísmica realizadas hacia el límite norte del área que se desea estudiar, se observa la continuación de los lineamientos estructurales de las oportunidades exploratorias; por lo que con este diseño se optimizará la recolección de datos sísmicos que contribuyan a la actualización del modelo geológico-estructural para un área aproximada de 715 km², permitiendo madurar y documentar estas oportunidades exploratorias en la zona occidental del país.

1.4 Ubicación del área de estudio

Estas oportunidades se encuentran ubicadas en la Costa Oriental del estado Zulia en su parte central-norte, con límite al noreste con el estado Falcón y al suroeste con el Lago de Maracaibo (figura.1.1).

Las oportunidades hacia el Norte de la zona de estudio son principalmente estructurales con cierres en tres y cuatro direcciones contra fallas lístricas y reactivación inversa con cierres contra domos de arcilla. En el caso de los objetivos ubicados hacia el Sur se trata de cuerpos sedimentarios superpuestos formado por areniscas y lutitas, depositados en un sistema que actualmente poseen un bajo nivel de estudio.

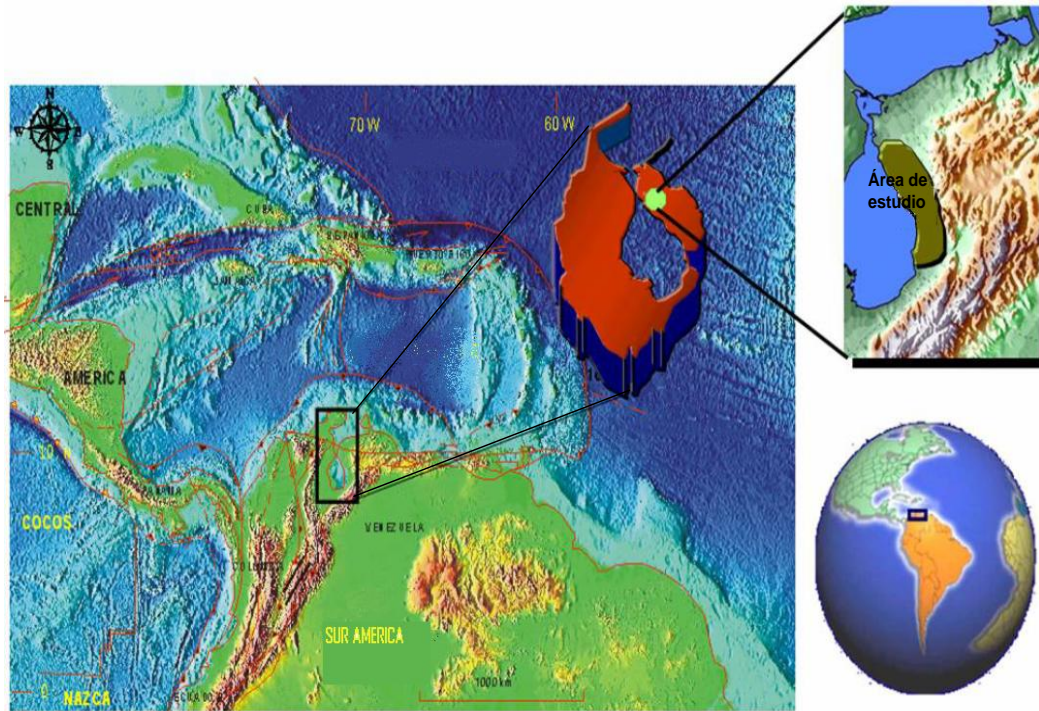


Figura 1.1 Ubicación del área de estudio. Tomado de Benguigui y Páez , (2006).

1.5 Antecedentes

1.5.1 Levantamiento sísmico zo-91c

Fue un levantamiento sísmico 2D, está ubicado en la parte norte central de la Costa Oriental del lago de Maracaibo. El proyecto estuvo ubicado entre los municipios de Baralt, Bachaquero, Lagunillas, Tia Juana, Cabimas y Miranda. El proyecto concluyó en el año 1991 (PDVSA-CGG, 1991)

Consta de 54 líneas para un total de 1393,140 km; las líneas con numeración par fueron orientadas de oeste a este y las impares perpendiculares a estas (figura 1.2).

Se dividieron las características naturales de la zona del proyecto en dos categorías:

- Zonas de llanura ubicadas cerca del lado de Maracaibo para la parte oeste del proyecto

- Zonas de montañas ubicadas al este del proyecto

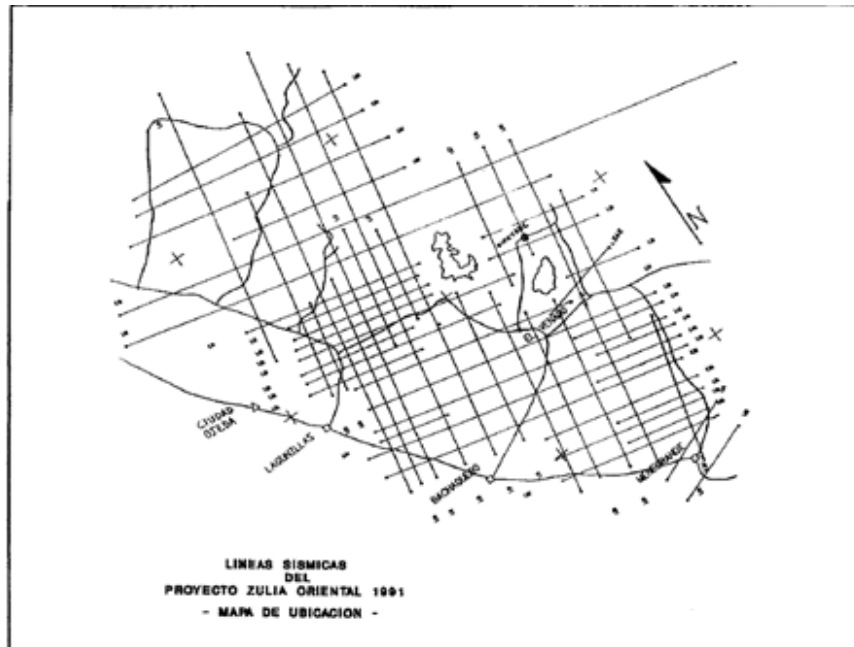


Figura 1.2 líneas sísmicas del proyecto Zulia Oriental 1991 (PDVSA-CGG, 1991)

Las líneas sísmicas atravesaron muchas zonas urbanas lo que implicó la presencia de obstáculos tales como líneas de alta tensión, casa carreteras, entre otros que produjeron dificultades a los diferentes grupos es inclusive exceso de ruido en las grabaciones.

Los parámetros de campo usado en este levantamiento fueron:

- Intervalos entre grupos : 35m
- Intervalos entre puntos de tiros : 35 m
- Offset : 17.5 m

1.5.2 Levantamiento LBV-95C

Este levantamiento sísmico (2D) tiene forma de polígono regular, de orientación

noroeste- suroeste, está ubicado en los municipios de Baralt, Valmore Rodriguez, Lagunillas y Cabimas del estado Zulia (PDVSA-MARAVEN, 1995).

Fueron un total de 30 líneas sísmicas registradas con 240 canales empelando vibradores y explosivos como fuentes de energía, haciendo un total de 643500 km de proyecto (figura 1.3). Este proyecto abarco áreas urbanas, autopista, carreteras, campos petroleros y aguas del lago de Maracaibo.

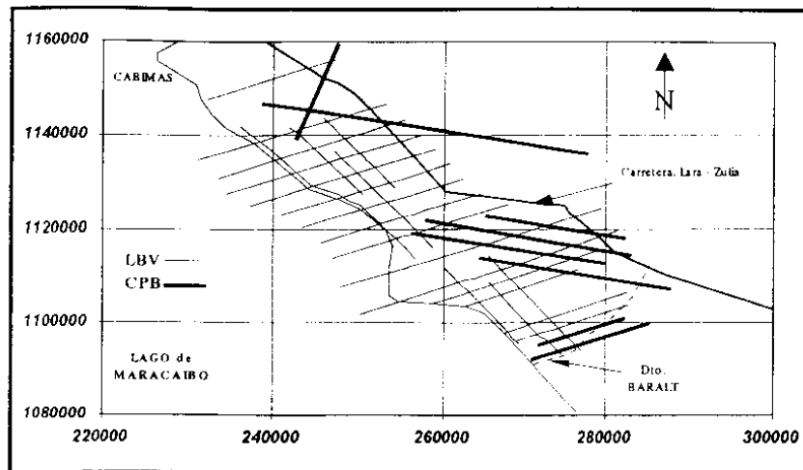


Figura 1.3 líneas sísmicas del proyecto Lagunillas-Bachaquero 1995

El trabajo se realizó en dos etapas:

1. Se utilizaron dos fuentes de energía de manera simultánea, una con explosivos y otra con vibradores con barridos aleatorios.
2. Se combinaron vibradores y cañones de aire.

La adquisición de los datos sísmicos tuvo como finalidad determinar o identificar entrapmes de tipo estructural o estratigráfico en el subsuelo las cuales puedan albergar hidrocarburos.

Este es el esquema de la estación sismográfica terrestre:

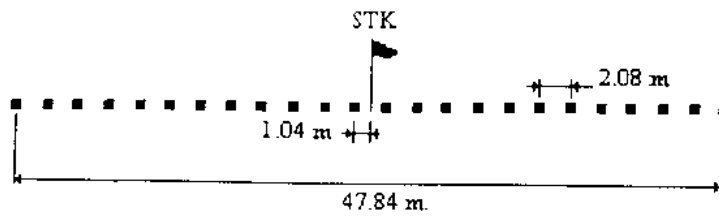
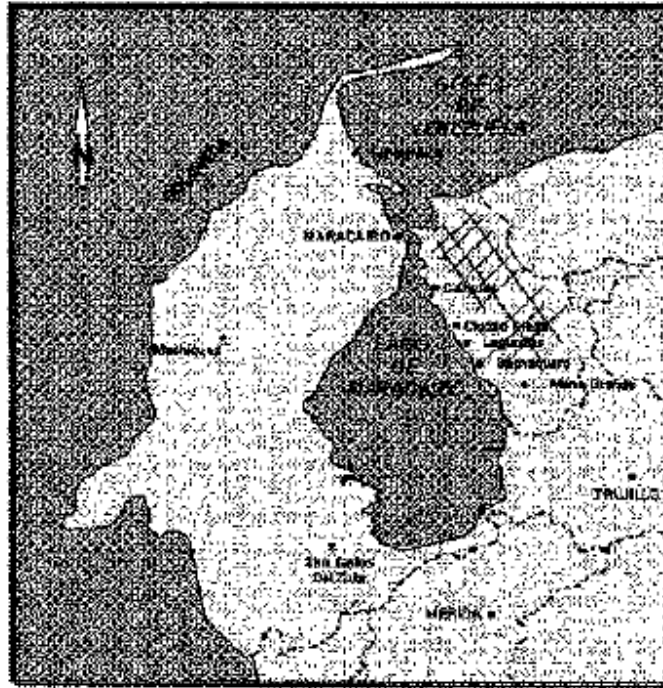


Figura 1.4 Estación sismográfica terrestre – 24 geófonos.

1.5.3 Levantamiento ONE-97C-1

El levantamiento oro negro 2D está ubicado en la región oriental del estado Zulia, abarca los municipios Baralt, Bolivar, Cabimas, Lagunillas, Miranda, Santa Rita y Valmore Rodriguez (figura 1.5).

Esta constituido por 42 líneas de exploración (PDVSA-CGG,1997), de las cuales 15 se identificaron con numeración impar, orientadas de Sur-Este con azimuth de 150° y las pares ubicadas perpendiculares a estas.



*Figura 1.5 Ubicación del proyecto Oro Negro 2D 1997, Tomado de (PDVSA-
CGG,1997)*

La metodología del levantamiento consistió en un recorrido de la zona para identificar y ubicar los puntos de control. Para la adquisición:

- En caso de zonas rurales y despobladas se realizó mediante dinamita.
- En zonas urbanas e industriales se realizó con camiones vibradores.

Para el diseño del proyecto se utilizó un arreglo simple de las estacas, esta se encuentran separadas cada 40 m, como se observa en la figura:

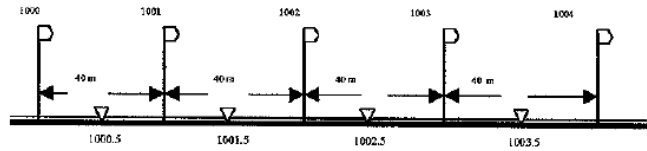


Figura 1.6 Estacado de las líneas sísmicas del proyecto Oro Negro 2D 1997

1.5.4 Levantamiento BAC-97C-3D

El proyecto sísmico Bachaquero 3D se circunscribió entre los municipios Valmore Rodríguez y Lagunillas, ocupando una superficie de 262,202 km² .(PDVSA-SOLOPETROL, 1997)

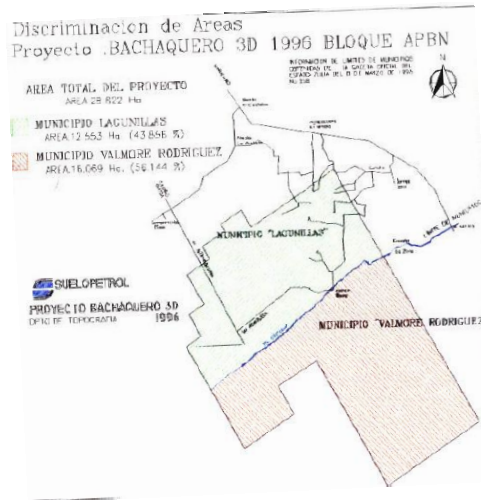


Figura 1.7 Distribución del proyecto Bachaquero 3D en el área. Tomado de (PDVSA-SOLOPETROL, 1997)

El objetivo de esta adquisición fue tratar de determinar características detalladas de las areniscas de los yacimientos petrolíferos ubicados en la formación Lagunillas a profundidades variables entre 1000 y 5000 pies.

La geometría usada fue de 120 m entre líneas de tiro y 240 m entre líneas receptoras y un bin de 40 x 40 m. En otras zonas se registró una geometría de grabación para obtener un muestreo espacial más denso y así de esta manera lograr obtener alta resolución de pequeños objetivos de horizontes someros, por eso se utilizó el estacado de receptores de 20 m, líneas de disparos separadas cada 60 m y líneas receptoras separadas 120m con una distancia entre puntos de tiros de 40 m.

Cabe destacar que la mayoría de información de las líneas sísmicas de los levantamientos antes mencionados, actualmente no se encuentra interpretadas aunque el proyecto Tigre – Pueblo Viejo se encargó de reunir clasificar e interpretar la información que se encuentra hoy disponible.

1.5.6 Proyecto Tigre - Pueblo Viejo, estudios regionales del sistema petrolífero exploración:

Este trabajo se enfocó en detallar las actividades realizadas en el área de Zulia Oriental las cuales se orientaron hacia la validación de datos sísmicos y de pozos asociados a las plataformas existentes en la gerencia, así como el estudio y análisis del marco tectónico regional asociado a la zona de estudio y su posterior integración con el desarrollo de un modelo geológico regional coherente en el área conocida como Tigre Pueblo Viejo

El modelo geológico tuvo como base de datos nuevas interpretaciones de líneas sísmicas 2D y correlación con sismogramas sintéticos obtenidos con parte de los datos de 100 pozos previamente seleccionados (figura 1.8). Dicho modelo regional inicial permitió la diferenciación de tres dominios estructurales en base a los cuales se estableció la actual división del proyecto en tres áreas: Zulia Oriental Norte, Zulia Oriental Centro y Zulia Oriental Sur.

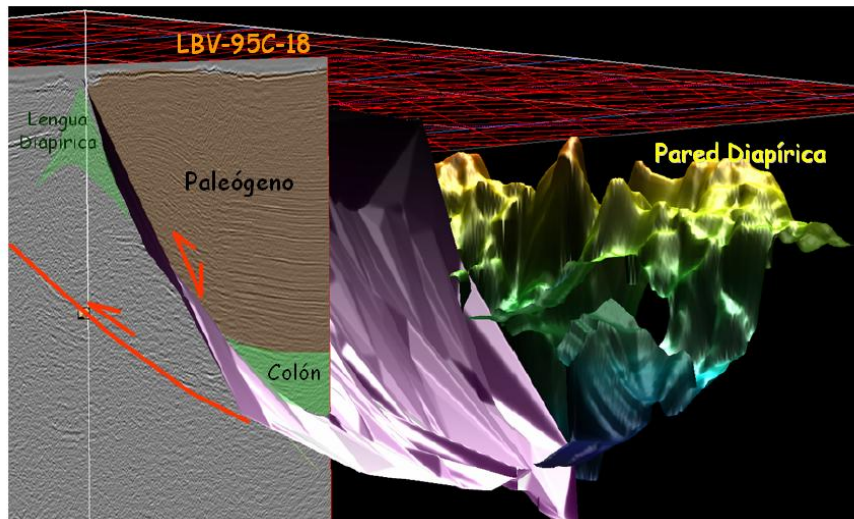


Figura 1.8 Modelo geológico mostrando lengua diapirica y su relación con la fallas listricas. Tomado de Benguigui y Páez, (2006).

La base de datos sísmica consto de las siguientes fases:

- Definición de un inventario de los levantamientos cargados con los cuales se inició el proceso de interpretación sísmica.
- Carga de líneas y archivos sísmicos depurados en ambas plataformas, incluyendo aquellos que fueron reprocesadas.
- Selección de 100 Pozos por disciplinas y carga de la información validada como: información básica, desviaciones y registros eléctricos. Los datos de los pozos que contienen *checkshots* fueron ubicados de diversas fuentes.
- Filtrado de los 133 horizontes interpretados tanto en 2D como 3D de los cuales fueron seleccionados 9 horizontes que corresponden en su mayoría a volúmenes de sísmica integrados de *grids* interpretados para varias superficies.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1 Geología regional

La cuenca de Maracaibo ocupa una superficie de 50.000 km² y colinda al noroeste con la Sierra de Perijá, en el suroeste por el macizo de Santander, Colombia, y en el sureste de los Andes venezolanos. El límite noreste de la cuenca está formada por la zona de las estribaciones occidentales de la Cordillera de Trujillo, que lo separa de la cuenca de Falcón, como se observa en la figura 2.1.

La Cuenca de Maracaibo revela la interacción entre las placas del Caribe, Suramérica, Nazca y el Istmo de Panamá durante el Cenozoico. La interacción está asociada al régimen transpresivo relacionado a las fallas Oca, Santa Marta y Boconó (figura 2.1.) las cuales definen un bloque triangular denominado Bloque de Maracaibo (Benguigui y Páez, 2006)

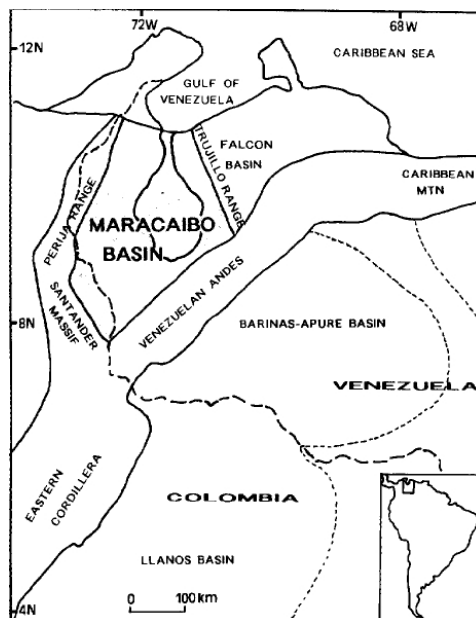


Figura 2.1 Ubicación de la cuenca del lago de Maracaibo

La Cuenca de Maracaibo es la cuenca petrolífera más importante de Venezuela. La roca madre por excelencia es la Formación La Luna, de edad Cretácico Tardío (figura 2.2). Schlumberger (1997) nos dice que sus facies se extendieron por toda Venezuela Occidental hasta Colombia. Se han encontrado rocas madre de importancia secundaria en los Grupos Cogollo (Miembro Machiques de la Formación Apón) y Orocué (Formación Los Cuervos). El petróleo fue generado, migrado y acumulado en diversos pulsos, siendo el más importante el ocurrido durante el levantamiento andino. Donde las principales rocas yacimiento clásticas son las Formaciones Río Negro y Aguardiente

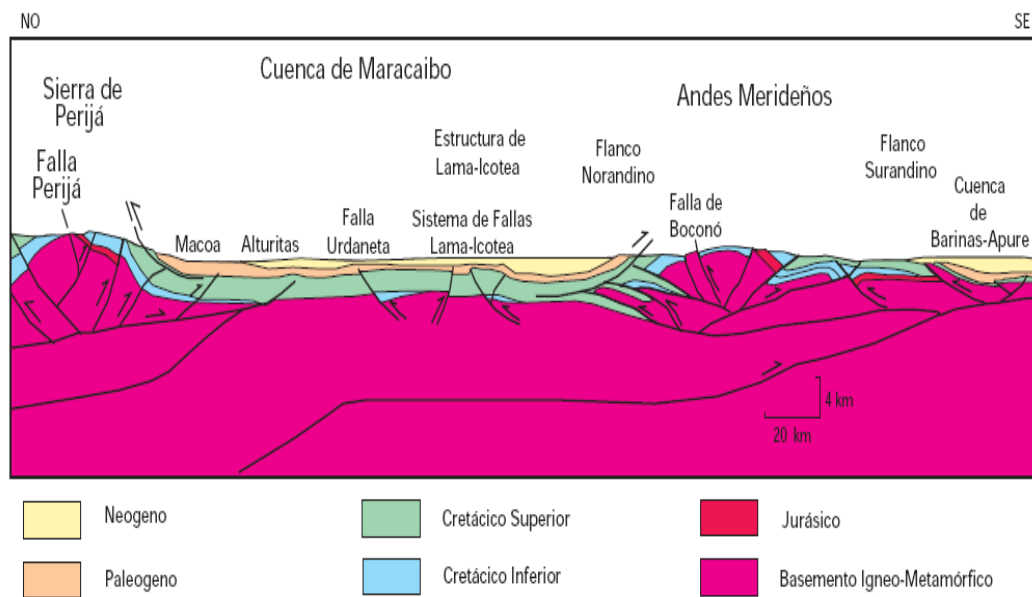


Figura 2.2 Corte estructural NW-SE a través de la cuenca de Maracaibo, desde los Andes Merideños hasta la Serranía de Perijá. Tomado de Schlumberger (1997).

2.1.1 Características estructurales regionales

La cuenca del lago de Maracaibo se encuentra enmarcado por tres lineamientos orogénicos mayores: La Sierra de Perijá al Oeste, Los Andes de Mérida al Sureste y

la Serranía de Trujillo al Este, al cual se une el sistema de falla de Oca hacia el Norte; Gonzáles de Juana *et al* (1980) clasifica a estos elementos tectónicos como “Cinturones Móviles”.

La falla de Oca constituye el límite septentrional de la cuenca del Lago de Maracaibo, al menos en su acepción estructural. Se le ha atribuido movimiento transcurrente de magnitud variable, relacionando su movimiento con la falla de San Sebastián, en la costa centro norte de Venezuela y la falla de El Pilar, al sur de la Península de Paria. Esta falla se mantuvo activa durante distintos periodos geológicos en particular al final del Eoceno y antes de la sedimentación Post Eoceno, tuvo movimientos horizontales durante el Post-Eoceno. Los efectos de la falla de Oca no afectaron en forma apreciable la estructura de la Cuencas del Lago de Maracaibo (Calleja R, 1998).

Dentro de los cinturones móviles se desarrolla un amplio sinclinorio que integra estructuralmente a la Cuenca Petrolífera del Lago de Maracaibo, dentro de los cuales se conocen diversos alineamientos tectónicos, de los cuales pocos son importantes para la producción de petróleo. El alineamiento estructural andino se refleja en pequeñas estructuras de Los Andes venezolanos, dentro de La Cuenca de Maracaibo, en donde los ejes anticlinales y fallas mas importantes tienen una fuente componente norte.

Calleja R, (1998) hace referencia a que se conocen cinco alineamientos de dirección aproximada sur-norte que se destacan entre todos los demás por su pronunciado relieve estructural, enumerados de noroeste a sureste. Estos son el alineamiento de La Paz- Mara-El Moján, el alineamiento de la falla de Icotea, el alineamiento de Pueblo Viejo-Ceuta, la estructura de Misoa-Mene Grande y el anticlinorio de Tarra, situado en la parte suroccidental de la cuenca, cerca de la frontera con Colombia. Una característica común a estos cinco alineamientos es el severo fallamiento longitudinal sobre, o cerca de, las zonas de crestas.

El alto de Icotea es descrito por Calleja R, (1998) como el principal de todo el sistema estructural del Lago de Maracaibo, tanto por su longitud, no menos de 150 km, como por su pronunciado relieve.

La Falla de Icotea es realmente un sistema complejo de fallamiento transcurrente sinistral que atraviesa el Lago de Maracaibo en dirección noreste-suroeste con un desplazamiento horizontal de 16 kilómetros, desde Punta Icotea (Cabimas) hasta las bocas del Río Catatumbo, donde se ramifica y pierde sus características. Frecuentemente da lugar, por trituración, a una cuña hundida. El sistema de Icotea se combina con otras fracturas longitudinales subparalelas, y se encuentra afectado por el sistema de fallas transversales característico de toda el área central del Lago. El sistema de Icotea se combina con otras fracturas longitudinales subparalelas, y se encuentra afectado por el sistema de fallas transversales característico de toda el área central del Lago (figura 2.3).

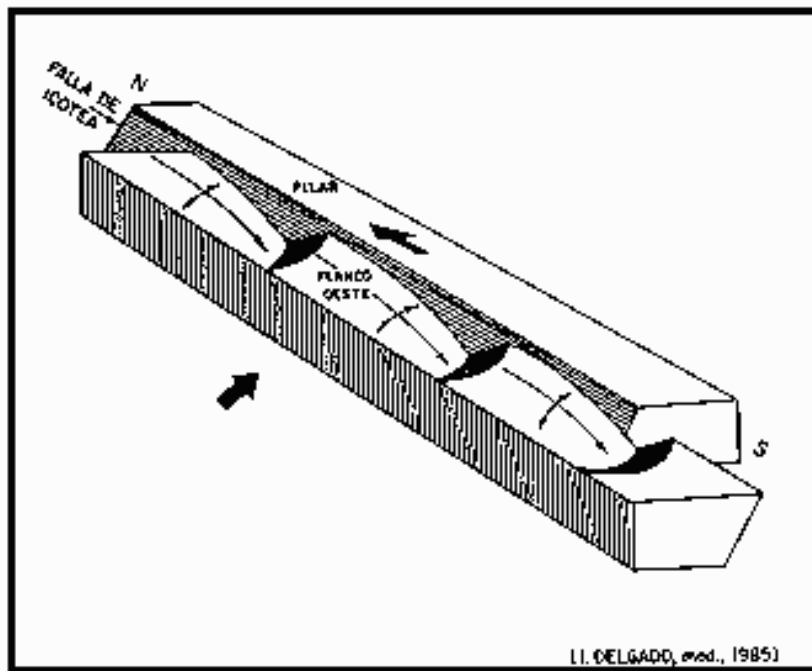


Figura 2.3 Esquema de la falla de Icotea. Toma de Calleja R, (1998)

2.1.2 Evolución tectónica de la cuenca del Lago de Maracaibo

La evolución de la Cuenca del Lago de Maracaibo ha sido bastante compleja a lo largo del tiempo geológico debido a una serie de trasgresión y regresiones marinas que fueron determinantes para la sedimentación, tanto de rocas madres generadoras de hidrocarburos como de reservorios adecuados para almacenarlos.

Talukdar S y Marcano F, (1994) resumen la evolución de esta cuenca en tres momentos de importante deformación, entre el Cretácico y Paleoceno; donde resaltan el levantamientos de Los Andes y de Perijá, iniciando así la formación de trampas para hidrocarburo. Durante el Eoceno y Oligoceno se relaciona con compresiones del noreste contra el noroeste de Sur América, y hay evidencia de inversión estructural. Por último desde Mioceno al Plioceno existe una intensa deformación, pliegues, fallas y transpresión a lo largo de la falla de Bocono es la causa de la elevación de los Andes en contra de foredeep adyacentes.

En el presente trabajo se describirán los eventos tectónicos desde el Tríasico hasta el presente para conocer de forma mas detallada la evolución de la cuenca del Lago de Maracaibo

2.1.3 Pre – Triásico: ocurre el metamorfismo y plegamiento andino, intrusiones ígneas, formación del Arco de Mérida, ocasionando el levantamiento de la región central del Lago de Maracaibo precursora de la subsiguiente Plataforma de Maracaibo. El borde continental se levanta produciendo retirada general de los mares de Venezuela Occidental (Calleja, 1998).

Según Ghosh S. *et al* (1995), La Flla de Icoatea divide el Pre-Triásico de la cuenca de Maracaibo en dos provincias: Sierra de Perijá- Urdaneta y Lago Centro – Flanco Norandino. Las diferencias entre las dos provincias habrán de ejercer un control significativo en la sobre la formación posterior de la cuenca.

2.1.4 Triásico – Jurásico: este periodo se caracteriza como una etapa de relajación y

rifting, se inicia en el Tríasico y continúa hasta el Jurásico Superior. Este rifting se debe tanto a la apertura del Océano Atlántico (figura 2.4), como a la extensión de la zona del retroarco, al este de la Cordillera Central Colombiana. Existe una sobreposición del rift Tríasico por el Jurásico en la región centro occidental de la Cuenca de Maracaibo. Las fallas de borde de los rifts persistieron como zona de debilidad que dio origen a sedimentación preferencial en las depresiones. En estas zonas se observan grandes rasgos de inversión entre los cuales están los levantamientos perijanero, andino y los asociados con las fallas de Icoatea y Pueblo Viejo.

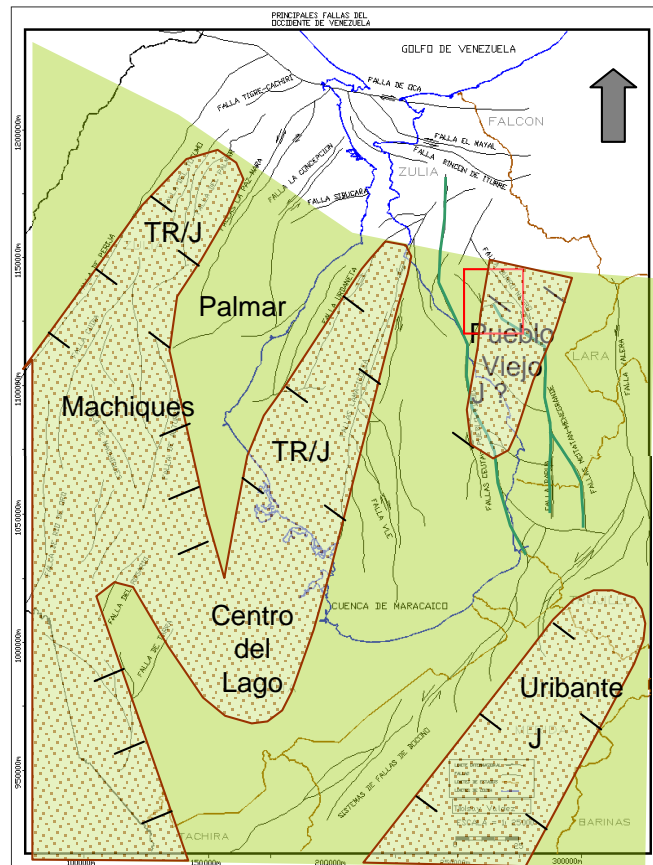


Figura 2.4 Ubicación de la zona de estudio durante la fase de rifting o apertura oceánica entre Triásico – Jurásico

2.1.5 Jurásico – Cretácico: en el Jurásico la costa del Pacífico de Colombia pasó de

volcánico con el continente suramericano. Ocurre subducción del continente por debajo del arco volcánico por lo que el retroarco del cretácico se convierte en una antifosa. (Ghosh S. *et al* 1995),

El Paleoceno se caracterizó por la orogénesis de la Cordillera Occidental de Colombia, debido a la colisión anterior mente explicada. Pestman, P., Ghosh S, *et al*(1995) explican que también ocurrió el levantamiento de la Cordillera Central persistente, y se formó una cuenca ante país al este de la misma. El Paleoceno tardío se caracteriza por un hiato que se debe a un ligero levantamiento de la plataforma, posiblemente causado por una Flexión del alto periférico relacionado con el desarrollo de la cuenca ante país de Orocué.

Durante el Eoceno persiste el sistema de compresión de oeste a este, con la presencia de la fosa de Orocué; sin embargo (Ghosh S. *et al* 1995), indica que el principal elemento que controla la tectónica de la región es el emplazamiento de las Napas de Lara que origina tres patrones estructurales

1. Una antifosa en Zulia y Falcón
2. Un posible alto periférico en la zona central de la cuenca
3. Fallas normales entre las cuales son las de Tigre-Cachiri, La Paz, Urdaneta, Icotea, Pueblo Viejo y Begote.

2.1.7 Eoceno – Oligoceno: Durante el Eoceno Tardío Maracaibo entra en un período de fallamiento importante, particularmente en los alineamientos longitudinales del lago, con ejes de plegamiento orientados de sur a norte. Subsiguiente a esto hay una erosión profunda de las formaciones del Eoceno medio que produce remoción casi total de Paují, Mene Grande y remoción parcial de Misoa en alineamientos occidentales del lago (Calleja, 1998).

Por otro lado Ghosh S. *et al* (1995), se deja expuesto que en este periodo se genera el levantamiento de la Sierra de Perijá. El sistema de esfuerzos que afecta la Sierra de

Perijá, también ejerce influencia sobre el Lago de Maracaibo al provocar pulsos compresionales en dirección NO-SE a E-O, los cuales causan inversión estructural del sistema transcurrente de rumbo N a N-NE. Se inicia el levantamiento andino, lo cual se expresa en la cuenca de Maracaibo mediante esfuerzos de compresión NO-SE.

2.1.8 Oligoceno – Mioceno: durante este periodo se mantiene el avance hacia el Este de la Sierra de Perijá, al tiempo que se levanta el Macizo de Santander. Al norte y este de la Falla de Oca se formaron una serie de semigrabens, desde un sistema de levantamiento dextral escalonado de fallas de cizallamiento, superpuestas sobre el cinturón de pliegue de Caribe interno (Audemard, F. 1991). Durante el Oligoceno y Mioceno inferior continua el período erosivo en la parte norte-noreste del lago y comienza la sedimentación no marina hacia el oeste-suroeste. (Calleja R, 1998)

En el Mioceno empezó una nueva fase de actividad de fallas transcurrentes en la Cuenca de Maracaibo. Entre ellas están Icotea y Ceuta; la Falla de Boconó empezó a existir en el Mioceno tardío, también ocurrió en este periodo una marcada transurrencia a lo largo de la Falla de Santa Marta. El movimiento dextral de Boconó y sinistral de Santa Marta causan un desplazamiento al norte del Bloque de Maracaibo. Se genera la zona de compresión en el Caribe la cual es básicamente un prisma de acresión y ocurre la subducción de la placa Caribe por debajo del Bloque de Maracaibo. (Ghosh S. *et al* 1995),

2.1.9 Mioceno Tardío - Plioceno: Al final del Mioceno se produjo el levantamiento definitivo de la Cordillera de Los Andes en forma predominantemente vertical (figura 2.6), y de la Sierra de Perija, afectando el triangulo de Oca - Bocono - Perijá el cual delimita a la cuenca de Lago de Maracaibo en su configuración actual. (Calleja R, 1998)

Los Andes venezolanos emergieron como la principal estructura durante este intervalo de tiempo, y estuvieron probablemente asociados con un despegue más profundo que el relacionado con el de Perijá (Audemard, 1991). Sustituyeron a Perijá

como la mayor fuente de sedimentos y separaron el foredeep en distintas subcuencas: la cuenca de Maracaibo norte y la cuenca de Barinas – Apure al sur.

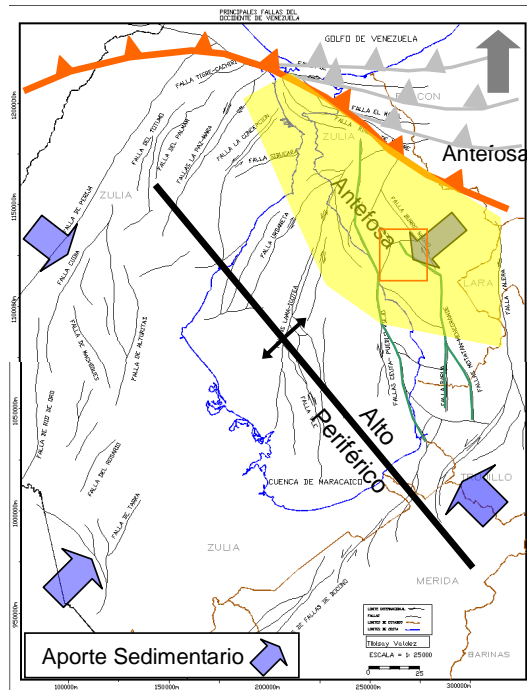


Figura 2.6 Ubicación de la zona de estudio durante la el emplazamiento de las napas de Lara entre el Cretácico hasta el presente.

2.2 Geología local

2.2.1 Evolución tectónica

De Toni B *et al.*, (1994) sintetizan la evolución tectónica de Zulia Oriental en seis principales fases:

La primera fase de estructuración Mesozoica estuvo asociada al desarrollo de grabens y semigrabens durante el Jurásico (figura 2.7). Estas discontinuidades corticales (Ceuta, Motatan, Burro Negro y Valera) controlaron, mediante una historia compleja de reactivaciones, la geometría y la subsecuente evolución estructural a escala local. Algunas de ellas pudieron haber sido reactivadas en extensión durante el Cretácico

temprano.

La segunda etapa importante en la evolución del área, estuvo caracterizada por el desarrollo de un margen pasivo, y subsidencia termal durante el Cretácico. Esta tectonosecuencia muestra una ligera forma de cuña, tendencia de engrosamiento hacia el noreste (figura 2.7). Esto es producto de la transición desde ambientes plataformales a ambientes de talud continental.

La tercera fase de estructuración resulto de la colisión oblicua entre el arco de islas caribe y el margen septentrional de Venezuela, el cual ocurrió progresivamente a partir del Cretácico Superior hasta el Eoceno Medio (figura 2.7). La subsidencia de la cuenca paso a estar dominada por flexión de la litosfera, en respuesta a la carga ejercida por el sistema de Napas Caribe, desarrollándose una cuenca ante país.

La tectonosecuencia asociada a este evento posee, a nivel regional, forma de cuña con tendencia de engrosamiento hacia el noreste. Localizadamente el evento indujo, en primer lugar, la reactivación en extensión y transtensión de las estructuras jurásicas en donde se depositaron grandes extensiones de sedimentos sintectónicos paleógenos. A fines de Eoceno Medio, las estructuras de Ceuta, Mene Grande y Motatán sufrieron una ligera inversión transpresiva. (De Toni B *et al.*, 1994).

En el Eoceno Tardío – Oligoceno sobrevino una nueva fase de extensión. La estructura reactivada de Burro Negro constituyó el límite suroeste de esta deformación, la cual se acentuó hacia el noreste, en el área de Falcón.

La última fase de la deformación predominante intracontinental (figura 2.7), comenzó en el Neógeno y continúa activa. A ella se asocia el levantamiento de los Andes venezolanos. El evento resulta de la depositación de una tectosecuencia (molasa andina) que se lenticulariza hacia el noreste. El plegamiento de ella evidencia la última fase de reactivación e inversión transpresiva de las estructuras de Ceuta – Pueblo Viejo, Mene Grande, Motatán, Burro Negro y Valera. (De Toni B *et al.*, 1994).

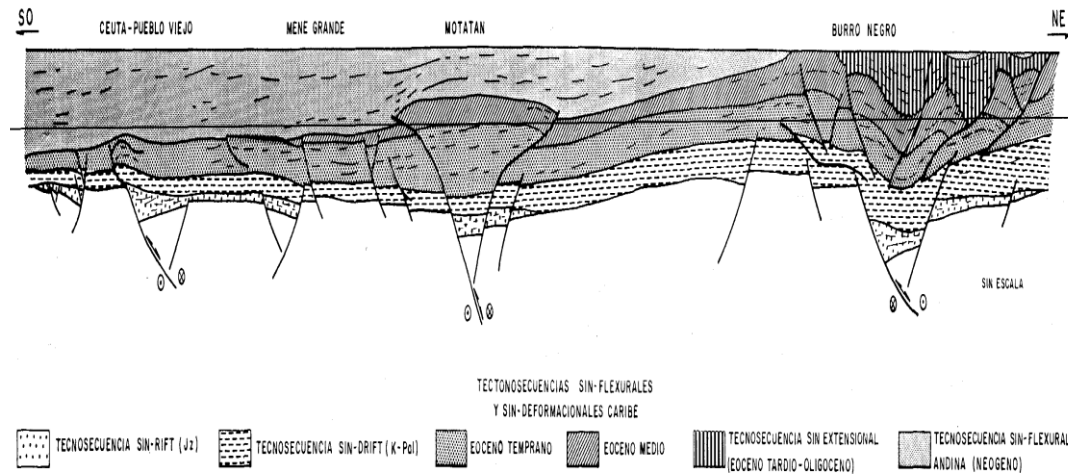


Figura 2.7 Sección idealizada- conceptual a través de los alineamientos estructurales de Ceuta, Mene Grande, Motatán y Burro negro.

2.2.2 Características estructurales

La nueva interpretación preliminar de Benguigui y Páez (2006), permitió corroborar la presencia de los sistemas de fallas rumbo – deslizantes definidas como Tigre – Pueblo Viejo y Burro Negro los cuales limitan la zona. Además possibilitó la generación de un nuevo modelo estructural suponiendo que, dada la afectación de la zona por elementos estructurales asociados a la interacción de las placas y presencia de zonas de transpresión desde el Paleógeno hasta la actualidad, en la pila sedimentaria que rellena el área, se desarrollan estilos estructurales complejos que involucran la presencia de corrimientos y fallamientos lítricos al este de la Falla de Pueblo Viejo, asociados a un nivel de despegue a lo largo del cual se podrían presentar cuerpos de lodo originados de lutitas de la Formación Colón que atraviesan o intrusionan en la secuencia sedimentaria superior en las zonas caracterizadas por alta tasa de sedimentación; esta observaciones permiten distinguir tres dominios estructural de Norte a Sur en el área de Zulia Oriental.

Hacia el nortela falla de Tigre Pueblo Viejo se comporta similar a la falla de Ico tea

observándose dos fallas pertenecientes al mismo sistema que generan un horst el cual influye en la sedimentación de edad Paleógena. Las fallas lítricas principales cabecean hacia el norte en su flanco sur invirtiéndose la geometría progresivamente en dirección norte. Se identifica divergencia en los limbos de las unidades dispuestas en los bloques cabalgantes asociados al nivel de despegue intra Cretácico Tardío en un marco tectónico de piel gruesa.

Hacia el centro las interpretaciones previas postulan fallas normales de alto ángulo en cuya reactivación se afecta la pila sedimentaria. Benguigui y Páez, (2006) explican como la falta de imagen sísmica, la falta de continuidad y el pinchamiento de las unidades interpretadas hacia el flanco de la zona de respuesta caótica son asociados en este estudio, a la presencia de una estructura diapíricas.

La nueva interpretación de Benguigui y Páez , (2006) de la sección Z0-97C-01 y los datos estratigráficos disponibles revelan la presencia de un diapiro asociado a la movilización de la Formación Colón durante el Paleógeno (figura 2.8). En esta sección la restauración estructural permite correlacionar dos fases dominantes en la deformación del lodo. Un primer evento de edad Paleoceno y un segundo y posterior evento durante el Eoceno con la circulación y reacomodo del lodo asociado a los periodos compresivos de la obducción de las Napas de Lara en la colisión Sur América – Caribe.

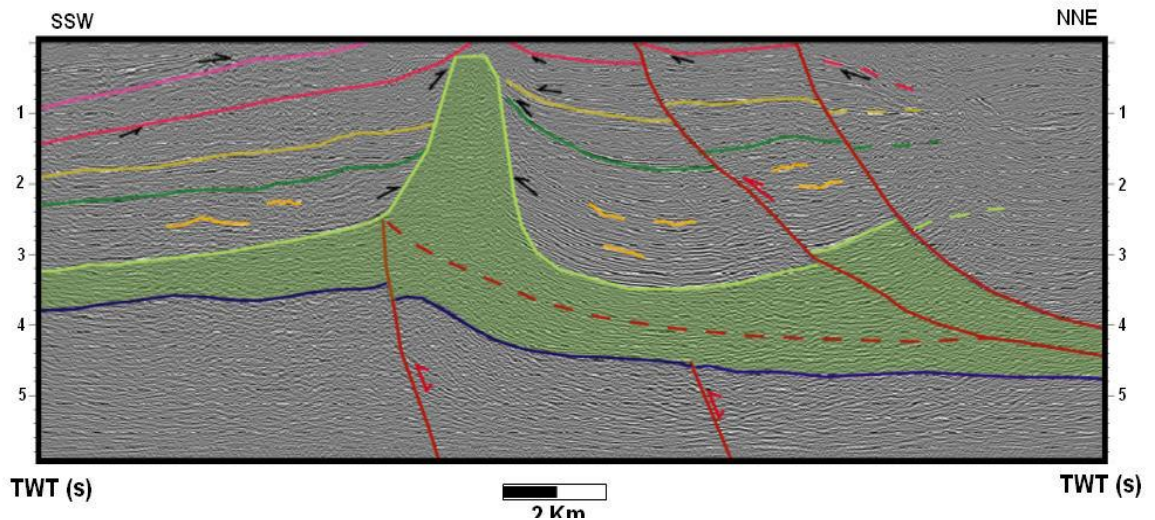


Figura 2.8 La línea sísmica ZO-97C-01 revela la presencia de un diapiro asociado a la movilización del lodo de la Fm. Colón. El mismo forma parte de una pared lutítica orientada preferencialmente en la dirección NNE-SSO. Tomado de Benguigui y Páez, 2006.

Zona Sur las interpretaciones realizadas al sureste del área de estudio, indican la presencia de corrimientos profundos que deforman la pila sedimentaria como resultado de la propagación del levantamiento de la Serranía de Trujillo. En este caso, la disposición de la Cuenca Antepaís desarrollada en este sistema, actúa como impedimento para la propagación de la deformación asociada a dicho régimen compresivo generando retrocorrimientos relevantes los cuales deforman la secuencia Terciaria en el frente del sistema imbricado (Benguigui y Páez , 2006)

Hacia el noreste de la Cuenca de Maracaibo, la zona transpresiva está caracterizada por la presencia del sistema de fallas rumbo deslizantes Tigre – Pueblo Viejo y Burro Negro– Mene Grande que controlan la deformación de la pila sedimentaria y a partir de las cuales se proponen los cambios en el modelo estructural. En esta zona se ubica el límite aproximado de la cuenca con las Napas de Lara. Otros elementos estructurales importantes en la zona de estudio, son la Serranía de Trujillo al oriente, los Andes de Mérida al Sur y la Serranía de Perijá al occidente. Benguigui y Páez, (2006) como se muestra en la siguiente figura:

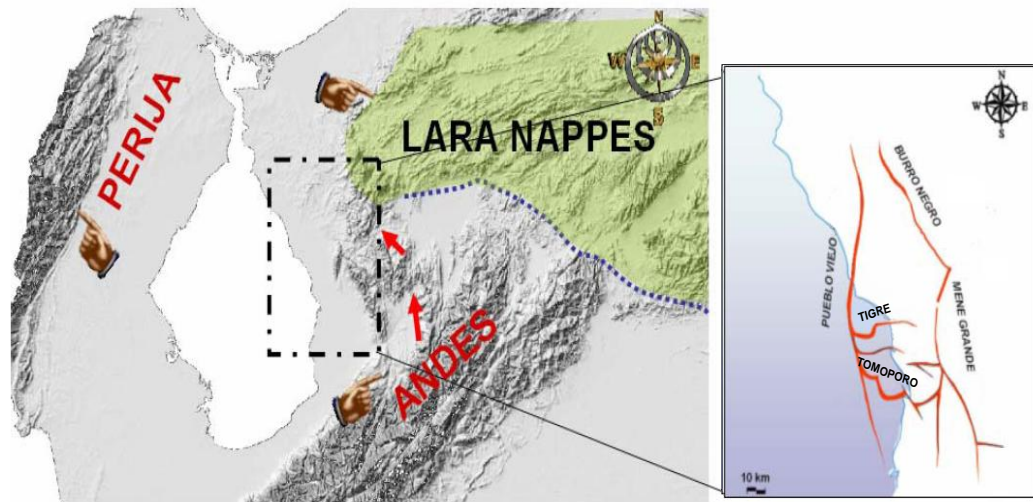


Figura 2.9 Ubicación relativa de los principales elementos estructurales que afectan el área. Tomado de Benguigui y Páez, (2006).

Estructura Burro Negro – Paujil: De Toni B *et al.*, (1994) muestra perfiles sísmicos en esta estructura con una dirección este-oeste, y se evidencia un episodio importante de extensión en el Eoceno Tardío e inversión Neógena de algunas de esas estructuras. Las secuencias sin-extensionales se encuentran entre dos discordancias mayores: una intra-Eocena y otra Miocena, donde la discordancia intra- eocena ha servido como superficie de despegue, tanto en la fase de extensión como en la de inversión posterior, esta secuencia aflora ampliamente a ambos lados de la falla de Valera.

Existe un alto ángulo entre las fallas normales eocenas y las charnelas de pliegues neógenos generados durante la inversión. Esta relación pudiera sugerir que las estructuras se reactivaron en transpresión (De Toni B *et al.*, 1994).

De Toni B *et al.*, 1994 muestra que en las secciones norte-sur (figura 2.10), se presentan variaciones laterales de las estructuras formadas durante la extensión Eoceno Superior- Oligocena. Se evidencia un plegamiento pasivo de la cubierta

sedimentaria Cretácica- Eoceno Medio, como consecuencia de la reactivación distensiva del sistema de Burro Negro durante el Eoceno Tardío- Oligoceno. Las fallas de borde que limitan el semigraben al noreste, aparecen como estructuras tectónicas que pierden desplazamiento en profundidad y terminan en niveles dúctiles dentro de las formaciones Trujillo y Colon.

Durante la fase de extensión ocurrida en el Eoceno Tardío- Oligoceno la deformación del basamento estuvo dominada por fallamiento normal, con transporte al noreste, a lo largo de la falla de Burro Negro; la combinación de la falla principal en el basamento con la falla en la cobertura, genera una cuña y sus fallas limitantes fueron reactivadas por transpresión durante el Neógeno. Es probable que la falla de Burro Negro formase parte del sistema de grabenes jurásicos que fueron reactivados primero en extensión, durante el Eoceno, y luego en transpresión en el Neógeno.

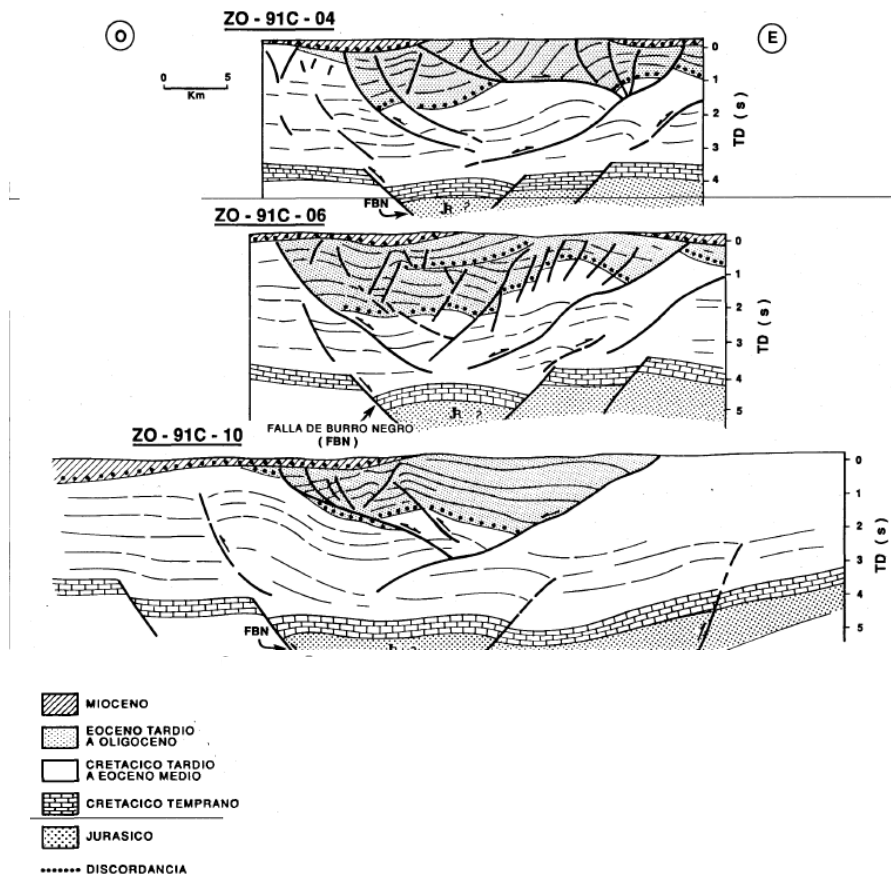


Figura 2.10 Secciones a trazos de líneas sísmicas norte-sur a través de la estructura de Burro Negro – Paují. Tomado de De Toni B et al., 1994.

Falla de Valera y Cabimas: en el sector comprendido entre Cabimas y la traza de la falla de Oca, al oeste de la falla de Burro Negro, se observa un estilo estructural que también puede interpretarse como el resultado de la reactivación e inversión Neógena de estructuras extensionales. Sin embargo, la calibración estratigráfica es inadecuada para determinar con precisión la edad del evento de extensión. Puedo haber ocurrido en el Eoceno Temprano-Medio como resultado de la transición del margen pasivo a un margen activo o puede estar asociado a la extensión Eoceno Superior – Oligoceno (De Toni B et al., 1994)

De Toni B et al., (1994) indica que en la depresión de Monay, al este de la falla de Valera, también se observan los efectos de la extensión ocurrida en el Eoceno

Superior – Oligoceno. Y así como sucedió en las fallas de Burro Negro y Valera (figura 2.11), estas estructuras fueron parcialmente invertidas durante el Neógeno

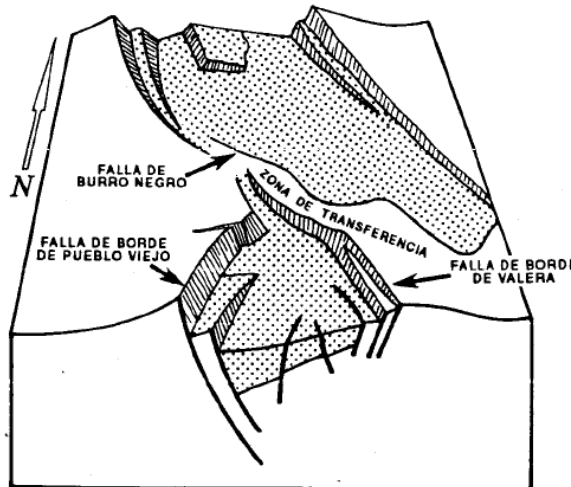


Figura 2.11 Modelo conceptual tridimensional que muestra la posible relación entre las fallas de Pueblo Viejo, Valera y Burro Negro. Tomado de De Toni B et al., 1994

Levantamiento Pueblo Viejo- Ceuta: limita por el oeste con el sinclinal central del Lago, tiene un alineamiento casi norte-sur con ligeras componentes hacia el noroeste y se conoce dentro del lago por una longitud de aproximadamente 45 km. Hacia el norte se arquea al noreste y forma parte del cinturón móvil de la serranía de Trujillo, hacia el sur esta mal conocida, cerca de la costa del Lago de Maracaibo, comienza con un declive a nariz anticlinal hacia el sur de inclinación fuerte. El declive se encuentra cortado por tres y aún cuatro, fallas importantes. El levantamiento está limitado al este y al oeste por fallas longitudinales que lo separan del sinclinal central del lago y del sinclinal de San Lorenzo; la zona crestal aparece cortada por dos o tres fallas del sistema norte-sur y toda la estructura está afectada por fallas del sistema oeste-nor-oeste (Calleja , 1998).

2.2.3 Estratigrafía del área

Benguigui y Páez, (2006) analizó la base de datos de levantamientos sísmicos (2D) para generar una nueva interpretación que cubre el flanco oriental (costa adentro y zona transicional) de la Cuenca de Maracaibo, haciendo imagen de las estructuras en subsuelo ubicadas entre la Serranía de Trujillo y la costa del lago, las cuales afloran parcialmente en superficie. Las unidades sísmicas identificadas se amarran a partir de la base de datos de pozos disponible en el PGP Cabimas y el seguimiento de diferentes eventos sísmicos interpretados en el mismo estudio correlacionado desde el lago hasta el sistema de fallas Tigre – Pueblo Viejo. Para la extrapolación de la interpretación se integra la información dispuesta en el pozo claves del área, LS-1387, el cual llega al Cretácico (figura 2.12.).

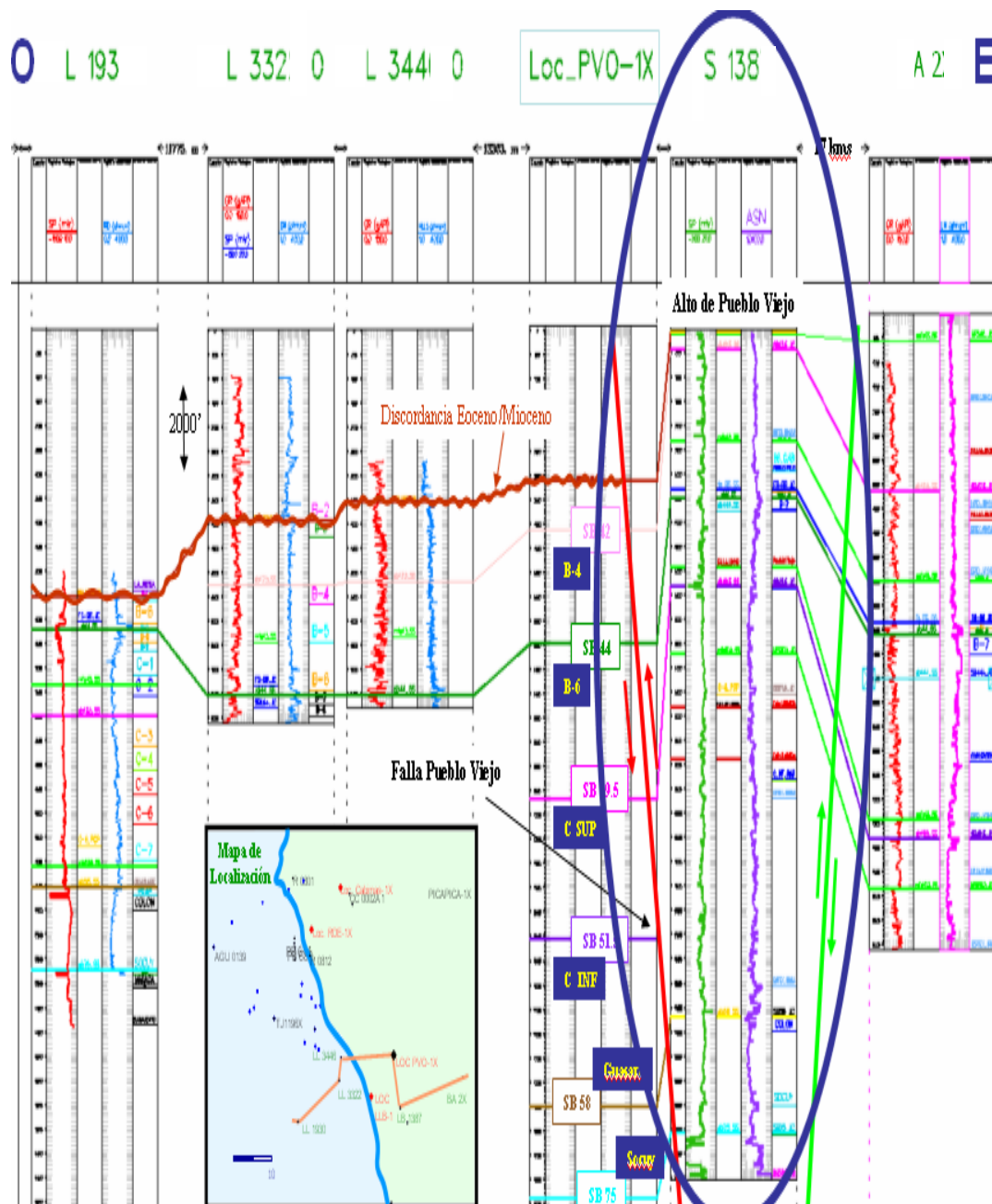


Figura 2.12 Sección estratigráfica indicando los datos de pozos utilizados para la correlación estratigráfica de las unidades sísmicas. Tomado de Benguigui y Páez, (2006).

En el perfil A, (figura 2.13) revela un basamento que es afectado por un sistema de fallas de extensión el cual infrayace un sistema de fallas lítricas normales reactivadas como inversas las cuales a su vez afectan la pila sedimentaria. Dichas fallas permiten

la depositación sin-tectónica de las turbiditas de la Formación Trujillo durante el Paleoceno induciendo la migración lateral del lodo infrayacente hacia el este, lo cual se manifiesta al norte en el incremento de espesor en esta dirección de la unidad equivalente a la Fm. Colón. Las fallas lítricas principales cabecan hacia el norte en su flanco sur invirtiéndose la geometría progresivamente en dirección norte. Se identifica divergencia en los limbos en las unidades dispuestas en los bloques cabalgantes asociados al nivel de despegue intra Cretácico Tardío en un marco tectónico de piel gruesa.

Benguigui y Páez , (2006) establece una nueva interpretación estratigráfica en donde se puede apreciar (figura 2.13) hacia el este de base a tope unos reflectores continuos y de alta amplitud, respuesta asociada al tope de Socuy. Suprayacente al mismo se interpreta un nivel de baja amplitud y relativamente discontinuo, asociado al tope del equivalente de la Fm. Colón y cuya unidad presenta un patrón divergente hacia el este. Por encima de la misma se observa un paquete de reflexiones discontinuas y con variaciones laterales de amplitud dentro del cual se observan lentes y canales que se pueden asociar a depósitos turbidíticos que representan un equivalente estratigráfico de la Fm. Trujillo, encontrándose su base en contacto aparentemente erosivo hacia el Oeste con la Fm. Guasare y hacia el este de la falla de Pueblo Vejo con la Fm. Colón. Suprayacente a estas se observan límites de secuencias continuos interpretadas de edad Eoceno Inferior (EI1) asociada al deposito de las arenas C de la Formación Misoa y a las Unidades de Edad Eoceno Medio (EM1 y SB42.5) equivalentes litológicos de las arenas B6 y B4 respectivamente de la Fm Misoa, así como posibles arenas b́asales de Pauj́; las cuales no muestran mayores cambios de facies sísmicas lateralmente para bloques delimitados entre fallas. Finalmente se identificó una superficie de discontinuidad, marcada por la interrupción downlap y toplapde los reflectores representativa de la discordancia del Eoceno.

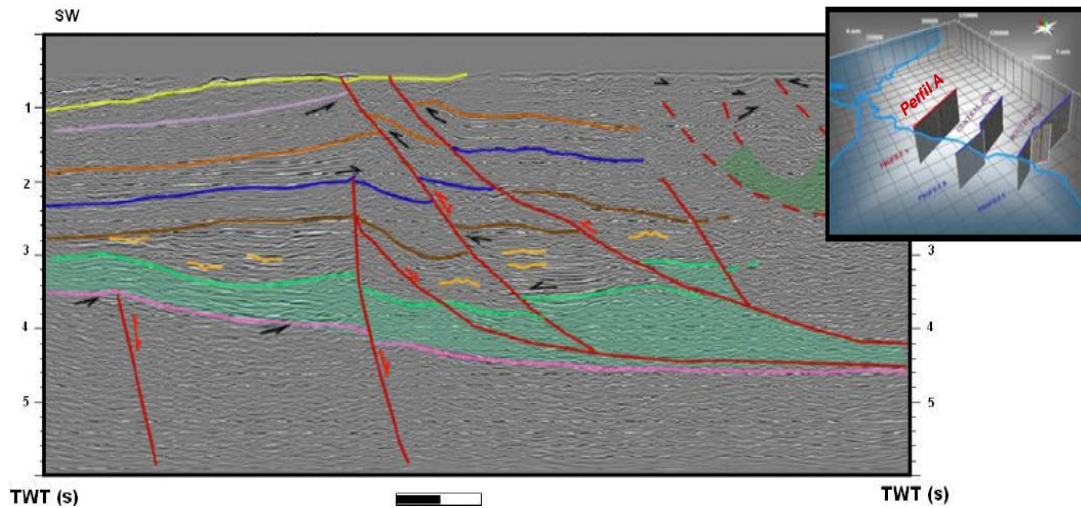


Figura 2.13 Perfil A localizado en el norte de la Costa Oriental del Lago en la dirección de transporte tectónico. La unidad resaltada en verde representa la Formación Colón. Tomado de Benguigui y Páez, 2006.

Las interpretaciones de las unidades discutidas anteriormente pueden ser evidenciadas a lo largo de varias líneas sísmicas 2D (figura 2.14). Estas revelan la variación espacial de los horizontes interpretados en el marco estructural postulado según el modelo tectonosecuencial propuesto por Benguigui y Páez, (2006). Las líneas sísmicas que se presentan a continuación son líneas paralelas que evidencian como hacia el NE se observa como estructuras resaltantes las fallas planares de basamento, las fallas lístricas generadas por gravitación y las estructuras tipo arpón en la unidad equivalente a la Fm Trujillo con los cambios de espesor indicando que son fallas normales reactivadas posteriormente como inversas y que actualmente representan las escamas o corrimientos observados al NE como altos estructurales en los mapas de topes en tiempo que se muestran en la figura 2.14.

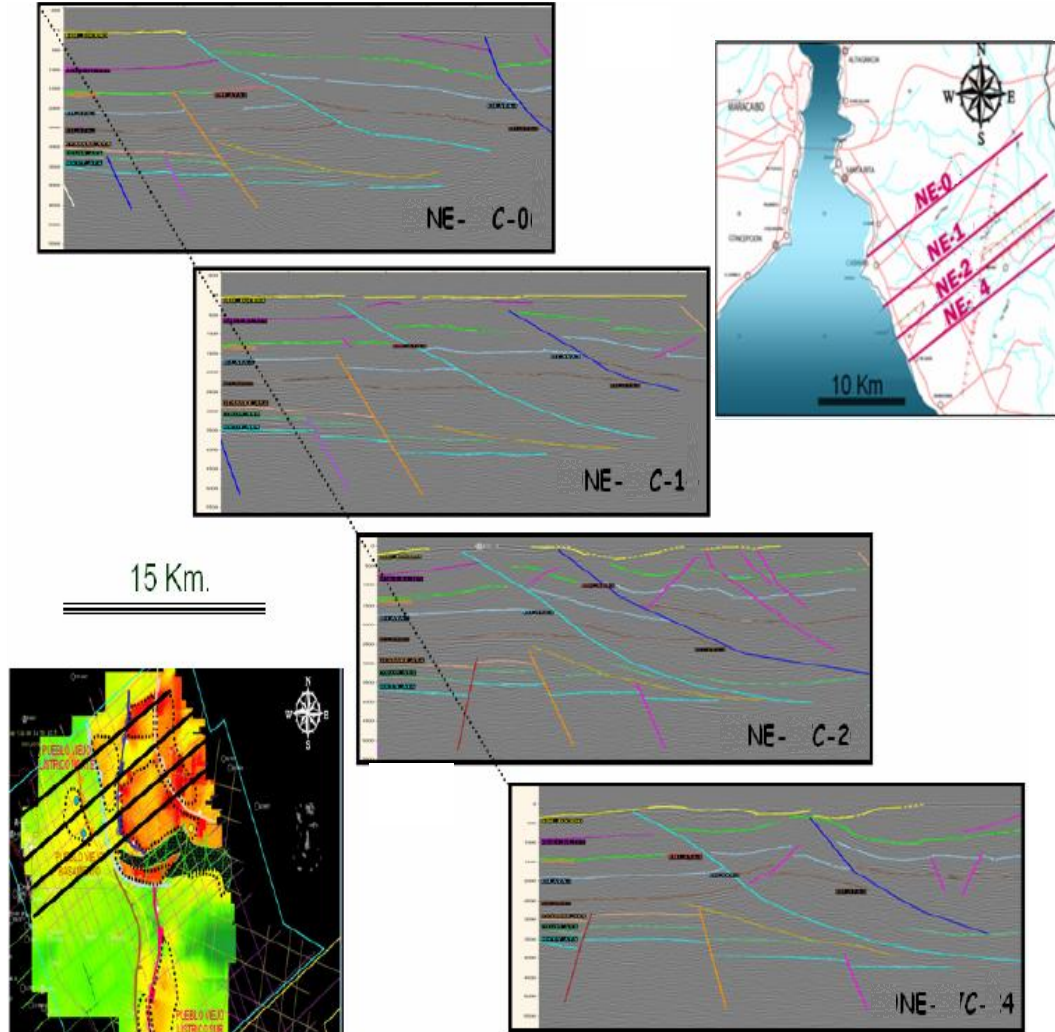


Figura 2.14 Ubicación e interpretación de las secciones NE-C-0 hasta la NE-C-4. Tomado de Benguigui y Páez, 2006.

En la figura se observa el fallamiento normal del basamento infrapuesto bajo el fallamiento lístrico que alcanza el nivel de despegue en la unidad correlacionada como equivalente de la Fm. Colón; se nota como al norte de la NE - 2 deja de ser observable el horst de Tigre Pueblo Viejo, así mismo se evidencia que las fallas lístricas principales cabecean hacia el norte en su flanco sur invirtiéndose la geometría progresivamente en dirección norte.

2.2.4 Descripción de los objetivos geológicos

Pueblo Viejo Sur, Palito Blanco, Burro Negro Sur: Pertenecen al Eoceno Medio, asociado a las arenas B4 y B6 de la Formación Misoa; Eoceno Inferior, equivalente a niveles arenosos entre B6 y el tope de las arenas C. Eoceno Inferior, equivalente al tope de las arenas C de la Formación Misoa. El tope de la Formación Socuy corresponde al Cretácico. Los sistemas sedimentarios incluyen carga de fondo fluvial de corrientes entrelazadas, modificados por marea, de marea dominados por deltas y de zona litoral retrabajado por oleaje.

Chipororo: Los intervalos objetivos se caracterizan por secuencias de areniscas y lutitas intercaladas, que conforman 13 pares sellos/reservorios alcanzando un espesor que pueden variar entre 2000 y 2350 m. Los espesores de los reservorios oscilan entre 20 y 120 m y los valores de porosidad y saturación de petróleo esperados se hallan entre 8-20% y de 70-75%, respectivamente. El espesor de los sellos se encuentra entre 10 y 210m.

Begote El objetivo esta conformado por tres cuerpos sedimentarios superpuestos de origen turbidítico, depositados en un sistema de bajo nivel dentro de la Formación Trujillo. Los cuerpos están afectados por un suave plegamiento y algunas fallas menores que cortan de la trampa. Según uno de los Pozo exploratorios la Formación Trujillo tiene un espesor total de 1500 pies y su intervalo basal corresponde aproximadamente a 500 pies de espesor.

A continuación se muestra la columna estratigráfica que describe detalladamente la geología y estructuras de la zona de estudio:

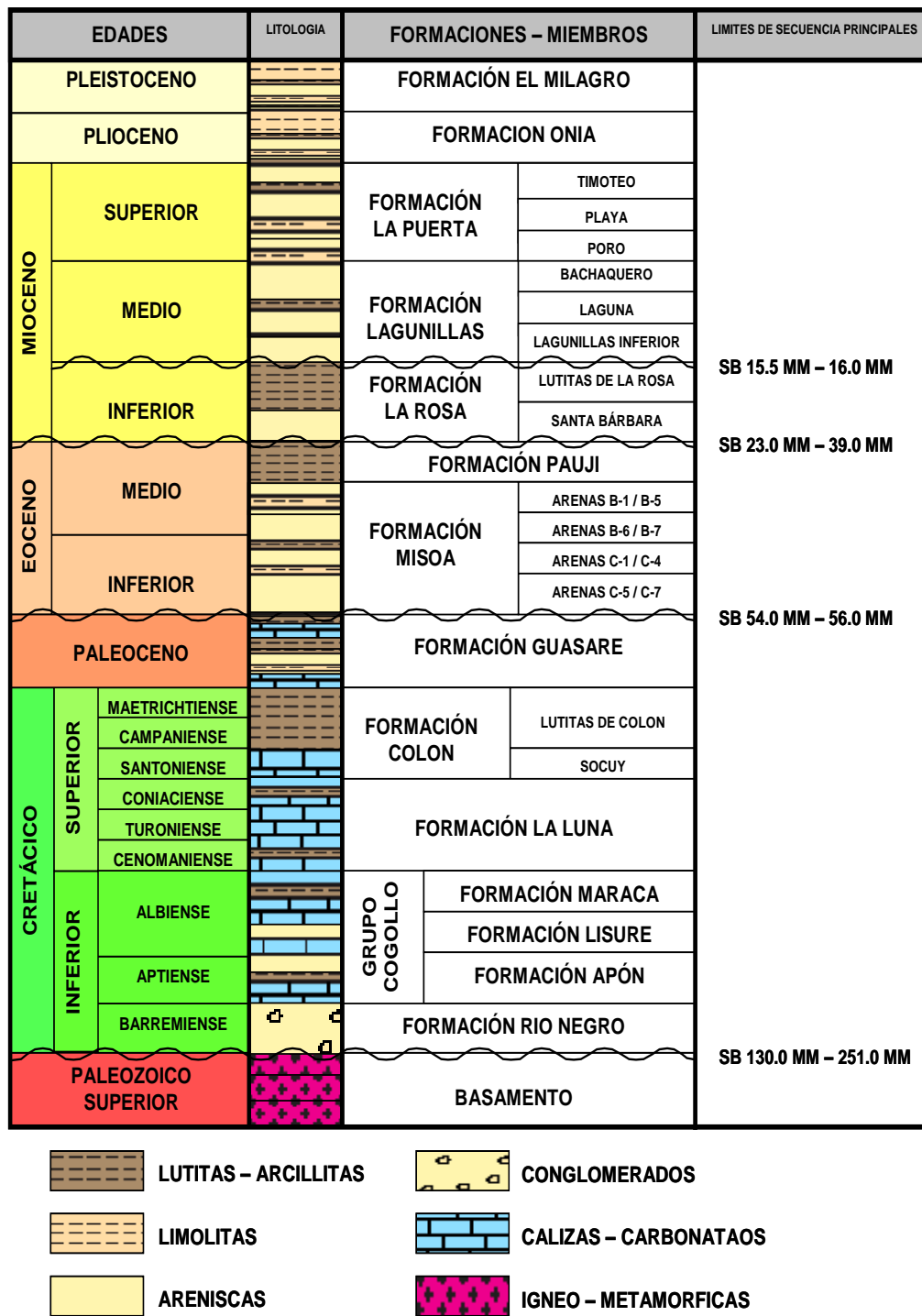


Figura 2.15 Columna estratigráfica de la Cuenca de Maracibo (De Toni et.al,1994)

Las arenas informales B1, B6 y C superior de la Formación Misoa, la cuales corresponden a las unidades genéticas identificadas desde el punto de vista sismoestratigráfico como EM1 (Eoceno Medio, arenas B6 de la Formación Misoa), EM2 (Eoceno Medio B4 y B6 de la Formación Misoa), EI4(Eoceno Inferior, arenas B6 y tope de arena C de la Formación Misoa) y EI1 (Eoceno Inferior arena C de la Formación Misoa).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Método sísmico

Es el estudio de la propagación de la onda sísmica en el suelo consecuente de una perturbación ocasionada por un impulso elástico; originado por trámite de golpes en el suelo, vibraciones o explosivo. Knott, C. (1989) expone que el objetivo es el estudio del subsuelo en general, lo cual permite obtener información geológica de los materiales que lo conforman, por lo que se convierte en una herramienta de investigación de suma importancia, ya que con ella se puede inspeccionar con buena resolución desde los primeros metros del terreno hasta varios kilómetros de profundidad.

Cavada, J. (2000), propone que los métodos de prospección sísmica pueden ser clasificados por el tipo de información que se utilice para obtener la información del subsuelo. De esta forma se obtienen estudios de ondas reflejadas, ondas cónicas o refractadas críticamente, ondas directas y ondas superficiales; en donde las metodologías principales son la de refracción y reflexión. Este último es el método de exploración sísmica mas utilizado para prospección de hidrocarburos

Cuando la onda llega a esta interfase entre dos capas del subsuelo, que poseen distinta velocidad y distinta densidad, parte de la energía se refleja y la otra se trasmite al otro medio con diferente velocidad. En la figura 3.1, se observa la conversión de onda p y como la onda reflejada y refractada siguen una trayectoria descrita por la ley de Snell.

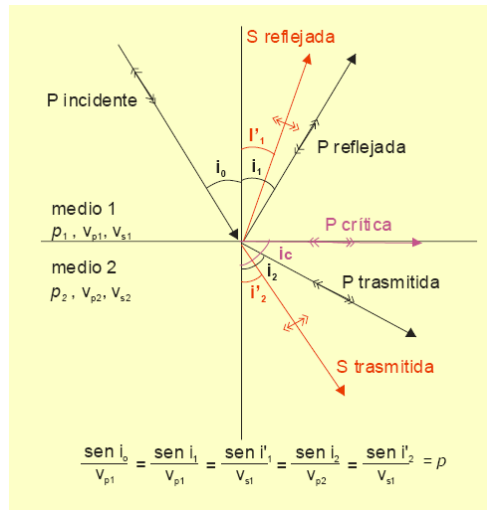


Figura 3.1 Conversión de una onda incidente P donde la cantidad de energía de las ondas incidentes se reparte entre las ondas reflejadas, las refractadas y la absorción natural del terreno. Tomado de Knott, C. (1989)

El principio de Huygens, fundamenta que las ondas que se propagan desde una fuente puntual podían considerarse como la superposición de diminutas ondas secundarias y que cualquier punto de cualquier frente de onda podía considerarse como una nueva fuente puntual de ondas secundarias, (figura 3.2) Es decir, los frentes de ondas están hechos de frentes de onda más pequeños. (Verdugo, 1993).

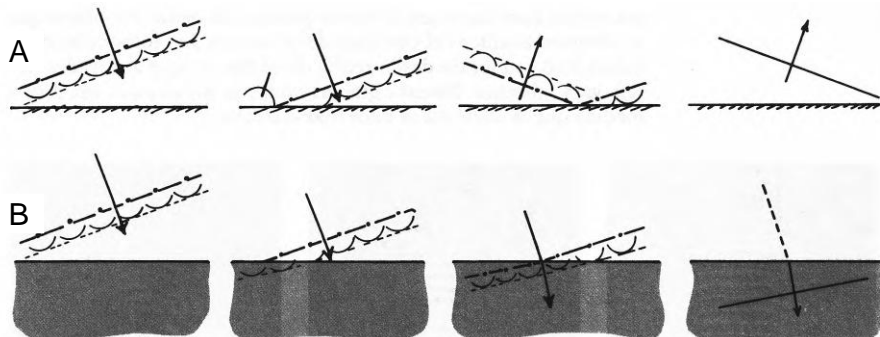


Figura 3.2 Aplicación del principio de Huygens a la reflexión (A) y la refracción (B). Tomado de (Verdugo 1993)

El resultado final es que ambas leyes se combinan en un único planteamiento: en una interfase el parámetro de rayo, p , debe tener el mismo valor para las ondas incidentes, reflejadas y refractadas (Knott, C. 1989).

3.2 Sísmica de reflexión

Este método se concentra principalmente en el estudio de la onda reflejada, para obtener información de amplitudes frecuencia, tiempo doble de viaje, entre otros; que son de carácter necesario para la investigación. Las reflexiones de las ondas de compresión se producen en las interfases del subsuelo donde existe suficiente contraste en los valores de la impedancia acústica (figura 3.3), definida como el producto de la velocidad V por la densidad del medio rocoso (Granda, Cambero, 2000)

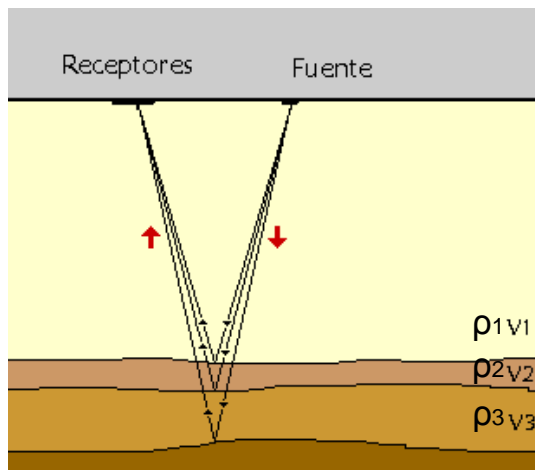


Figura 3.3 Esquema básico de la emisión y recepción de los rayos reflejados en las distintas capas reflectoras. Tomado de Granda, Cambero, (2000).

Entonces tenemos, matemáticamente hablando, que cualquier contacto o interfase en la que exista una diferencia notable en los valores de impedancia acústica será visualizada por el método de reflexión.

Como ya fue mencionado anteriormente, esta energía es producida por una fuente que genera un impulso elástico, para posteriormente ser captada por los receptores; estos están plantados en distancias conocidas y conociendo el tiempo de llegada de la onda de viaje y la geometría experimental se puede obtener una distribución de velocidades de los estratos en el subsuelo (figura 3.4).

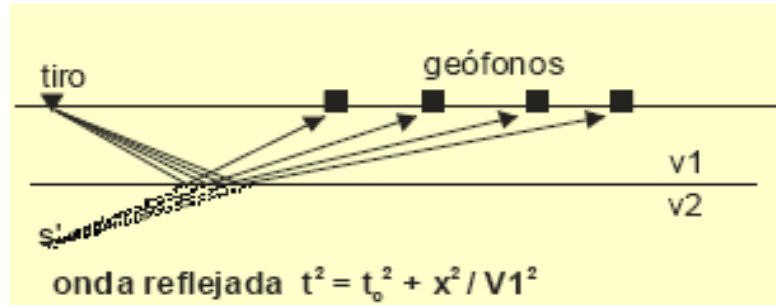


Figura 3.4. Rayo reflejado que se origina para ángulos de incidencia pequeños. Las ondas rebotan sobre el techo de la segunda capa. Tomado de Knott, (1989).

Dado que las distancias entre la fuente y los geófonos son pequeñas respecto a la profundidad de penetración que se alcanza (figura 3.2.3), el dispositivo experimental soporta que se esté operando en corto ángulo; asegurando así la obtención de reflexiones y distinguiéndose de la sísmica de refracción o de gran ángulo. (Knott, C. 1989).

Knott, C. (1989) hace referencia a que para tener un mayor densidad de información del área a estudiar, se debe contar con un arreglo numeroso de geófonos y realizar un numero de disparos mayor, para obtener un grupo de trazas sísmicas que serán procesadas, reordenadas por puntos medio común (CMP) (figura 3.5) las cuales tienen información de todas las reflexiones halladas.

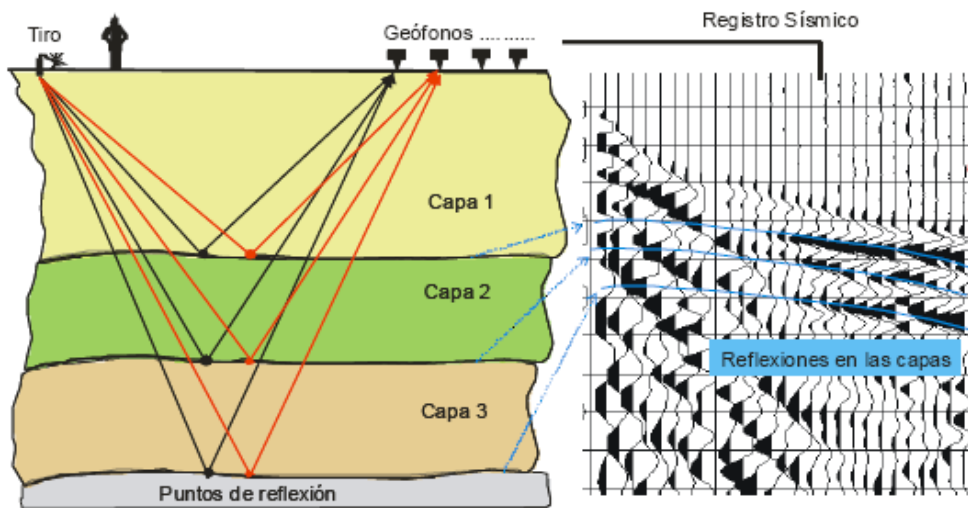


Figura 3.5 Esquema del recorrido de los rayos reflejados y obtención de la traza CMP. Tomado de Granda, Cambero, (2000).

Luego que todas las trazas de un mismo CMP están ordenadas son sumadas y se obtiene una traza CMP. El conjunto de todas las trazas CMP constituyen una sección sísmica de reflexión que es el resultado final de este método. La sección sísmica obtenida es una imagen del subsuelo en donde las reflexiones se ven en forma de lóbulos negros de mayor amplitud y definen las capas reflectoras que después se asociarán a las estructuras geológicas (figura 3.6).

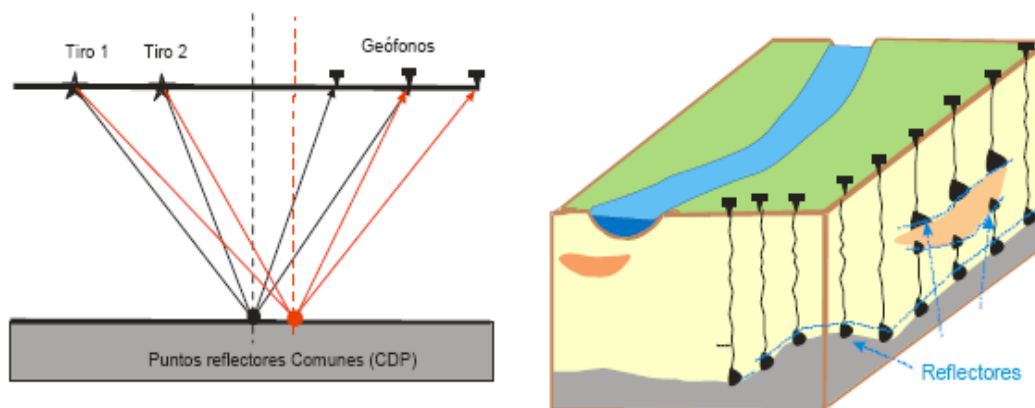


Figura 3.6. Agrupación suma de todas las reflexiones de un mismo CMP para obtener una traza CMP e imagen sísmica del terreno (sección sísmica). Tomado de Granda A, Cambero J, (2000).

La aplicación del método sísmico de reflexión cubre varias fases que se concatenan para optimizar los resultados, en donde no solo participan geofísicos sino también geólogos que definen el área en donde la geología sugiere que pueda existir una acumulación de hidrocarburos. Luego se determinan los parámetros de adquisición que iluminen la zona de interés apropiadamente creando un balance entre presupuestos, calidad de la imagen y preservación del medio ambiente. Todo esto para proceder con la fase de adquisición sísmica.

3.3 Adquisición sísmica

Constituye la primera etapa dentro de las actividades de exploración sísmica, y comprende desde el diseño de dispositivos y selección de parámetros de grabación hasta la recolección del dato sísmico.

Para elaborar un diseño o patrón de adquisición sísmica que nos permita tener una imagen con la correcta geometría y disposición de los estratos en el subsuelo, se debe tener en cuenta cierta cantidad de parámetros y variables las cuales se detallan a

continuación. En principio es importante definir el tipo de diseño que se desea establecer en la zona de estudio. Según Cordsen *et al*, (2010), existen varios tipos de arreglos que se ajustan a las necesidades y características del área de estudio, entre ellos tenemos el diagonal, radial, pared de bloques, hexagonal, zigzag, ortogonal.

3.3.1 Adquisición sísmica 2D

Se obtienen perfiles de reflexión a lo largo de líneas o combinación de líneas en diferentes direcciones. En este tipo de levantamientos las mega-estructuras y características estructurales mayores deben ser inferidas por medio de la interpolación (figura 3.7).

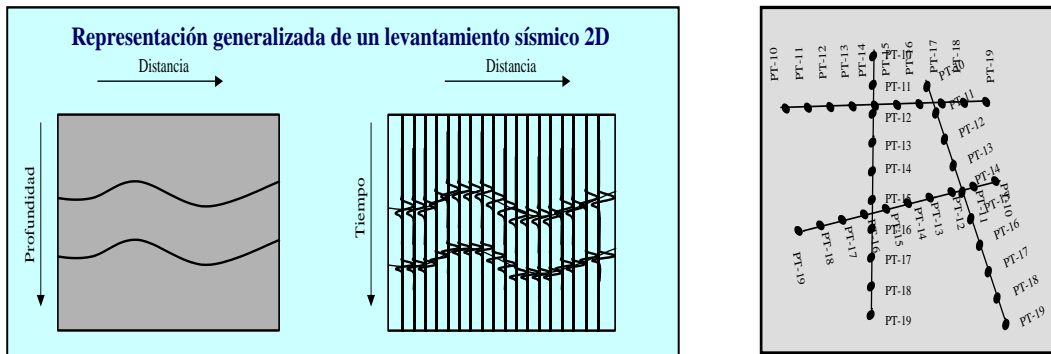


Figura 3.7 Representación general de un levantamiento sísmico 2D y su vista en planta

Los datos sísmicos adquiridos con esta sísmica nos ayudan a construir un panorama de la región geológica sobre las áreas que estamos explorando. Los geólogos y geofísicos pueden interpretar estos datos para identificar posibles zonas de interés.

Herrera, Cooper (2010), sugiere varios métodos de adquisición de sísmica 2D:

Efectos de márgenes: en ambos extremos de una línea 2D se experimenta el efecto de márgenes. Estas son unas zonas en donde tanto el muestreo de cobertura como las estadísticas son pobres. Si el tendido está centrado en la fuente, el margen es igual a

la mitad del offset utilizable para la zona de interés. Algunas compañías piden colocar disparos extras en los extremos de las líneas, en posiciones únicas, con la finalidad de aumentar el fold y aminorar estos márgenes. Sin embargo, esta técnica solo recupera un poco el cubrimiento más no las distribuciones de *offsets*.

Método de franja ancha o Swath: se refiere al registro simultáneo de varias líneas receptoras colocadas a cierta distancia de una línea 2D que tiene tanto fuentes como receptores. El principio reside en la generación de puntos medios en el subsuelo, no solo verticalmente por debajo de la línea 2D, sino también a la mitad de la distancia entre las líneas receptoras y la línea 2D. El objetivo es tener un mayor cubrimiento del subsuelo. Sin embargo, con la cantidad de canales disponibles, hoy en día las operadoras prefieren hacer levantamientos 3D. En países en donde no se disponen de muchos canales, entonces el método swath es muy utilizado.

Método de propagación cruzada: se refiere al caso en el cual los receptores siguen una trayectoria diferente a las fuentes, por ejemplo: se colocan las fuentes a un lado de un río y las receptoras al otro extremo. Este método no es muy popular en países en donde se tiene una gran cantidad de canales.

3.3.2 Levantamiento sísmico 3D

Con este método se obtienen reflexiones sísmicas en varias direcciones horizontales (co-planares) simultáneamente. Se hace un estudio de toda un área a distancias fuente receptor.

Por lo general los estudios sísmicos 3-D son diseñados para la zona principal de interés (objetivo primario) ya que dicha zona determinará la economía del proyecto, y afectará la modificación de los parámetros geofísicos para la prospección sísmica 3-D.

Cordsen (2010), indica que la dirección de las principales características geológicas, tales como fallas o canales, puede influir en la dirección de los receptores y de líneas

de tiro.

Existen varios tipos de levantamiento sísmico 3D que Herrera Y, Cooper N, (2010) explica de la siguiente forma:

Full range: el tendido es diseñado de manera que abarque todos los offsets máximos utilizables para los objetivos. La forma del tendido es cuadrada. Es un método muy común dado la disponibilidad de canales en el mercado. Con este tipo de tendidos se registran una mayor cantidad de offsets lejanos los cuales son muy importantes para los análisis de velocidades y supresión de múltiples.

Q-land: es un sistema para la adquisición de datos de alta densidad, se emplean un sistema de canales individuales a intervalos muy cortos los cuales usan un acelerómetro para el registro de datos digitales.

Sparce: este tipo de diseño presenta un fold bajo y una separación entre líneas receptoras y líneas fuentes muy grande. El objetivo final de este método es el ahorro de gastos y debido a su baja densidad de trazas las interpretaciones no son muy confiables.

La calidad de los resultados de una sísmica 2D son muy distintos a los de la sísmica 3D, esto se debe a que en la sísmica 3D se hacen consideraciones que no aplican en la sísmica 2D:

- Los objetivos y parámetros de adquisición de un levantamiento 3D deben ser establecidos y especificados de forma mas precisa que en uno 2D ya que en el momento de la adquisición un levantamiento 3D es mucho más difícil cambiar parámetros
- El muestreo espacial en un levantamiento 3D es mucho mas denso, en levantamientos 3D la fuente y receptores están distribuidos de forma areal, lo que permite registrar información a distintos azimut,
- El detalle de la imagen obtenida en el levantamiento 3D es de mejor calidad

por lo que la interpretación de las características geológicas del subsuelo tienen un alto grado de detalle.

Aunque la sísmica 3D presenta numerosas ventajas sobre la 2D como las que acabamos de describir, existe un fenómeno que se presenta en los levantamientos 3D que puede afectar la interpretación y se conoce como “footprint”.

3.3.3 Footprint: las geometrías regulares como la ortogonal tienen la ventaja de que la adquisición en general se lleva a cabo de manera sencilla y ágil (figura 3.8), pero tienen el inconveniente de que imprimen en los datos una huella indeseable en el patrón de disparos y receptores a lo que se le conoce como footprint (Cooper *et al.*, 2007),.

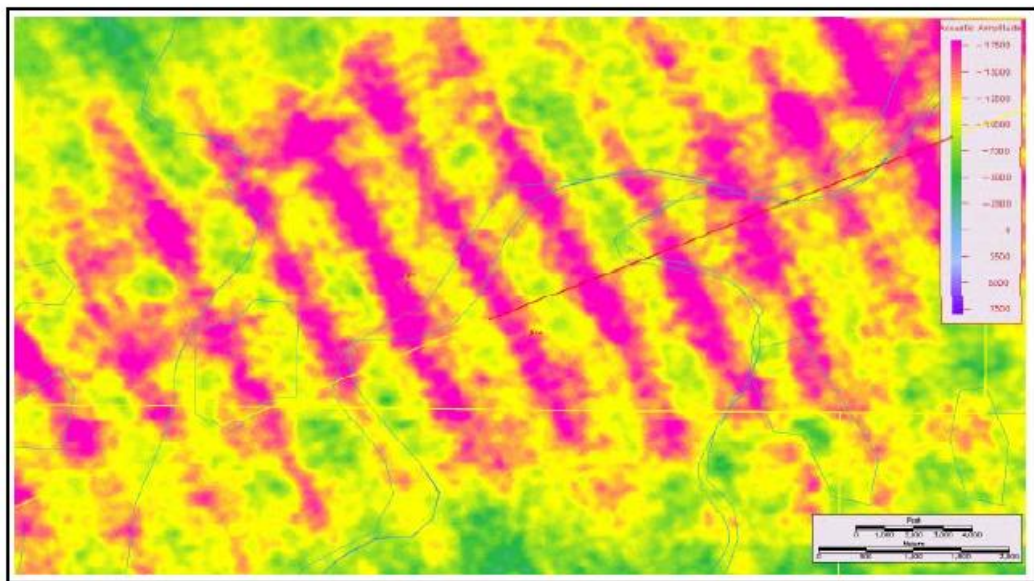


Figura 3.8 Ejemplo de adquisición de footprint. Tomado de Cooper et al., (2007).

Este fenómeno es causado por un muestreo espacial irregular y está relacionado directamente con la geometría de adquisición sísmica y distorsiona la amplitud ocasionando problemas a la hora de procesar e interpretar los datos.

Varios autores han implementado e investigado métodos para atenuar o eliminar *footprint* tanto en la adquisición como en el procesamiento dentro de los cuales están: Magrave *et al.*, (2007) modeló el footprint en datos sintéticos por medio de procesos exhaustivos y decimación con el objetivo de identificar qué tipos de footprint se podrían presentar. Gesbert (2002) ha declarado mecanismo de cómo la migración en profundidad Pre apilado 3D genera footprint y da una solución de cómo remover el footprint por remigración de los datos. Falconer (2008) propone un filtro por número de onda $K_x K_y$ para reducir el footprint.

3.4 Elementos del diseño de sísmica 3D

La primera consideración en el diseño es la naturaleza del principal objetivo a iluminar, se debe tener información del objetivo geofísico, de estructuras o estratigrafía; si la investigación es de carácter exploratorio o de producción. Numerosas bibliografías hacen referencia a los siguientes como los parámetros que se deben tener presentes a la hora de hacer un diseño de adquisición sísmica 3D:

3.4.1 Líneas receptoras: es la línea a lo largo de la cual están plantados los geófonos, generalmente a un intervalo de distancia regular, (Cordsen, A *et al* 2010). También podemos hablar de trayectorias a lo largo de las cuales están los receptores; debido a que en ocasiones se pueden presentar inconvenientes, como obstáculos geológicos, que impidan que se siga una línea recta, aunque en los levantamientos terrestres se debe intentar mantener lo mas recto posible. Se denota como intervalo de líneas fuentes a la distancia que existe entre estas, RLI.

4.4.2 Líneas fuentes: mantiene la misma definición que las líneas receptoras solo que a lo largo de estas líneas, o quizás trayectorias, están ubicadas los puntos fuentes. El intervalo entre fuentes se identifica como SI (Source interval), y el intervalo entre líneas fuentes, SLI.

4.4.3 Densidad de disparo: es el numero de disparo por unidad de área (Chaouch, A y Mari J, 2006). Entonces el número de líneas fuentes y el número de fuentes por

kilómetro determinan la densidad de disparo.

3.4.4 Dirección in-line: es la dirección paralela a las líneas receptoras (figura 3.9).

3.4.5 Dirección cross-line: es la dirección perpendicular a las líneas receptoras (figura 3.9).

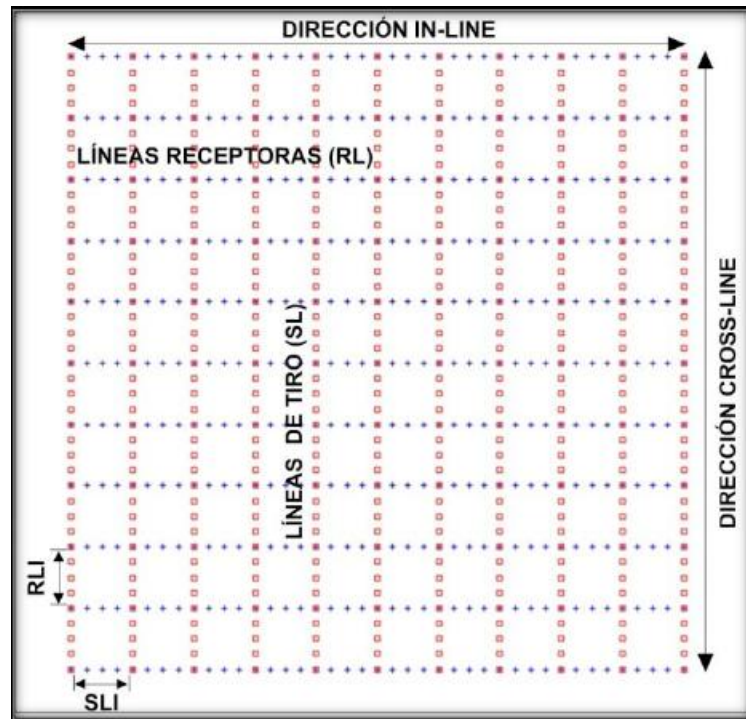


Figura 3.9 Disposición de las líneas de tiro y líneas receptoras. Tomado de Cordsen, A et al 2010

3.4.6 Box o caja: se conoce como el cuadrilátero limitado por dos líneas fuentes adyacentes y dos líneas receptoras adyacentes (figura 3.10). Usualmente representa el área más pequeña de toda el área de estudio que contiene las estadísticas completas del levantamiento (dentro de un área de máxima cobertura), (Cordsen, A. et al 2010)

3.4.7 CMP Bin o Bin: es el cuadrado o rectángulo que contiene todo los puntos

medios que corresponderán a la suma de CMP (Chaouch, y Mari, 2006). Es decir, todas las trazas que se encuentren dentro de un mismo Bin serán apiladas para generar una sola(figura 3.10). Por lo general sus dimensiones son $(SI \div 2) \times (RI \div 2)$

3.4.8 Super bin: se conoce como la agrupación de bins vecinos; por lo general se hacen en agrupación de 3x3 (figura 3.10). Esta agrupación de bins usualmente son usados para determinar velocidades, soluciones de estática residual, atenuación de múltiples y para algoritmos de atenuación de ruido(Cordsen,*et al* 2010).

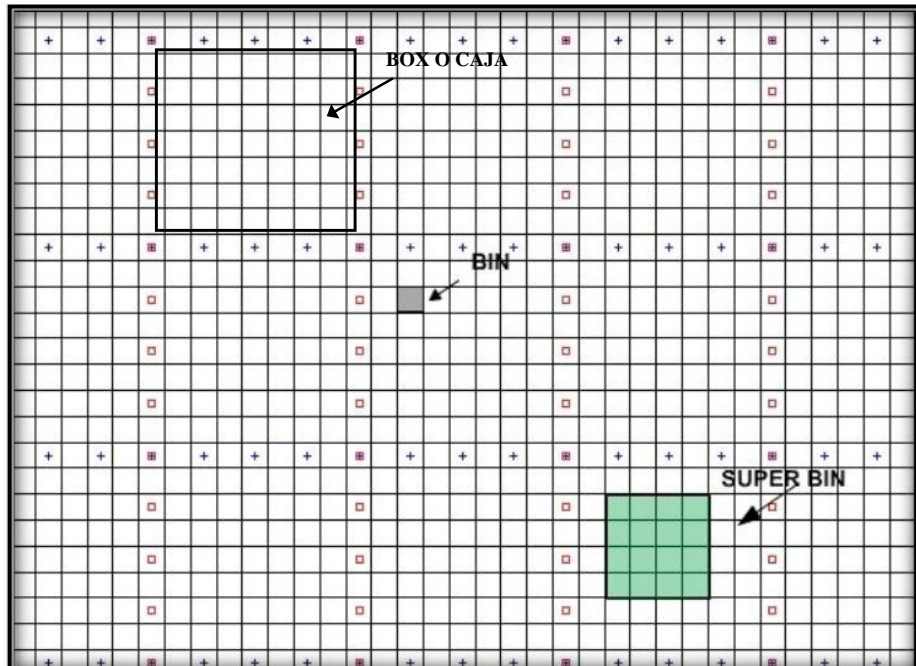


Figura 3.10 Ilustración de la Caja o Box, Bin y Super Bin. Tomado de Cordsen, A et al (2010)

3.4.9 Patch: Cordsen, A. *et al* (2010), lo define como las estaciones vivas para cualquier punto de disparo en un levantamiento 3D (figura 3.11). Por ende podemos definirlo como el número de estaciones que se encuentra activas en cualquier punto de disparo durante el levantamiento.

3.4.10 Salvo: es el número de puntos de tiros disparados antes de que el template se desplace a lo largo del levantamiento. (Cordsen, A. *et al* 2010).

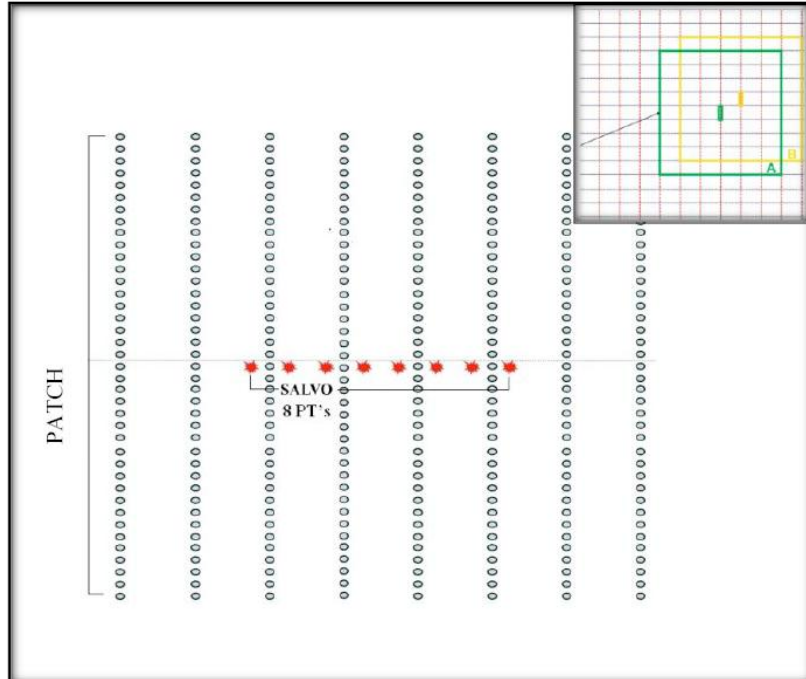


Figura 3.11. Ilustración del Patch y Salvo. Tomado de Cordsen, et al (2010).

3.4.11 Template son todos los receptores activos correspondientes a un punto de tiro dado, estos receptores están ubicados sobre varias líneas paralelas. (Chaouch, A y Mari J, 2006). Es decir lo podemos definir como la suma del patch mas el salvo (figura 3.12).

3.4.12 Swath Es el ancho del área sobre el cual las fuentes están siendo disparadas según la configuración de un template y sin avance cross-line del patch, a menudo con muchos avances in-line. (Chaouch, A y Mari J, 2006)

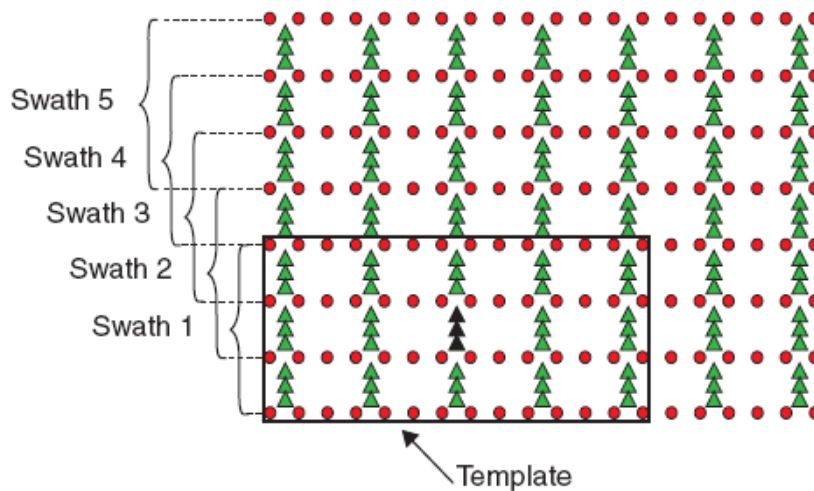


Figura 3.12 Ilustración de Swath y del Template. Tomado de Chaouch, A y Mari J, (2006).

3.4.13 Roll-along es la distancia de dos posiciones consecutivas del template (Chaouch, A y Mari J, 2006).

- **In-line roll-along:** corresponde al movimiento hacia in-line mayores del template y la distancia entre dos posiciones consecutivas de este.
- **Cross-line roll-along:** es el movimiento del template hacia cross-line mayores. Al igual que en el in-line roll-along se trata de la distancia correspondida entre dos posiciones consecutivas del template (figura 3.13).

El numero de filas receptoras que se van quedando atrás son iguales al número de movimientos que hace el template (Chaouch, A y Mari J, 2006).

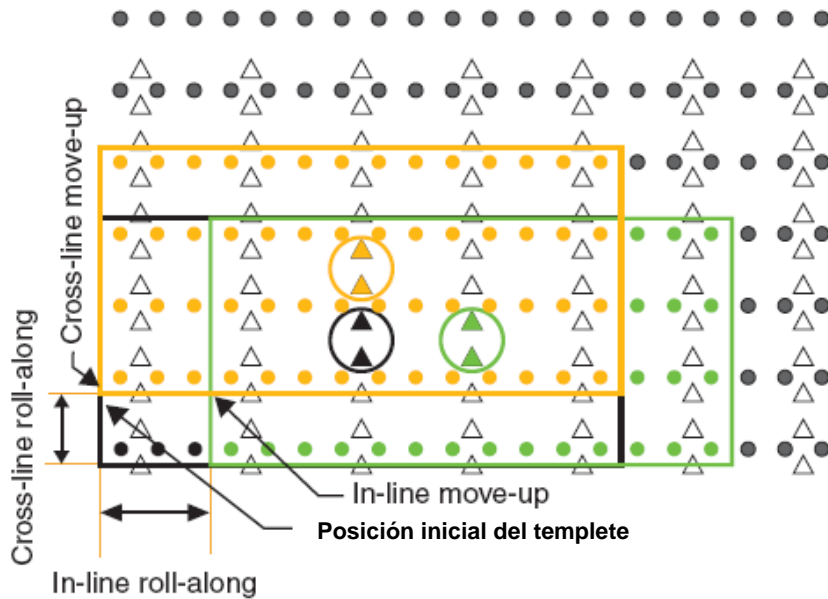


Figura 3.13. Desplazamiento de un templete en un levantamiento. Tomado de Chaouch, A y Mari J, (2006).

3.4.14 Offsets: se refiere a la distancia que existe entre fuente receptor, Chaouch, A y Mari J, (2006),(figura 3.14) nos habla sobre los offsets definidos a partir de la configuración del levantamiento 3D:

- **In-line offset:** es la distancia representada por la mitad de la longitud del templete en la dirección in-line.
- **Cross-line offset:** esta dirección esta representada por la mitad de la longitud del templete en la dirección cross-line.

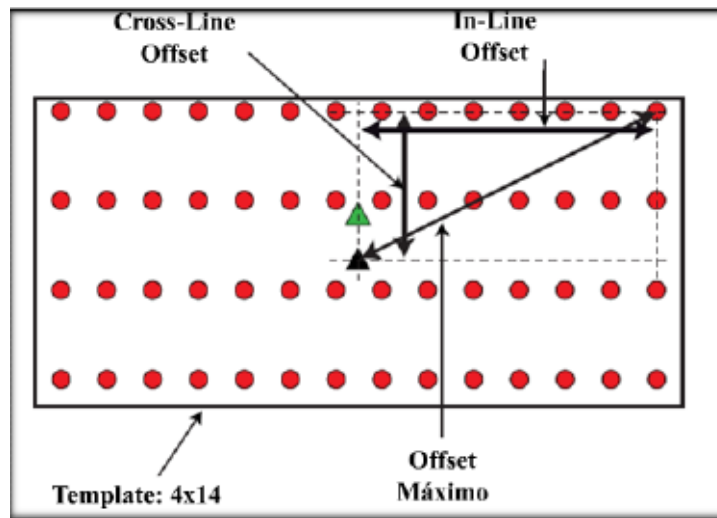


Figura 3.14 Ilustración del inline offset, cross-line offset, y offset máximo. Tomado de Chaouch, y Mari, (2006).

3.4.14.1 Offset mínimo: es la distancia de la diagonal de la caja o box (Chaouch, A y Mari J, 2006). Esta distancia deriva de que en muchos diseños ortogonales, los puntos medios de varios pares de fuente – receptor se ubican en el bin central de la caja (figura 3.15); entonces el offsets más corto en el bin es al mínimo offset mas largo del levantamiento (X_{min}).

Debe ser lo suficientemente pequeño para muestrear adecuadamente reflectores superficiales que podrían ser utilizados para fines isocrónicos o datuming (Cordsen, A. et al 2010). Este offset se ve relacionado con al profundidad del objetivo superficial; y debe ser muestreado adecuadamente para ser procesado adecuadamente, se necesita al menos una cobertura de 4 a 5. Para capas planas el mínimo offset máximo debe ser menor que la capa de menor profundidad ($X_{min} < Z_{sh}$) (Chaouch, A y Mari J, 2006)

El X_{min} debe ser menor que el offset del ángulo crítico de refracción (X_c). Este ángulo es de 35° (Chaouch, A y Mari J, 2006) por lo que tenemos:

$$X_c = 2 * Z * \tan(\text{ángulo crítico})$$

$$X_c = 2 * Z * \tan 35^\circ$$

$$X_c = 1.4 * Z$$

$$X_{min} < X_c$$

Esto se debe a que el X_{min} debe respetar el criterio de refracción, porque el ángulo de refracción limitará la distancia del mínimo offset.

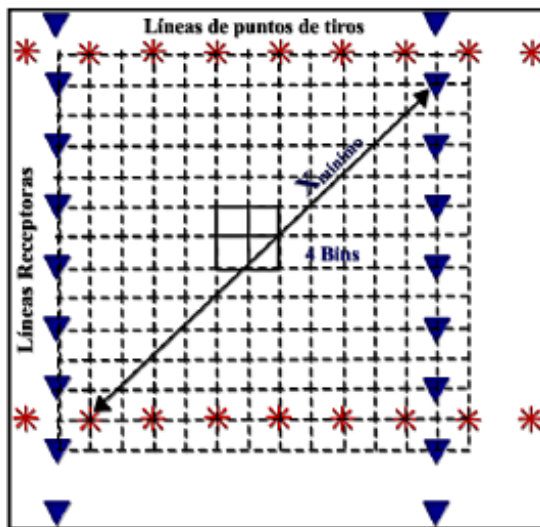


Figura 3.15 Diagrama representativo del offset mínimo. Cordsen, A. et al (2010)

3.4.14.2 Offset máximo X_{max} : dependerá del horizonte que se quiere iluminar. Es la distancia que corresponde a la mitad de la diagonal del template, constituyendo el desplazamiento máximo que encontramos dentro del template (Cordsen, et al 2010).

Chaouch, A y Mari J, (2006) comenta Muchos factores influyen en la selección del Offset máximo: profundidad del objetivo geológico, corrección NMO, estiramiento NMO, llegada directa, discriminación de múltiple, equipo disponible, etc.

El X_{max} debe ser lo suficientemente largo como para crear una imagen del objetivo geológico principal ($X_{max} \geq Z$). En capas planas X_{max} puede ser igual a la profundidad

del objetivo.

X_{\max} se relaciona con la corrección NMO porque la esta corrección es usada para alinear reflexiones que se ven diferente antes del apilado. La corrección NMO son aplicadas a los datos ordenados en gathers de CMP bin. Existe un offset límite para el cual se puede hacer el estiramiento NMO. X_{\max} puede ser seleccionado como el mínimo Offset requerido para marcar correctamente la imagen más profunda. X_{\max} también debe ser menor que el Offset donde el estiramiento NMO se convierte en inaceptable. Por último, permitirá aplicar correctamente análisis AVO (Chaouch, A y Mari J, 2006)

3.4.14.3 Distribución de offset cuando se tiene un diseño 3D la distribución para cada clase de offset (offset cercano, lejano, medio) es irregular: contiene un alto porcentaje de offsets lejanos, aproximado de 57%; un pequeño porcentaje de offset medio, alrededor de 33%; y un muy pequeño porcentaje de offset cercano, de 10% (figura 3.16). La alta contribución de offset lejano mejorará la eliminación de múltiples, mientras que la pequeña cantidad de offset cercano reducirá el ruido asociado a esta clase de offset, como el ground roll, ruido generado por la fuente, etc. Esto mejorará la relación S/N (Cordsen,*et al* 2010).

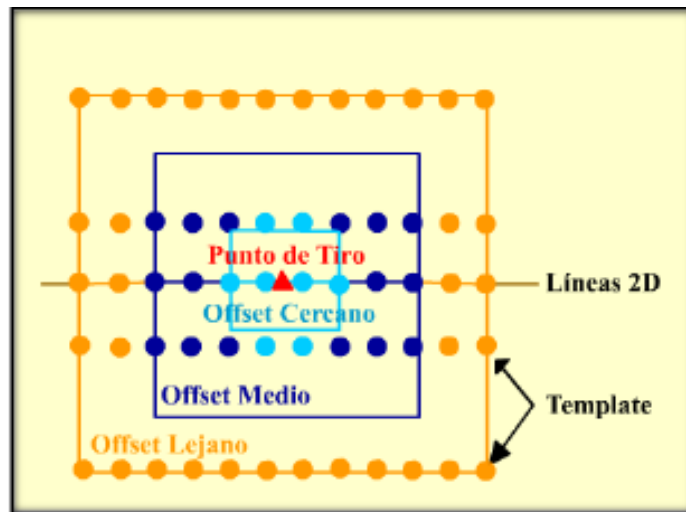


Figura 3.16. Distribución de offset tomado de Cordsen, A. et al (2010)

Stone D ,(1994) hace referencia a que el tamaño del *offset* cercano puede afectar :

- Zonas “mute”.
- Los reflectores de poca profundidad.
- Intervalo de grupo.
- Intervalo de cross – line.

3.4.15 Fold o cobertura: la cobertura de un levantamiento 3D representa el número de trazas que están localizadas dentro de un mismo bin y luego son sumadas. Cada traza es generada en el medio de un par fuente-receptor. Los pares de fuente receptor tienen diferente direcciones. (Chaouch, A y Mari J, 2006)

Cuando se suman trazas con la misma señal, esta es mejorada ya que se encuentra en fase. Sin embargo todas las trazas tienen diferente ruido aleatorio que esta fuera de fase, entonces el proceso de sumatoria disminuye este ruido (Chaouch, A y Mari J, 2006). El proceso de apilado de las trazas por bin (figura 3.17) contribuye con el aumento de la relación señal ruido.

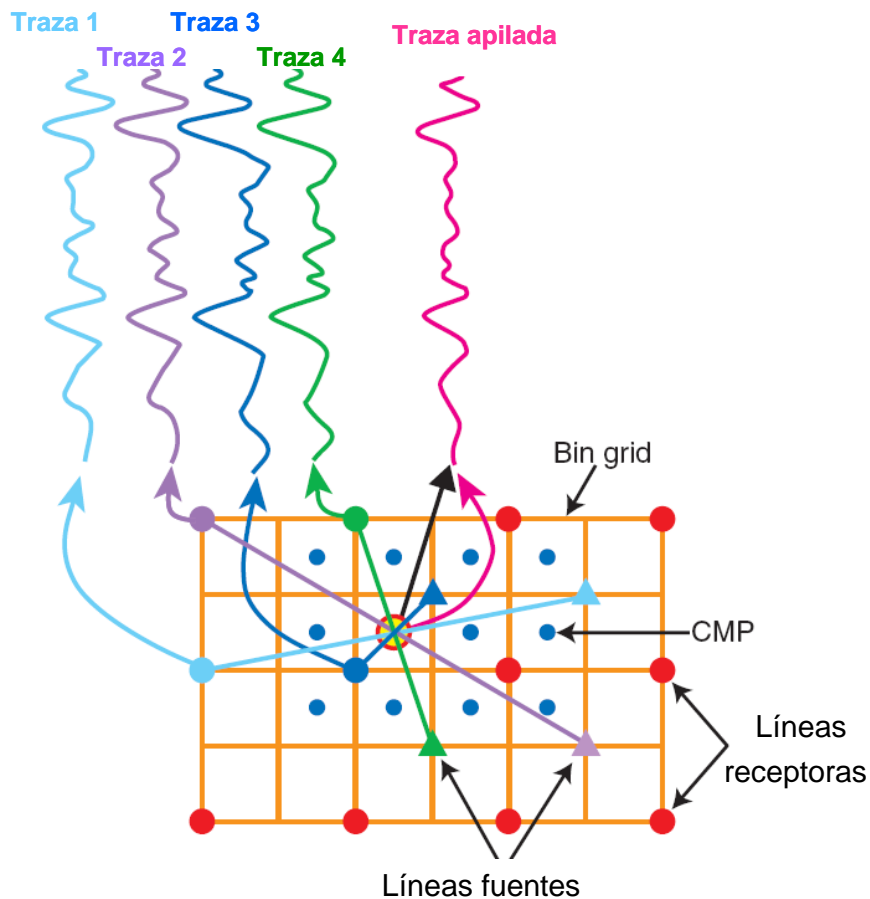


Figura 3.17. Suma de trazas de un mismo Bin forman la cobertura por fin en un levantamiento. Tomado de Chaouch, A y Mari J, (2006).

La cobertura, por lo general, esta impulsada por las necesidades de procesamiento. Esta puede ser vista como un rango en el cual pueden influir otros parámetros del bin considerados mucho más críticos. Con los sistemas de canal de alta calidad que se usan hoy en día en los levantamientos sísmicos la cobertura suele ser muy alta en la adquisición moderna (Stone, 1994).

Al diseñar trabajamos con las siguientes coberturas:

Cobertura in-line: es muy similar a la cobertura 2D (Cordsen, A. *et al* 2010), el

intervalo de la línea fuetes define cuántos puntos fuentes se producen a lo largo de cualquier línea receptora.

Cobertura cross-line: se calcula similar al in-line fold, (Cordsen, A. *et al* 2010), en donde es importante resaltar la expresión $NRL \times RLI$, ya que de esta forma se definen los medios del área que son cubiertos

Cobertura nominal (full fold): se refiera al área de full cobertura en el levantamiento. Cordsen la expresa de forma matemática como el producto entre la cobertura in-line y cross-line.

3.4.15.1 Relación de la cobertura y densidad de disparo: la cobertura es obtenida por la combinación de fuentes y receptores activos. Es un hecho que cada punto de tiro genera una línea de bin en el subsuelo para cada línea de receptores activa. Por lo que Chaouch, A y Mari J, (2006) propone calcular la cobertura a partir de la densidad de disparos de la forma:

$$F = S_d * b^2 * T_r$$

Donde S_d es la densidad de disparo por km^2 , b es el área del bin en km y T_r el total de rceptores

3.4.16 Apertura de migración: asegura que los eventos migrados de importantes reflectores permanezcan sobre el sismograma. La longitud del spread necesita ser un poco mayor que la profundidad del reflector que se quiere quede reflejado en la sección sísmica. (Cordsen, A. *et al* 2010)

Chaouch, A y Mari J, (2006) la define como la franja que debe ser añadida alrededor del área del objetivo en el subsuelo con el fin de migrar correctamente los eventos buzantes y enfocar correctamente la energía difractada situada en el borde de la zona objetivo

Es decir que la apertura de migración es la distancia que se agrega al estudio, al rededor de objetivo a interpretar, para tomar en cuenta los buzamientos de este, y de esta forma sean muestreados, por lo que se relaciona con el desplazamiento de eventos buzantes a su verdadera posición y con el colapso de difracciones.

Cordsen, A. *et al* 2010 explica que los objetivos de la migración son:

- Reposicionar las reflexiones movidas por el buzamiento.
- Concentrar la energía dispersa sobre la zona de fresnel.
- Colapsar la energía difractada proveniente de puntos de fuentes.

En el plano (x,y) se obtiene una hipérbola difractada en los datos apilados; en teoría la hipérbola se extiende al infinito en tiempo y espacio. Sin embargo en la practica, para la migración esta hipérbola se truncará en una extensión espacial en donde el proceso de migración colapsará toda la energía al vértice de la hipérbola; esta extensión espacial se conoce como apertura de migración, que en la figura 3.18 se denota como la distancia AC (Chaouch, y Mari, 2006)

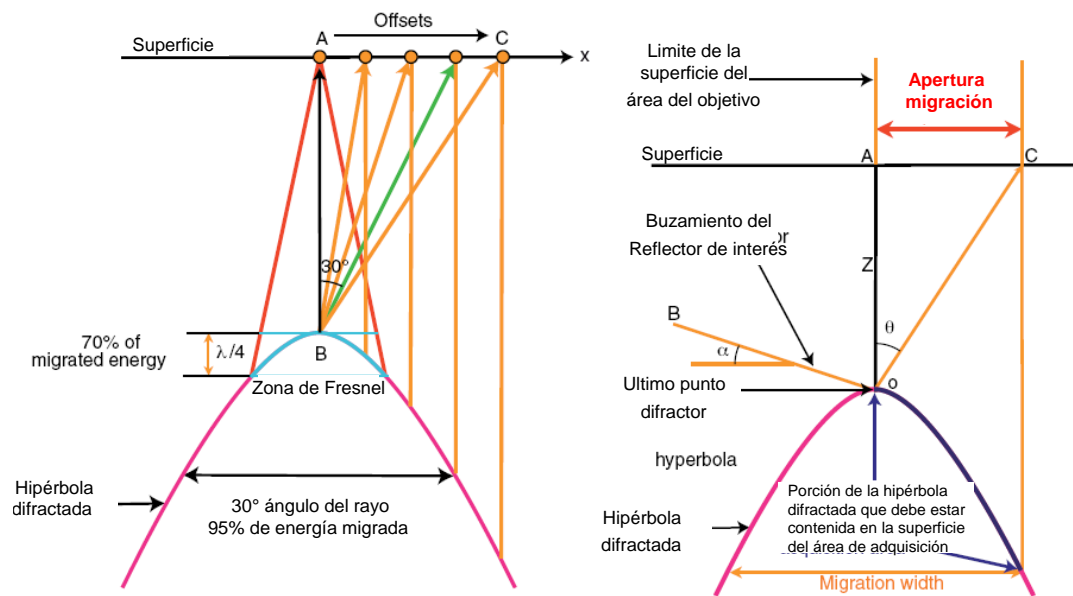


Figura 3.18. Se muestra la hipérbola colapsada y representación gráfica de la apertura migración. Tomado de Chaouch, A y Mari J, (2006).

Se acepta para limitar la extensión de la hipérbola el 95% de energía sísmica migrada,

Considerándola como una extensión de la cobertura, se asegura tener fuentes y receptores a *offsets* que tomen en cuenta la trayectoria de los rayos de las estructuras con alto buzamiento

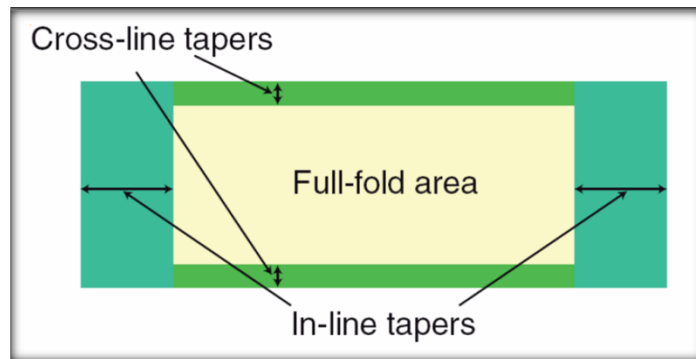
3.4.17 Fold taper: el área alrededor de un estudio 3D que se debe ser adicionada para poder construir un área de full cobertura (figura 3.19). Esta zona no es necesariamente la misma en dirección inline y en dirección cross-line, por lo cual debe ser calculada separadamente, (Cordsen, A. *et al* 2010).

Esta área toma en cuenta los problemas de bordes que se encuentran alrededor del áreas de full cobertura del levantamiento

- **In-line taper:** Para el taper in-line el mínimo valor de cobertura es usualmente

tomado igual a uno. Sin embargo, podría ser mayor en el caso de ahorrar costos (Chaouch, A y Mari J, 2006).

- **Cross – line taper:** Depende de la configuración del templete (Chaouch, A y Mari J, 2006).



*Figura 3.19 Diagrama de full-fold área y fold taper en un diseño de adquisición.
Tomado de Chaouch, A y Mari J, (2006).*

Tomando en cuenta lo anteriormente explicado, se puede dividir el área del levantamiento sísmico en 3 fase; la primera que es suministrada por el interprete y es el área en donde se desea una cobertura nominal, la segunda es el área de apertura migración añadida para efectos de tomar en cuenta en procesamiento la estructuras bufantes y por ultima el área del fold taper que se agrega para satisfacer las necesidades de full cobertura de las dos primeras lo cual se puede demostrar de una forma mas clara con la siguiente figura:

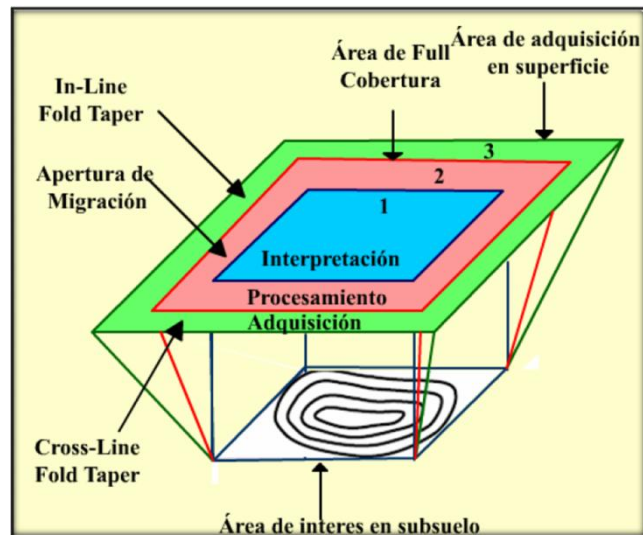


Figura 3.20 Áreas de un levantamiento sísmico 3D. Tomado de Cordsen, A. et al (2010)

3.4.18 Resolución: Sheriff, R, (2002) define a la resolución como la capacidad de la sísmica para distinguir dos eventos en la superficie uno muy cercano al otro. De aquí derivan la resolución vertical y lateral.

La tierra, la adquisición y procesamiento sísmico juegan un papel fundamental como factores que afectan a la resolución.

3.4.18.1 Resolución vertical: es la capacidad para resaltar de forma individualizada las reflexiones producidas por discontinuidades del subsuelo muy próximas entre si. Entonces se tiene que para estas reflexiones provenientes de determinadas interfases entre capas, en donde hay una diferencia de densidad y velocidad, existe una distancia límite por debajo de la cual es imposible identificar los contactos de capas como dos reflexiones independientes; esta distancia es definida como la resolución vertical Cordsen, et, al (2000)..

La resolución vertical puede ser calculada como

$$R_z = \frac{cV}{2f_{\max} \cos i}$$

Donde la variable c es una constante que proviene del criterio de Rayling que es 0.751, este valor puede llegar a ser un cuarto de la longitud de onda dominante, es decir 0.25. Así mismo se supuso que el valor del $\cos(i)$ es 0.9, que corresponde aproximadamente con el "máximo desplazamiento (*offset*) es igual a criterio de profundidad" Cordsen, et, al (2000).

Como se describe en la figura 3.21 a medida que profundiza en el subsuelo aumenta la velocidad y la frecuencia disminuye. Por esta razón se pierde resolución a grandes profundidades. La relación de existe entre la resolución vertical y de la frecuencia de la onda nos manifiesta que la señal sísmica no solo debe ser intensa sino que también debe incluir un espectro de altas frecuencias que aumente la resolución.

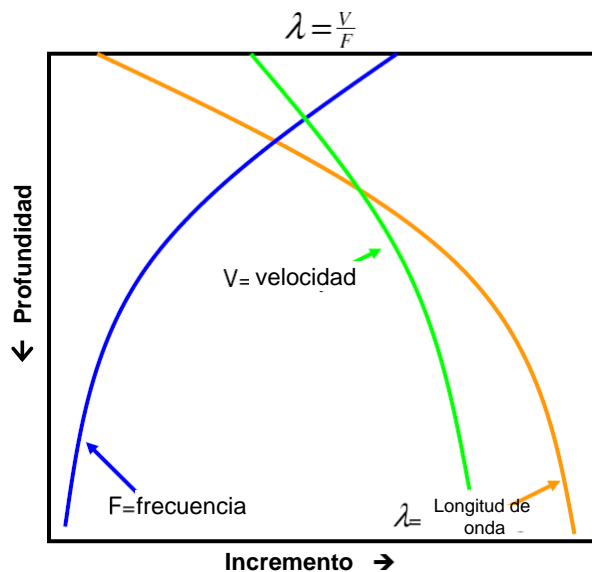


Figura 3.21 Relación entre la velocidad, frecuencia, longitud de onda y profundidad.

3.4.18.2 Resolución lateral: corresponde a la dirección del plano de medición y es relacionado con la zona de Fresnel (figura 3.22).

La zona de Fresnel está definida como el área en superficie donde la energía reflejada llega a la superficie con un tiempo de retardo igual a la mitad del periodo dominante ($T/2$). En este caso trayectorias de los rayos de diferentes ondas reflejadas por menos de mitad de la longitud de onda. Es aceptado comúnmente el valor de un cuarto de la longitud de onda ($\lambda/4$).

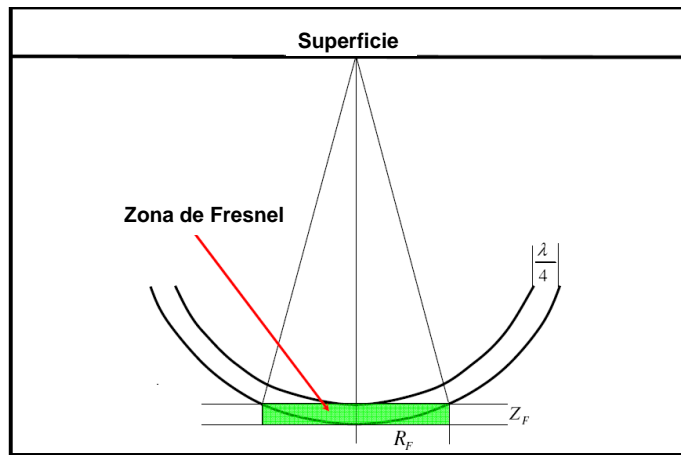


Figura 3.22 Ilustración de la zona de Fresnel

Las reflexiones grabadas en la superficie no provienen de un punto en el subsuelo, sino de un área con forma de disco, cuya dimension es igual a la zona de Fresnel

$$B = \frac{V_{rms}}{4 * f * \text{sen}(\theta)}$$

Por lo general es un valor grande y significa que eventos menores al radio de Fresnel puede perderse en el apilado de CMP

3.4.19 Aliasing espacial y temporal: el Aliasing es el fenómeno que ocurre cuando

el intervalo de grupo de receptores, se selecciona inadecuadamente, produciendo un mal muestreo de la señal.

El aliasing espacial es especialmente crítico en áreas con buzamiento alto, puesto que las trazas que se suman en un bin se encuentran en desfase. Esto trae como consecuencia (en secciones no migradas) eventos con buzamiento falso y generaciones de ruidos no coherente (Sheriff. 2002). Herrera Y, Cooper N, (2010) explica que para evitar el aliasing espacial se aplica la teoría de Nyquist y se asegura de que se muestree por lo menos dos trazas por longitud de onda aparente que regresa a la superficie. Esta longitud de onda representa los eventos más pequeños en los que se está interesado en la zona.

El aliasing temporal es aquel fenómeno que se produce cuando la señal sísmica está mal muestreada en tiempo, lo que impide la buena representación de la traza sísmica que a su vez trae como consecuencia la mala representación de los eventos existentes en subsuelo.

Para el aliasing temporal se debe asegurar que se use el intervalo adecuado de muestreo según las frecuencias que se esperen recuperar y que el filtro de aliasing de los instrumentos esté activado. (Herrera Y, Cooper N, 2010).

3.4.20 Relación señal ruido (S/N): es una relación que existe entre la señal deseada y la no deseada y mientras mayor sea, indica que la señal predomina sobre el ruido, la relación señal- ruido es difícil de calcular con exactitud porque es difícil separar completamente la señal del ruido y también depende de que se constituye el ruido.

Explica que en el análisis de la relación S/R se asume la presencia de ruido aleatorio en la data cruda. Será añadido ruido que también es coherente; por ejemplo el ruido del disparo de traza a traza lo cual complica el problema del diseño al menos que el ruido pueda ser eliminado en el campo a través del uso de arreglos, o en procesamiento en lugar de alguna técnica multicanal. (Galbraith, M., 2004)

Se calcula la relación señal ruido asumiendo que las trazas tienen igual señal y diferente ruido. Cuando se trabaja con los datos ya apilados estos poseen una relación señal ruido que ha sido mejorada en procesamiento.

La relación S/N cambia con la frecuencia, ya que la relación S/N para un rango de baja frecuencia es generalmente mayor que S/N para las frecuencias altas. Si alta frecuencia es importante para la detectabilidad, entonces la Cobertura puede tener que ser incrementado para conseguir la deseada S/ N en la gama de frecuencia más alta (Galbraith, M., 2004)

Para un bin cuadrado la relación S/N es directamente proporcional a la longitud de un lado del bin. Por lo tanto, sólo un ligero cambio en la selección del tamaño del bin puede tener un efecto importante sobre la cobertura y la relación (Cordsen, A. *et al* 2010)

3.4.21 Tamaño de bin (bin size) es el área sobre la cual las trazas son apiladas, este ve de mano a mano con la cobertura (Chaouch, A y Mari J, 2006).

- **Tamaño del bin y la resolución:** El tamaño del bin debe ser igual a la resolución lateral después de la migración. Este valor es igual a al mitad de la longitud de onda dominante asociada con la frecuencia dominante

$$\text{Bin size} = 1/2 \lambda_{\text{dom}}$$

- **Tamaño del biny muestreo espacial:** El muestreo espacial es una operación común en la sísmica de adquisición. Las muestras registradas deben permitir la reconstrucción de la señal original sin ninguna ambigüedad. Un muestreo adecuado es dado por las condiciones de Nyquist, que establece un mínimo de dos muestras por periodo para reconstruir una señal discreta. Entonces si tratamos al muestreo en el dominio de punto medio se tiene que

$$\Delta X_m \leq V_{\text{min}} / 4f_{\text{max}}$$

Vermeer,. (1998) explica que en un plano (f,k) existe un máximo número de onda (k_{max}) de tal manera que la energía es nula (cero) para frecuencias mayores a f_{max} y hay una velocidad mínima V_{min} .(figura 3.23).

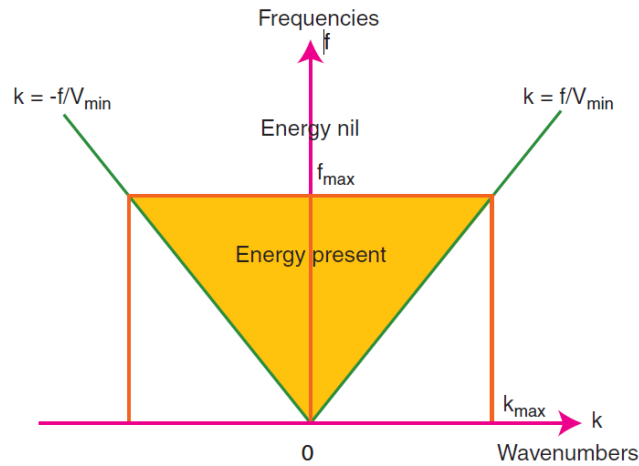


Figura 3.23 Número de ondas de Nyquist. Plano (f,k) donde existe un numero de onda máximo donde la energía es nula para frecuencia mayores a f_{max} . Tomado de Chaouch, A y Mari J, (2006)

Cuando la velocidad min es muy pequeña o la frecuencia máxima es muy alta se tiene que trabajar con un tamaño de bin muy pequeño lo cual no es factible. Entonces es común en adquisiciones aceptar alguna tipo de señal con aliasing tal como el ground roll con una baja velocidad y alta frecuencia.

- **Tamaño de bin y las difracciones:** las difracciones son útiles para la migración y deben ser muestreada correctamente, la formula más simple es:

$$\Delta X \leq V_{rms} / 4f_{max} \sin\phi$$

Donde ϕ es el ángulo de despegue del punto de difracción

Cordsen, A. *et al* 2010 propone el cálculo del bin por

- Calculo a partir de las velocidades RMS (velocidades apiladas) usadas durante

procesamiento de líneas 2D.

- Calculo por frecuencias máximas, usando filtros variables en el tiempo utilizado en los datos de viejos pueden indicar frecuencia máxima, pero debe ser usado con precaución. Los paneles de filtros en los registros crudos, datos apilados y migrados generan frecuencia máxima más real ya que estos han sido menos manipulados.
- Calculo por buzamiento: se considera que las difracciones de una falla y el 95% de la energía difractada se pueden migrar a un punto desde el interior un ángulo de 30 grados: por lo tanto, a partir 30 grados se debe considerar el buzamiento.

La siguiente figura 3.24 resume los elementos anteriormente explicados de un levantamiento sísmico 3D

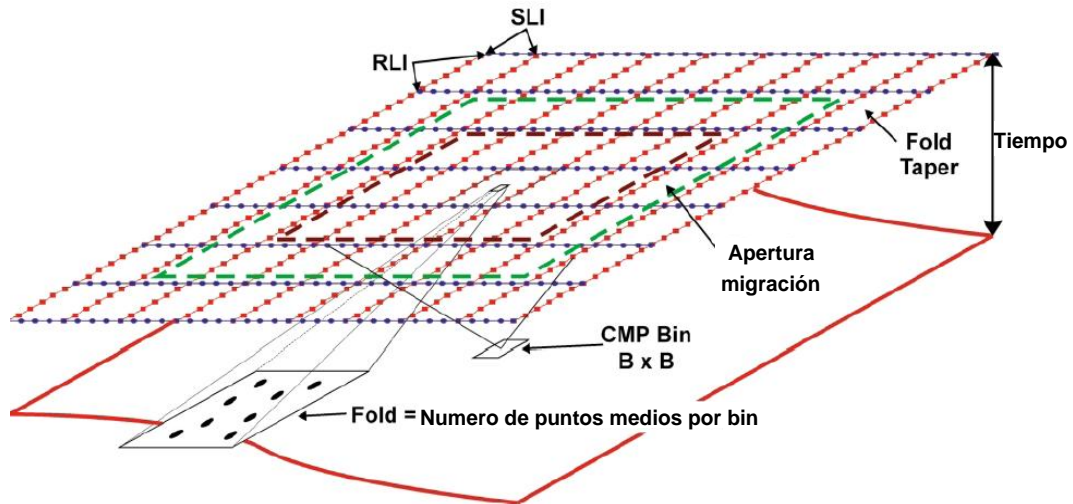


Figura 3.24 Disposición de los elementos perteneciente al diseño de parámetros de la adquisición sísmica 3D. Tomado de Cordsen, A. et al (2010)

3.5 Atributos de un diseño sísmico.

Cordsen, A. *et al* (2010) hace referencia a que un diseño sísmico no está completo hasta que no se haya realizado un mapa de atributos; los atributos estándares analizados para cada bin son:

3.5.1 Bin display: muestra los bins que contienen al menos un punto medio geométrico. Algunos de estos puntos pueden caer cercanos al centro y otros próximos a los bordes del bin.

3.5.2 Análisis de cobertura: la zona en donde se encuentra el objetivo debe tener una buena relación señal ruido para obtener buenas secciones sísmicas a la hora de interpretar. La cobertura debe ser nominal para ser precisos en la estimación de velocidades, esta cobertura será máxima hacia el centro y disminuirá hacia los bordes

3.5.3 Distribución de offset: la distribución de *offset* está directamente relacionada con la cobertura. Bajos valores de cobertura generan una pobre distribución de *offset*, mientras que altos valores de cobertura aumentan la distribución de los mismos (figura 3.25). La distribución de *offset* más efectiva debe contener trazas provenientes de *offsets* tanto cercanos como lejanos, lo cual facilitará los cálculos de velocidad para las correcciones NMO, así como también permitirá obtener el mejor resultado del apilado.

Una distribución poco equilibrada de *offsets* (desproporción en la cantidad de *offsets* lejanos con respecto a los cercanos, o viceversa) puede causar aliasing de los elementos buzantes, puede ser fuente generadora de ruido e incluso puede originar reflexiones primarias inexistentes

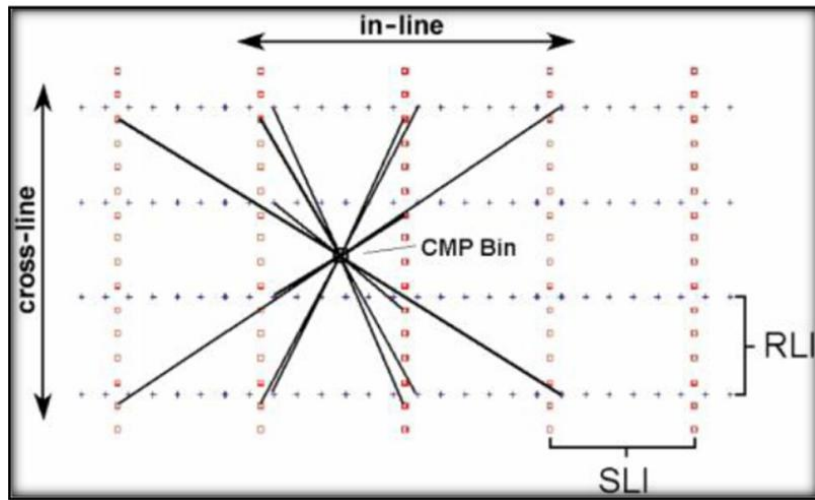


Figura 3.25 Distribución de offset y azimuth para un CMP bin. Tomado de Cordsen, A. et al (2010)

3.5.4 Distribución de azimuth: El análisis azimuthal se hace de acuerdo al valor que se obtiene de la tasa de aspecto, la cual se define como el cociente entre la dirección cross-line y la dirección in-line del patch. Si la relación de aspecto se encuentra en 0.6 y 1.0 se obtiene una buena distribución de azimuth, lo que garantiza que la información de todos los ángulos que rodean el bin son incluidos en el apilado.

Una manera de representar la distribución de azimuthal es a través de los llamados diagramas de araña (figura 3.26) el cual permite visualizar el azimuth de cada traza perteneciente a un CMP bin. Cada pata de la araña (tanto el tamaño como el color) indica la distancia de *offset* y apunta en dirección de la fuente al receptor

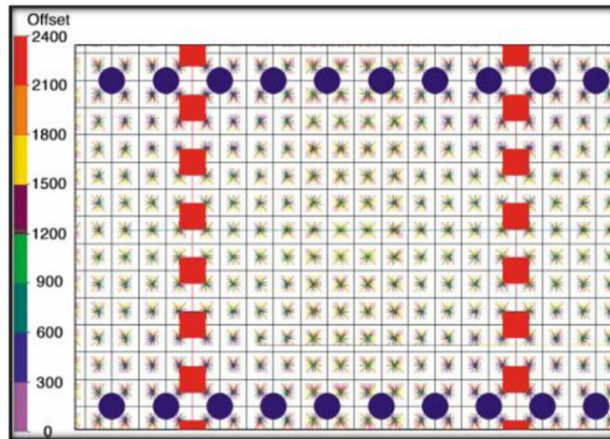


Figura 3.26 Ilustración del diagrama de araña en un conjunto de bins. Tomado de Cordsen, et al (2010)

3.5.5 Diagrama de palitos (stick diagram): cada cuadro representa un CMP bin y el número de palitos dentro del mismo es igual al número de trazas a ser apiladas; Una distribución perfectamente triangular indicará la presencia de todos los *offsets* posibles. Si dos o más trazas tienen el mismo *offset*, el palito será dibujado con un color diferente para indicar redundancia.

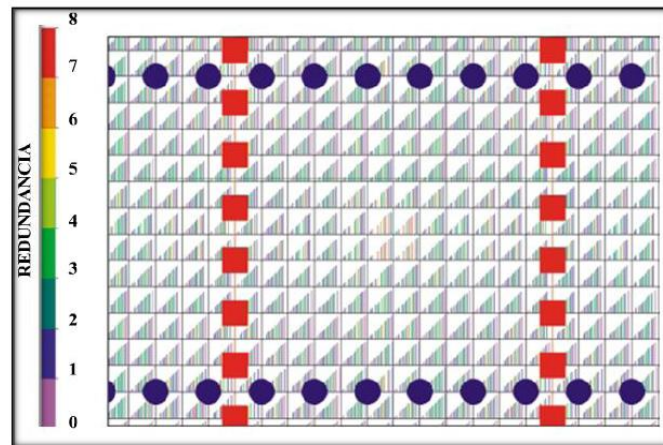


Figura 3.27 Ejemplo de diagrama de palitos (stick diagram). Tomado de Cordsen, A. et al (2010)

Los bins con poco o ningún *offset* lejano o irregularmente muestreados, no son convenientes para un análisis AVO. La cobertura puede ser la apropiada, pero a los bins les pueden estar faltando contribución de *offset* lejanos o pueden tener muchas trazas con el mismo *offset*; el análisis de “Conteo de trazas vs *offset*” es similar a este con la diferencia de que en este el estudio se hace sobre todas las trazas del levantamiento y no bin a bin.

3.5.6 Diagrama de rosa: el diagrama de rosa muestra un diagrama polar del *offset* contra acimut. Cada cuña en el diagrama representa el número de trazas en una gama dada de *offset* y del acimut. Cada círculo concéntrico representa una gama de *offsets*. Las gamas del acimut son marcadas por las líneas radiales, comenzando a partir de los 0 grados e incrementándose en sentido horario hasta 359 grados (figura 3.28).

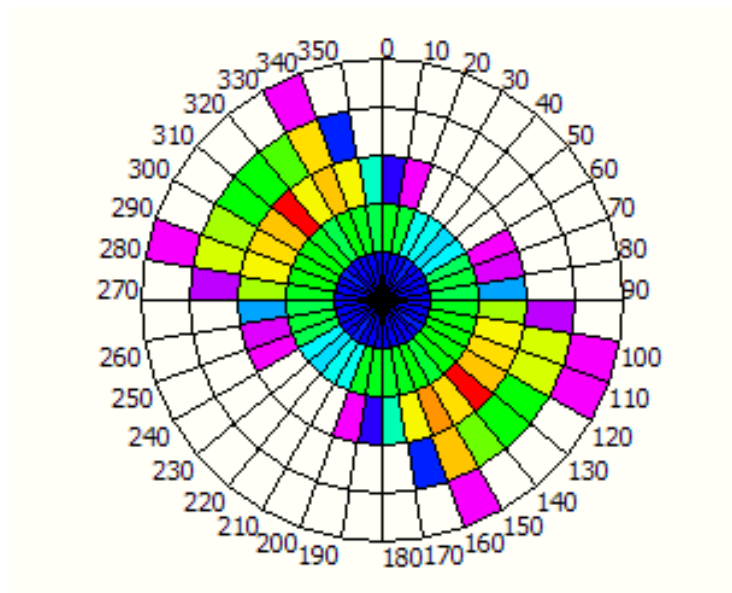


Figura 3.28 Ejemplo del diagrama de rosa

Actualmente existe análisis más específico que están innovando la técnica de diseño y de esta forma lograr que los datos obtenidos a través del análisis teórico sea lo más similar a los esperados en campo, en GEDCO (2012) describe alguno de estos:

- **Stack analysis (análisis del apilado):** es un estudio que se crea a partir de un

archivo shot gather con corrección NMO conjunto con la distribución de *offset* en cada bin del levantamiento; donde esta información debe representar los datos del área estudiada. El resultado se muestra en una venta donde cada casilla representa un bin, el cual estará representado con el color de la amplitud, mostrados sus variación de bin a bin. A partir de este análisis se obtiene la gráfica “Desviación Estándar de la Amplitud vs Tiempo”.

- **Unique fold (cobertura única):** la contribución de bin es dividida en sectores que están basados *en offset* y/o azimuth. Si dos o más trazas caen dentro de un mismo sector (*offset* y azimuth) esta son contadas como una solo contribución para el análisis de unique fold
- **Redundant fold (cobertura redundante):** este análisis muestra la diferencia entre la cobertura (fold) y el resultado del estudio de “unique fold”, es el conteo de trazas que han sido adquiridas más de una vez en el mismo sector.
- **Análisis k_x vs k_y :** para cada bin las trazas son ordenadas de acuerdo a un rango de *offset*; los datos son convertidos del domino “x,y” al domino “ k_x , k_y ” por una transformada de Fourier. Las magnitudes de los valores del apilado son calculados y se crea un espectro de amplitud en forma de mapa.

3.6 Modelado sísmico

Es una técnica usada para simular la propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo, Según Margrave y Manning (2004) hay muchos métodos que pueden ser usados para simular como se propaga el campo de ondas sísmicas por el subsuelo y como serian registradas por los receptores

Krebes, E. (2004) define de una forma mas especifica al modelado como, el cálculo numérico de sismogramas teóricos o sintético, para un determinado modelo geológico del subsuelo. La idea entonces es comparar las trazas sísmicas sintéticas con datos sísmicos reales adquiridos en el campo. Si los dos concuerdan dentro de un nivel aceptable de precisión, el modelo geológico obtenido puede ser tomado como un modelo razonablemente preciso del subsuelo.

Este modelado puede hacerse por el método de ecuación de onda y trazado de rayo.

La elaboración de un diseño tomando consideraciones de gradiente lineales de velocidades muestra una metodología intermedia entre las reglas prácticas, de cálculo de parámetros del diseño, y la utilización de trazado de rayos para establecer los parámetros finales. El gradiente de velocidad lineal incorpora los efectos de primer orden de variaciones de velocidad con profundidad y temperatura en la trayectoria de los rayos desde y hacia la superficie.

3.6.1 Trazado de rayo

La teoría de rayo puede ser usada para calcular tiempos de tránsito de ondas y amplitudes sísmicas a lo largo de trayectorias de los rayos en un medio heterogéneo cuando las frecuencias presentes en la onda son lo suficientemente altas como para que la aproximación geométrica puede ser utilizada (Krebes, 2004).

La utilización del trazado de rayos para explorar la iluminación de una estructura geológica de interés por un diseño 3D en particular; esta metodología envuelve el concepto de diagnóstico de adquisición, permitiendo desplegar múltiples características de la propagación de los rayos como atributos sobre la superficie de los reflectores sísmicos de interés. Una gran cantidad de diagnósticos puede ser generada a partir de un trazado de rayos y la visualización de éstos sobre las estructuras geológicas provee mayores posibilidades de análisis de las consecuencias en la selección de muchos parámetros del levantamiento.

El trazado de rayos sísmicos consiste en determinar el camino que sigue una onda sísmica desde un lugar del suelo donde se genera (fuente) hasta otro punto de la superficie donde se recibe (sensor) (figura 3.29). La propagación de la onda sísmica por el subsuelo esta determinada por las condiciones locales del terreno y por lo tanto, es posible obtener información de dichas condiciones estudiando los tiempos de propagación y las amplitudes de las ondas sísmicas, siendo en muchos casos este modo de detección el único modo de obtenerla (Contreras O, *et al* , 2008).

Cordsen,*et al* (2010) explica que la técnica de trazado de rayos es muy útil para definir un diseño de adquisición a fin de iluminar los estratos y sobre todo cuando las capas en el subsuelo tienen a un modelo tectonoestratigráfico complicado; por ejemplo domos de sal, fallas, discontinuidades laterales de velocidad, entre otros. De esta forma se puede modificar el espaciamiento entre receptores y fuentes de tal manera que se asegure full cobertura en zonas estructuralmente complejas y también permite ver la distribución de atributos del diseño sobre el horizonte de interés.

Contreras *et. al*(2008), indica como la detección de zonas de pobre iluminación en los reflectores de interés, y de esta forma modificar tanto los parámetros del patch de grabación como la ubicación de las fuentes, y así optimizar el diseño existente. El análisis de los resultados del trazado de rayos en el modelo geológico permite evaluar la influencia de un diseño determinado sobre etapas del procesamiento de datos tales como análisis de velocidad o migración; hacen énfasis en el riesgo que se corre en “sobre-especializar” el levantamiento para iluminar lo que el modelo establece como la geología del área sin considerar el impacto de la incertidumbre del modelo en la selección de parámetros.

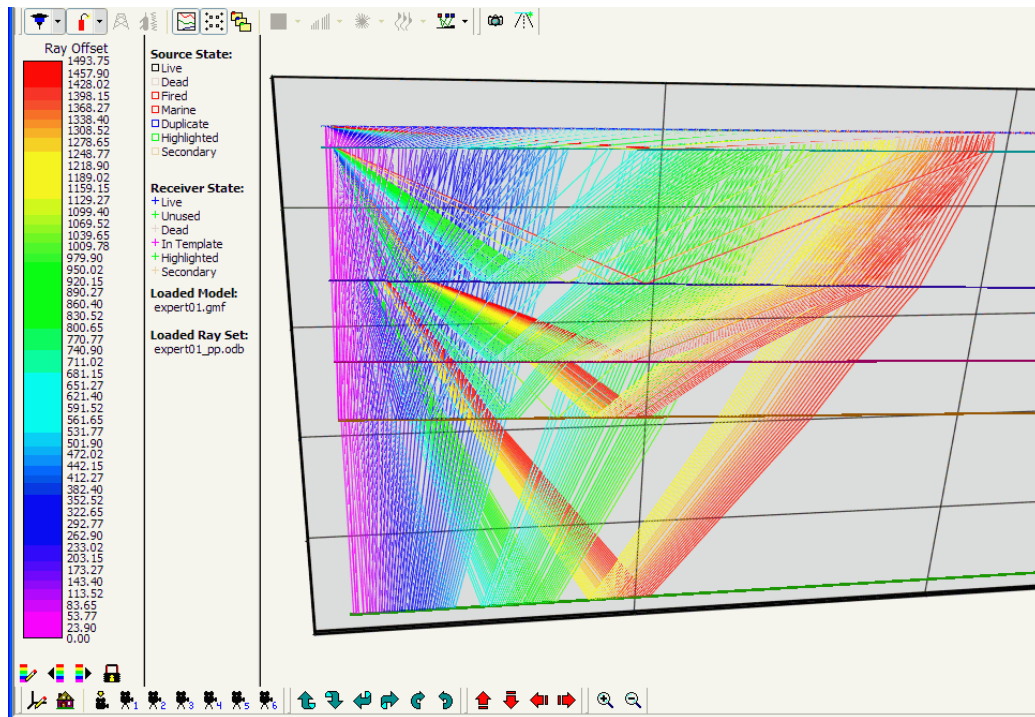


Figura 3.29 Trazado de rayos elaborado en el programa Mesa

CAPITULO IV

MARCO METODOLÓGICO

La elaboración de un diseño de adquisición sísmica conlleva un proceso que abarca desde el estudio de donde se va a ubicar el levantamiento, la forma y longitud, la topografía, aspectos climáticos, condiciones de la superficie, etc. Se recopilan los datos necesarios del subsuelo, registros de campo, secciones sísmicas, información de pozos, etc. Toda esta información se analiza y aquí es donde comienza el diseño de los parámetros de adquisición (figura 4.1).

El esquema describe la metodología empleada a lo largo del desarrollo de esta investigación de tal forma se obtenga un mejor análisis cuantitativo y cualitativo del área estudiada con el diseño sísmico 3D, y obtener los mejores resultados de los datos a ser adquiridos.

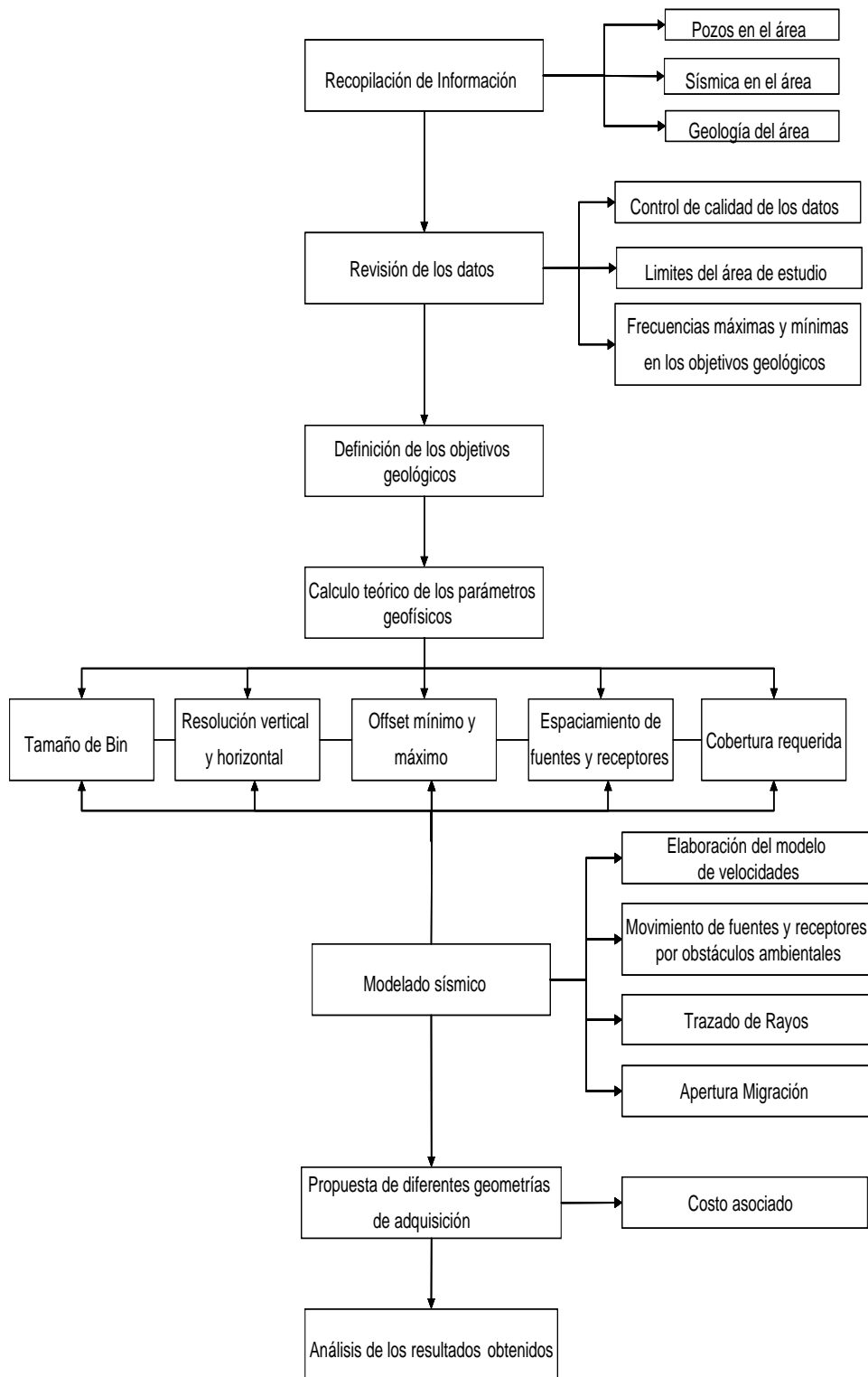


Figura 4.1 Esquema de la metodología de trabajo empleado durante el desarrollo del proyecto

4.1 Recopilación de la información

En esta primera etapa se procedió a la recopilación de la información existente del área para generar una base de datos con la información de curvas, datos generales por pozo y sísmica.

En principio se realizó una revisión de la información geológica disponible de la Cuenca Occidental de Venezuela para obtener de esta forma una ubicación geográfica, espacial y teórica de la complejidad estructural y geológica presente en la región. También se estudió la geología local, la evolución tectónica, la estratigrafía de la Cuenca de Maracaibo.

Se realizó un inventario de pozos del área (tabla 4.1.) de sus datos básicos, los respectivos topes, cantidad y tipos de registros corridos a los pozos, etc. La información perteneciente a estos fueron clasificada y revisada de tal forma de identificar como es la distribución de la información en el área de estudio, la calidad de los datos y cuales serán utilizada para la elaboración del diseño.

Tabla 4.1 Inventario elaborado para los pozos de la zona del área de diseño, se muestra los registros existentes por cada pozo en el área.

Pozos ZON	CAL	Litología	RD	RHOB	NPHI	DT
A0159	x	x	x	x	x	
AMN0001	x	x	x	x	x	
BA0703	x	x	x	x		
CC0002A		x	x			X Synt
CC0003		x	x			X Synt
CC0004		x	x			X Synt
CC0005		x	x			X Synt
EFC0029		x	x	x synt		X Synt
EFC0047		x	x			X Synt
EZO0023		x	x			
LB0114		x	x			
LB0273		x	x			
LL1930	x	x	x	x		
LL2080		x	x		x	X Synt
LR0239	x	x	x	x	x	
LS1387	x	x	x			X Synt
LSE2507		x	x	x synt		X Synt
PB0519		x	x	x		X Synt
PB0612		x	x	x	x	
PB0689	x	x	x	x	x	X Synt
PB0694	x	x	x	x	x	X Synt
QZ0005		x	x			
QZ0007		x	x			X Synt
R0801		x	x			X Synt
R0807		x	x			X Synt
R0818		x	x			X Synt
R0825	x	x	x	x	x	
R0849	x	x	x	x	x	
R0853		x	x	x	x	X Synt
R0869	x	x	x	x		X Synt
TJ0351		x	x			
TJ0999	x	x	x	x synt		X Synt

Los pozos seleccionados permiten tener una distribución coherente en el área de estudio definida para el proyecto; los mismos fueron seleccionados en base a la mejor cantidad y calidad de registros disponibles, pozos de control para geología y sísmica.

Dentro de la recopilación de información se identificaron los estudios previos disponibles para el área del proyecto, obteniendo así la información sísmica existente en el área a partir de los levantamientos:

- Zulia-Oriental 1991
- ONE-97C-1
- Oro Negro 3D

De estas campañas se recopiló información sobre el año de adquisición, parámetros

de grabación, secuencia de procesamientos y calidad de los datos (figura 4.2.) Como parte de información perteneciente a la geología del área se contó con las únicas superficies geológicas interpretadas para la zona de la Costa Oriental del Lago. Se debe destacar que las superficies no abarcan por completo el área geográfica en la que este estudio se desarrolla.

4.2 Revisión de los datos

Como el área de estudios esta enmarcada dentro de una complejidad geológica, la información de los pozos como son los registros petrofísicos-sísmicos que abarquen toda la geología es poca y en algunos pozo es inexistente; por lo que se realizó una revisión de los datos de cada pozo para clasificar la calidad de información que este pudiera aportar al estudios, distribuidos en la zona de la siguiente forma (figura 4.2):

forma analizar la frecuencia que se puede recuperar en la zona a estudiar.

Las líneas sísmicas 2D que fueron analizadas son(figura 4.3):

- ZO-91C-11
- ZO-91C-13
- ZO-91C-21
- ZO-91C-26
- ZO-91C-48
- LBV-95C-09

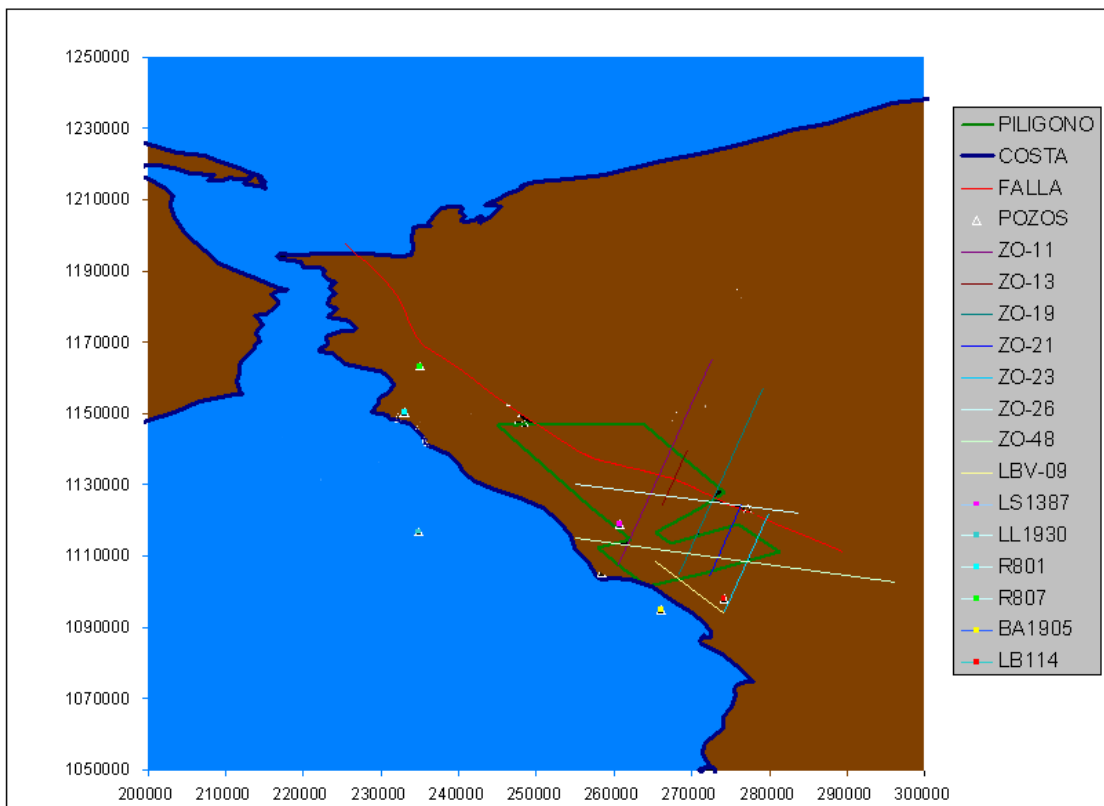


Figura 4.3 Distribución de los pozos y líneas 2D seleccionadas para el desarrollo del proyecto de diseño.

Los informes de adquisición de los levantamientos previos dieron a conocer las siguientes geometrías durante la etapa de grabación; de esta forma conocer información de parámetros como: *offset* máxima, intervalos entre receptores y fuentes, cobertura, etc, de los estudios previos en el área.

Los prospectos de interés fueron evaluados tomados en cuenta con estimación de crudo y gas (figura 4.4 y tablas 4.2. y 4.3), estableciendo una jerarquía de importancia tomando en cuenta estos valores. De esta forma podemos clasificarlo en el orden de interés productivo y así tenerlo en cuenta en el momento del cálculo de parámetros del diseño, datos que podrían ser factor decisivo en el momento de establecer criterios para la selección de parámetros.

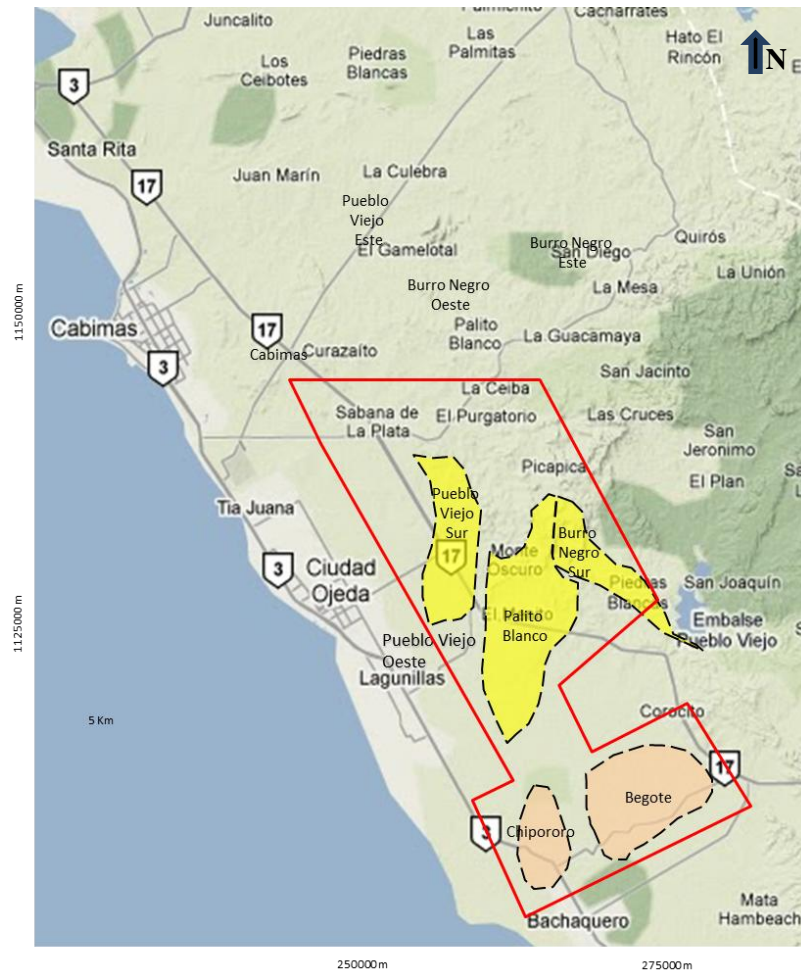


Figura 4.4 Distribución de los objetivos para el estudio. Los de color amarillo que se encuentra hacia el norte los clasificados como prospectos y los dos del sur clasificado leads.

Tabla 4.2 Rango de prioridad según acumulación de crudos para los objetivos clasificados como prospecto

Prospecto	Crudo MMBIs	Gas MMPPc	Éxito (%)	TD Pies	Area Km ²	Loc.
Burro Negro Sur	334	543		16500	129	
Palito Blanco	126	169		13000	88	
Pueblo Viejo Sur	672	1280		14000	49	
Oportunidades Revisadas (Reservas PP y PPP)						

Tabla 4.3 Rango de prioridad según acumulación de crudos para los objetivos clasificados como leads:

Leads	Crudo MMBl _s	Gas MMMPc
Chipororo	63	339
Begote	270	1343

4.3 Estimación de frecuencia máxima y dominante

En estas líneas fueron aplicados estudios para la estimar la frecuencia máxima recuperada en el levantamiento, la cual es requerida para resolver la capa más delgada de interés como explicamos en el tercer capítulo de este trabajo; a medida que se profundizamos en el subsuelo aumenta la velocidad y la frecuencia va disminuyendo, perdiendo resolución a grandes profundidades ya que las bajas frecuencias no permiten resolver capas de poco espesor.

Para esta estimación fue realizada bajo dos procedimientos que nos permitieron aproximar el valor tanto de la frecuencia máxima como la dominante :

4.3.1 Generación de ventanas de espectro de frecuencia

Para la estimación de la frecuencia máxima y dominante por medio de este proceso se escogieron líneas sísmicas de estudios 2D previos. El análisis fue hecho en el *software* VISTA de la compañía GEDCO y en PostStack de Landmark – Halliburton.

Las líneas sísmicas que fueron seleccionadas, para esta parte del análisis, atraviesan los objetivos tal forma que las frecuencias obtenidas sean las representativas del objetivo a iluminar.

El procedimiento en ambos software fue el mismo; se seleccionaron ventanas para

extraer espectros de frecuencia de la sísmica previa en la zona, se seleccionaron ventanas a nivel somero (figura 4.5), profundo y sobre el objetivo; que comprendieran un intervalo de tiempo doble entre los 900ms y los 3800 ms, intervalo en el cual se ubica el objetivo.

El criterio para la selección de la frecuencia dominante fue escoger el doble de la frecuencia máxima como explican Cordsen,*et al* (2010) y IASPEI (2006)

El programa permite obtener como resultado un análisis espectral gráfico en el cual se puede determinar el valor tanto de frecuencia dominante como de la frecuencia máxima.

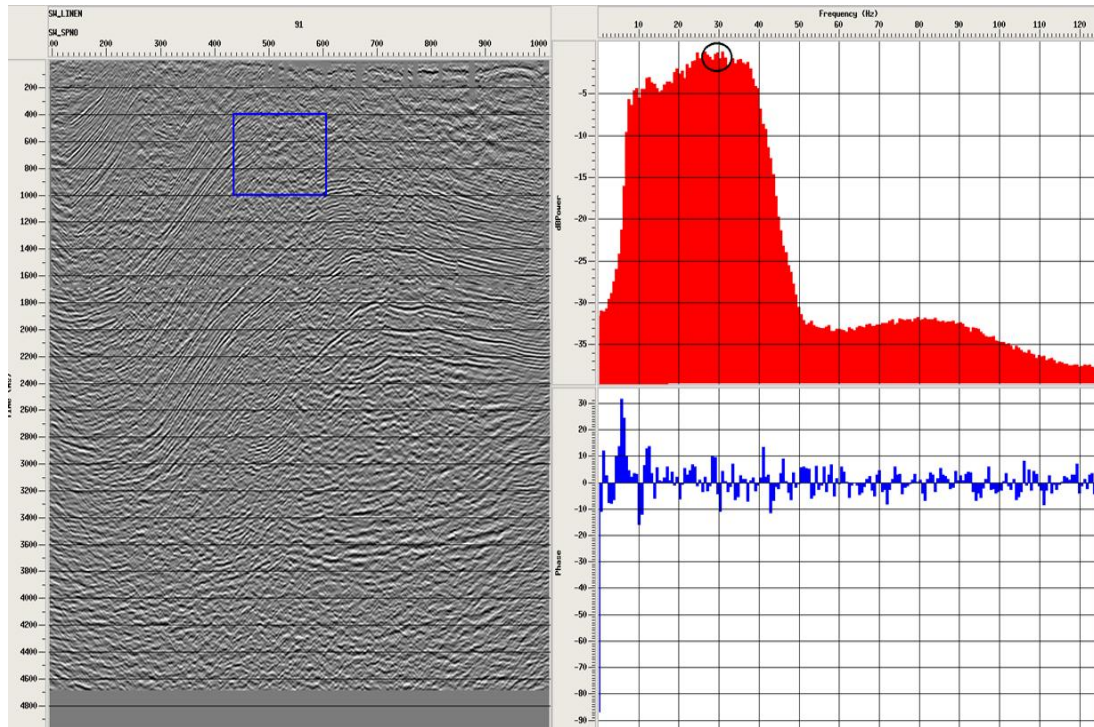


Figura 4.5 Ejemplo de ventana de frecuencia calculada para la región somera de la línea Lbl-95c

4.4 Estimación de la función de velocidades.

Después de hacer una revisión detallada de la calidad de los datos de los registros sínicos del pozo del área de estudio, fueron seleccionados aquellos que presentaran la mejor calidad y que estuvieran distribuidos de la forma más cercana y equitativa sobre el área (figura 4.3).

Se corrigieron los registros sínicos por el *checkshot*. El diagnóstico con *checkshot* es una herramienta de gran importancia que nos ayuda al entendimiento de cómo afecta la aplicación del *checkshot* o *seudo-checkshot* en los datos. Estos pueden ser usados para identificar puntos anómalos en el *checkshot* o para determinar los efectos de adición o eliminación en pares de *checkshot*.

La corrección por *checkshot* puede ser ejecutada cuando se usan *seudo-checkshot* o *seudo-sínicos*. Permiten visualizar las velocidades medidas *vs.* ITT (intervalo de tiempo de transito) que han sido cambiados basados en picos anómalos a lo largo de los tiempos de quiebre y reflexión.

El diagnóstico se realiza entre pares de tiros de verificación, obteniendo una diferencia del ITT entre estos puntos. Este valor es asignado al registro sínico distribuyéndolo de forma equitativa en el mismo intervalo de pares de *checkshot* que se está analizando. Dicho procedimiento se realiza a lo largo de todo el registro (figura 4.6).

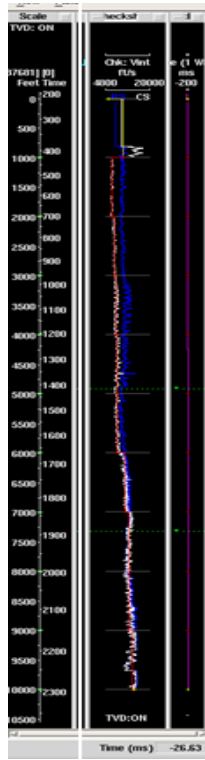


Figura 4.6 Ejemplo de la Corrección de un pseudo-sónico por el registro checkshot para el pozo LS1387

Como en los registros sónicos se presenta alta dispersión de los datos se aplicó un suavizado a cada uno de los registros por mediana móvil (100, 200, 300) procedimiento que también fue aplicado de esta forma en el trabajo investigativo de Perez, (2008). Este procedimiento fue realizado en el programa EXCEL de Microsoft Office (figura 4,7).

Fue seleccionada la mediana móvil de 300 ya que realiza un suavizado del registro sónico pero sin perder su tendencia, mientras que la de 100 y 200 mantiene los picos abruptos que se desean suavizar.

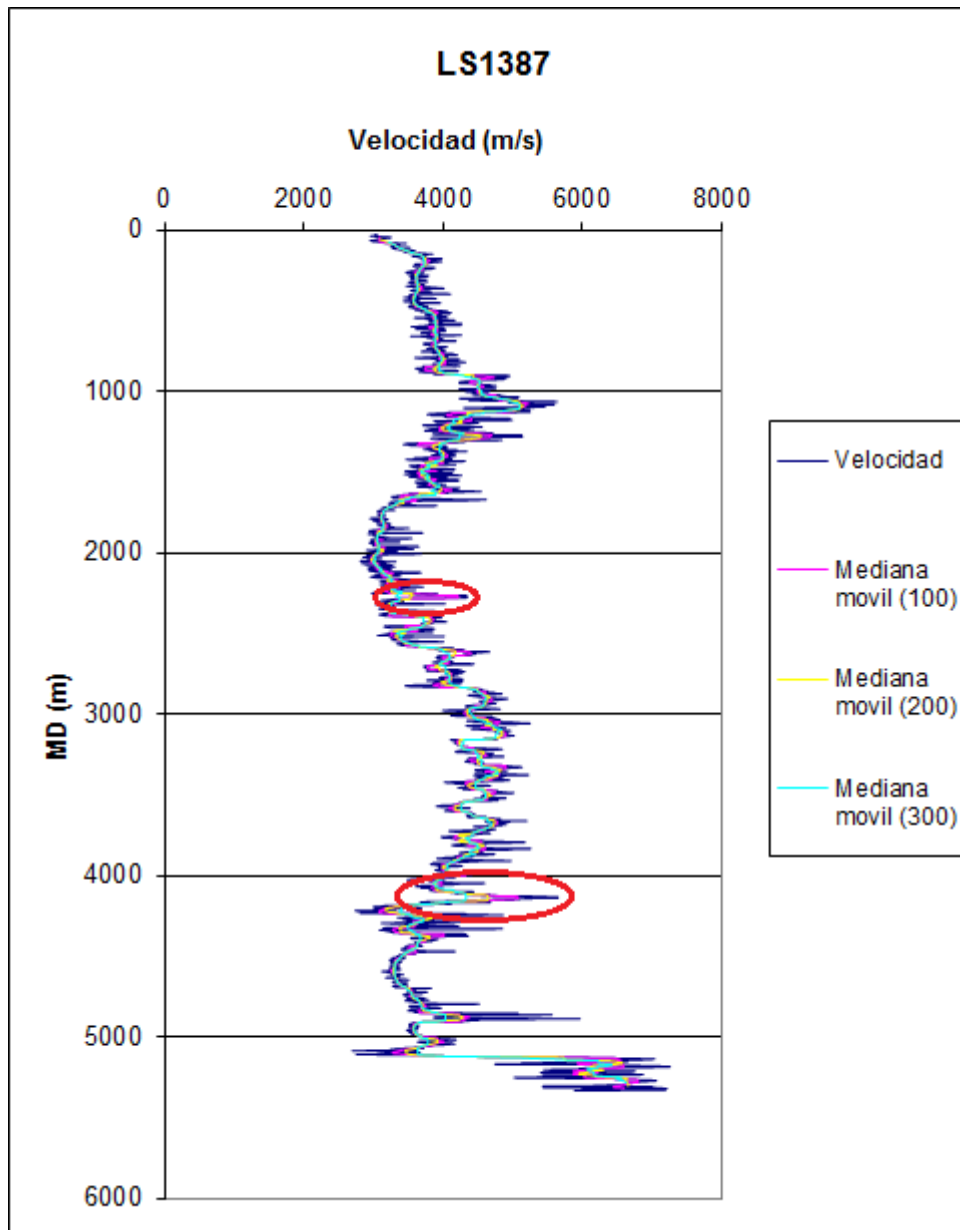


Figura 4.7 Ejemplo del suavizado por mediana móvil para el pozo ls1387. En rojo se observa como la mediana de 100 y 200 mantienen los picos abruptos.

La mediana opera ordenando un número finito de valores de forma creciente y toma el valor que se encuentre en la posición que divida justamente en dos partes iguales al conjunto de datos. Si el número de valores muestreados es impar la mediana sería el valor medio, cuando el número de datos a analizar es par existirían dos valores

medios: en tal caso la mediana es el promedio de los valores (Ruiz David, 2004).

Se obtuvieron valores de velocidad a partir de los registros sísmicos, y con esto se elaboró una función lineal que describiera a la velocidad de cada pozo con su respectivo coeficiente de dispersión (r^2). De esta forma se aseguraba que se tenía una buena correlación de los datos ($r^2 > 0.75$) y a partir de esto fue generada una función de velocidades general para al zona de estudio.

4.5 Estimación de los buzamientos en el área

Tener conocimientos de los buzamientos de las estructuras del área es necesario porque es uno de los requerimientos geológicos principales a la hora de elaborar un diseño de adquisición sísmica, debido a que estos valores son posteriormente usados para cálculos de parámetros como lo son el cálculo del tamaño del Bin y el de la Apertura de Migración.

Este estudio que fue realizado con el programa OMNI, consistió en la creación de mapas que describieran la tendencia que presentan los ángulos de buzamiento en el área de estudio.

Para esto se usaron como input las superficies del modelo estructural del área, a estas se les aplicó un análisis de “angule dip” (figura 4.8), que se encarga de calcular el ángulo de buzamiento en cada coordenada de la superficie, donde este calcula el ángulo de buzamiento a partir de las diferencia de cota de la superficie.

Con esta información obtenida se procedió a generar los mapas de contorno para cada superficie del proyecto y de esta forma visualizar de maneras mas fácil y rápida los buzamientos de la zona.

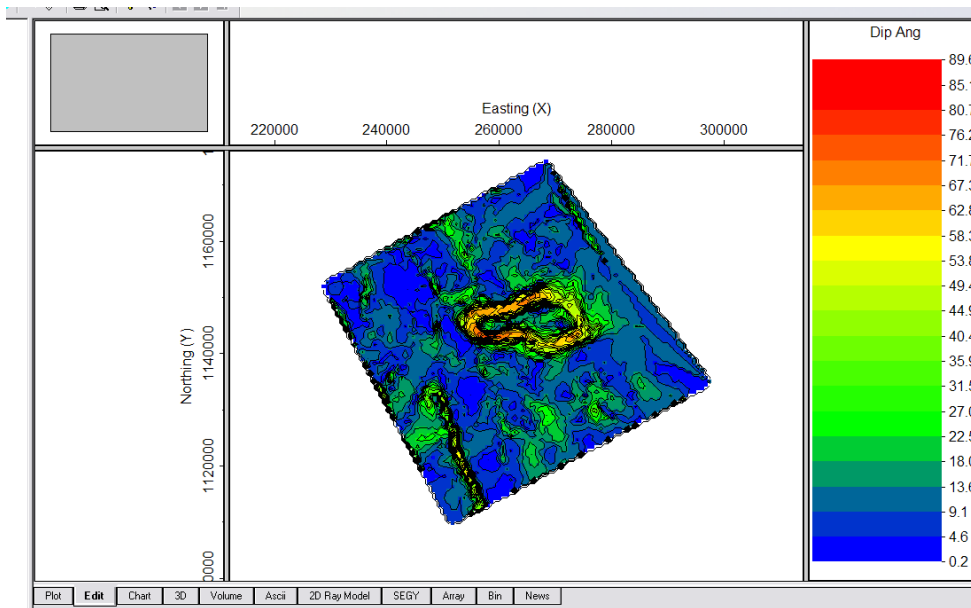


Figura 4.8 Ejemplo del cálculo de los mapas de buzamientos para la superficie Colon con el programa OMNI

4.6 Cálculo del tamaño del bin

La determinación del cálculo del bin se hizo empleando relaciones que permitirán estimar este parámetro de tal forma de lograr evitar el aliasing espacial en los datos grabados y así obtener una máxima resolución.

Cada evento buzante tiene un valor máximo de frecuencia que no entra en aliasing antes de la migración. Sin embargo para casos donde la mayor parte de los objetivos poseen buzamientos menores a 30° la ecuación utilizada es la de resolución horizontal o tamaño de bin, que viene dada por la siguiente ecuación:

$$B = \frac{V_{rms}}{4 * f * \text{sen}(\theta)} \quad (1)$$

Donde:

V_{rms} = velocidad en el objetivo

θ = ángulo de la apertura de migración, que en este caso se consideró 30°.

f = Frecuencia máxima

4.7 Cálculo del *offset* mínimo y máximo

El cálculo del *offset* máximo requerido para este levantamiento fue diagnosticado por diferentes criterios para validar de una forma más certera este parámetro. Hay que destacar que en la elección de este parámetro fueron usados los siguientes criterios:

- Ser menor o igual al *Offset* asociado al estiramiento máximo NMO (para un 20 % y 30% de estiramiento aproximadamente).
- Ser menor o igual al *Offset* asociado al ángulo de incidencia crítica.
- Permitir la grabación de reflexiones provenientes de los horizontes y fallas de mayor buzamiento.
- Ser mayor o igual a la profundidad del objetivo a iluminar.

Para la aplicación de estos criterios es necesario generar un modelo geológico 2D en la aplicación OMNI 3D de la compañía GEDCO, se realizó el modelo digitalizando la imagen del transecto 2, que contiene interpretación geológica del área de estudio en dirección Sur Oeste – Nor Este . (figura 4.9)

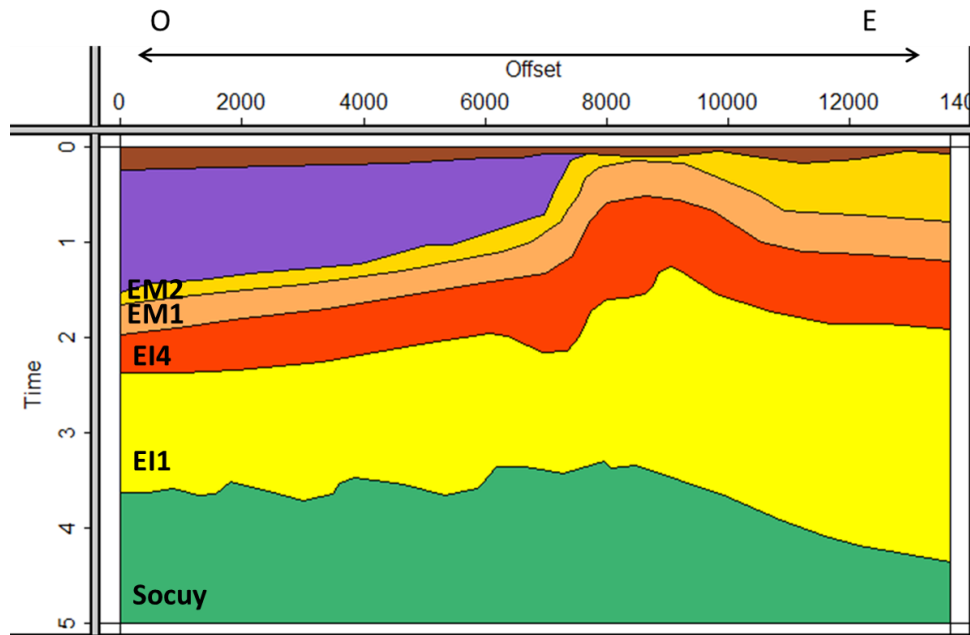


Figura 4.9 Perfil del modelo geológico usado para la estimación del offset máximo y mínimo

Utilizando la función de velocidades construida, se precedió al cálculo de la función de estiramiento NMO para distintas localizaciones del perfil de estudio: Oeste, la parte central y este, tal como se muestra a continuación en la figura 4.10:

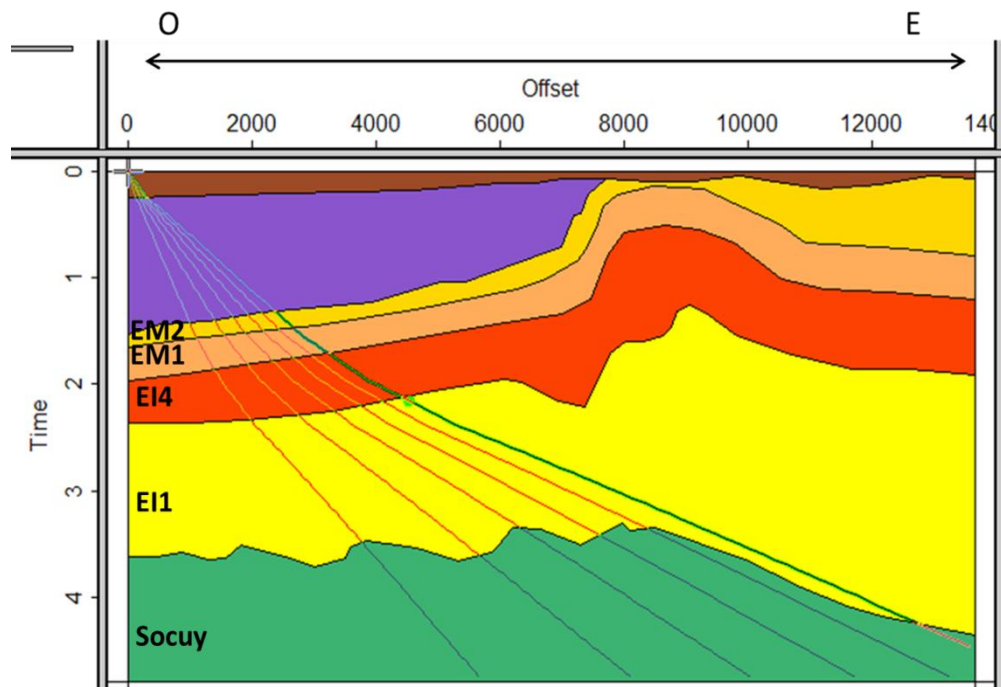


Figura 4.10 Estiramiento NMO en la zona este del modelo.

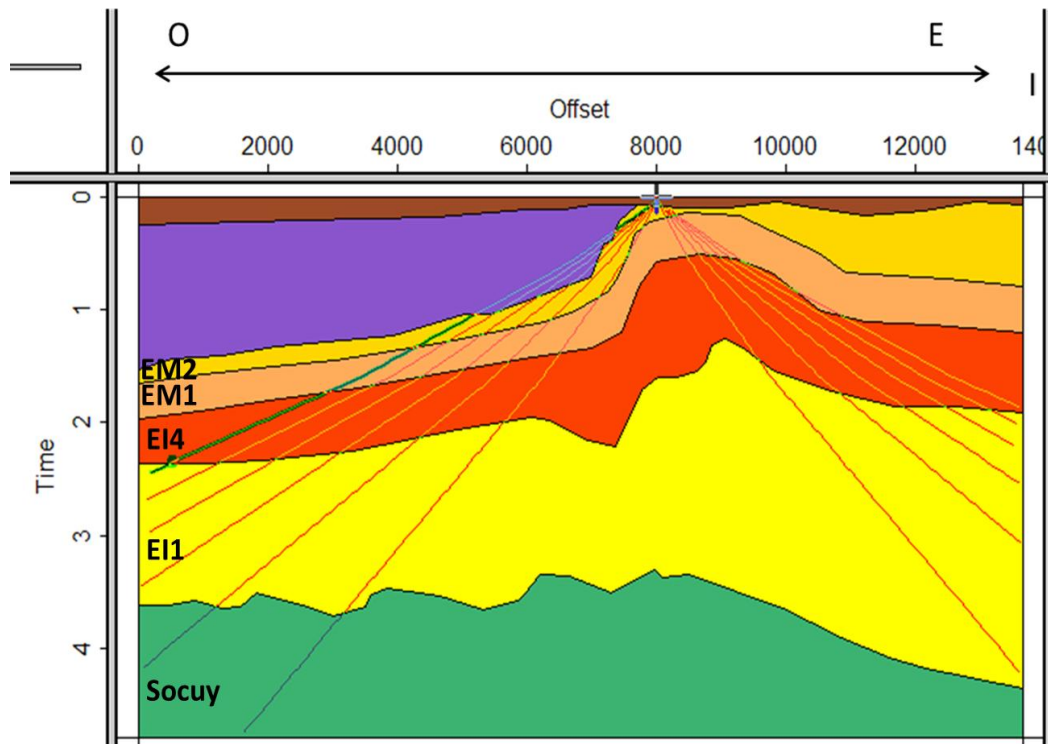


Figura 4.11 Estiramiento NMO en la zona este del modelo.

El tema del estiramiento NMO es sumamente importante pues está directamente vinculado a la resolución vertical resultante después del apilado, por lo que este cálculo se hizo lo más detallado posible para que el análisis y los resultados tengan mayor confiabilidad.

La siguiente fase del diagnóstico es la determinación del *offset* máximo y del *offset* mínimo a través del análisis de rayo crítico tanto en el objetivo somero y en el objetivo profundo, como se muestra en la siguiente figura (figura 4.12):

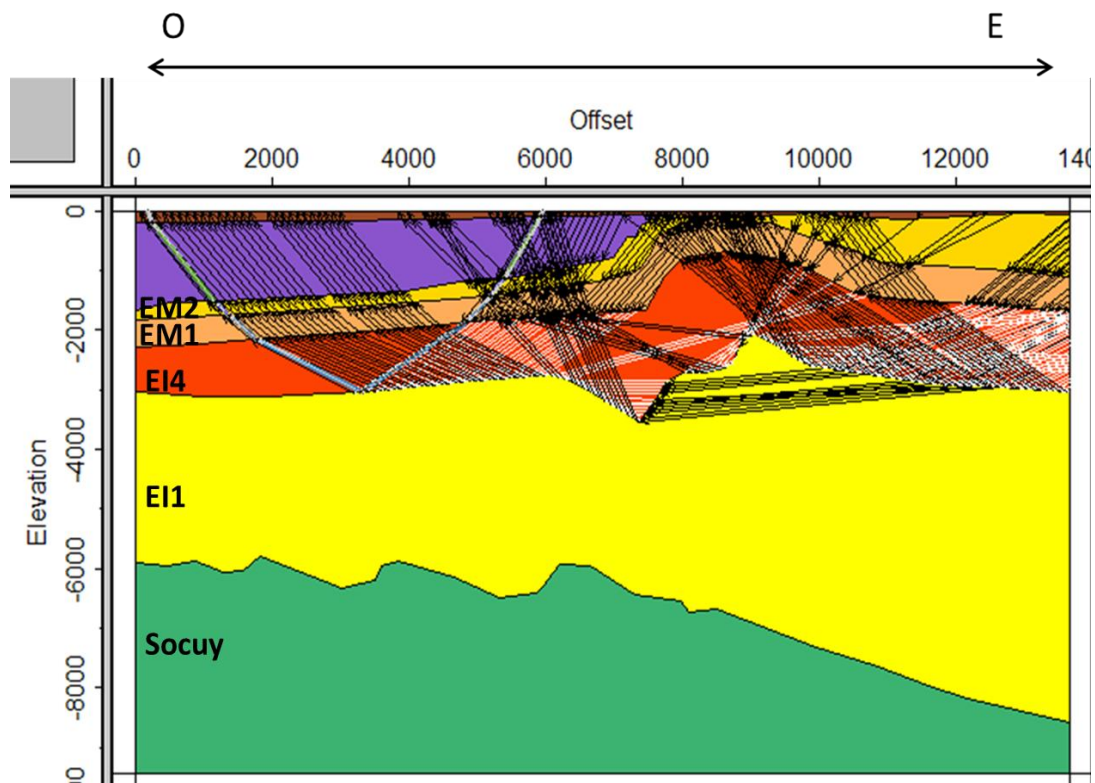


Figura 4.12 Estudio de rayo crítico en la superficie E11 para la estimación del offset máximo.

El análisis al igual que el anterior fue realizado en el software OMNI, el cual proporciona hasta que distancia se recibirán solo reflexiones, y donde inicia la llegada del rayo crítico (inicio de las refracciones).

Este estudio fue aplicado sobre un modelo 2D y los datos sintéticos generados fueron utilizados para definir *offset* de interferencia entre las primeras llegadas (onda directa y refracciones) y las reflexiones primarias asociadas al objetivo geológico de interés, tomando en cuenta que el objetivo somero se asocia al *offset* mínimo y el objetivo profundo al *offset* máximo.

El último criterio en este estudio se estable el *offset* mínimo debe ser menor al objetivos somero y el *offset* máximo debe ser mayor al objetivo profundo.

4.8 Cálculo de parámetros del diseño

Para el área de estudio se definieron dos propuesta basadas en un diseño de patch simétrico similar al trabajo hecho por Balaguera, A., (2010), ya que este tipo de adquisiciones son excelentes para el análisis de velocidades, atenuación de múltiples, soluciones estáticas, a demás según Chaouch, A y Mari J, (2006) un patch cuadrado contribuye a la obtención de mejores datos en zona de complejidad geológica como en la que se encuentra presente el estudio.

4.8.1 Cálculo de la longitud de líneas receptoras y líneas fuentes

En esta parte debemos considerar que trabajaremos con un patch simétrico, se conoce el rango de *offset* máximo que es necesario para el estudio se puede deducir de la siguiente ecuación (2) el valor necesario de la longitud de las líneas fuente y las líneas receptoras (figura 4.13):

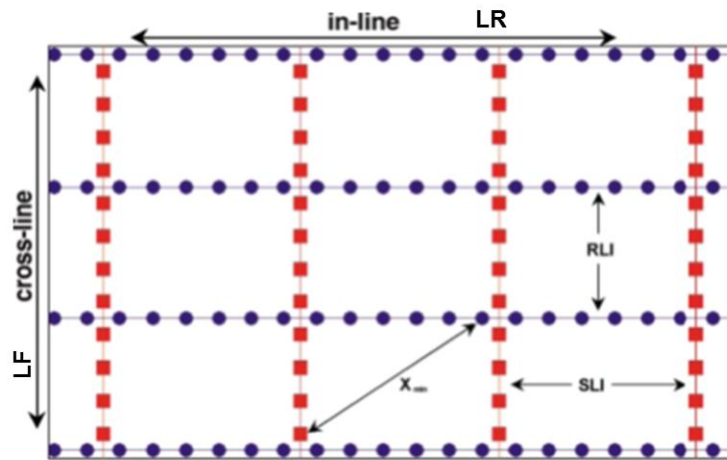


Figura 4.13 Parámetros a calcular en el diseño

$$offset\ max = \frac{LR}{\cos\left(\arctg\left(\frac{LF}{LR}\right)\right) * 2} \quad (2)$$

Dónde:

LR: Longitud de la línea receptoras

LF: Longitud de la línea fuente

Obteniendo como resultado posibles valores de la longitud total de las líneas fuentes y receptoras

4.8.2 Cálculo del intervalo entre receptores y fuentes

Esta parte es muy sencilla de desarrollar, ya que solo es necesario conocer el tamaño del BIN y así se puede conocer el intervalo entre fuentes y receptores de la siguiente forma (ecu. 3 y 4):

$$IF = 2 * LBin \quad (3)$$

$$IR = 2 * LBin \quad (4)$$

Dónde:

IF: Intervalo entre fuentes.

IR: Intervalo entre receptoras

LBin: lado del bin cuadrado

4.8.3 Cálculo del número de receptores por líneas

La metodología empleada para este cálculo consistió, en que ya conociendo la longitud de las líneas receptoras (explicado anteriormente), encontramos el número de receptores necesario por líneas fuentes aplicando la siguiente ecuación:

$$N^{\circ} \text{Receptores} / \text{Lineas} = \frac{LR}{IR} + 1 \quad (5)$$

Dónde:

N° receptores / líneas: Número de receptores por líneas

LR: Longitud de líneas receptoras

IR: Intervalos entre receptores

4.8.4 Cálculo de la cobertura

En esta etapa del trabajo de se considera la cobertura in-line, cobertura cross-line y cobertura total (full fold).

Se debe tener en cuenta la cobertura de los análisis anteriores ya que el levantamiento 3D debe tener por lo menos la mitad de la cobertura de los levantamiento 2D previos (cuando la relación señal/ruido es alta) , por lo que se hace importante tener un buen desarrollo de la etapa de análisis de estudios previos.

Cobertura in-line

Este cálculo se puede realizar al conocer las longitudes de la línea receptora y el intervalo de líneas fuentes, lo cual fue desarrollado ya con anterioridad, por lo que podemos obtener este resultado aplicando la ecuación (6):

$$Cobertura \text{ in - Line} = \frac{N^{\circ} \text{receptores} * IR}{2 * SLI} \quad (6)$$

Dónde:

N° receptores: Número de receptores

IR: Intervalo entre receptores

SLI: Intervalo entre líneas fuentes

Cobertura cross -line

Fue desarrollado de forma similar al cálculo anterior, con el uso de la ecuación (7):

$$Cobertura \text{ cross - inline} = \frac{N^{\circ} \text{Re ceptores} * RIL}{2 * RLI} \quad (7)$$

Dónde:

N° receptores: Numero de receptores

RLI.: Intervalo entre líneas receptoras

Cálculo de la cobertura total

Este cálculo permite obtener la cobertura nominal del diseño y se obtiene a partir de la cobertura in-line y cross-line:

$$CoberturaTotal = CIn - line \times CCross - line \quad (8)$$

Dónde:

CIn-line: Cobertura in-line

CCross-line: Cobertura cross-line

Cálculo del Fold Taper

Esta etapa es muy sencilla ya que este cálculo consta de conocer la cobertura in-line y cross-line y de los intervalos de líneas receptores y fuentes; que fueron calculados anteriormente. Fueron aplicadas las siguientes ecuaciones:

$$Fold \ Taper \ Xline = \left(\frac{Fold \ Xline}{2} - 0.5 \right) * RLI \quad (9)$$

$$Fold \ Taper \ Inline = \left(\frac{Fold \ Inline}{2} - 0.5 \right) * SLI \quad (10)$$

Dónde:

RL: longitud de receptores

LS: Longitud de fuentes

4.9 Orientación de las líneas receptoras y fuentes

Se elaboró un análisis “Dip azimuth” para cada superficie del área del levantamiento. El estudio fue hecho en aplicación OMNI 3D de la compañía GEDCO. Los resultados fueron exportados y analizados en GOCAD de la empresa Paradigm (figura 4.14).

Las superficies fueron creadas a través de “PointSet” en el programa GOCAD, que consisten en una nube de puntos que describen las superficies con su gradiente y las coordenadas (X,Y) del mismo, proveniente de los mapas de contornos obtenidos en OMNI.

A las superficies analizadas se le extrajeron histogramas de frecuencias para estudiar así de forma cuantitativa el acimut de los gradientes presente en las superficies (figura 4.14).

Estos valores fueron comparados con las orientaciones de las líneas de adquisición de los levantamientos previos y de esta forma justificar la orientación que deben tener las líneas receptoras y fuentes para este estudio (tabla 4.4).

Tabla 4.4 Orientación de levantamientos previos

Levantamiento	Orientación de líneas (azimuth)	
Oro Negro 3D	52 (receptora)	141.998 (fuente)
Zulia-Oriental 2D 91	61.13 (par)	150.83 (impar)
Oro Negro 2D 97	61.13 (par)	150.83 (impar)

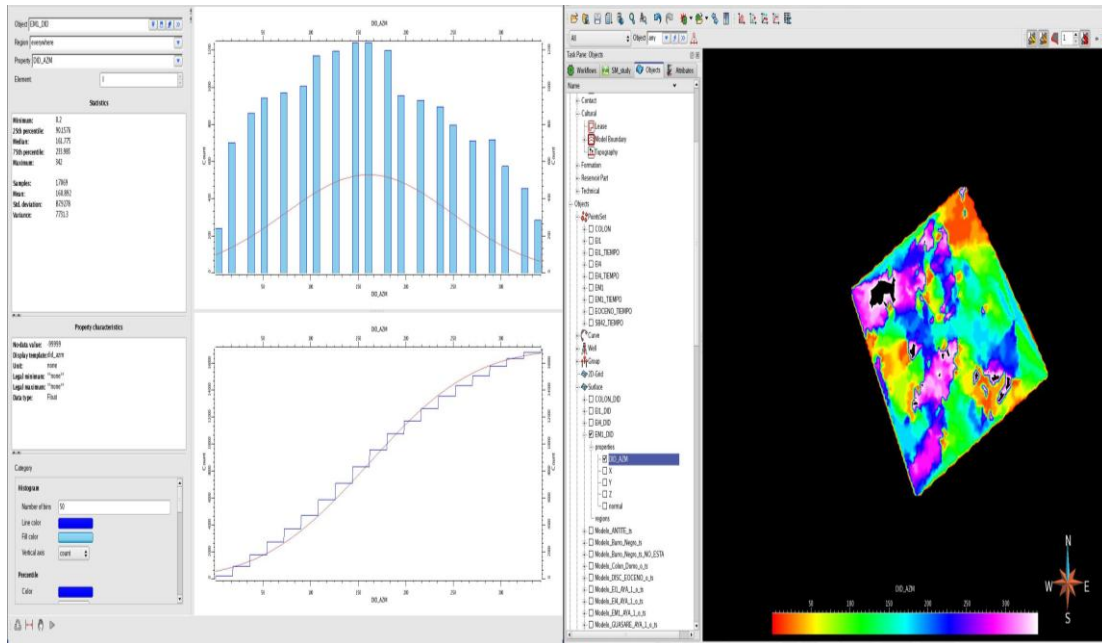


Figura 4.14 Ejemplo de estudio de buzamientos realizado en la superficie EMI

4.10 Cálculo de la apertura migración

La realización de este análisis es de mucha importancia puesto que con el que se obtiene el valor de la franja que debe ser agregada al polígono de adquisición para asegurar que se encuentren fuentes y receptores a *offset* que tomen en cuenta la trayectoria de estructuras con fuerte buzamiento.

Para optimizar el cálculo de este parámetro se crearon mapas que describen el valor de apertura migración que se necesita a lo largo del área de estudio. El valor de la apertura migración fue calculado con la ecuación (11):

$$\frac{V_0 * Z * \text{Sen } \theta}{(V_0 + R * Z) * \sqrt{1 - \text{Sen}^2 \theta}} \quad (11)$$

El cálculo fue realizado para las superficies más profundas y de mayor interés en el estudio.

Los resultados fueron gráficos en la herramienta GOCAD para crear superficies. Con las coordenadas X,Y y su correspondiente valor de apertura migración se crearon PointSet, que posteriormente fueron usados para la elaboración de los mapas de distribución de apertura migración.

A los mapas de tendencia de apertura migración se le calcularon histogramas de frecuencia para entender la distribución de los valores obtenidos en la zona de estudio

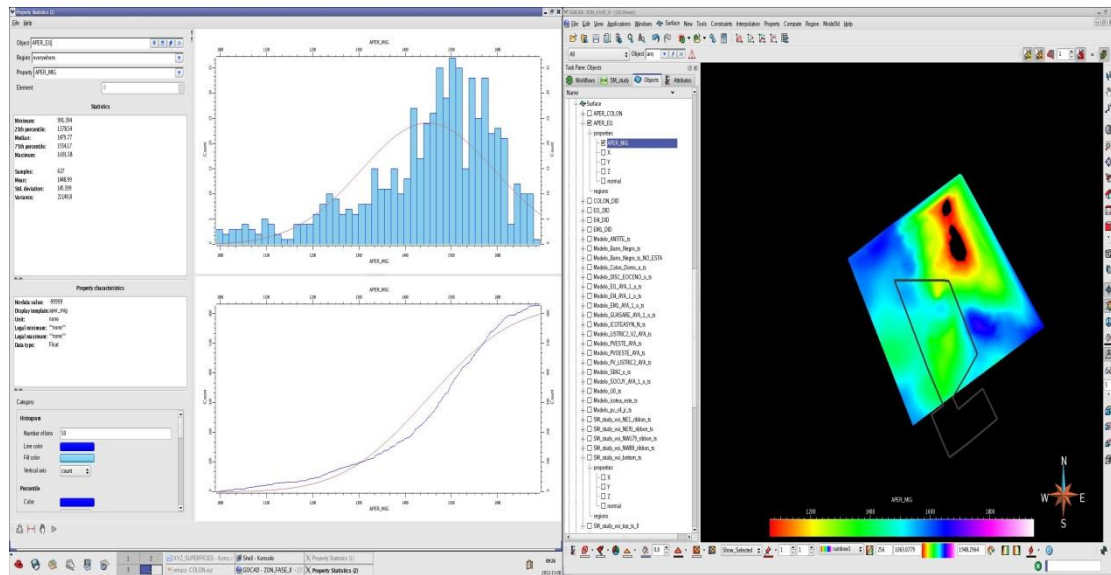


Figura 4.15 Mapa de tendencia de apertura migración de la superficie E11

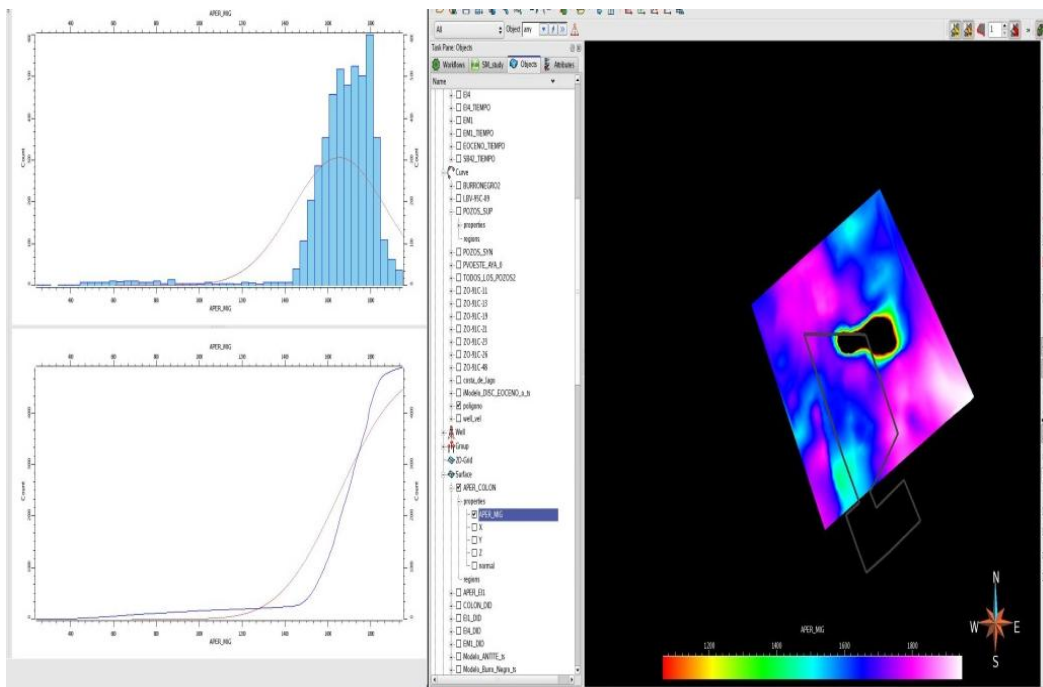


Figura 4.16 Mapa de tendencia de apertura migración para la superficie Colón

4.11 Generación del modelo de velocidades

Para el desarrollo de este modelo se utilizó el programa GOCAD de la plataforma PARADIGM, en este se creó un proyecto al cual fueron transferidos la información recolectada en la primera etapa de este proyecto.

Se procedió a generar una base de datos con la información que fue debidamente revisada y a los cuales se le aplicó un detallado control de calidad; utilizándose para esto información de velocidad (curvas TZ calibradas), topes de formaciones y modelos geológicos previo de la zona costa oriental del lago.

Antes de cargar los datos se verificó que todos estuvieran en el mismo dominio (tiempo), debido a que el modelo geológico suministrado por la Gerencia de Proyectos Occidente de PDVSA se encuentra en el dominio del tiempo

Con las datos de las curvas TZ ya calibradas (Z profundidad y tiempo doble de viaje),

se creó una propiedad de velocidad interválica la cual más adelante será utilizada para interpolar en el modelo (figura 4.17).



Figura 4.17 Zonas de velocidades creadas para los pozos utilizados en la investigación

Se puede notar que existen pocos pozos en la zona de estudio; por eso fueron tomados los pozos más cercanos a esta y con la mejor calidad de datos posible para así de esta forma disminuir la incertidumbre del modelo.

Las velocidades fueron interpoladas por capas (regiones) del modelo para que de esta forma tener un carácter más estructural y real de la zona a estudiar, como se muestra en la siguiente figura 4.18:

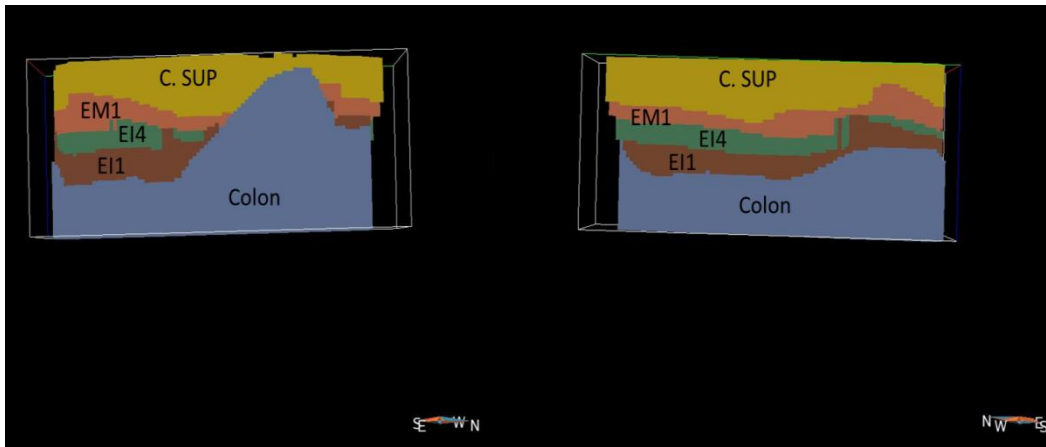


Figura 4.18 Creación de las regiones estructurales para el modelo de velocidades.

Por último se hizo una limpieza del modelo para restringir la información solo a la zona de estudio y evitar que información que caiga fuera de esta altere los estudios estadísticos y análisis de velocidades que serán aplicados más adelante al realizar el modelado (figura 4.19).

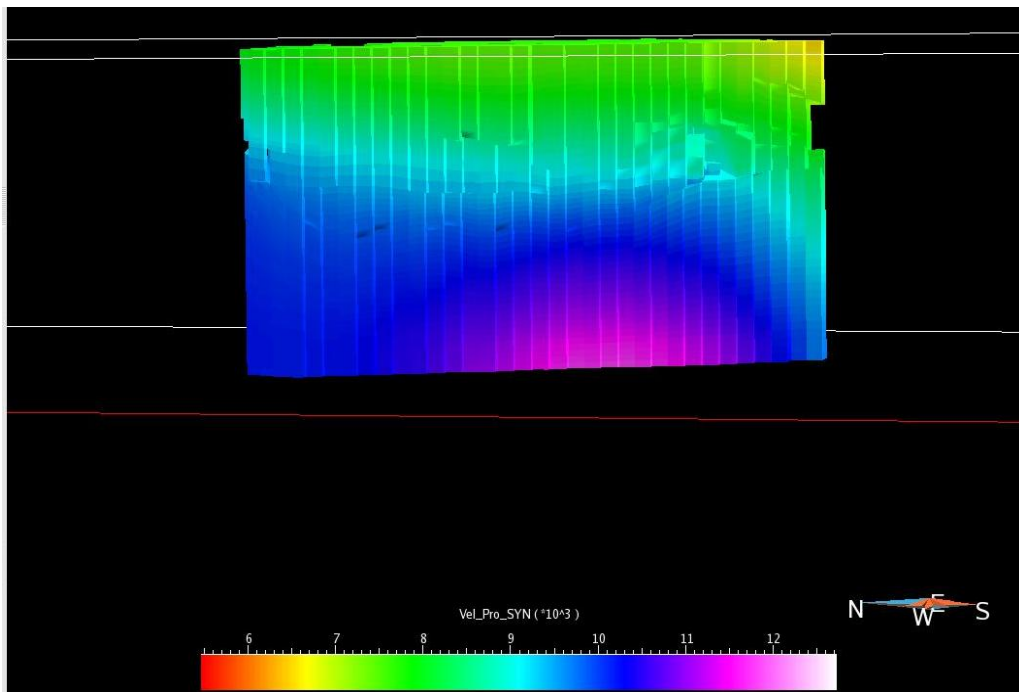


Figura 4.19 Vista lateral del modelo de velocidades obtenido para la zona de estudio.

4.12 Creación de las plantillas de diseño

El software de diseño empleado para la creación de las plantillas del diseño de adquisición del proyecto fue el OMNI ya que ofrece un ambiente más sencillo al momento de cargar los datos, ya que se usó lo que OMNI llama “asistente de diseño” (figura 4.20) con lo que se logró el desarrollo y creación de la plantilla así como también con los atributos y estudios que fueron extraídos de las mismas.

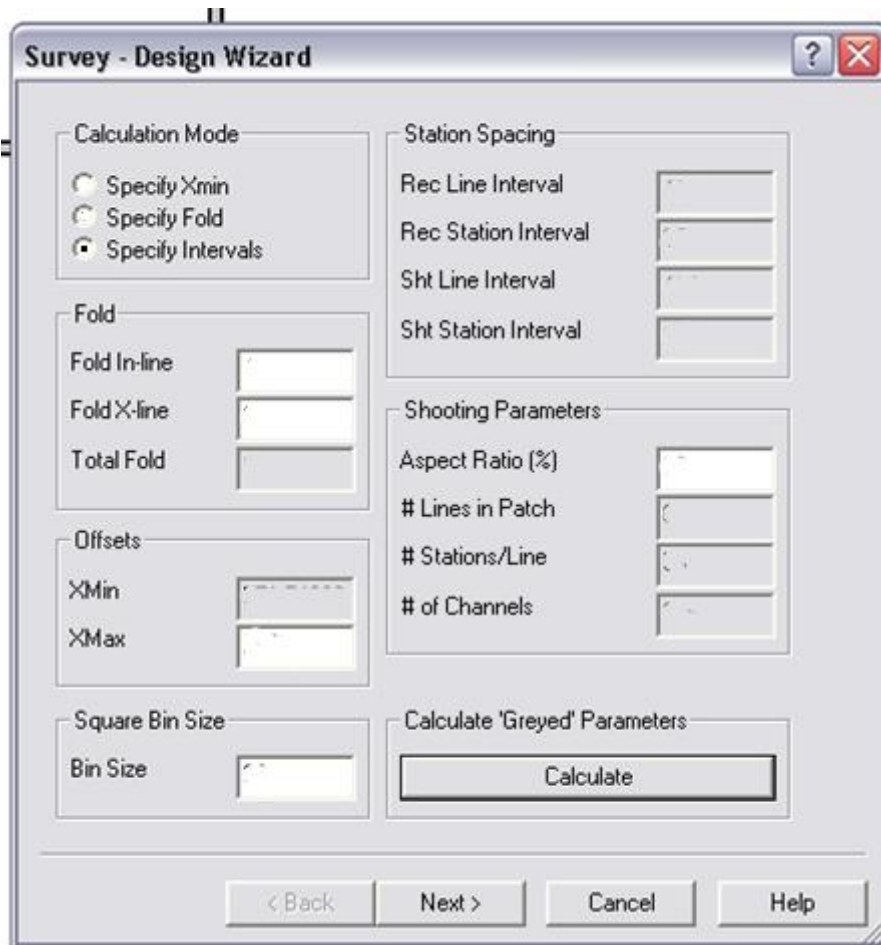


Figura 4.20 Vista de la ventana del asistente de diseño del programa OMNI.

Se creó un proyecto con un sistema de referencia que enmarcara la zona en la que se está desarrollando el trabajo. El proceso de carga de datos fue sencillo ya que OMNI da la facilidad de trabajar con formatos como txt.

En el momento de introducir la plantilla se trabajó con la opción de “especificar intervalos” la cual permite agregar y modificar los valores de los siguientes parámetros:

- Intervalos de líneas receptoras.
- Intervalo de líneas fuente .
- Espaciamiento de receptores.
- Espaciamiento de fuentes.
- Número de líneas en el patch.
- Número de canales.

Datos que ya se tienen de todo lo desarrollado anteriormente en este trabajo.

Para crear el polígono el programa da la facilidad de importarlo de un archivo txt (figura 4.21); se tomó en cuenta el datum en el que se encuentran las coordenadas para que coincida con el mismo sistema de referencia usado a la hora de crear el proyecto, el polígono fue aumentado de tamaño sumándole los valores de Apertura de migración y fold taper.

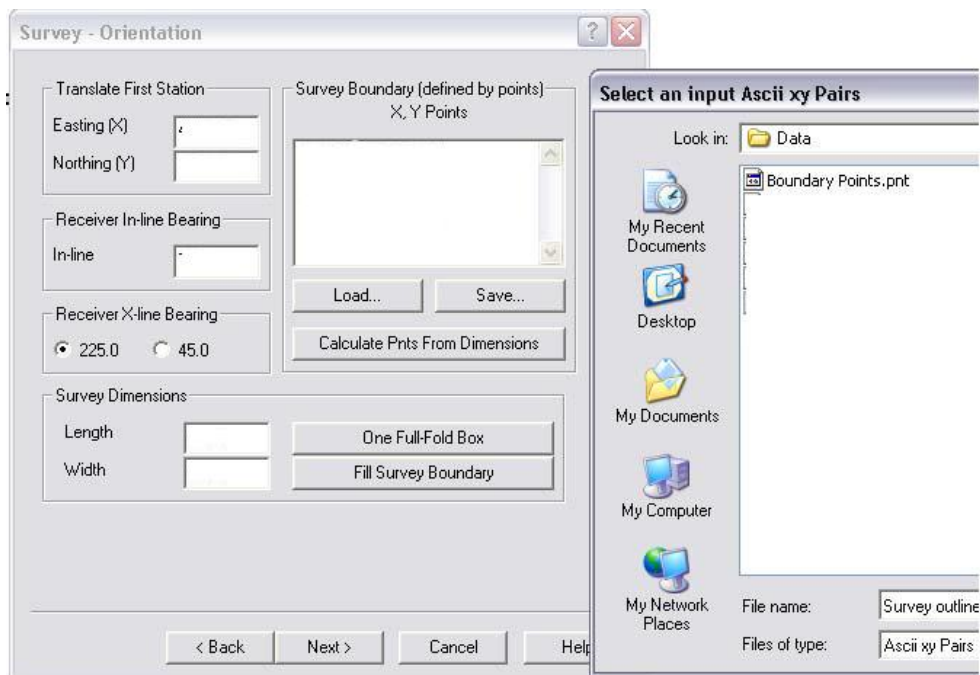


Figura 4.21 Ventana de selección del polígono del diseño en el programa OMNI.

Una vez creada la plantilla, se verifica que uno de los parámetros que corresponde a esta sean iguales con los que se calcularon antes, en este trabajo.

Finalizado el proceso de diseño se procedió a la creación de los atributos, los cuales se despliegan de un “scrip” del programa (figura 4.22). El programa ofrece una amplia variedad de estudios de los cuales se escogieron los más importantes y necesarios para el proyecto.

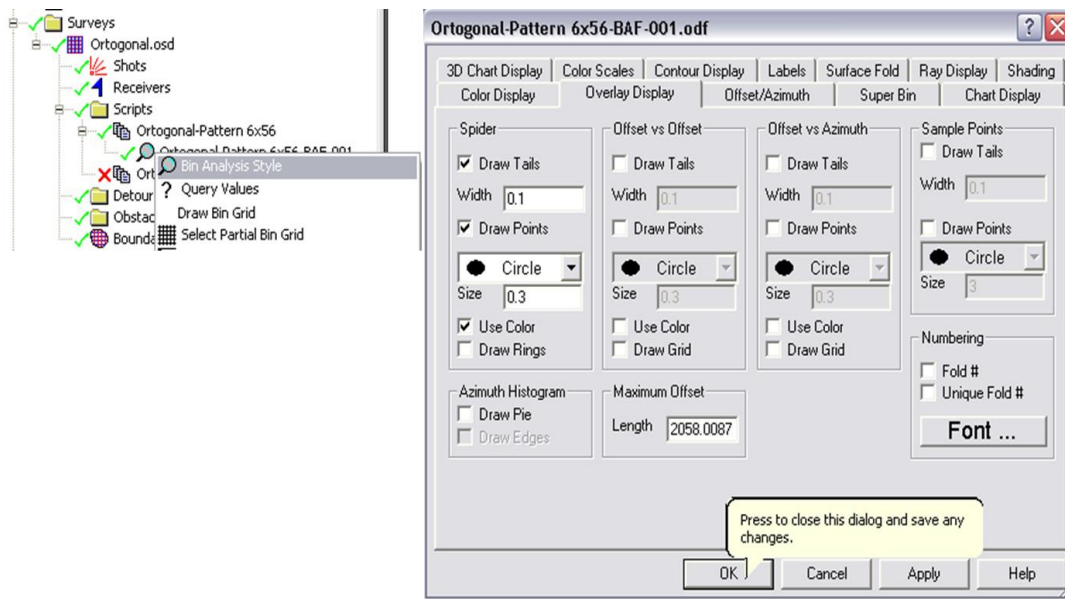


Figura 4.22 En la parte derecha de la imagen el “scrip” de análisis en el programa OMNI. En la parte izquierda de la imagen vemos las opciones de los distintos análisis que ofrece el programa

4.13 Creación del modelo geológico

La carga de datos fue hecha en el programa MESA ya que ofrece una mejor facilidad y visualización en la parte del modelado sísmico.

Para esta carga de datos lo primero fue enumerar las líneas fuentes y líneas receptoras de acuerdo con el estándar sísmico venezolano; la nomenclatura inicia en 100 para las líneas fuentes y en 3000 para las líneas receptoras, y el incremento es por unidad (en ambas).

Antes de cargar los horizontes se le aplicó una interpolación a cada uno; esto debido a que la interpolación que hace el programa es inestable y de esta forma se asegura una carga confiable de todos los puntos de la superficie. La interpolación fue hecha en SURFERTM, y consistió en separar cada uno de los puntos con un espaciamiento de 500 m (figura 4.23); por requerimientos del programa se necesitaba que cada coordenada del mallado del horizonte fuese un número entero y múltiplo de 10.

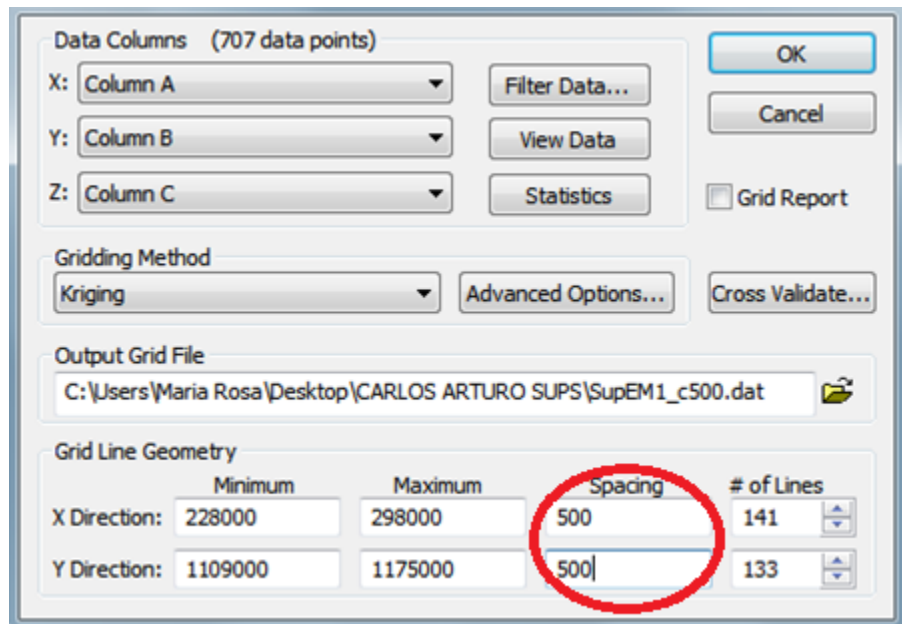


Figura 4.23 Interpolación de las superficies realizada en el programa SURFER con espaciamiento de 500m.

Una vez hecho el trabajo de interpolación fueron cargados los horizontes

- EM-1
- EI-4
- EI-1
- Colom

El programa MESA automáticamente luego de cargar todas las superficies crea un modelo geológico y genera por defecto una superficie con el nombre “top” la cual se ubicó al nivel del mar, tal cual muestra la siguiente figura 4.24:

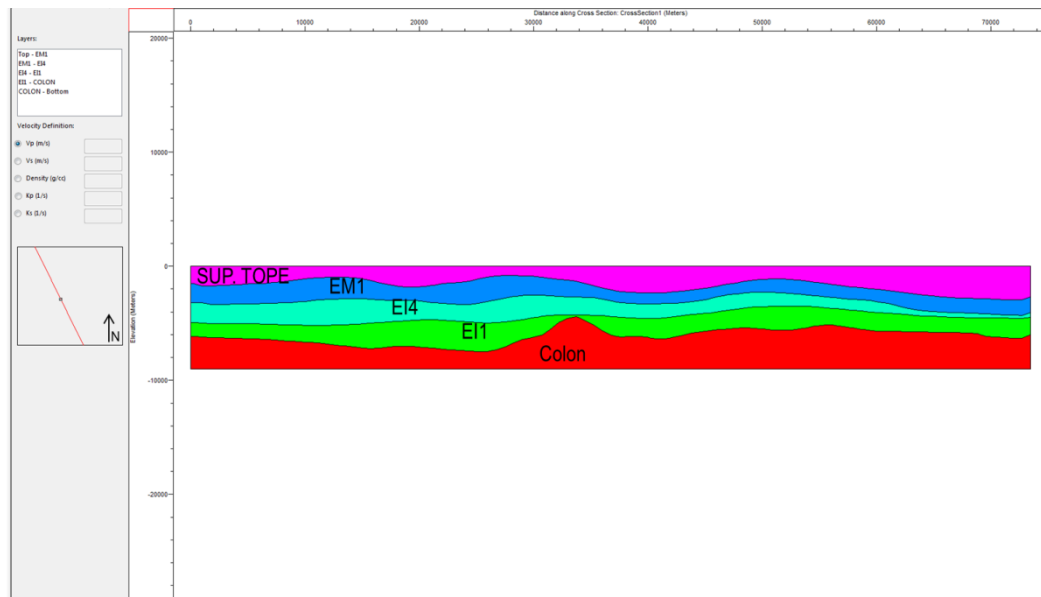


Figura 4.24: Modelos geológico generado en el programa MESA para el trazado de rayos

Las velocidades de cada una de las capas fueron suministradas por análisis estadísticos realizados en el modelo de velocidades. Este estudio se desarrolló en GOCAD, en donde se extrajeron “mapas de velocidad media” los cuales dan la representación visual y estadística de la velocidad media en cada una de las capas figura 4.25.

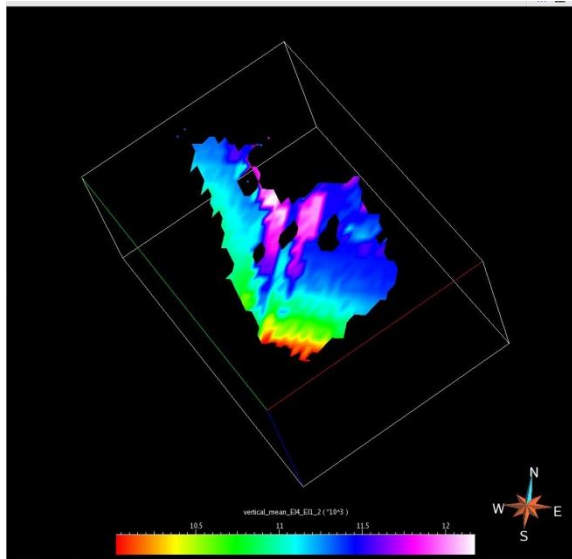


Figura 4.25 Ejemplo del mapa de velocidad media obtenido para la región limitada entre la superficie EI4 y EI1

4.14 Modelado sísmico por trazado de rayos

Este procedimiento se ejecutó en Mesa, ya que el programa tiene un ambiente más directo que hace más sencillo el proceso, una vez cargado el modelo geológico y la geometría del diseño. Este proceso fue llevado a cabo en el trazador “enhanced” en ambos diseños.

Se hace la aclaración de trazador usado pues el programa mesa da la opción de escoger entre este y el trazador Wavefront. El primero, como su nombre lo indica es un trazador más robusto y su funcionamiento puede ser brevemente descrito como, los rayos de la fuente se generan y se propagan hasta alcanzar los límites del modelo, los datos resultantes son analizados y las trayectorias de los rayos que conecten fuentes a receptores con ciertas características predeterminadas, son encontrados algoritmos de búsquedas basados en un gradiente.

Antes de iniciar el trazado de rayos se debe tener claro los parámetros con los que se van a trabajar, que se explican a continuación:

4.14.1 Parámetros de iluminación

Los parámetros de iluminación son los ángulos delta theta y delta phi, que representan las coordenadas polares y azimut entre dos rayos adyacentes emitidos desde una fuente puntual.

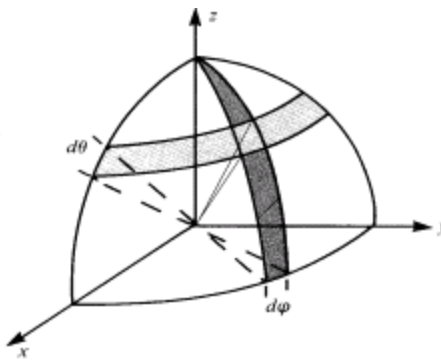


Figura 4.26 Parámetros de iluminación (delta theta y delta phi). Fuente: Manual de MESA (2012).

Para este trabajo se trabajó con delta phi y delta theta igual a 1 grado ya que daban una mayor rapidez en velocidad de cómputo sin afectar la iluminación en el área.

4.12.2 Parámetro de búsqueda de rayos.

La búsqueda de rayos se controla mediante la tolerancia, el máximo número de rayos y el máximo número de iteraciones. La tolerancia es una distancia definida a partir del receptor objetivo, en la cual todos los rayos que estén dentro de ella serán atribuidos al receptor en cuestión. El máximo número de rayos y el máximo número de iteraciones son condiciones que permiten acotar el número de rayos y evitar caer en un ciclo indefinido durante los cálculos.

En este sentido, se escogió una tolerancia igual a diez (10), buscando que éste sea un

valor menor a la mitad de la distancia entre dos receptores ($RI/2$). En cuanto a los máximo número de rayos y máximo número de iteraciones, se realizaron algunas pruebas de las cuales los mejores resultados se obtuvieron fueron:

- Máximo número de rayos :1
- Máximo número de iteraciones:2

Una vez cargado todos los datos se ejecuta el trazado de rayo (figura 4.27), y una ventaja del trazador “enhanced” es que se visualiza el número de rayos que han sido disparados y el tiempo restante para la finalización del modelado.

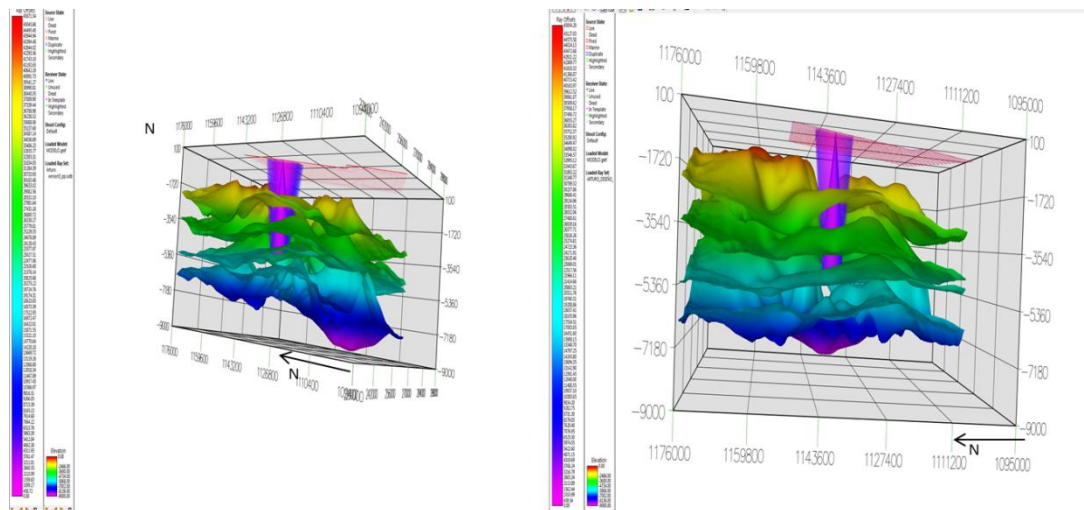


Figura 4.27 Trazado de rayos realizado en el programa MESA. Del lado derecho se encuentra el correspondiente al diseño 1 y al lado izquierdo diseño 2

Por último, para la evaluación del diseño se extrajeron los mapas de CRP (puntos de reflexión común) de los horizontes EM-1 y Colon y así poder analizar la variación de cobertura en los horizontes, y de esta forma observar en conjunto a los mapas de CMP, comparar y comprender la propagación del frente de ondas.

Este atributo también fue realizado en MESA 11 en la opción de “expert attributes” (figura 4.28), y es un procedimiento sencillo en donde solo hay que seleccionar el

estudio que se desea realizar, una vez culminado la ejecución del trazado de rayos.

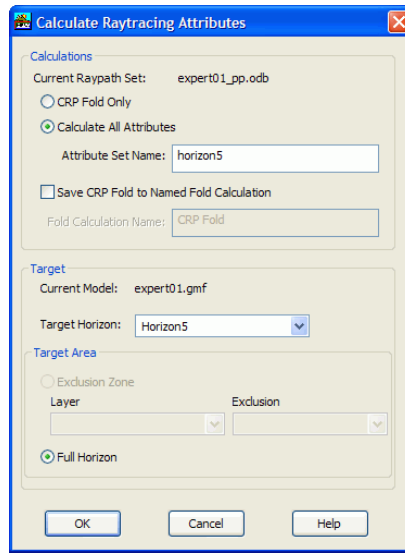


Figura 4.28 Ventana para el cálculo de atributos del trazado de rayos en el programa MESA

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Ya descrita de forma detallada la metodología realizada durante el desarrollo de este trabajo, se procedió a analizar cada uno de los resultados obtenidos, y así dar a entender cada una de las fases del trabajo y dar respuesta a los objetivos plantados desde el inicio

5.1 Estimación de frecuencia máxima

Para lograr el determinar los parámetros de adquisición, se comenzó con la frecuencia máxima. Se analizó detalladamente ventanas de frecuencia de las líneas seleccionadas que se encuentra dentro de la zona de estudio, para determinar la frecuencia máxima requerida para resolver el espesor asociado a las áreas de interés. De acuerdo a las necesidades de PDVSA se espera resolver espesores entre 100 y 150 ft.

Espectros de frecuencias para una ventana somera de la línea LBV-95 se observa que la frecuencia dominante está alrededor de los 30 hz (figura 5.1) mientras que para la misma línea a mayor profundidad se obtiene una frecuencia dominante aproximadamente de los 25 hz como vemos en la figura 5.2.

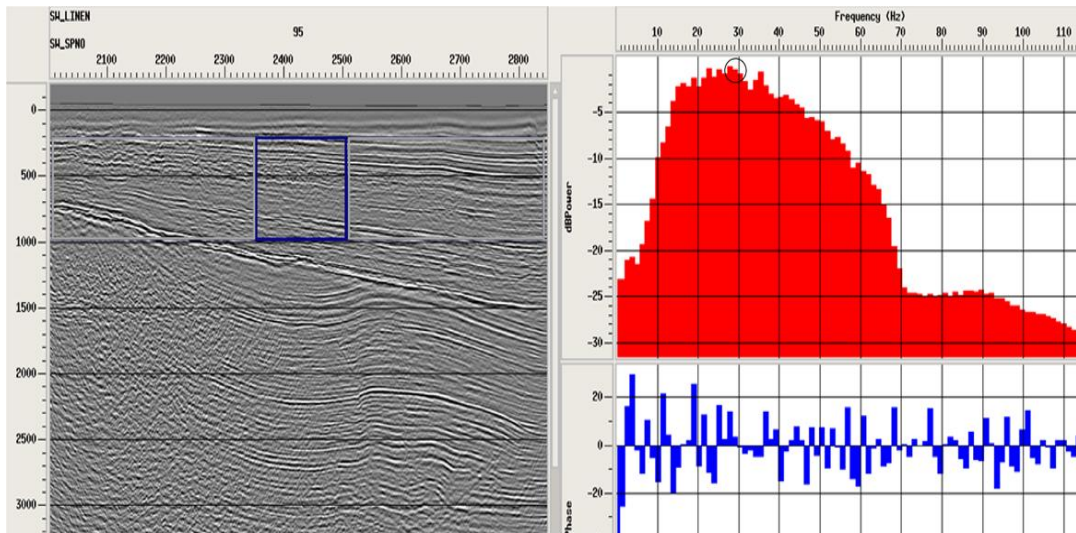


Figura 5.1 Espectro de frecuencia para una ventana somera de la línea lbv95

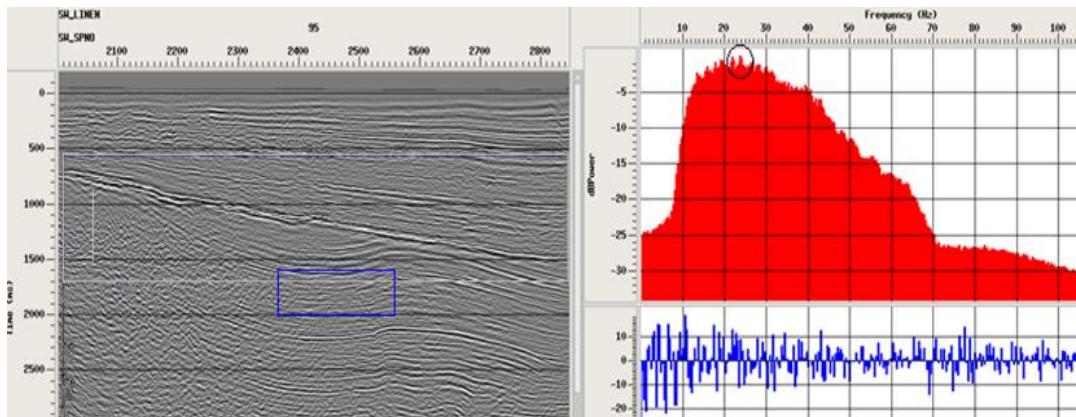


Figura 5.2 Espectro de frecuencia para una ventana profunda (nivel objetivo) en la línea lbv95

En la línea zo-91c-11 se observa como la frecuencia dominante se alcanza en los 30 hz (figura 5.3), en la parte somera, mientras que al profundizar en la zona objetivo se obtienen valores de 25 hz (figura 5.4).

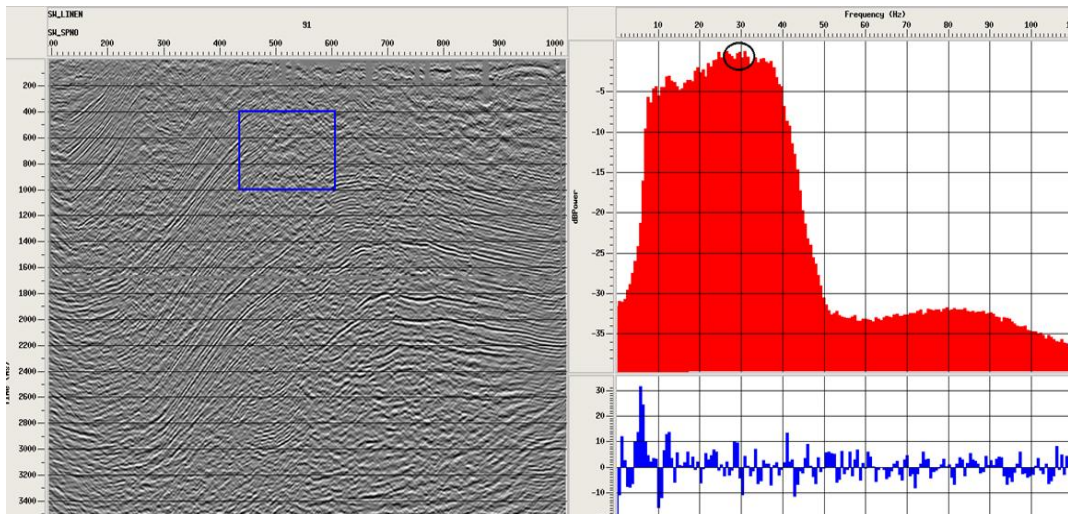


Figura 5.3 Espectro de frecuencia para una ventana somera de la línea ZO-91C.

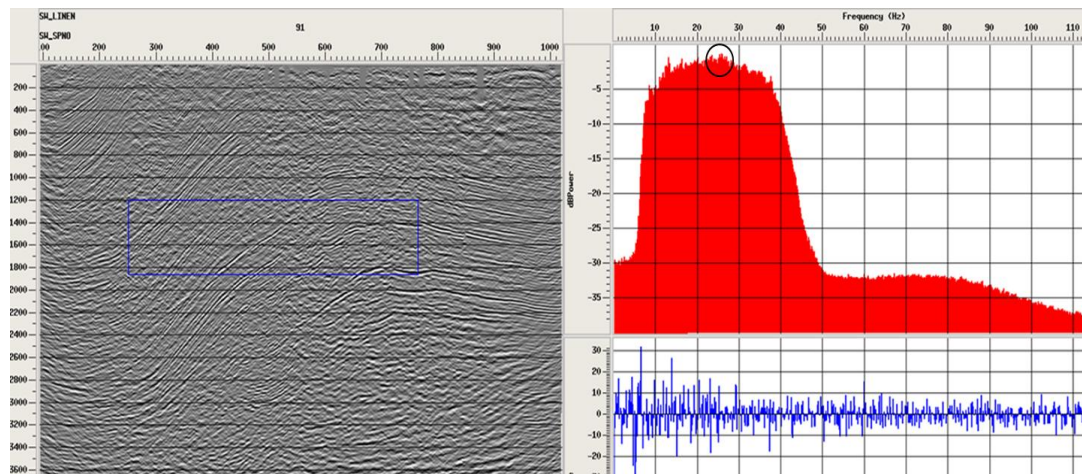


Figura 5.4 Espectro de frecuencia para una ventana profunda (nivel objetivo) en la línea ZO-91C

Y este patrón se presenta en el resto de las líneas.

El análisis hecho indica que entre 50 y 55 hz es posible resolver entre 100 y 150 ft respectivamente, lo cual satisface los requerimientos indicados por PDVSA. Por lo tanto establecemos que la frecuencia máxima debe ubicarse alrededor de los 50 hz (teóricamente) y este parámetro definirá posteriormente variables como lo que es el

tamaño del bin.

5.2 Función de velocidades

Este análisis de velocidades se hizo con la finalidad de encontrar una función que describiera el comportamiento de la velocidad a medida que profundizamos en la zona de estudio

Cuando se tomaron los *check-shot* y se graficaron uno sobre otro pudimos observar que las curvas se asemejan y que el comportamiento de esta es casi el mismo ya que se solapan uno sobre la otra como se ve en la siguiente figura:.

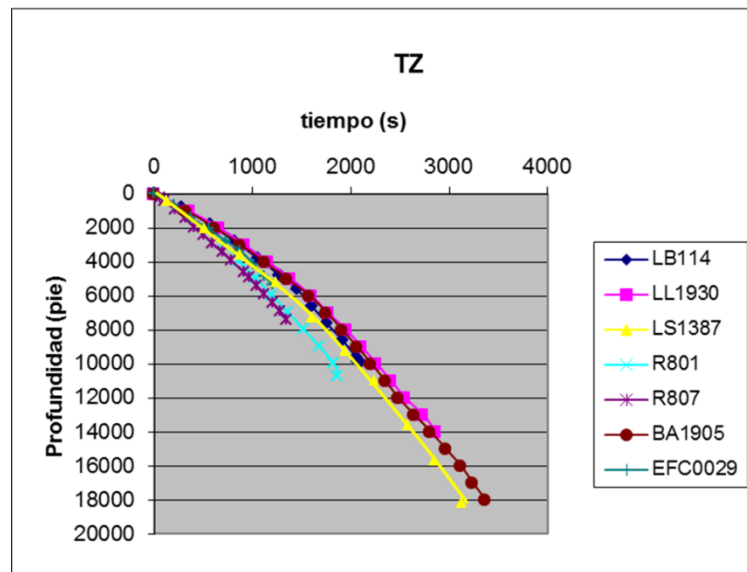


Figura 5.5 Gráfica con los *check-shot* de los pozos utilizados en la investigación.

Por esta razón se decidió trabajar toda la zona como una sola función de velocidad que fue calculada a través de los *check-shot* corregido con los sónicos, procedimiento que fue explicado en el capítulo anterior.

Ya que como se trata de una zona exploratoria esta con cuenta con registros de alto detalle que permitan discriminar con mejor facilidad el contacto entre los horizontes de interés, solo se contaron con seodo-sonicos (ya habiendo sido revisados y aplicado un control de calidad a los datos) .

Se obtuvo como expresión que describe la velocidad de la zona:

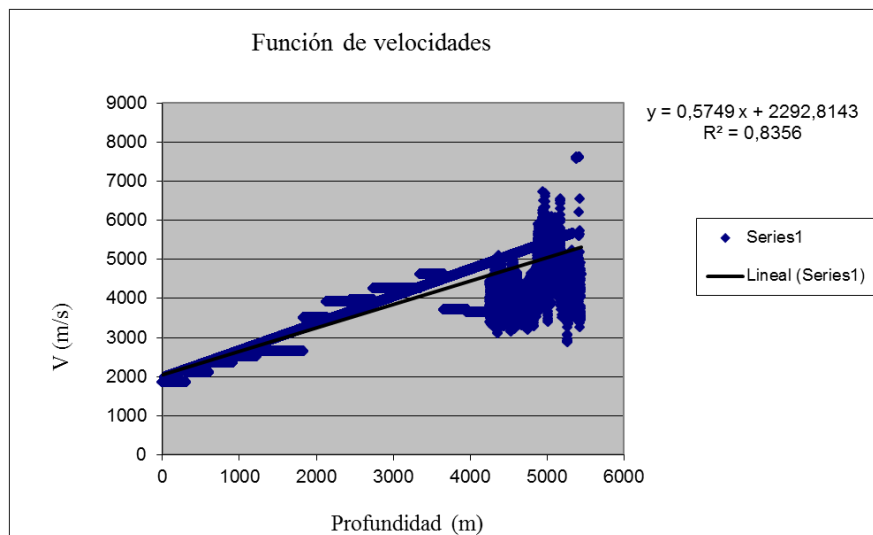


Figura 5.6 Gráfica de la función de velocidades obtenida

Con la cual tenemos valores de velocidad 2800 m/s en los horizontes más someros y 4200 m/s en horizonte entre EM2 Y EM1 (Profundidad de interés) y se alcanza velocidades de 7135 m/s (Colon). No se observó ningún inversión de velocidades en los registro usados ni en la función de velocidades obtenidas lo cual se observa de forma más directa en el modelo de velocidades creado que se mostrara más adelante.

Estos datos de velocidad fueron insumos de suma importancia en el cálculo y análisis del tamaño del bin, al igual que la frecuencia máxima.

5.3 Análisis del buzamiento de las estructuras

El estudio de buzamiento de las superficies que se hizo con la finalidad de determinar cuáles son los buzamientos que predominan en la superficie del área, arrojó los siguientes resultados:

En el mapa de la superficie EM1 (figura 5.7) notamos que presenta gran homogeneidad y poca variación a lo que buzamiento se refiere. Se tienen buzamientos mínimos entre 5 y 9, los mayores buzamientos que se observan son

entre 25 y 30 los cuales se notan con una dirección Noroeste- Sureste.

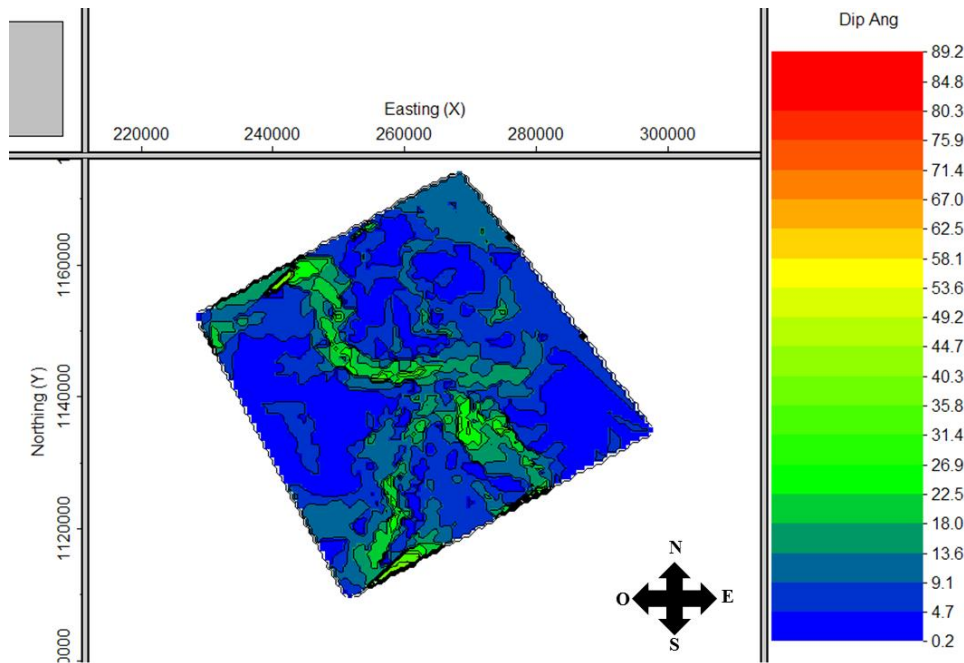


Figura 5.7 Mapa de distribución de los buzamientos de la superficie EM1.

El mapa de la superficie EI4 muestra que predominan buzamientos bajos, en comparación superficie anterior, los mínimos buzamientos observados esta entre 1 y 5 y describen la mayor proporción de mapa. Los máximos buzamientos vistos están entre 22 y 30 y siguen la misma tendencia anterior (figura 5.8).

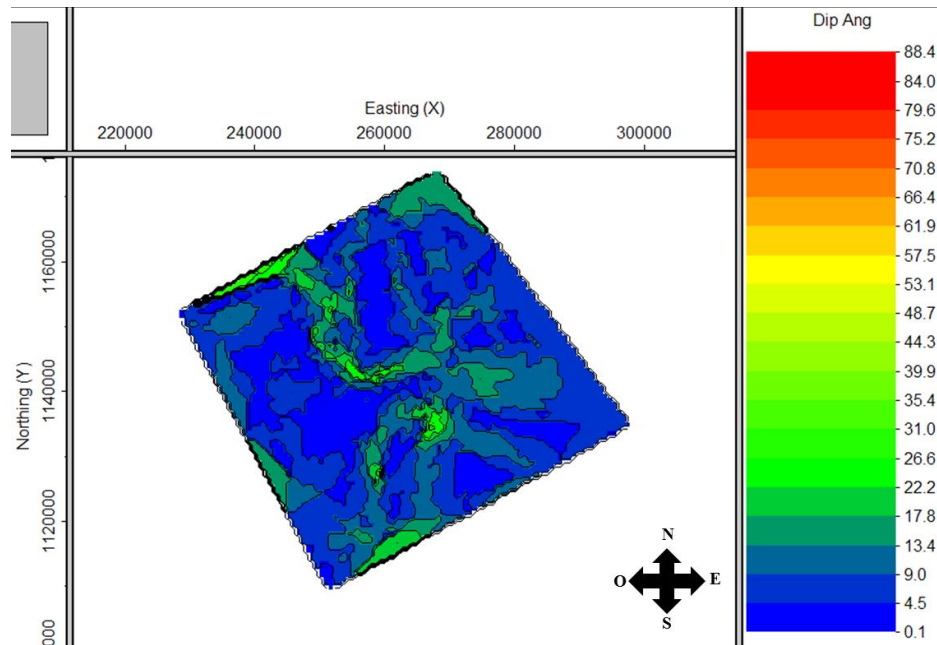


Figura 5.8 Mapa de distribución de los buzamientos de la superficie EI4.

En el mapa de la superficie EI1 (figura 5.9) podemos observar que también predominan un buzamiento mínimo entre 1 y 5, esto para casi toda la proporción del mapa. Se presenta el mismo patrón de buzamiento entre 23 y 30 en la dirección noreste sur oeste. También observamos que en el borde este del mapa predominan buzamientos alrededor de 30°.

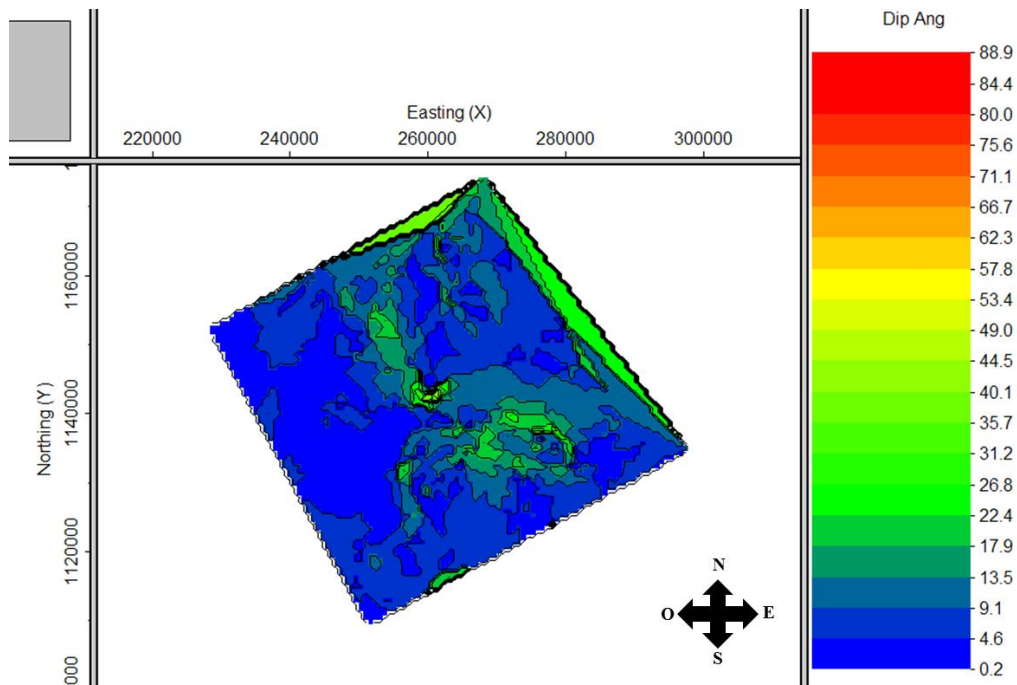


Figura 5.9 Mapa de distribución de los buzamientos de la superficie EII.

Colon siendo la superficie más profunda de las analizadas, presenta una distribución de buzamientos distinta a las otra tres superficies. El buzamiento mínimo observado esta entre los 5° y 9° el cual se distribuye en la mayor parte del mapa. Se observa buzamientos máximos alrededor de 63° y 67° ubicados entre las coordenadas Norte: 114000 – 114000 y Este:250000 – 270000,(figura 5.10) estos buzamiento describe claramente una estructura en forma de un domo lo cual esta asociado con la tectónica de lodo que se maneja en la zona (De Toni *et all.* 1994)

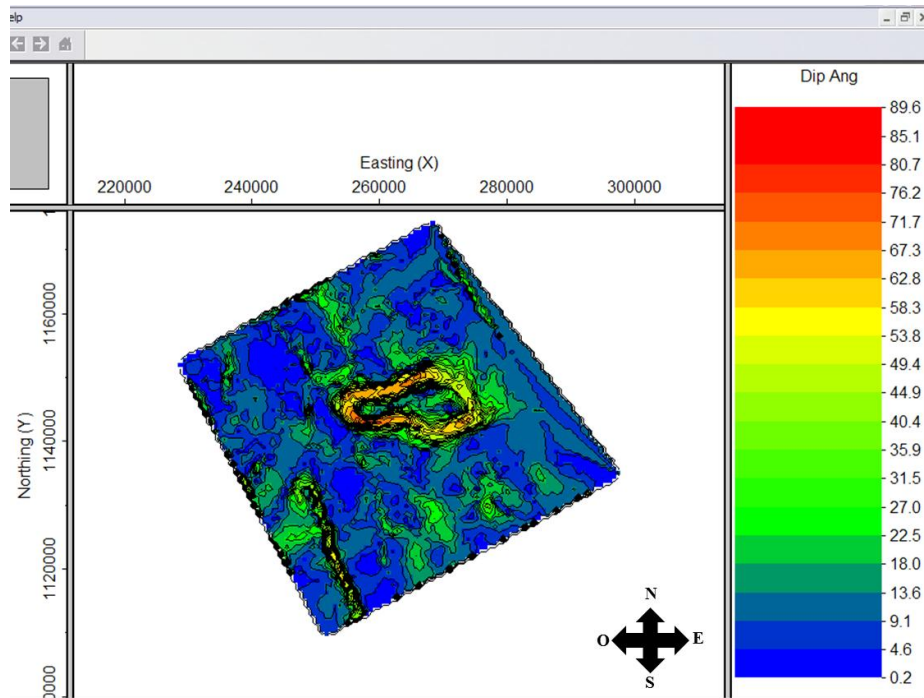


Figura 5.10 Mapa de distribución de los buzamientos de la superficie Colón.

Todas las superficies exceptuando Colón presenta un mismo patrón de buzamientos en donde el máximo buzamiento predominante es 30°, Colón presenta buzamiento más alto (alrededor de 65°) en el área central del mapa, este buzamiento delimita la estructura de un domo la cual solo se presenta en esta superficie, por lo que el estudio de buzamiento no puede ser desviado a un caso particular sino trabajar con un ángulo que represente de mejor forma todas las estructuras que se presente en la zona estudiada, siendo en este estudio 30°, ángulo importante para el cálculo de la apertura de migración.

El resultados de este estudio concuerda con los datos facilitados por la gerencia de proyectos, dónde señalan que los buzamientos máximos observados en las líneas sísmicas estas alrededor de los 25°, asegurando así que en el resultado del análisis de buzamientos de las estructuras en el modelo geológico es muy cercano al proporcionado por el intérprete.

5.4 Selección del tamaño de bin

Este análisis se hizo con mucha precisión debido a que necesitamos muestrear una señal de tal forma que no presenta aliasing y este efecto será visible en las secciones no migradas y podrían llegar a producir eventos falsos y un ruido incoherente en las secciones desplegadas

Se escogió trabajar con un bin cuadrado ya que debido a la complejidad de la zona, la simetría en el diseño es un elemento que nos beneficia a la hora de adquirir la información (cita)

5.4.1 Resolución vertical

Es necesario recordar que el espesor mínimo a resolver es de 100 ft, este dato es un requerimiento de la gerencia, dónde los resultados para logra resolver este espesor fueron:

Tabla 5.1 Datos de la frecuencia máxima necesaria para resolver 100 ft.

Tope	Fmax (hz)
EM2	37,4049536
EM1	43,8736578
EI4	55,465685

Esto indica que en el objetivo más profundo se necesita tener una frecuencia máxima de pro lo menos 55.5 hz y en el mas somero 37,4 hz. Por el análisis de frecuencia hecho anteriormente se conoce que es posible tener frecuencia de este rango en la zona, necesitamos saber con qué tamaño de bin esto es posible.

5.4.2 Resolución horizontal

Este resultado muestra cuales son los posibles tamaños de bin con los que es factible trabajar en el diseño, ya conociendo la frecuencia necesaria, de esta aseguramos que teóricamente la señal no entrar en aliasing:

Tabla 5.2 Propuesta de tamaños de bin para distintas profundidades de los topes en el área de estudio

Topes	Resolución x (m)	Tamaño de bin (m)
EM2	32,79182356	30
EM1	31,31794195	
E14	24,45848246	25

El rango de variación del tamaño de bin se encuentra entre 24, 45 m y 32,78 m, ya que por facilidades operáticas este valor debe ser un número entero, hablamos que los posibles tamaños de bin son 25 m y 30 m.

Ya conociendo estos valores se puede determinar si ambos satisfacen el requerimiento exigido por la gerencia de resolver un mínimo espesor de 100 ft (30,48m):

Tabla 5.3 Verificación del bin de 25 m en los topes EM2 y EM1.

Topes	Frecuencia	Rv
EM2	49,0630656	23,2375
EM1	54,9613067	24,3311007

Tabla 5.4 Verificación del bin de 25 m en los topes E14.

Topes	frecuencia	Rv
E14	46,8507816	37,3858027

Se puede notar que al evaluar el bin de 30 m en la superficie de E14 este solo resuelve un espesor de 37,4 m, los que es 7 m por encima de lo requerido. Mientras que al evaluar el bin de 25 m en las superficies de EM2 y EM1 inferior el espeso que este bin permite resolver es de 23m y 24 respectivamente.

Se determinó para la zona de estudio un tamaño de bin óptimo de 25 x 25 m, ya que

permite cumplir con el requerimiento de resolver un espesor mínimo de 30,48 m y este es el menor valor con el cual se tiene mayor área de muestreo sin tener aliasing espacial.

5.5 Determinación del offset máximo y mínimo

Es importante comentar, que existen algunas aproximaciones o “reglas de oro” para el cálculo de estos parámetros, las cuales se desarrollaron en la metodología, se debe analizar con cuidado cada resultado que se obtenga y relacionar todos los métodos aplicados en este estudio para llegar a un resultado final que cumpla con lo requerido

5.5.1 Estudio de rayo crítico

Por medio del estudio de ángulo crítico se obtuvo los siguientes resultados de rango de *offset*.

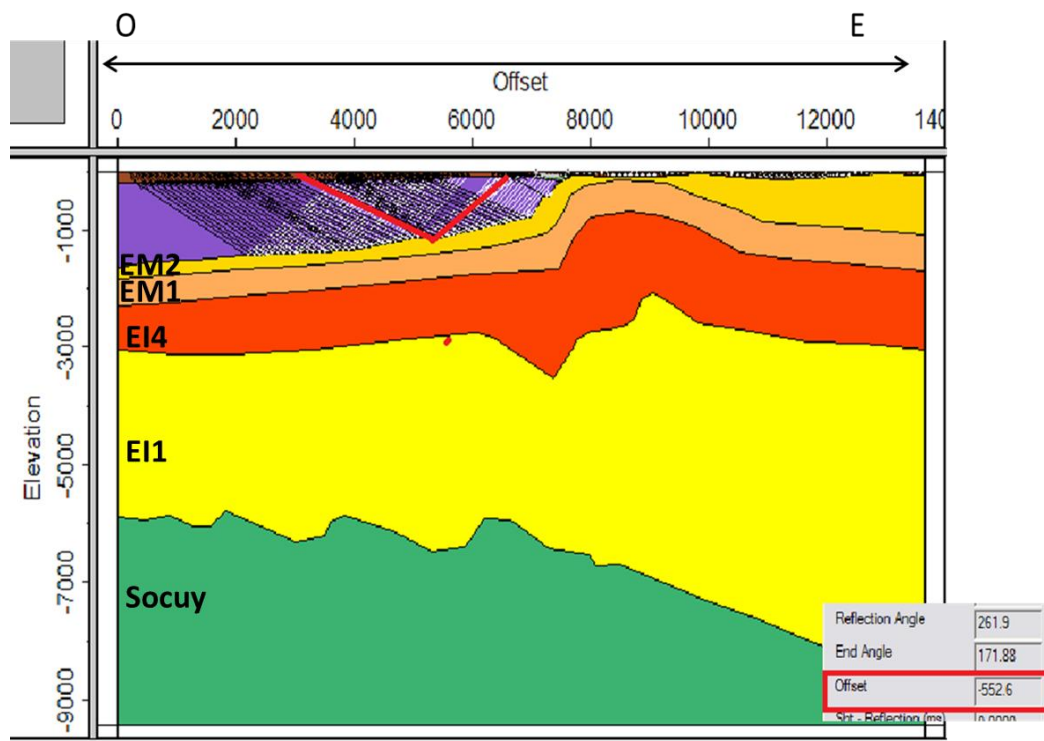


Figura 5.11 Estudio de rayo crítico para offset mínimo.

Tabla 5.5 Rangos de *offset* mínimo para el estudio de rayo crítico.

Zona	Offset mínimo (m)
Oeste	700 - 900
Centro	550- 1000
Este	200

Este resultado se obtuvo en la capa somera del estudio (figura 5.11), donde la superficie de EM2 fue similar a lo largo de la superficie, se lograron identificar tres grupos donde hacia la parte oeste se observan *offset* hasta de 900m en la parte central del modelo se recuperan mayor variedad de *offset* entre 650 y 1000 m, y hacia la parte este los *offset* no son mayores de 200 m.

En el siguiente cuadro podemos notar que hacia la parte central del modelo se necesitan mayor rango de *offset* esto debido a que la geología es más complicada en esta parte del modelo y el estudio demuestra que en esta zona la se seguirá recibiendo información hasta un *offset* de 8500m, lo que se puede observar en la figura 5.12.

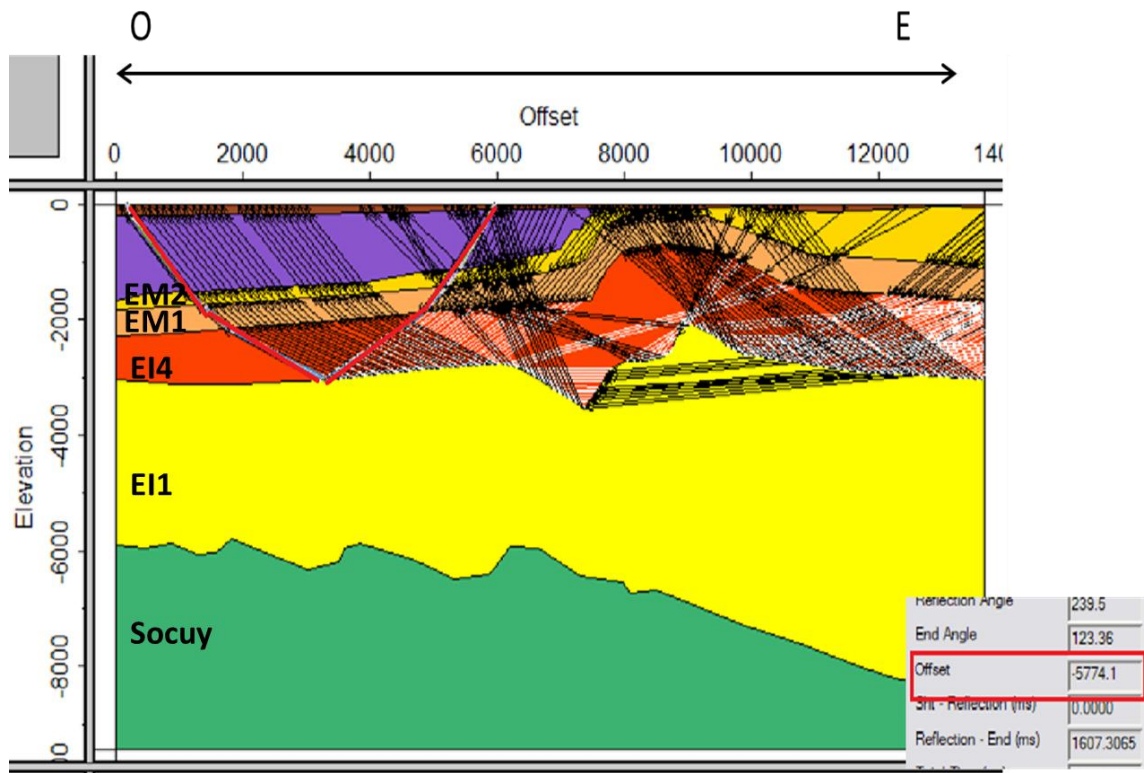


Figura 5.12 Estudio de rayo crítico en la zona oeste del modelo, para la estimación del offset máximo.

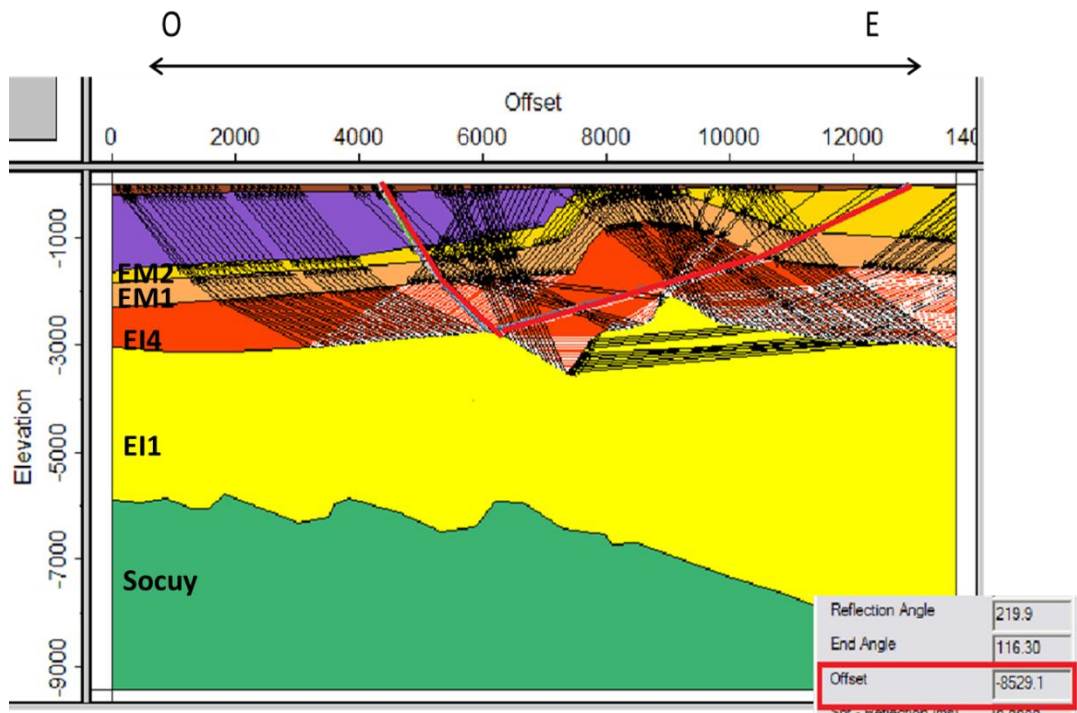


Figura 5.13 Estudio de rayo crítico en la zona central del modelo, para la estimación del offset máximo.

Tabla 5.6 Rango de offset máximo para el estudio de rayo crítico.

Zona	Offset máximo (m)
Oeste	5400-5800 m
Centro	7500-8500 m
Este	5800-6100 m

En la parte este y oeste (figura 5.13) del modelo se observa como disminuye el rango del *offset* y además se indica, según el estudio que se recibirán solo reflexiones hasta un *offset* alrededor de 6000 m.

En esta parte del análisis podemos decir que para el *offset* mínimo se debería trabajar con *offset* menor a 900 m, ya que se empieza a partir de este *offset* se graba

información útil y necesaria para el diseño. Mientras que para el *offset* máximo, este análisis sigiere que este alrededor de 6000 m ya que en promedio después de esta medida se inicia la llegada de las ondas refractadas

5.5.2 Estudio por estiramiento NMO

El tema del estiramiento NMO es sumamente importante pues está directamente vinculado a la resolución vertical resultante después del apilado. El resultado del cálculo del *offset* máximo a través del estiramiento NMO para dos zonas del perfil arrojó los siguientes resultados:

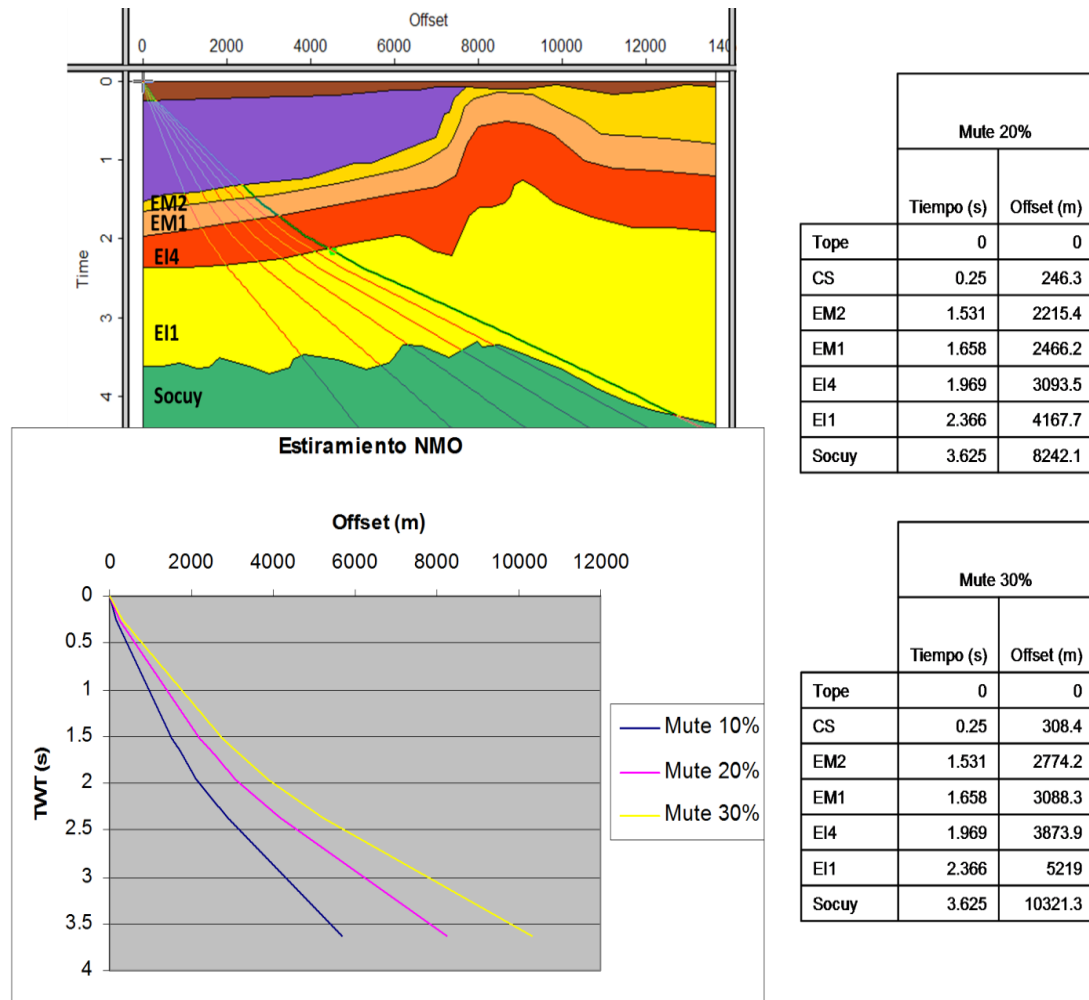


Figura 5.14 Estiramiento NMO de 20% y 30% al extremo oeste del perfil

Estos cálculos permitieron evidenciar que debido a la profundidad de los horizontes hacia la zona oeste del proyecto se requiere para la superficie e1 con un *mute* de 20% un *offset* alrededor de 4200 m y con un *mute* de 30% un *offset* de 5220 m para el objetivo principal y en parar el objetivo profundo un *offset* de 8200 m y 10300 m con *mute* de 20 % y 30% respectivamente (figura 5.14)

Estos valore se hacen mayores a media que nos desplazamos al este como vemos en la figura (9 en donde para un *mute* de 20 % se necesita un *offset* 5540 m y para un *mute* de 30% se necesita un *offset* de 7460, lo que claramente podemos observar en la figura5.15, cabe destacar que al igual que en el estudio de rayo critico los *offset* se hacen mayores en esta zona, debido a la particular complejidad estructural que se presenta. Como este rango solo se presenta por la complejidad estructural, para ambos estudios, no podemos viciar el diseño del *offset* máximo solo a esta zona, ya que la mayor parte del estudio muestra que son necesarios valores menores para el *offset* máximo.

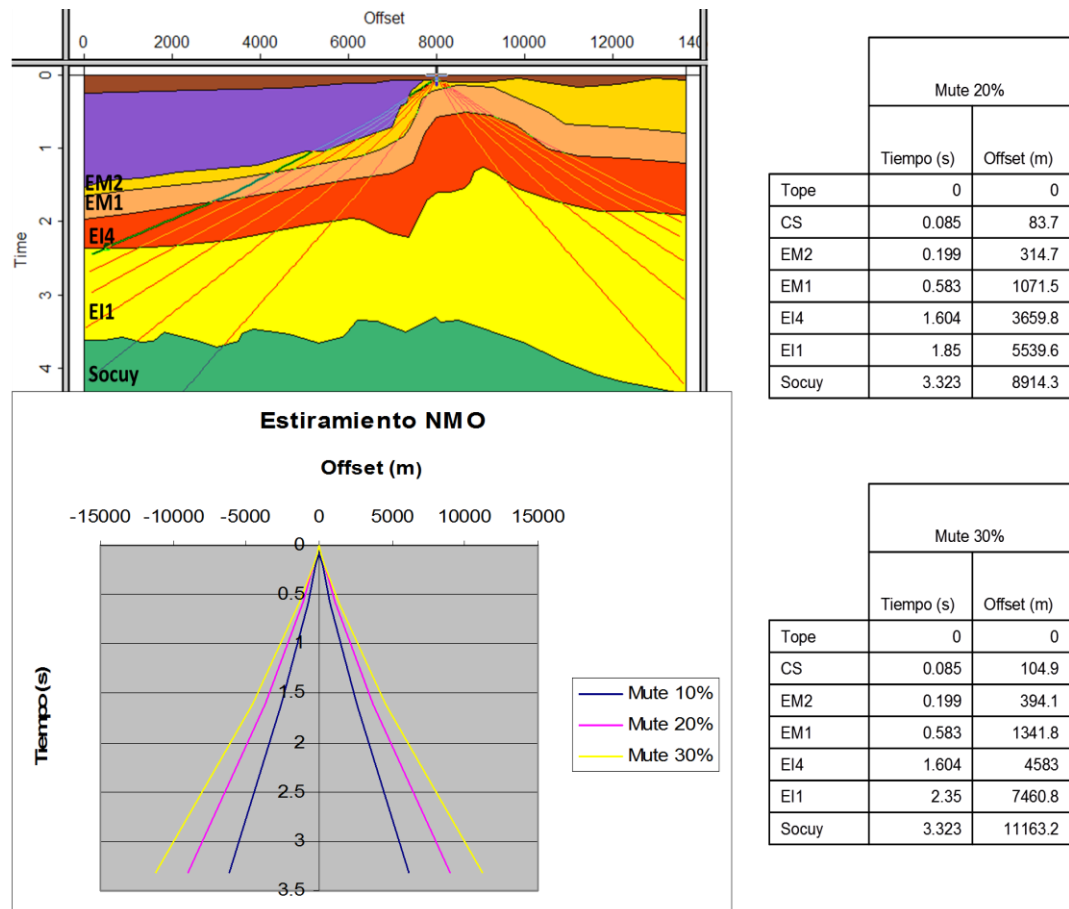


Figura 5.15 Estiramiento NMO de 20% y 30% al extremo oeste del perfil

Basados en el estudio de rayo crítico y el estudio de estiramiento de nmo máximo podemos sugerir que un *offset* máximo adecuado para la zona de estudio debe estar en un rango entre 6000m y 6400 m, lo cual respeta el criterio que nos dice que el *offset* máximo debe ser mayor a la profundidad del objetivo principal del diseño. Mientras que el *offset* mínimo debe ser menos a 900 m, dato importante en el momento del cálculo de la cobertura requerida.

El estudio de distancia CMP – CRP (figura 5.16) indica de una forma cualitativa que el desfase entre ambos puntos esta alrededor de los 100 metros por lo que decidimos tomar en cuenta esta distancia en el *offset* máximo para que sea incluido este desfase y asegurar de que sea grabada esta información por lo que un correcta distancia de

offset máximo se encuentra alrededor de los 6500 m.

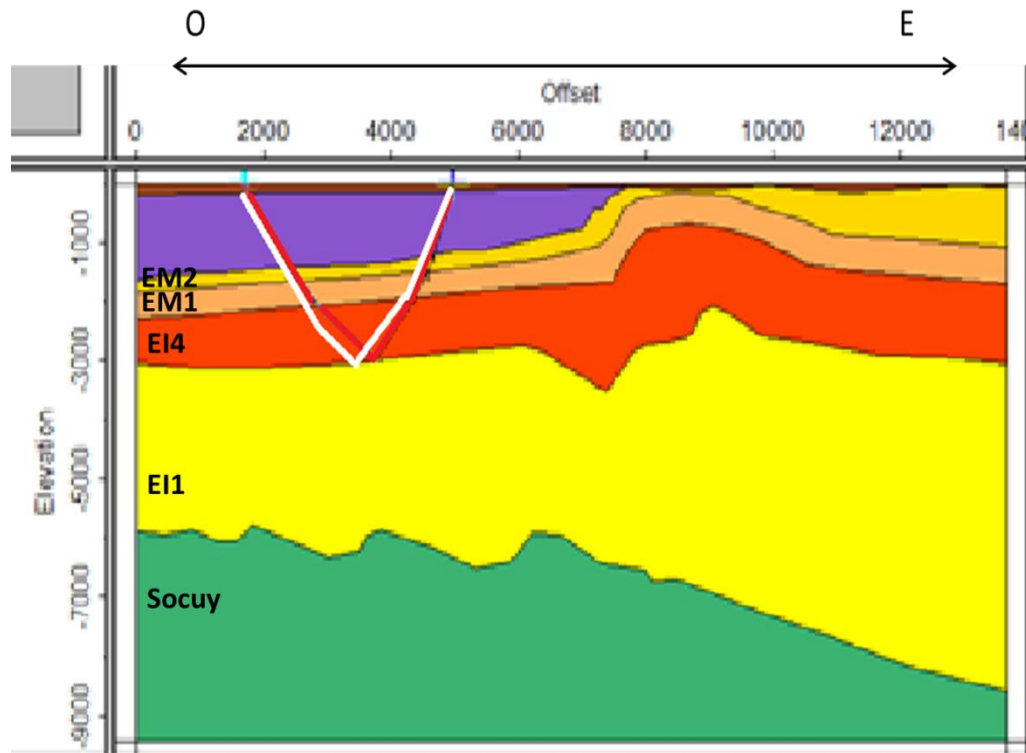


Figura 5.16 Desplazamiento CMP-CRP en el modelo

5.6 Orientación de las líneas receptoras y fuentes

Para este cálculo se hicieron estudio del azimuth de los buzamientos presentes en las estructuras (did azimuth), donde podemos observar en mapas cual es la tendencia de los buzamientos en el área, además se presentan estadísticas de los resultados:

Al ver el mapa de la superficie EM1 se observa que predominan tres grupos, debido a los colores presentes en el mapa. El primero de ellos descrito por el naranja está asociado a los mínimos valores de azimuth alrededor de 1° , los cuales se hacen más predominantes hacia el norte. El segundo grupo representado por el color morado está asociado a valores de azimuth alrededor de los 300° , estos predominan hacia la parte oeste del mapa. Por último los valores verdes que se encuentran en la partes central y se extienden hacia el este del mapa esta asociados con un azimuth de 160° , este es el

valor de la media que arroja los análisis estadísticos para esta superficie (media = 161°).

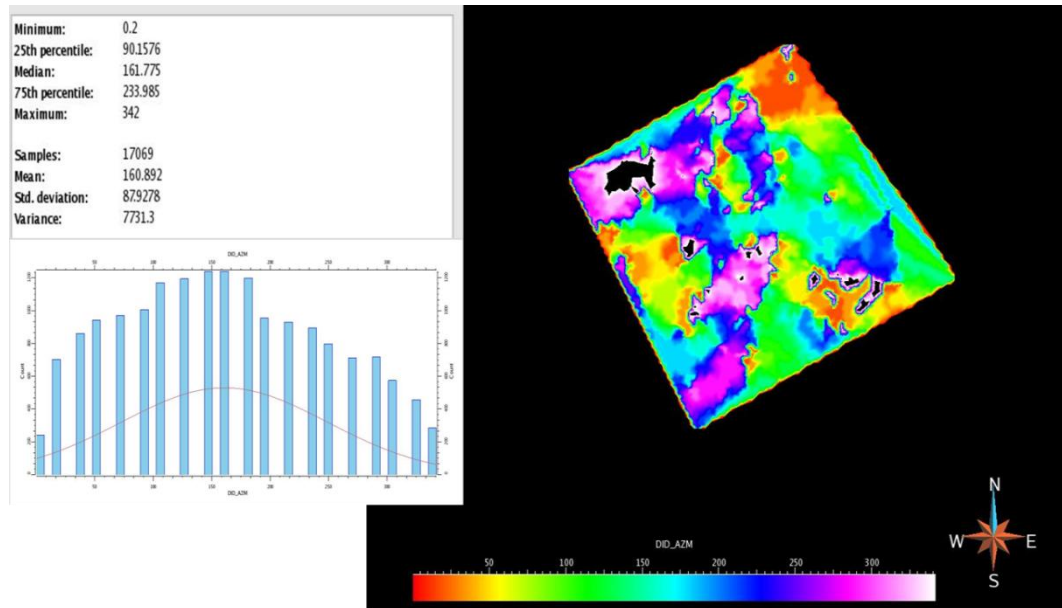


Figura 5.17 Distribución azimutal de los buzamientos de las estructuras en la superficie EMI.

En el mapa de la superficie EI4 se observa claramente como la mayor proporción del mapas nos dice que el azimuth de los buzamiento esta alrededor de los 160° lo cual es confirmado con el histograma generado a partir del mapa, donde la media es igual a 161. El mapa muestra valor máximos de 341 ° que lo podemos ubicar hacia el oeste del mapa y valores mínimos de 0.2° que se muestras en los bordes norte del mapa y hacia el este.

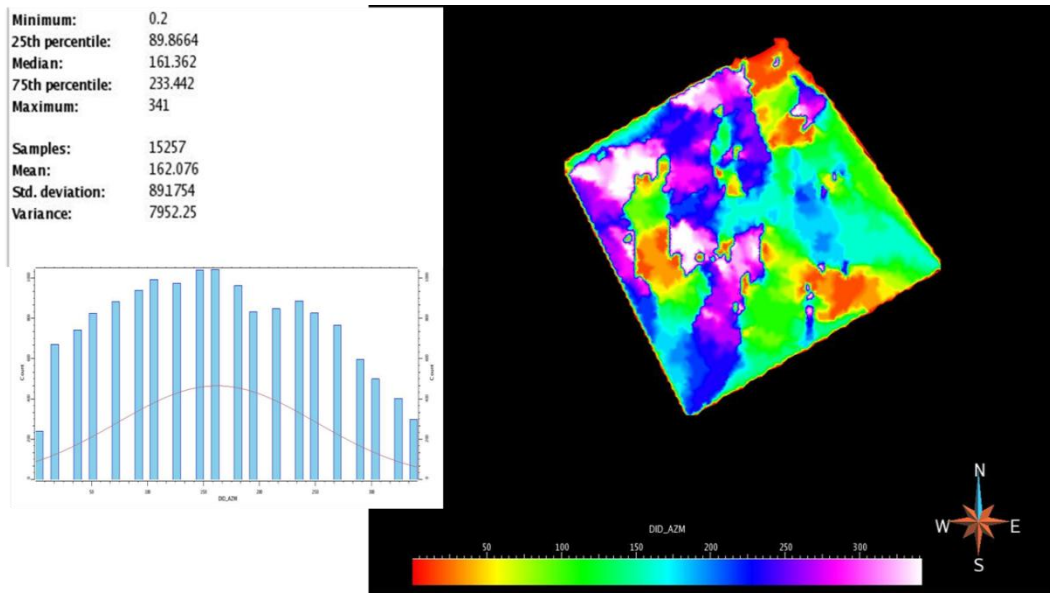


Figura 5.18 Distribución azimutal de los buzamientos de las estructuras en la superficie E14.

En el mapa de la superficie E11 (figura 5.19) observamos como hacia la zona norte del mapa predominan valores máximos de azimuth de 300-340 ° mientras que en la parte central del mapa se encuentra valores de 160° , y se extiende hacia el este; lo que coincide con los anteriores. Los estudios estadísticos muestran que la media es de 162°, y se tiene valores máximos de 341 ° y mínimos de 0.3 grados los cuales se siguen presentando hacia el borde este del mapa.

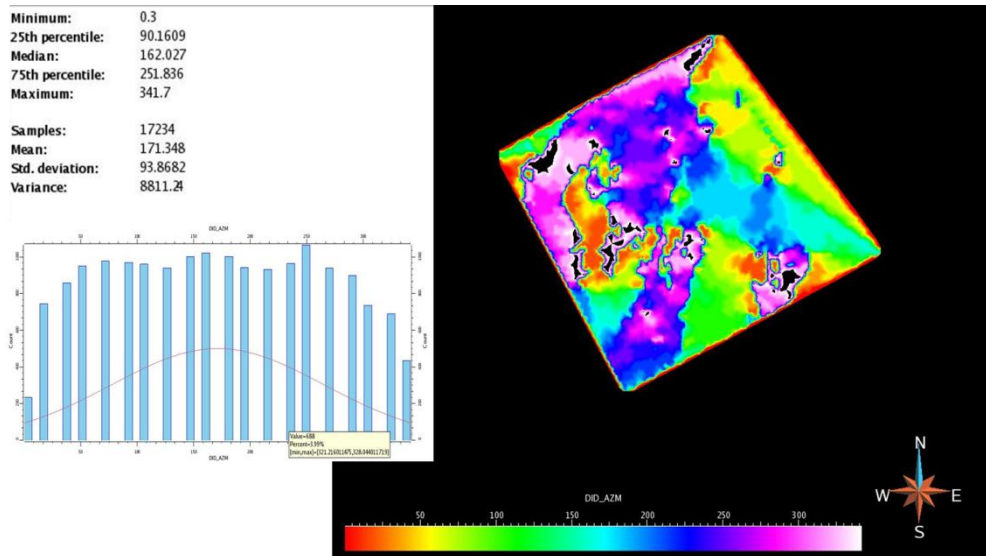


Figura 5.19 Distribución azimutal de los buzamientos de las estructuras en la superficie E11.

En la siguiente figura se tiene el mapa de la distribución azimutal de la superficie de colon, el cual es un poco diferente a los primeros 3 ya que no presente la misma tendencia que se ha venido presentando en cuando a la distribución de los azimuth en la zona puede ser a la presencia de domos de lodo que se manejan en el modelo geológico para esta superficie. Aunque los estudios estadísticos indican que la se presente una media 162° lo cual es totalmente similar a las anteriores.

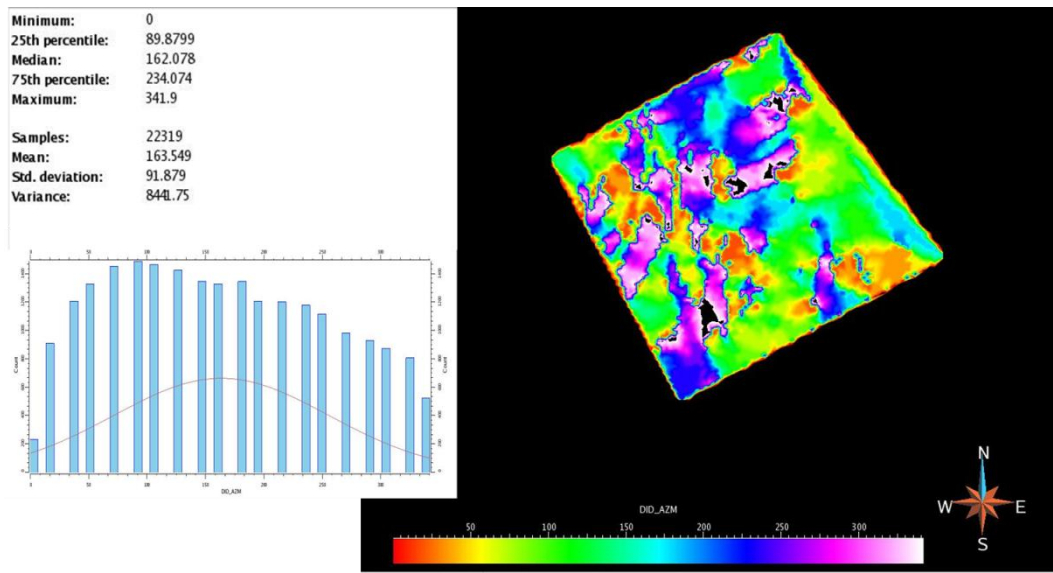


Figura 5.20 Distribución azimutal de los buzamientos de las estructuras en la superficie Colón.

Debemos recordar que estos estudios nos están indicando la dirección preferencial de los buzamientos de la zona así que cuando hablamos de máximos y mínimos nos referimos al menor valor de azimutuh o mayor valor, no a la cantidad de muestras.

Unas ves analizadas todas las superficies es evidente que la dirección preferencial de los buzamientos del área es de 160 °. Por geología conocemos que el rumbo de las estructuras es perpendicular a su buzamiento (), y () no recomienda que las líneas receptora deben ir perpendicular al rumbo de las estructurar por lo que la orientación de las líneas receptoras sera igual a 160^a y perpendiculares a estas se encontrarán las líneas fuentes.

5.7 Definición de los diseños finales

En la etapa de diseño de los diferentes pero-plot, fue un proceso iterativo en donde cada resultados fue analizado con detalle y de esta forma descartar cada uno de los diseños que no cumpliera con todas las especificaciones antes calculadas, ya que con

cumpliendo con cada uno de esos parámetros aseguramos un diseño óptimo para la zona estudiada

Se debe destacar que en este proceso iterativo existe parámetro fijos, los cuales ya fueron calculados y analizados , como fue explicado, y que esta parámetro siempre serán idénticos para cada uno de los diseños encontrados, como vemos en la siguiente tabla:

Tabla 5.7 Parámetros calculado para el diseño del área de estudio

Parámetro	Dimensión
Tamaño de bin	25 x 25 m
Offset máximo	> 6500 m
Offset mínimo	< 900 m
Cobertura	> 60
Relación de aspecto	> 0.7

Los primeros pre-plot constan de 12 líneas receptoras:

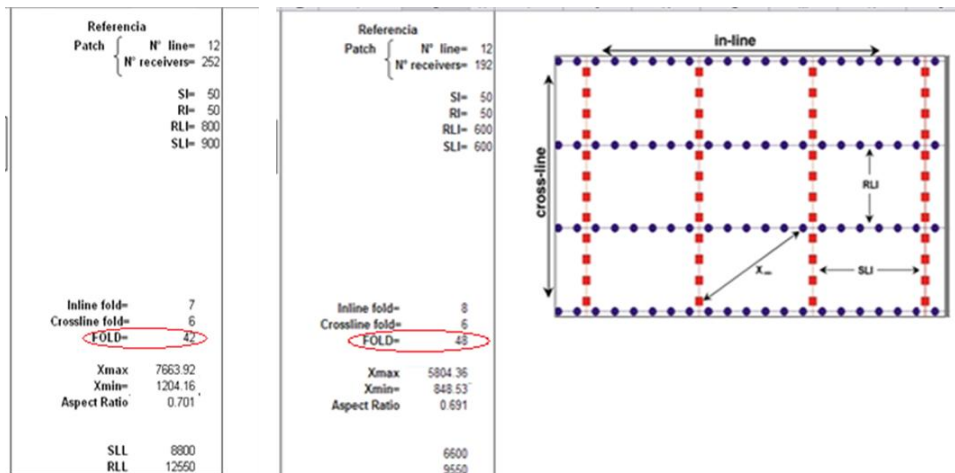


Figura 5.21 Pre-plots del diseño con cobertura inferior a 60

Cada uno de los pre-plot encontrados bajo estos parámetros no alcanza los requerimientos de cobertura que fueron analizados para la zona, lo cual se muestra en las figuras, por esta razón fueron descartados.

La cobertura encontrada se encuentra alrededor de 40, y para este diseño se estableció una cobertura de 60. Se buscó mejorar el problema de cobertura, para esto se aumentaron en número de líneas receptoras en el patch.

Cuando aumentamos los diseños a 14 líneas receptoras se obtuvo:

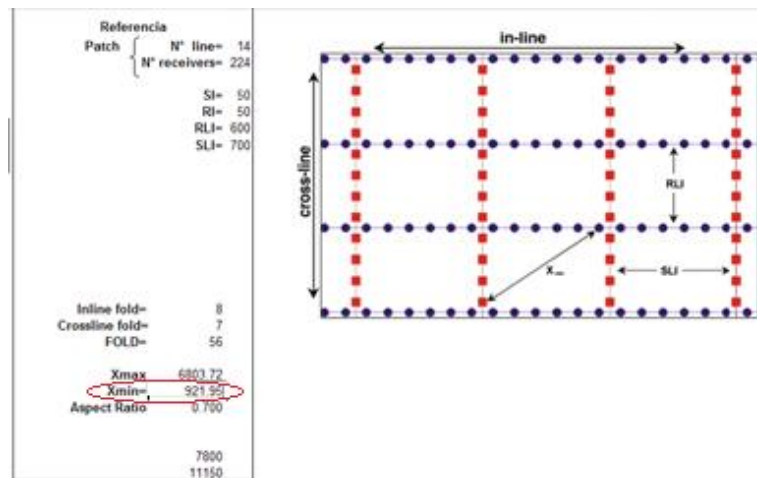


Figura 5.22 Pre-plot de 14 líneas receptoras y *offset* mínimo levemente superior al necesario

Este pre-plot se obtuvo resultados satisfactorios ya que cumple con los parámetros necesarios de cobertura, radio de aspecto, *offset* máximo. Pero se decidió optimizar el parámetro del *offset* mínimo y de esta forma satisfacer de una forma más precisa lo analizado en el capítulo, y con lo que se obtuvo el siguiente diseño:

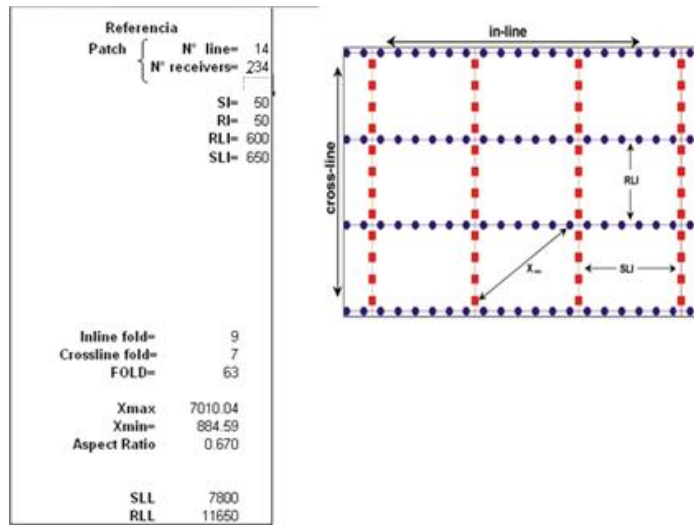


Figura 5.23 Diseño 1 que consta de 14 líneas receptoras y offset mínimo optimizado

En busca de disminuir el número de tiros (con la finalidad de encontrar un diseño más económico), se procedió a crear un diseño con un mayor espaciamento entre líneas fuente y receptoras, obteniendo el siguiente diseño:

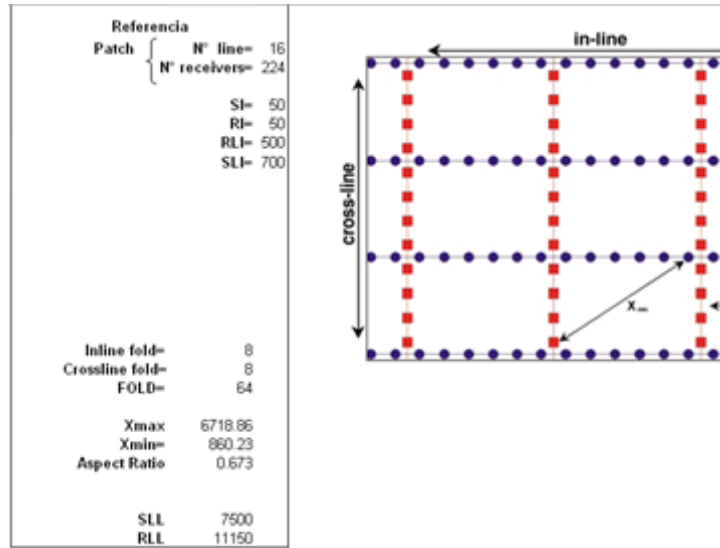


Figura 5.24 Diseño 2 de 16 líneas receptoras para un mayor número de fuentes y receptoras

Estos dos último, son los diseños finales (figuras 5.23; 5.24), ya que logran satisfacer cada uno de los parámetros que fueron analizados y con los que sugieren la forma más adecuada de adquirir los datos en este proyecto. A estos dos diseños finales se le realizaran diferentes estudios para deducir cuales contribuyen de mejor forma a la grabación y recolección de los datos.

Ahora solo se diferencia que en el primer diseño se tiene menor número de tiros que el segundo, mientras este otro tiene un mayor muestreo de la zona, pero no sabemos con certeza si este mayor muestreo proporcionara información de relevancia o información diferente a la que ya haya sido grabada. El resto de los estudios aplicados al diseño en conjunto con los mapas de CRP y el análisis de costo nos darán una visión más clara de los pros y los contras con los que nos topamos y tener una mayor evaluación de estos.

5.8 Análisis de cobertura

El primer análisis aplicado a los diseños, es el de cobertura CMP, obteniendo como resultado los siguientes mapas

Para el diseño uno tenemos:

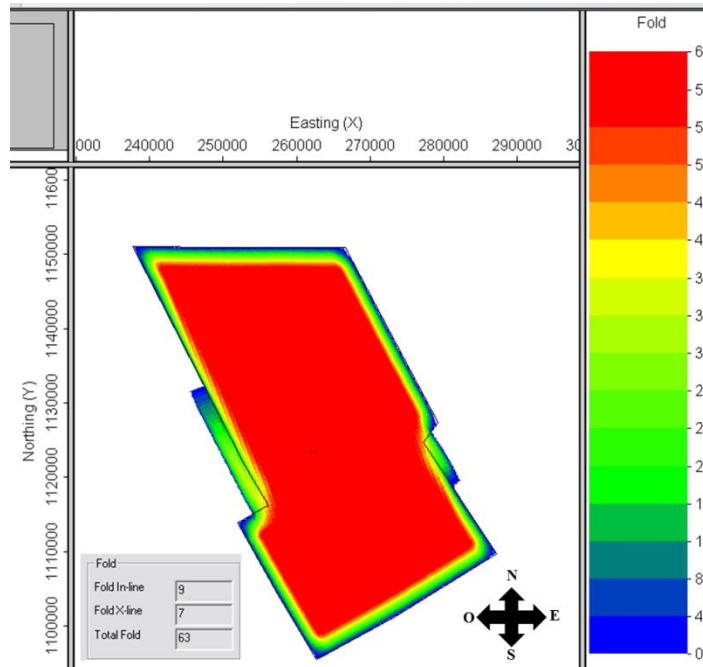


Figura 5.25 Mapa de cobertura CMP obtenida para el diseño 1

Se refleja la distribución de cobertura en lo largo del área en donde se desea adquirir la sísmica. La zona que vemos en degrade de colores es hacia los extremos de diseño es la asociado a la apertura migración y fold taper, la cual inicia cuando la cobertura disminuye desde 62 hasta 0. Aunque la cobertura hacia esta zona es menor debemos recordar que esta área es agregada para que la zona objetivo tenga la cobertura calculada.

En la figura anterior se puede ver claramente que la cobertura nominal del diseño es de 63 quiere decir que en cada bin serán sumadas y apiladas 63 trazas (Chaouch, A y Mari J, 2006). Más adelante será analizada que cantidad de estas trazas serán únicas, es decir si cada una de las trazas apiladas en el mismo bin aporta información diferente.

Para este diseño la cobertura in-line fue de 9 mientras la cobertura cross-line es de 7,

por eso tenemos un fold de 63.

Para el diseño 2 tenemos el siguiente mapa de cobertura:

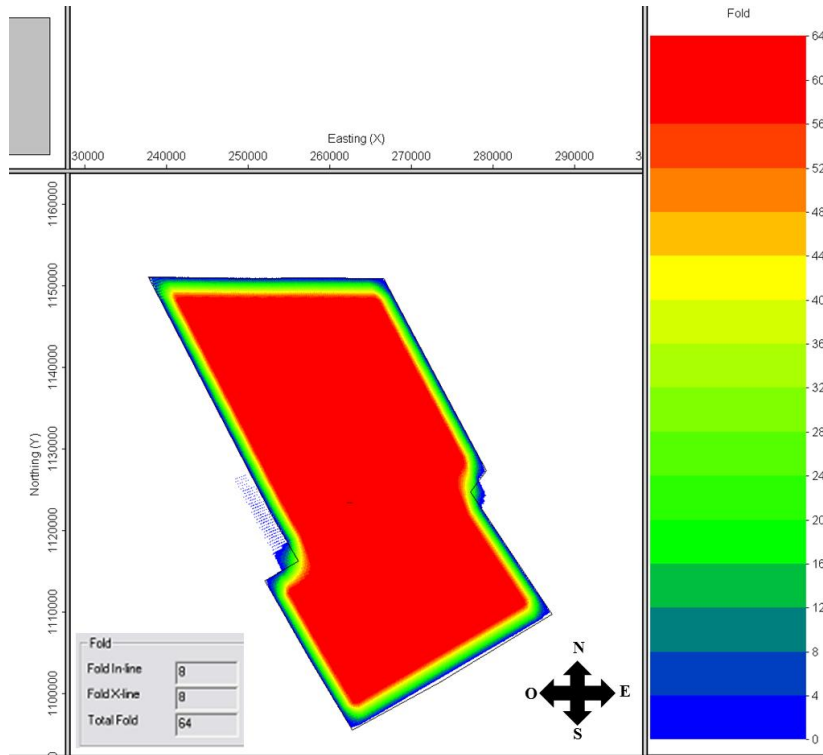


Figura 5.26 Mapa de cobertura CMP obtenida para el diseño 2

Se presenta el mismo análisis de cobertura CMP que para el primer diseño; en este tenemos una cobertura nominal de 64, consecuencia de una cobertura in-line de 8 y una cobertura cross.-line de 8.

Como ya explicamos, en este diseño se sumaran y apilara la información contenida en 64 trazas, por cada bin. La cobertura de ambos diseños es similar, esto se requería ya que por antecedente de la sísmica 2d está entre 100 y 120 para las distintas campañas, y por esto se escogió un cobertura alrededor de 60

La cobertura de los mapas de CMP calculada para ambos diseños es una cobertura

teórica, esto quiere decir que no necesariamente es la cobertura final que adquirirá en el diseño, ya que se deben tener en cuenta todos los elementos geológicos en subsuelo. Cuando analicemos los mapas de CRP estos serán comparados con la cobertura CMP calcula y se apreciara cuantas trazas realmente son apiladas y sumadas en un bin.

5.9 Análisis del gráfico de araña

En este diagrama podemos ver básicamente como es la distribución azimutal de los *offset* lejanos, medios y cercanos, bin a bin.

Gráfico de araña para el diseño 1:

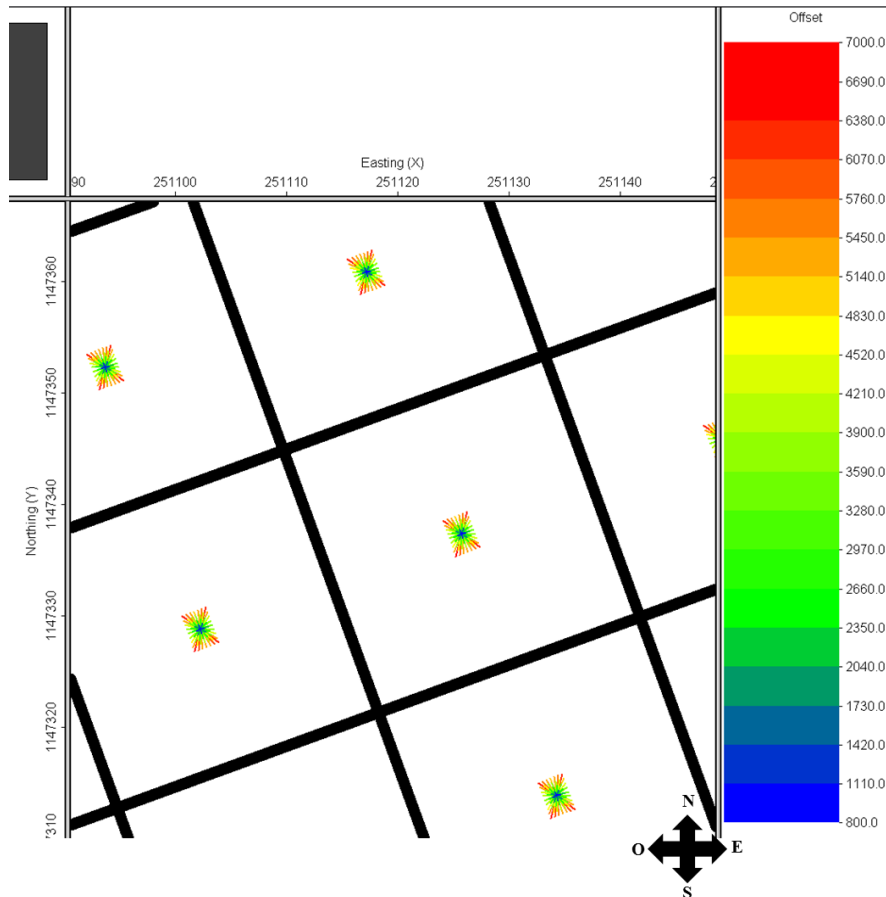


Figura 5.27 Gráfico de araña obtenido para el diseño 1

Observamos que existe una buena contribución de *offset* cercanos y medios, se observa como en el bin existe una cobertura radial para estos *offset*. Estos están ubicados entre 800 m y 4800 m

Se observa una buena contribución de *offsets* más lejanos que se encuentran entre los 4800 y 7000 metros. Este patrón se observa para todos los bins estudiados como se puede ver en la figura:

Gráfico de araña para el diseño 2:

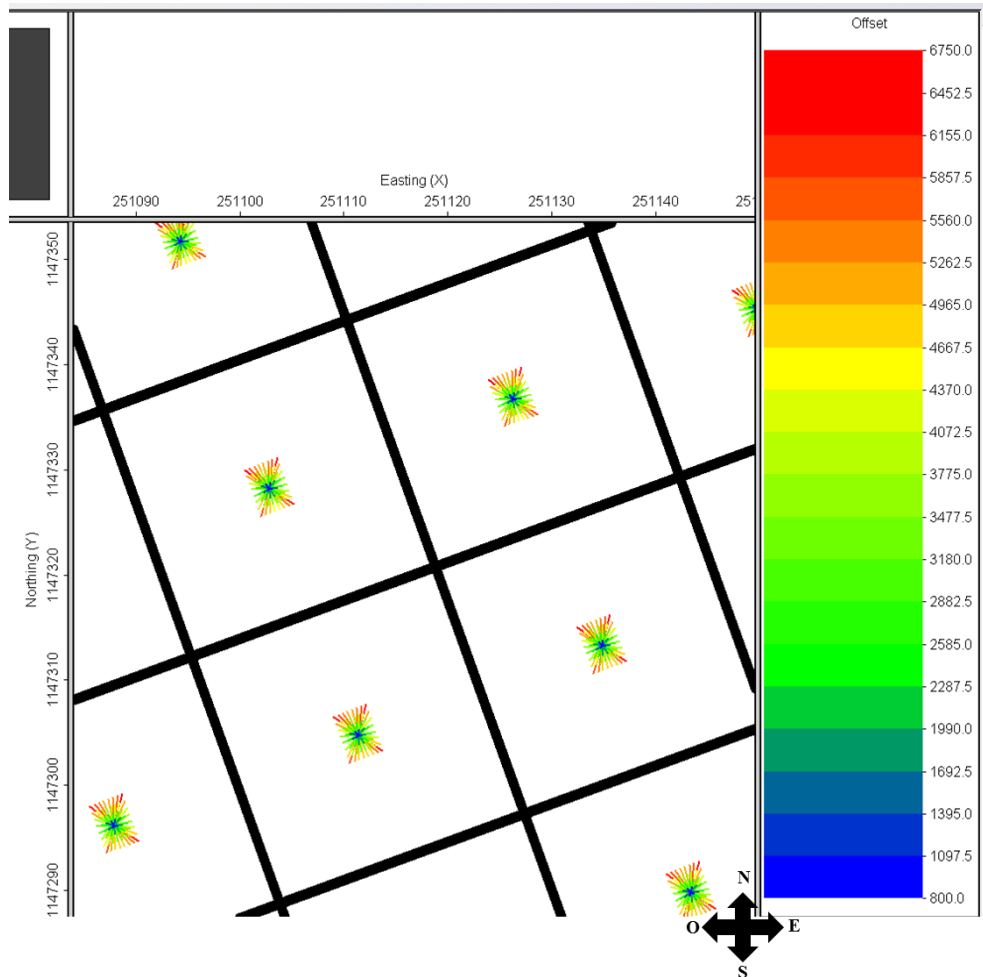


Figura 5.28 Gráfico de araña obtenido para el diseño 2.

Al igual que el anterior diseño también observamos una buena distribución de *offsets* cercanos y medios, que están entre 800 m y 4600 m. Los *offset* lejanos están se distribuyen en gran parte del bin estos se ubican entre 4600 m y 6750 m, siendo el *offset* máximo de 6750 m como fue diseñado

Para ambos diseños existe una aceptable distribución de *offsets* cercanos medios y lejanos, en cada bin. Es importante tener conocimiento de esto, ya que como se trata de un levantamiento 3d, esta distribución nos indica que se puede registra información que esta de buena forma distribuida en diferente direcciones.

Como tenemos conocimiento de que existe una geología compleja en el área se necesitaba tener una distribución de *offset* como esta. La estructura geológicas presentes pueden generar difracción, y tomando en cuenta este estudio, se puede afirmar que existen grandes probabilidades de que esta energía que se dispersó será grabada, y colapsada en procesamiento en la fase de migración, haciéndola interpretable.

Como se tiene una relación de aspecto cercana a 1, tenemos un diseño más narrow azimuth y menos wide azimuth, ya que los path de azimuth narrow son ideales para los cálculos de AVO, DMO y para cuando se presentan variaciones laterales significativas de velocidad (Cordsen, A., *et al.*, 2000); también evitamos tener un diseño 3D que grabe información como si se tratara de un diseño 2d. La relación de aspecto de ambos diseños es de 0.7 lo que contribuyes a tener una distribución azimutal aceptable para la mayor cantidad de offset y como explica Cordsen, A., *et al.*, (2000) de esta forma se garantiza que todos los ángulos que rodean al son incluidos en el apilado

5.10 Análisis del diagrama de rosa

Este análisis se realizó con la finalidad de ver la distribución azimutal de todos los *offset* que contribuyen en el diseño, obteniendo los siguientes resultados:

Para el diseño 1 se obtuvo el siguiente resultado:

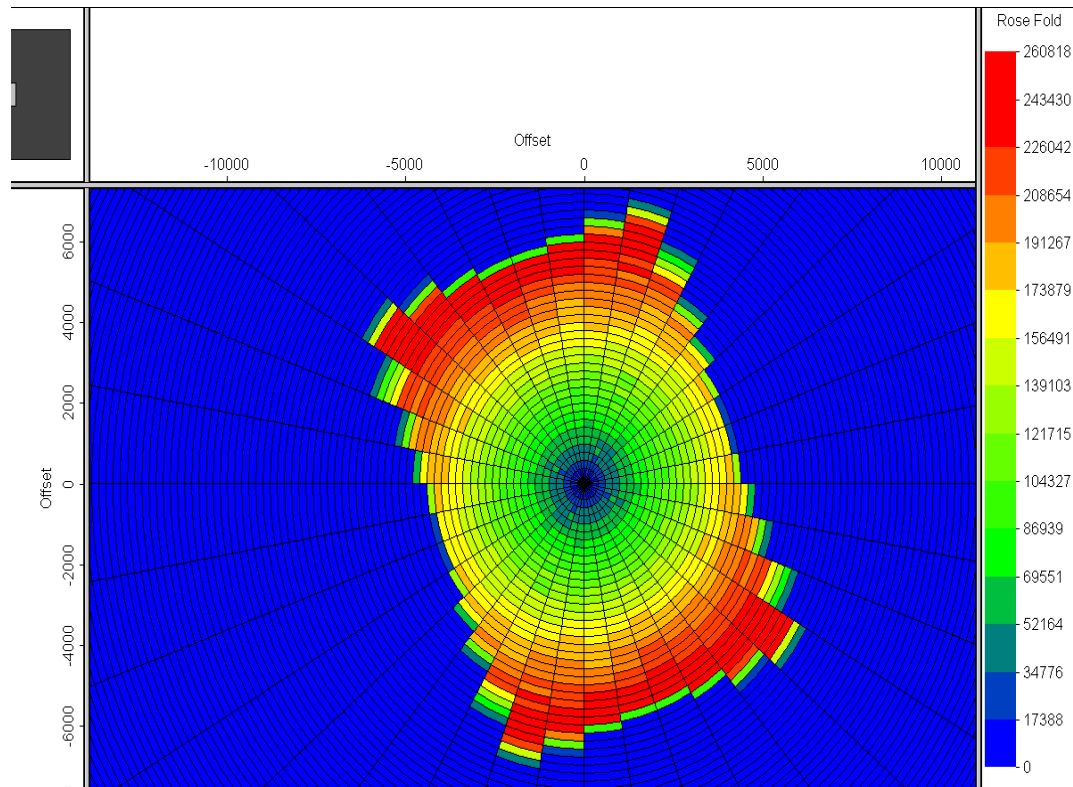


Figura 5.29 Diagrama de rosas obtenido para el diseño 1

Se observa como para las *offset* entre 800 y 4500 existe una distribución completa en todo el radio del estudio, en el diagrama de rosa nos muestra como en este rango se distribuye en los 360° del diseño con un número de trazas entre 0 y 174000.

Para *offset* entre 4500 y 7000 existe una cobertura entre los ángulos que van radialmente de 310° a 40° y de 110° a 230° lo que sugiere una buena distribución de *offset* largos.

Para el segundo diseño se tiene como resulta el siguiente diagrama:

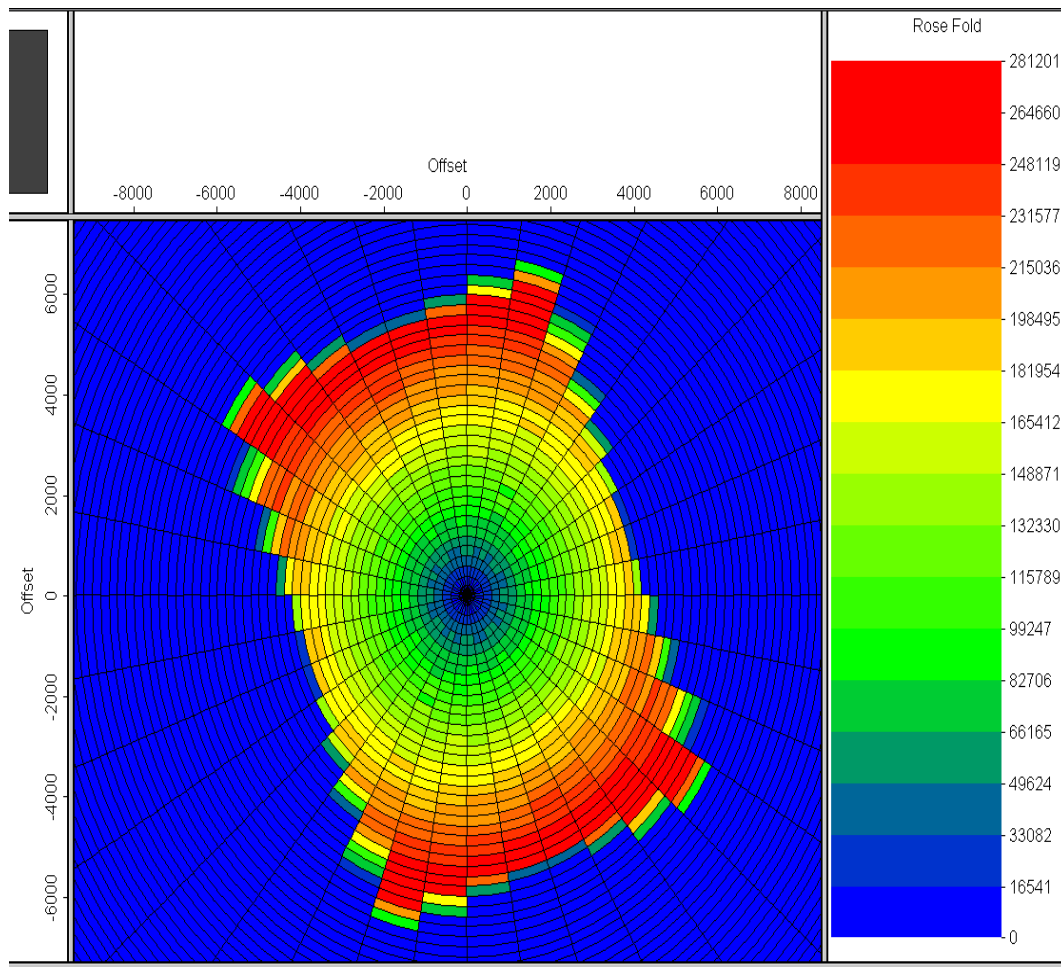


Figura 5.30 Diagrama de rosas obtenido para el diseño 2.

Muestra una distribución completa de 360° para *offset* de 800 m a 4000 m (esto incluye *offset* cercanos y medios), donde hay un número de trazas entre 0 y 182000.

Para *offset* lejanos (en este estudio se ubican en un rango de 4000 m a 6750m) el resultado es muy similar al primer diseño ya que estos se distribuyen en el mismos azimuth que va entre 310° y 40° y 110 a 230°.

Para ambos diseños la distribución tanto de *offset* lejanos y medios como lejanos es

similar. En ambos vemos que los *offset* lejanos se orienta en un azimuth el cual está se podría asociarse al azimuth preferencial que poseen los buzamientos de la zona y que la orientación de las líneas receptoras está orientada paralela a esta dirección.

5.11 Análisis de la distribución de offset

Este estudio nos permite notar la redundancia de los *offsets* bin a bin, en el primer diseño se obtuvieron los siguientes resultados:

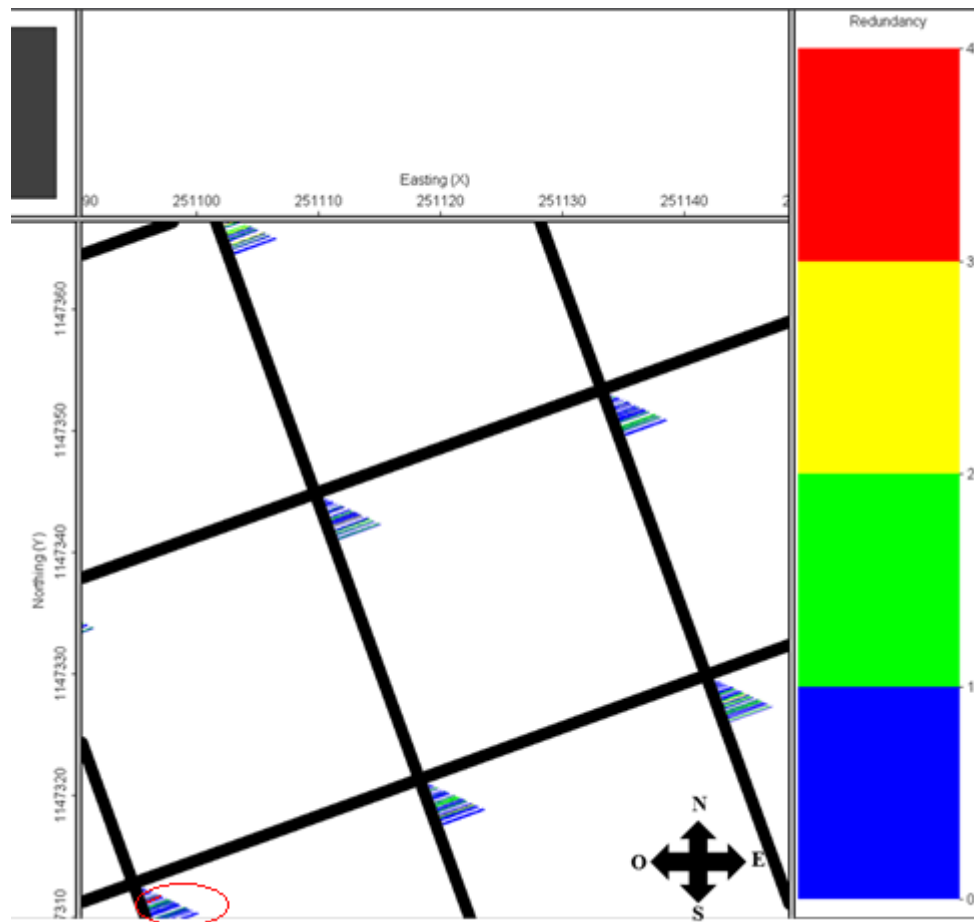


Figura 5.31 Estudio de distribución de offset para el diseño 1, se señala con el círculo rojo traza con redundancia 4

En el primer diseño existe una distribución regular de los *offsets*, cuando vemos la figura, bin a bin, nos damos cuenta que en la distribución por bin existe pocas

separaciones o zonas separadas (conocidas como gags), esto nos indica que en nuestra distribución que va desde el mínimo *offset* al *offset* máximo, es la adecuada.

También se observa como la redundancia del *offset* es baja esta entre 1 y 2 siendo más predominante la redundancia uno; esto nos quiere decir que la mayoría de los *offset* esta conformados por una sola traza, en caso de una redundancia 2 el *offset* esta repetido. En esta muestra tomada podemos observar que solo en una traza de un bin la redundancia es de 4

En el diseño 2, se obtuvo la siguiente distribución para los *offsets*:

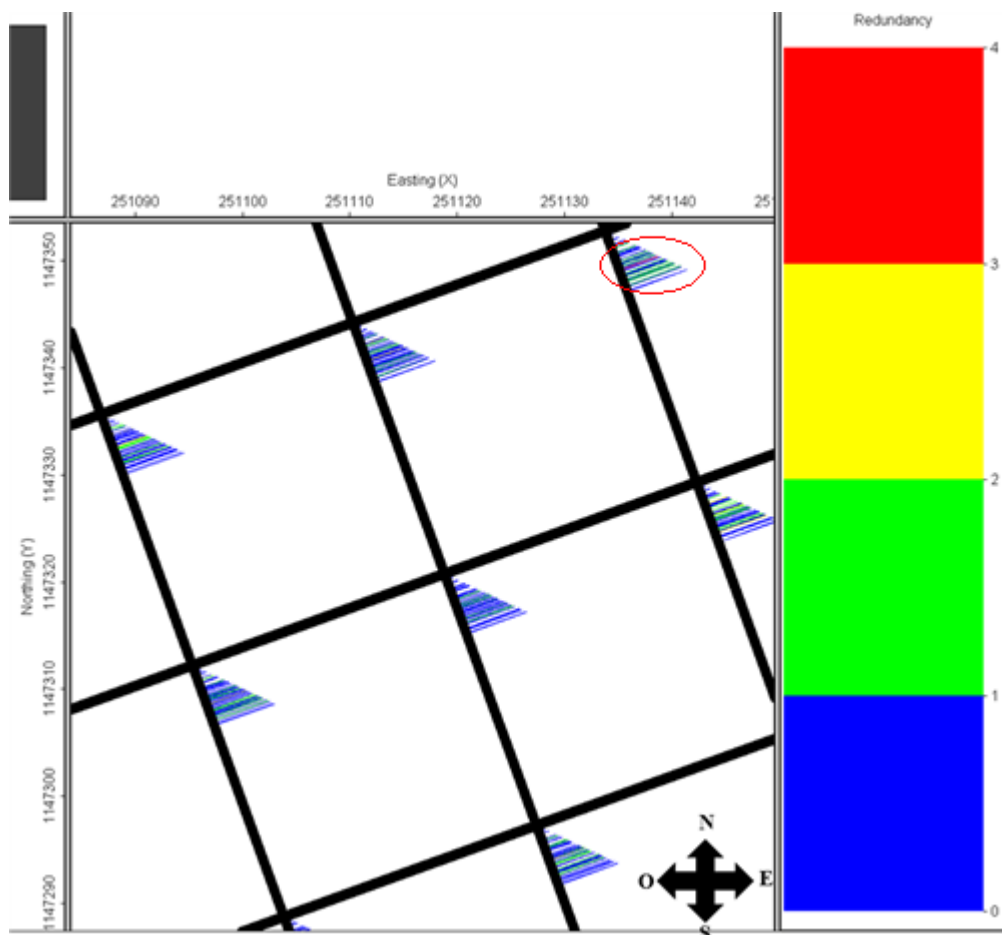


Figura 5.32 Estudio de distribución de *offset* para el diseño 2, se señala con el círculo rojo traza con redundancia 4

Al igual que en el primer diseño notamos que existe una buena distribución de *offset* de cercanos a lejanos, ya que se no se encuentran separaciones o huecos (gags) en la graficas de cada bin.

Se puede notar una baja redundancia de *offset* que va desde cero (siendo esta la que predomina) a 2, semejante al diseño 1. También se observa en este estudio una sola traza de un solo bin con redundancia 4 para esta muestra

En ambos diseños se hay una baja redundancia, hay una distribución que pareciera contemplar toda la colección de *offset* interesa, desde los lejanos hasta los cercanos, no se ven gags que me puedan comprometer el muestreo de cierto *offset* que podrían ser importantes para estudios de reflectividad; como los análisis AVO que requieren de un buen muestreo de rango de *offsets* para la inversión de la curva de ajuste (Cordsen, *et al.*, 2000)..

La buena distribución de *offset* presente en ambos diseño y su baja redundancia permiten inferir que se podría maximizar el poder del análisis de velocidad ya que existe una distribución de *offset* que nos permita muestrear geoméricamente la reflexión de la mejor manera, así como también se presenta una cobertura con alto porcentaje de trazas únicas, aunque esto tendrá mejor análisis con el estudio de “unique fold”.

5.12 Análisis del estudio trazas vs offset

Este estudio reúne todos los *offsets* de cada uno de los bin del levantamiento

En este estudio se obtuvieron los siguientes resultados para el diseño 1:

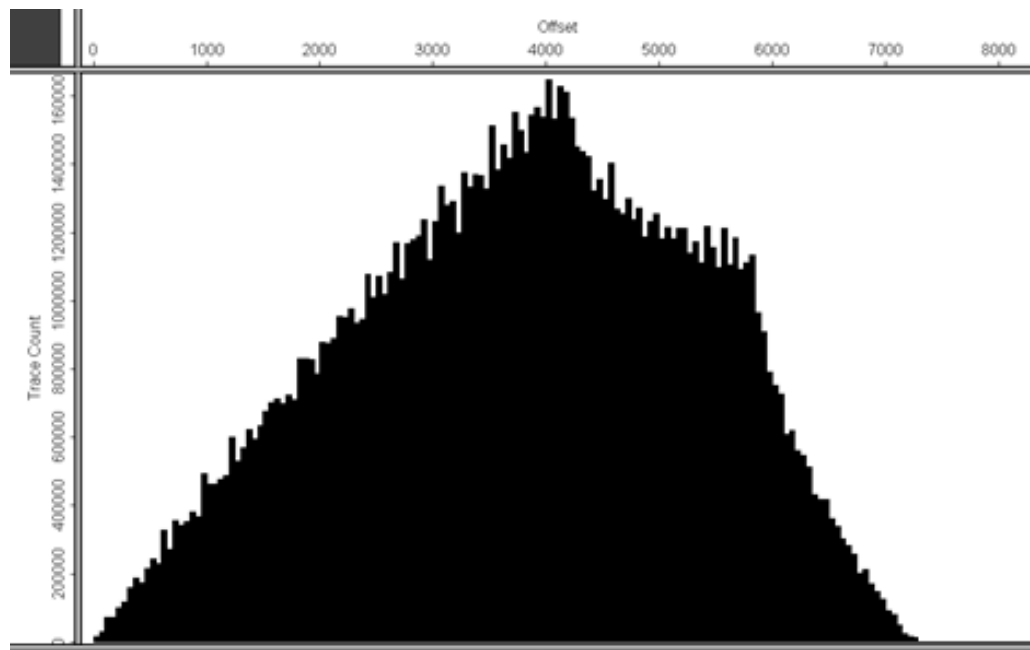


Figura 5.33 Gráfico de conteo de trazas vs offset obtenido para el diseño 1

En este grafico se observa que están cubiertos todos los *offset* diseñados en este proyecto, ya que no vemos ninguna zona vacía y esto indica que no hay ausencia de información. El mayor número de trazas de encuentra en un rango entre 4000 y 6000 m siendo una cobertura bastante aceptable para los niveles de objetivo.

Para diseños 2, se obtuvo el siguiente grafico :

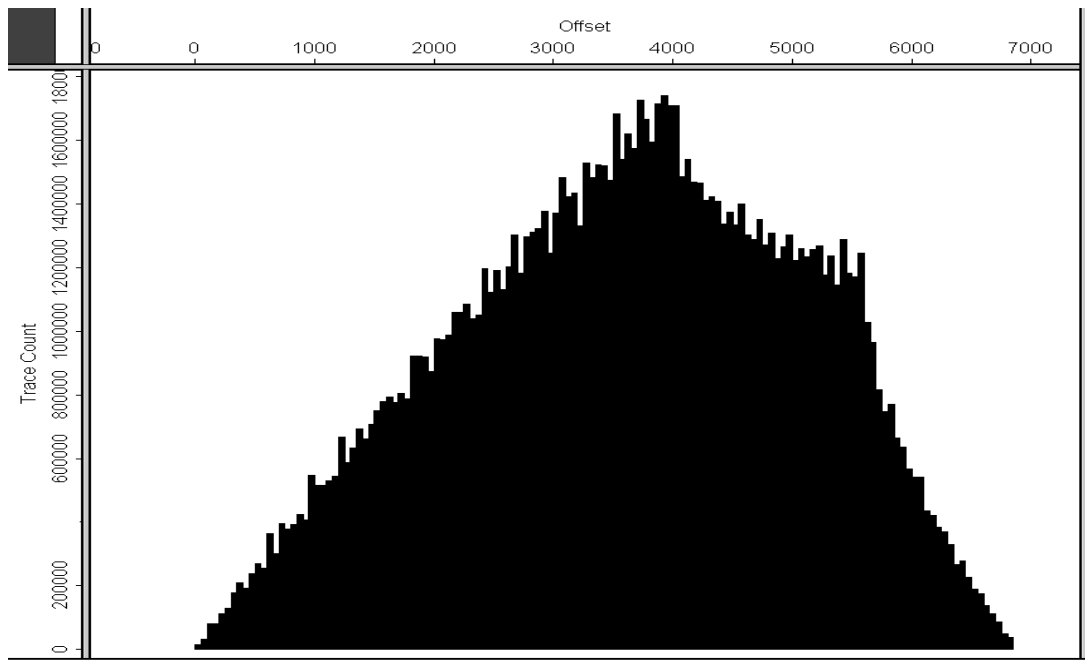


Figura 5.34 Gráfico de conteo de trazas vs offset obtenido para el diseño 1

Su distribución es similar a la anterior explicada. El mayor número de trazas se encuentra entre 4000m y 5800m un rango más pequeño que el anterior debido a que el *offset* máximo en este diseño es relativamente menor. Este rango también cubre satisfactoriamente los niveles objetivos

Este análisis permite visualizar la distribución de las trazas en todo el diseño y reconocer si existe *offset* que carecen de información, lo cual no sucede en ninguno de los dos diseños. Esto coincide con el análisis de diagrama de rosas donde vemos claramente que para el mismo rango de *offset* existe la distribución radial completa de todos los azimuth en el área por lo que este rango de *offset* tienen el mayor muestreo.

Es importante aclarar que aunque en este estudio no vemos vacío de información

para ningún tamaño de *offset*, no debemos olvidar que pueden existir diferencia bin a bin por lo que es necesario destacar el análisis anterior, esto se debe considerar en el caso de hacer estudios de reflectividad ya que estos son aplicados en un grupo de bin seleccionados.

5.13 Análisis de estudio *unique fold* y *redundance fold*

Este estudio tiene la finalidad de tener una idea de que cobertura existe para ambos diseños sin redundancia

El análisis de *unique fold* en el diseño 1, es el siguiente:

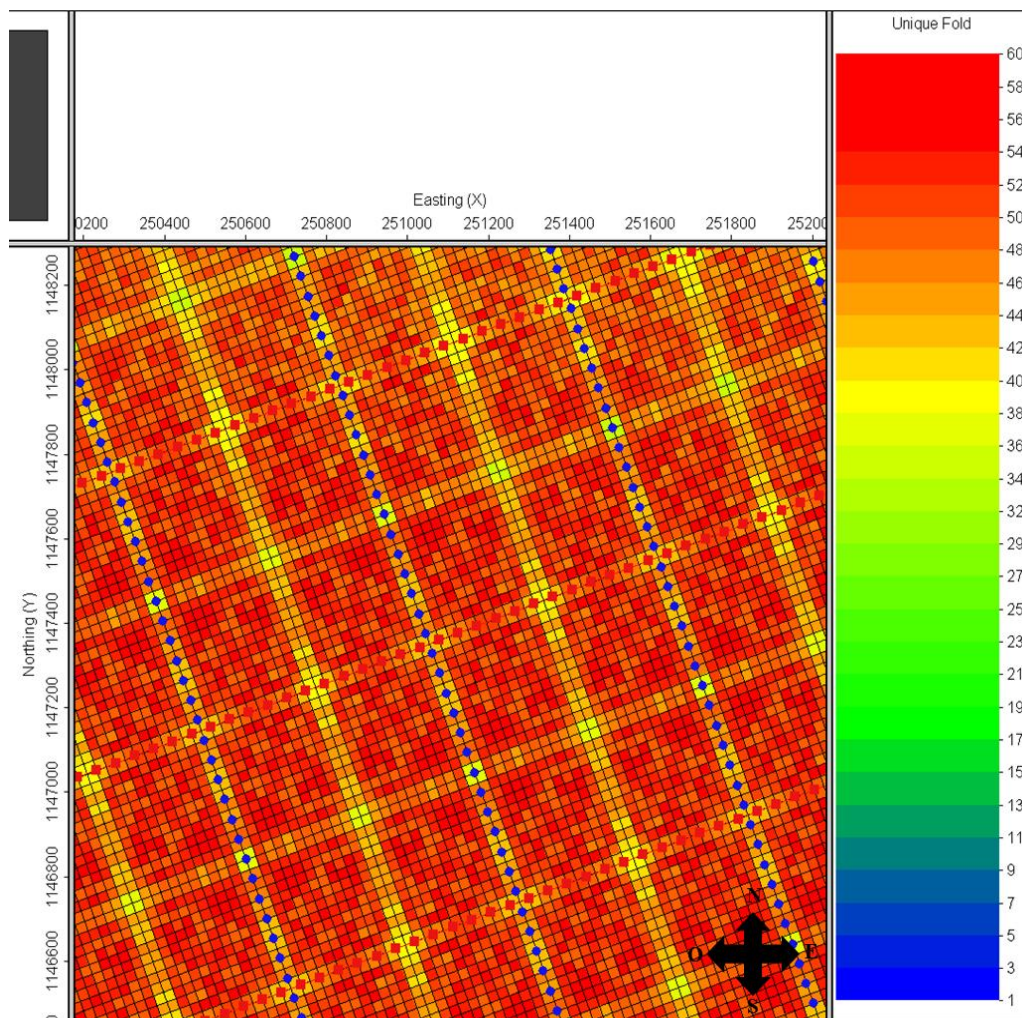


Figura 5.35 Estudio de *unique fold* (*fold* único) obtenido en el diseño 1

En esta figura del estudio del diseño 1, podemos observar que un una caja la redundancia es baja, podemos decir que para este diseño tenemos un promedio de unique fold de 56. La cobertura para este diseño es de 63 y tenemos que el unique fold que se acerca mucho a lo diseñado. El patrón se repite en todas las caja de la muestra tomada en la figura

Para el Diseño 2, este fue el resultado obtenido del análisis de unique fold:

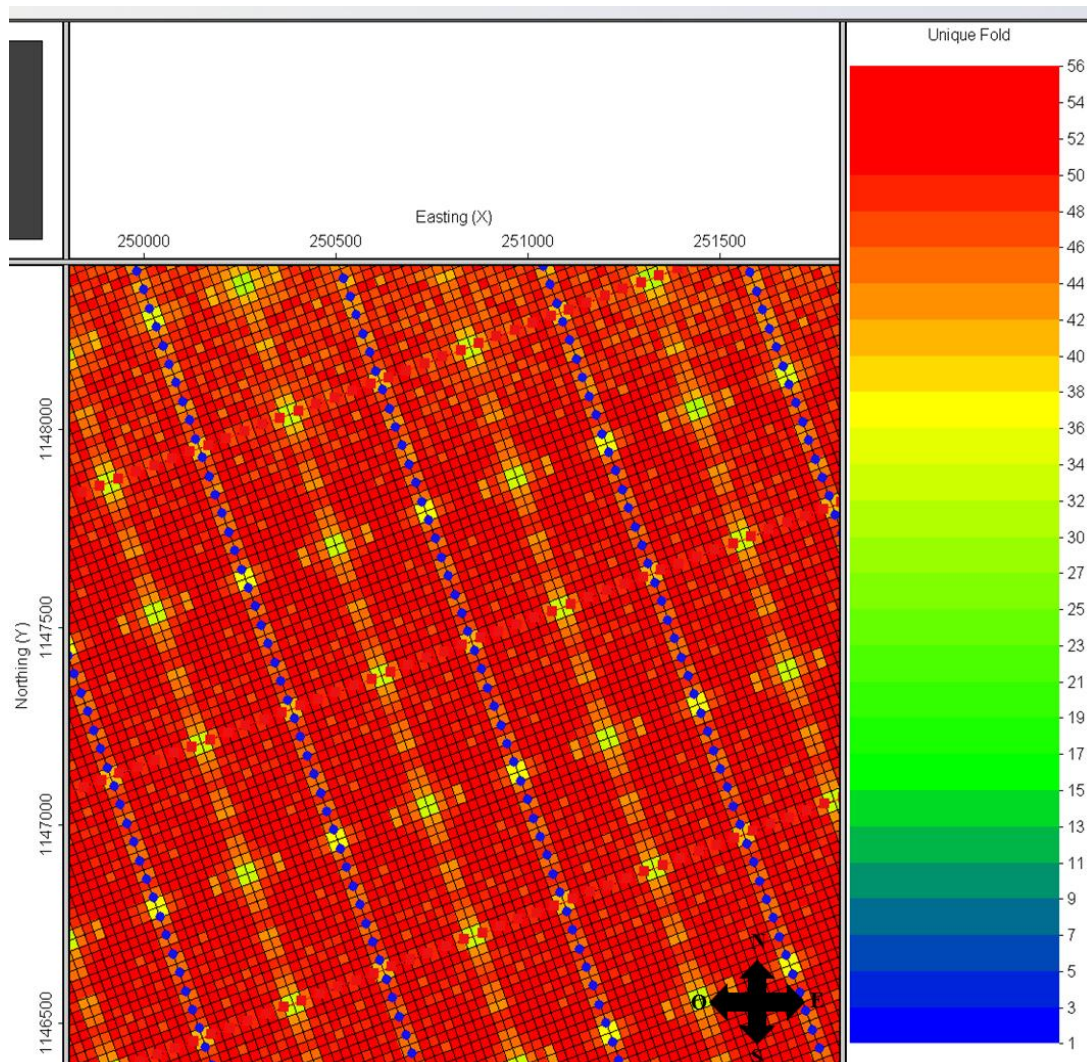


Figura 5.36 Estudio de unique fold (fold único) obtenido en el diseño 2

En el segundo diseño, este estudio se obtiene un resultado más homogéneo que en anterior. Si observamos bin a bin dentro de una caja la mayoría arroja el unique fold de 56 y disminuye hacia los bin ubicados hacia los centros de la caja (unique fol = 36).

Este estudio fue complementado con el “Redundant fold”, en donde podemos observar el número de trazas que se repiten lo opuesto al (unique fold)

En el Diseño 1, el estudio de redundant fold es el siguiente:

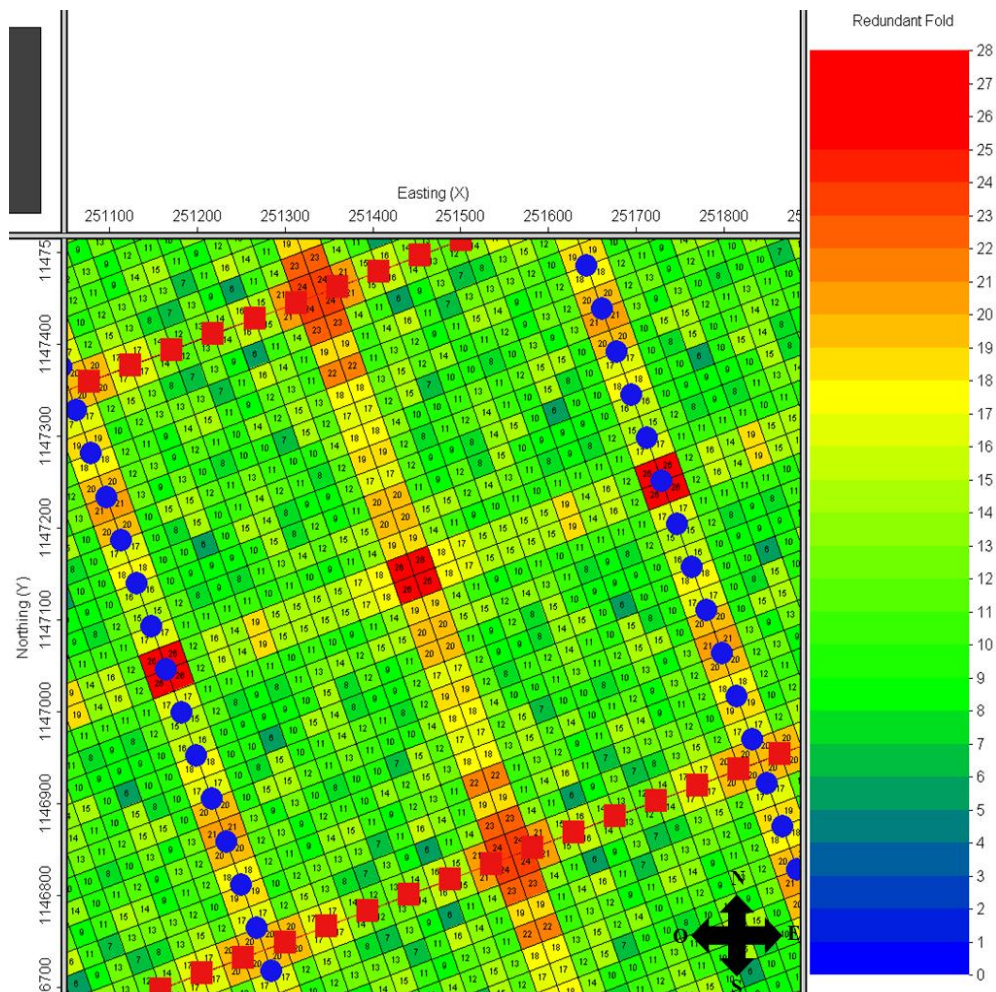


Figura 5.37 Estudio de redundant fold (fold redundante) obtenido en el diseño 1

En este análisis notamos que el mayor un número de trazas repetidas se encuentran en los bins del centro de la caja, donde son 26 las trazas repetidas. Este valor disminuye hacia los bin ubicados a los bordes de la caja, donde se tiene un promedio de 12 el número de trazas repetidas.

Este es el resultado del analisis de redundant fold para el diseño 2:

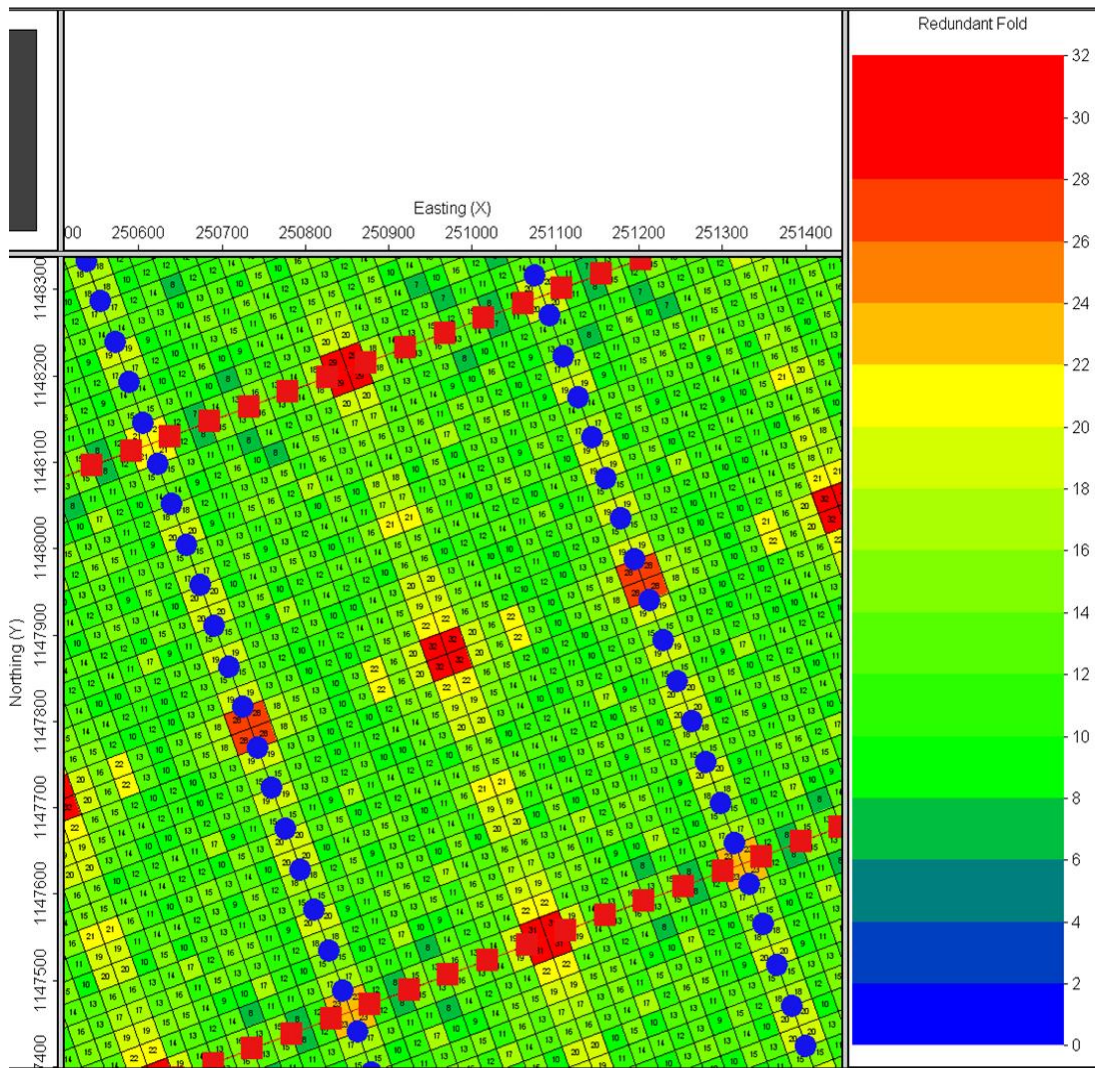


Figura 5.38 Estudio de redundant fold (fold redundante) obtenido en el diseño 2

Al igual que en el primer diseño, se encuentra en los bin del centro de la caja la mayor cantidad de trazas que se repiten (32 trazas). Este disminuye hacia los

bordes, obteniendo en estos bin solo un promedio de 12 a 13 trazas repetidas.

Para el primer diseño el número de trazas repetidas es menor que en el segundo, pero el número de bin en que se repite más trazas es mayor en el primer diseño que en el segundo. Aunque pudimos notar que en los bin centrales a la caja existe mayor número de trazas repetidas en ambos diseños, podemos decir que los valores de unique fold son bastante buenos ya que se son cercanos a la cobertura diseñada

Estos resultados del unique fold indican, al igual que el análisis de distribución de *offset*, que las reflexiones serán muy bien muestreadas, ya que tenemos un alto el porcentaje de trazas única en cada bin para ambos diseños (alrededor de un 90%).

5.14. Análisis del estudio de atenuación por número de ondas

El resultado de este estudio nos permite visualizar la atenuación que se generara en el bin después del apilado, donde obtuvimos:

En el diseño uno se obtuvo la siguiente atenuación:

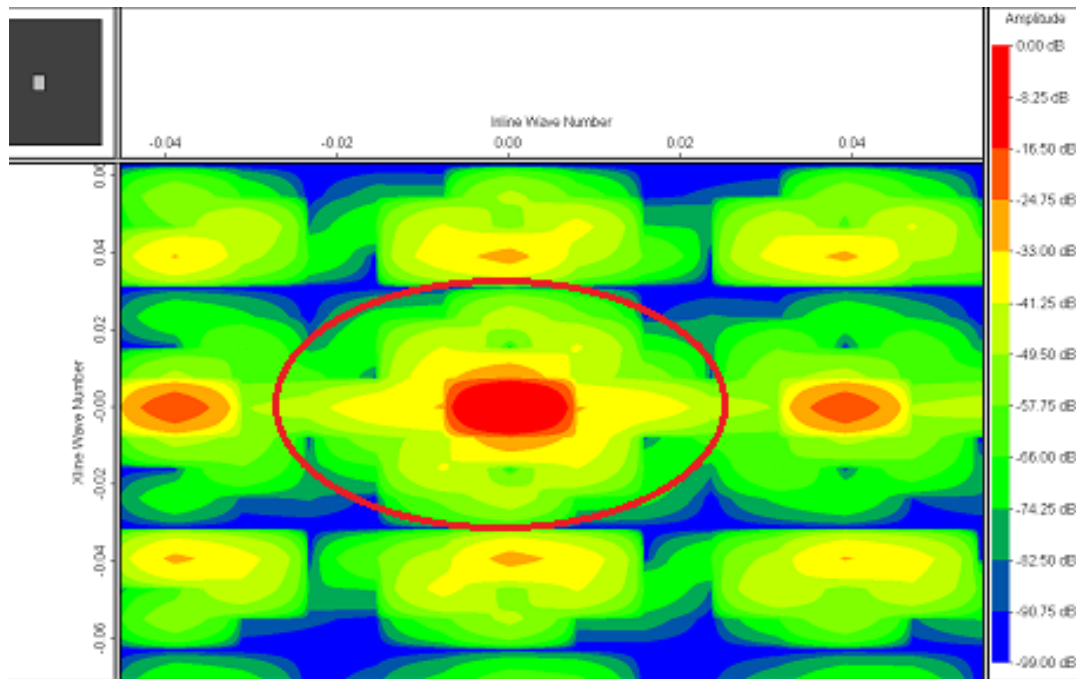


Figura 5.39 Análisis de la atenuación por número de onda obtenido para el diseño 1, se marca en el círculo rojo la atenuación que se produce en el bin

Para el primer diseño se observa con un numero de onda de cero y cercano a cero cuando se apila es lo que menos se atenúa (atenuación de 0 db), esta aumenta a media que nos alejamos del centro (aumentando el número de onda) en donde hay una atenuación de -33 db a -50 db, según este estudio.

La atenuación para el segundo diseño fue la siguiente:

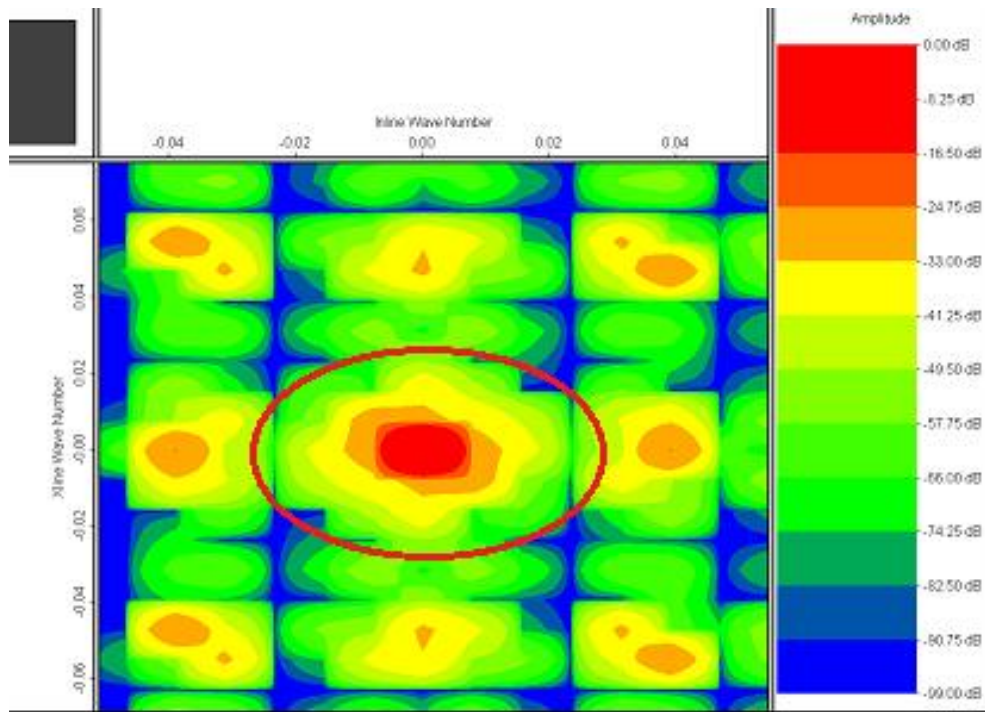


Figura 5.40 Análisis de la atenuación por número de onda obtenido para el diseño 2, se marca en el círculo rojo la atenuación que se produce en el bin

Se explica igual que el primer estudio, en donde vemos que no existe atenuación para números de onda igual a cero. El proceso de atenuación se hace mayor hacia los extremos (al aumentar el número de onda), en un rango entre -24 db y -57 db.

Para ambos diseños tenemos una atenuación similar durante el apilado como vemos en ambas imágenes; ya que estamos trabajando con un bin cuadrado y del mismo tamaño para ambos diseños (25 x 25 m) el número de onda de la dirección in-line será igual al número de onda en la dirección cross-line, lo que facilita los procesamientos que trabajen en este dominio.

Ambos estudios indican que existirá atenuación para eventos de mayor número de onda, estos eventos pueden ser asociados a bajas velocidades como fue explicado en el capítulo 3.4.21 (tamaño de bin y muestreo espacial). Entonces según este estudio el

apilado podría atenuar mejor eventos bajo número de onda que puede ser asociado a eventos de baja velocidad y alta frecuencia como el gran roll (Vermeer., 1998) y atenuaría menos eventos de mayor numero de onda los cuales podrían ser asociados a eventos velocidades mayores (como las reflexiones)

5.15 Análisis del estudio respuesta del apilado (stack analysis)

Este análisis es similar al anterior solo que en este no se refleja en número de ondas, sino que veremos la atenuación de las trazas en el bin.

La respuesta de apilado del primer diseño fue la siguiente:

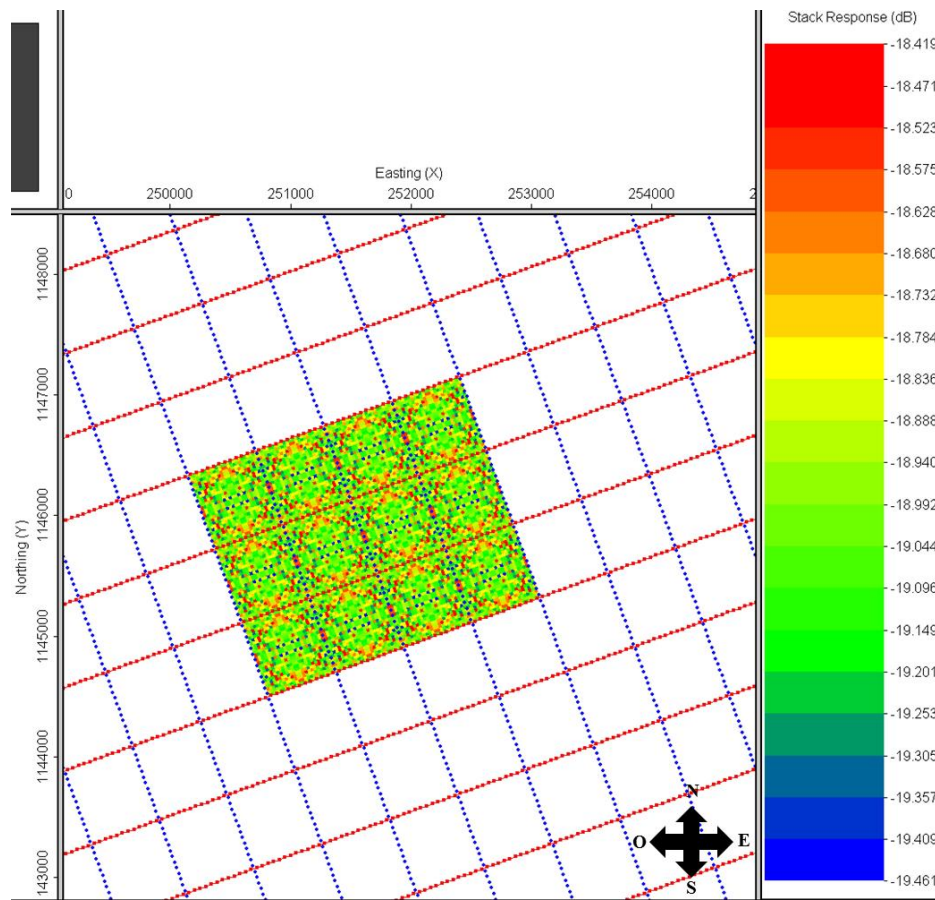


Figura 5.41 Respuesta de apilado obtenida para el diseño 1.

Claramente se observa que hay trazas que se atenúan más que otras, esto simplemente a ver el patrón de colores que se presentan en una caja y como este se repite en todas las seleccionadas para este estudio, se ve una variación entre -18,419 db a -19,461 db.

El resultado de la respuesta de apilado del segundo diseño fue este:

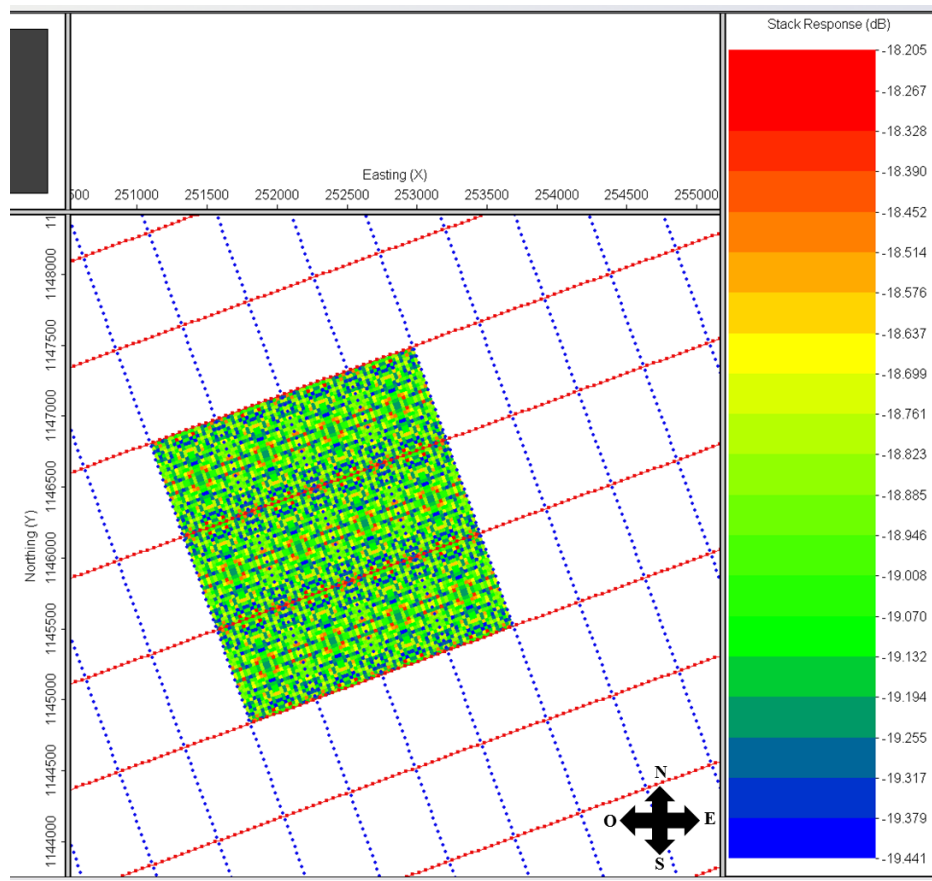


Figura 5.42 Respuesta de apilado obtenida para el diseño 2.

Para este diseño también observamos una atenuación distinta para las trazas esta van desde -18.514 db a -19.441, valores similares al diseño anterior. Aunque los valores de atenuación de trazas son similares en los dos diseños el patrón de atenuación es diferente en ambos.

En ambos diseños podemos ver que las trazas fueron atenuadas con respecto a la traza original, esto puede ser a que la distribución es *offset* es distinta. Lo importante de conocer esto es que a ver esta variación de amplitudes debemos conocer en donde existe la mayor variación por lo que se calculó la desviación estándar para ambas respuestas de apilado obteniendo así los siguientes gráficos:

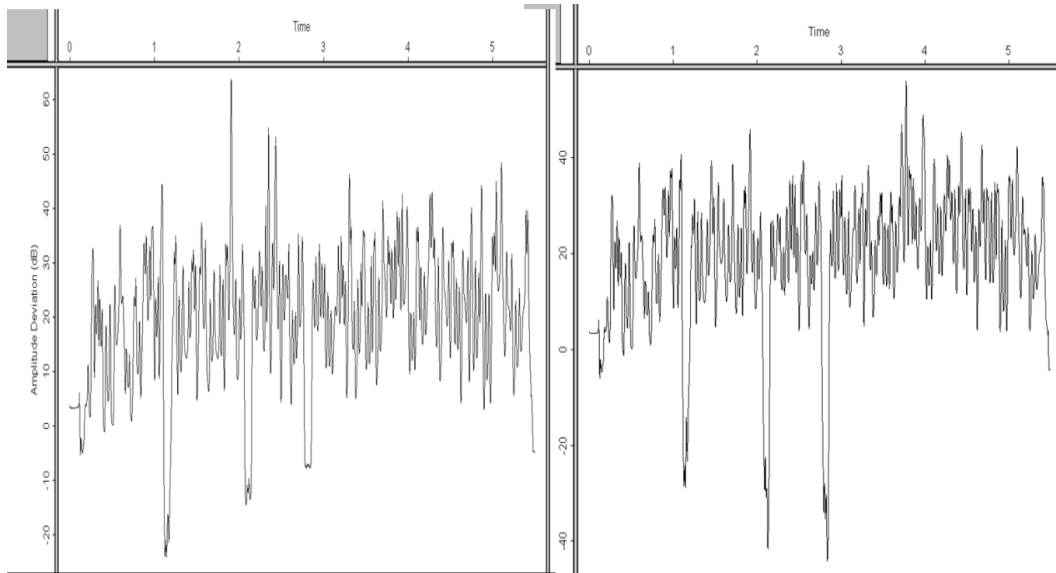


Figura 5.43 Gráfico de tiempo vs desviación de estándar de la amplitud calculado a partir de la respuesta de apilado. El gráfico de la derecha pertenece al diseño 1 y el de la izquierda al diseño 2.

Tabla 5.8 *Mediana y promedio de la desviación estándar de la amplitud obtenida para ambos diseños*

Diseño	Desviación estándar	
	Promedio	Mediana
Diseño 1	19.54	18.331
Diseño 2	18.83	21.079

Los resultados muestran que la mayor desviación estándar fue calculada para el segundo diseño, esto indica que en esta existe mayor variación de amplitudes (Cooper *et all.*, 2007) y se debe considerar que mientras mayor sea esta mayor será las posibilidades de existir foot print

Si analizamos la relación de aspecto de las cajas en ambos diseños, la primera se obtiene una relación de aspecto de 0.92 y en la segunda la relación de aspecto es de 0.71; determinando así que la caja del segundo diseño es mucho menos simétrica que la primera.

En el caso en donde la relación de aspecto de la es menor tenemos mayor probabilidad que exista una variación de distribución de *offset* más alta, por lo tanto se tendrán mayores variaciones de amplitud bin a bin lo que traerá como consecuencia mayor footprint. Aunque como este es un levantamiento exploratorio y con orientación estructural el footprint no sería un elemento tan determinante.

5.16 Análisis de los mapas de cobertura CRP

Se obtuvieron los mapas de CRP, donde vemos los puntos de reflexión común y de esta forma compararlos con la cobertura que fue diseñada. Además debemos recordar que solo fueron disparadas la fuente para las cuales existía modelo geológico, debido a que este no abarca la zona sur del diseño.

El mapa de cobertura CRP para el diseño 1 es el siguiente:

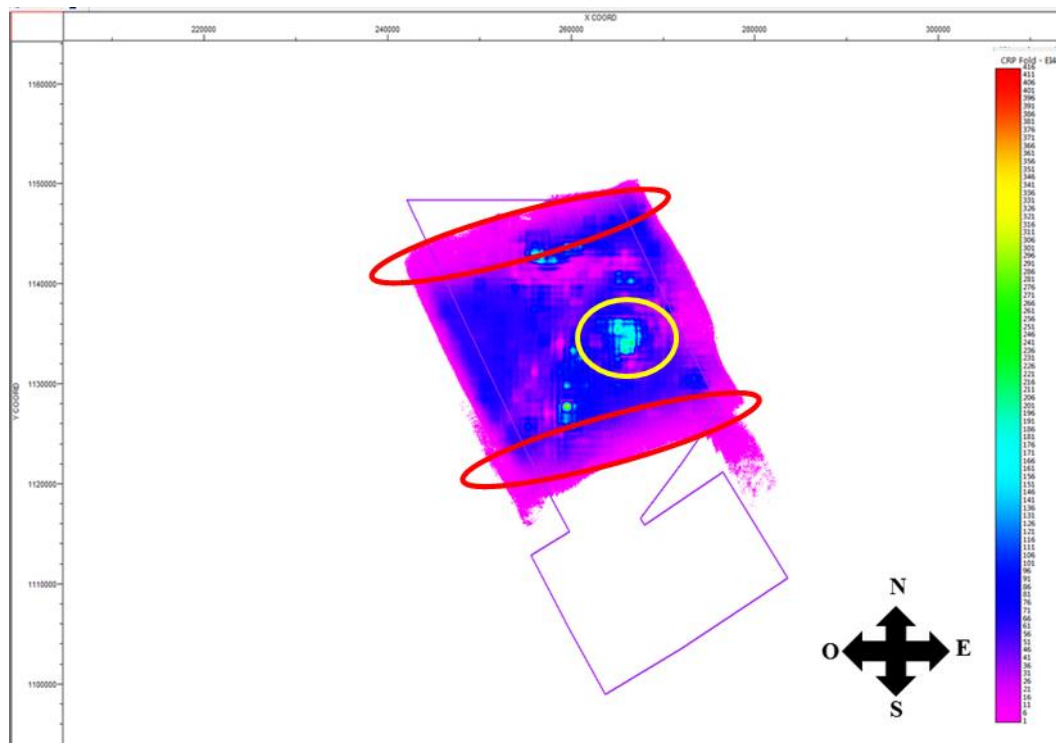


Figura 5.44 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI4 en el diseño 1. En roja se indica zona de baja cobertura asociada a las líneas fuentes no disparadas en el trazado de rayo, en amarillo se indica zona de máxima cobertura

En este mapa se observa una cobertura promedio entre 56 y 63. Se observa un máximo que está alrededor de 180 de cobertura CRP ubicado entre las coordenadas X: 260000 270000 m Y: 1250000 1300000 m, junto al cual se encuentra un mínimo de cobertura cerca de 26.

Se observan mínimos de cobertura al en los límites de estudios pero estos no podemos asociarlo a problemas de cobertura sino a que en estas zonas no fueron disparadas las líneas fuente ya que no se contaba con modelo geológico, por eso observamos un decrecimiento de la cobertura CRP en los bordes similar a un área de apertura migración.

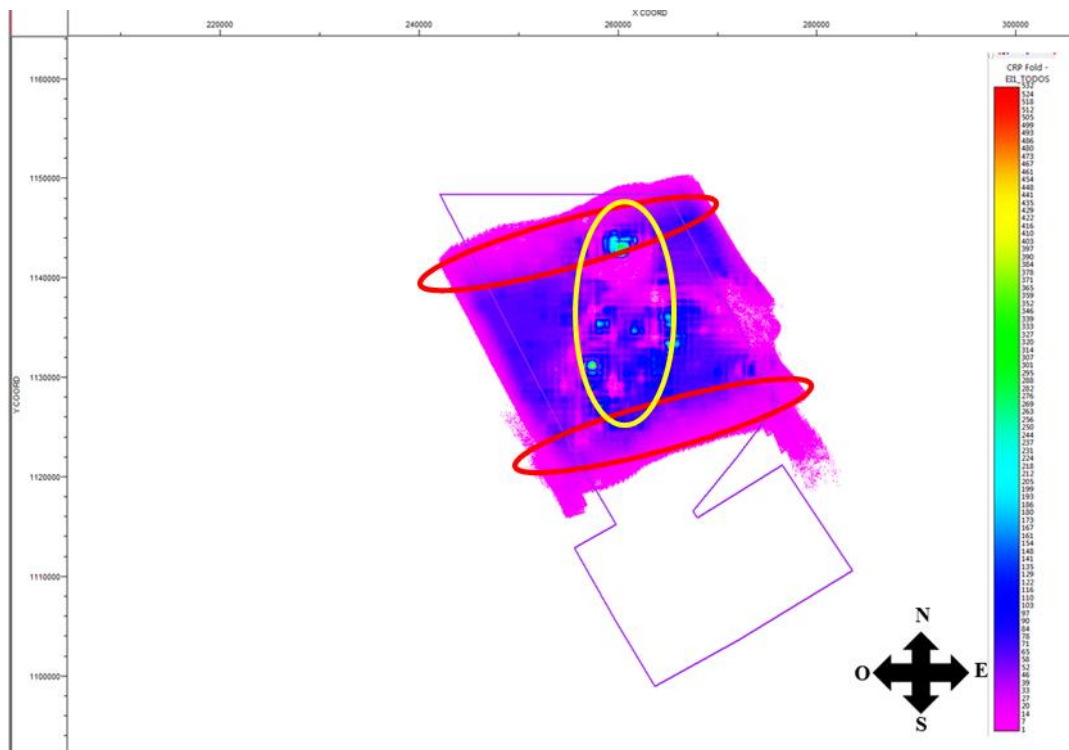


Figura 5.45 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI1 en el diseño 1. En roja se indica zona de baja cobertura asociada a las líneas fuentes no disparadas en el trazado de rayo, en amarillo se indica zona de máxima y mínima cobertura

En el mapa de la superficie EI1, gran porcentaje de la zonas estudiada posee una cobertura CRP entre 56 y 60, muy cercana a la cobertura 63 CMP diseñada. Se observa mínimos de cobertura alrededor de 25 en la zona central del mapa, los cuales vienen acompañado de un máximo de cobertura que esta alrededor de 240

Presenta una baja cobertura en los bordes del estudio, igual que en la superficie ei4, que se debe a las mismas razones ya explicadas.

Los mapas de cobertura CRP para las superficies EI1 y EI4 del primer diseño presentan resultados similares, la presencia de los máximos de cobertura se encuentra relativamente en las mismas zonas del mapa. La pérdida de cobertura CRP se ve ligeramente menor en la superficie EI1 pero se sigue teniendo una buena cobertura.

Esta zonas de alta cobertura CRP pueden ser asociadas eventos difractares, ya que este evento concentro tanta energía haciendo que esta se dispersara en esa zona aumentado así la cobertura.

Diseño 2:

Fueron calculados los mapas de la cobertura CRP para las superficies EI1 y EI4 al igual que en el primer diseño

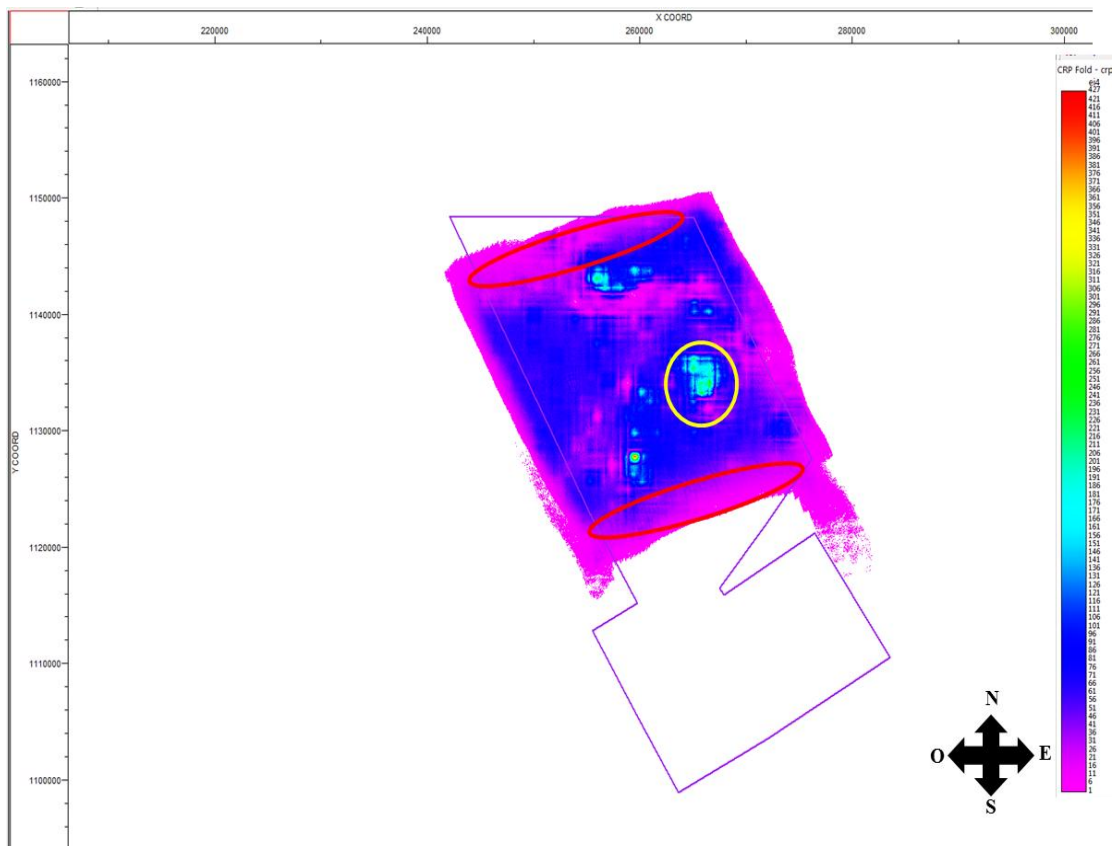


Figura 5.46 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI4 en el diseño 2. En roja se indica zona de baja cobertura asociada a las líneas fuentes no disparadas en el trazado de rayo, en amarillo se indica zona de máxima cobertura

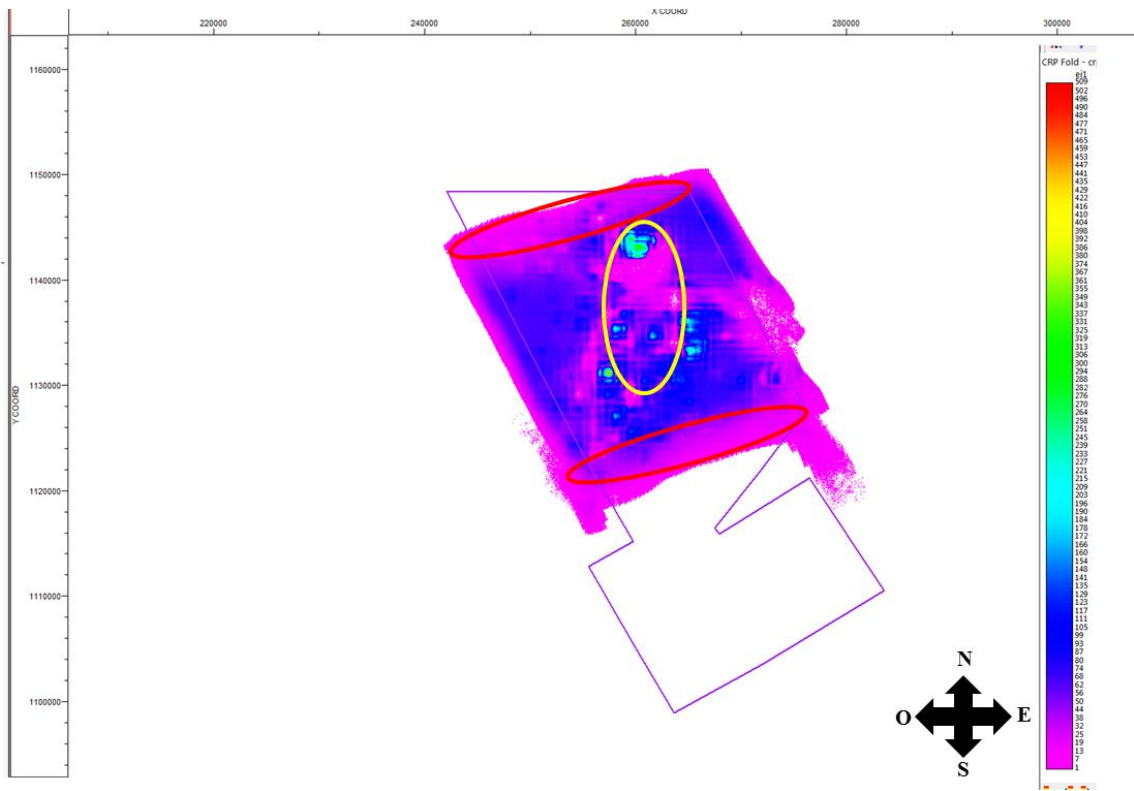


Figura 5.47 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI1 en el diseño 2. En roja se indica zona de baja cobertura asociada a las líneas fuentes no disparadas en el trazado de rayo, en amarillo se indica zona de máxima y mínima cobertura.

En la superficie EI4 (figura 5.46) notamos que la zona en dónde ubicábamos la mínima cobertura en la superficie anterior (parte central del mapa) es de menor área, la cobertura mínima sigue siendo de 20, notamos que se siguen presentando el patrón de zonas de mínima cobertura seguidas de zonas de máxima cobertura. Al igual que el mapa de cobertura CRP del primer diseño para esta superficie notamos un máximo de 220 en la misma zona de coordenadas X: 260000 270000 m Y: 1250000 1300000m.

En la cobertura CRP de la superficie EI1 (figura 5.47) se observa una cobertura promedio entre 50 y 56, similar a la cobertura CMP para este diseño que es de 64. Esta cual disminuye al centro del mapa, cercana a las coordenadas X: 255000 26500m Y:1135000 1140000m, con una cobertura mínima de 20 la cual esta seguida

de un máximo de alrededor de 233 cobertura CRP, cabe destacar que el mapa del diseño 1 y el diseño 2 para esta superficie es bastante similar, las zonas donde se presenta la mínima cobertura abarca más área para este diseño.

En ambos mapas la franja de baja cobertura en los bordes está asociada a las líneas fuentes no disparadas, como ya explicamos. También asociamos estas zonas de alta cobertura a eventos que pueden ocasionar difracción de la energía.

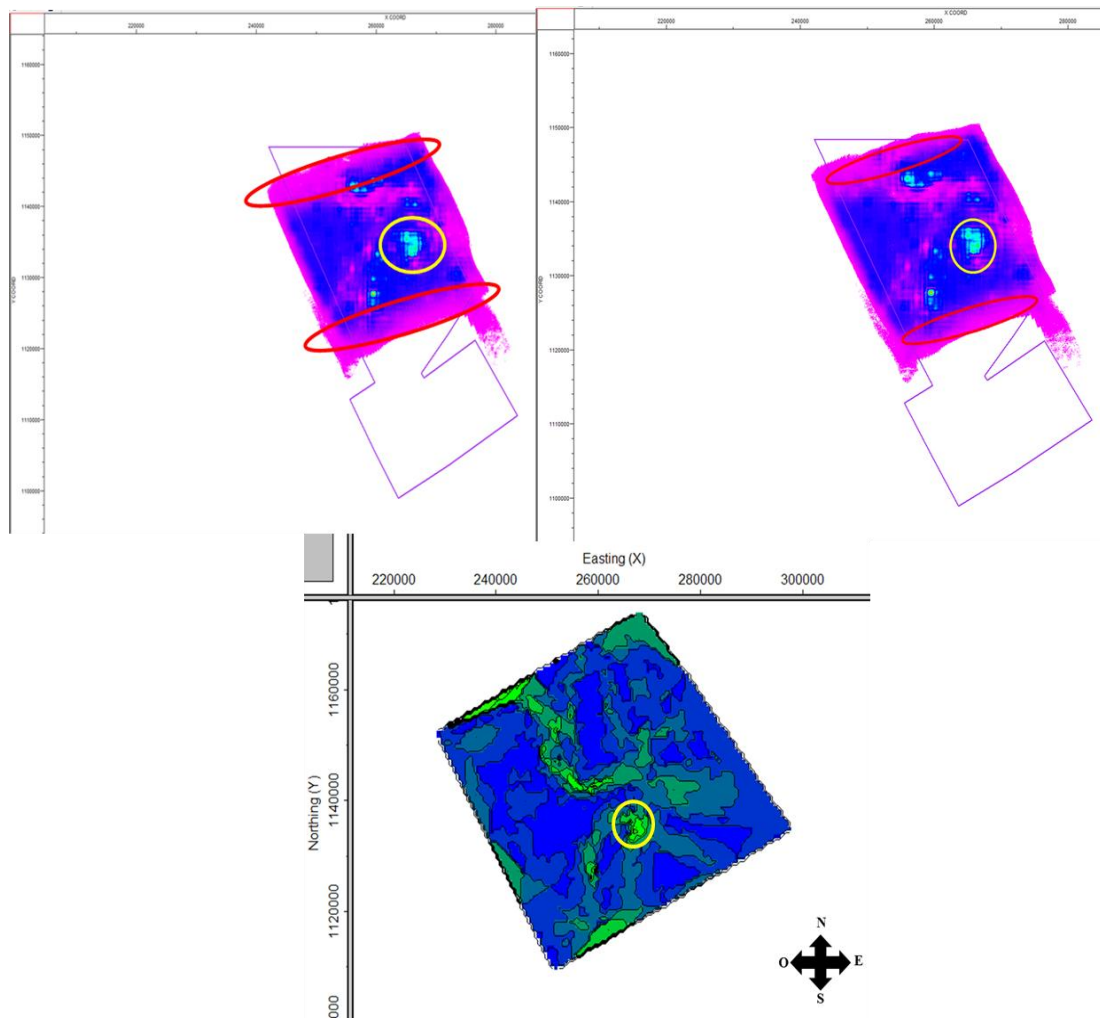


Figura 5.48 Mapa de cobertura CRP para la superficie EI4, en la parte superior derecha corresponde al diseño 1, izquierda diseño 2. En la amarilla se indica zona de difracción, comparándola con el mapa de buzamiento para esta superficie identificando posibles eventos que la causan.

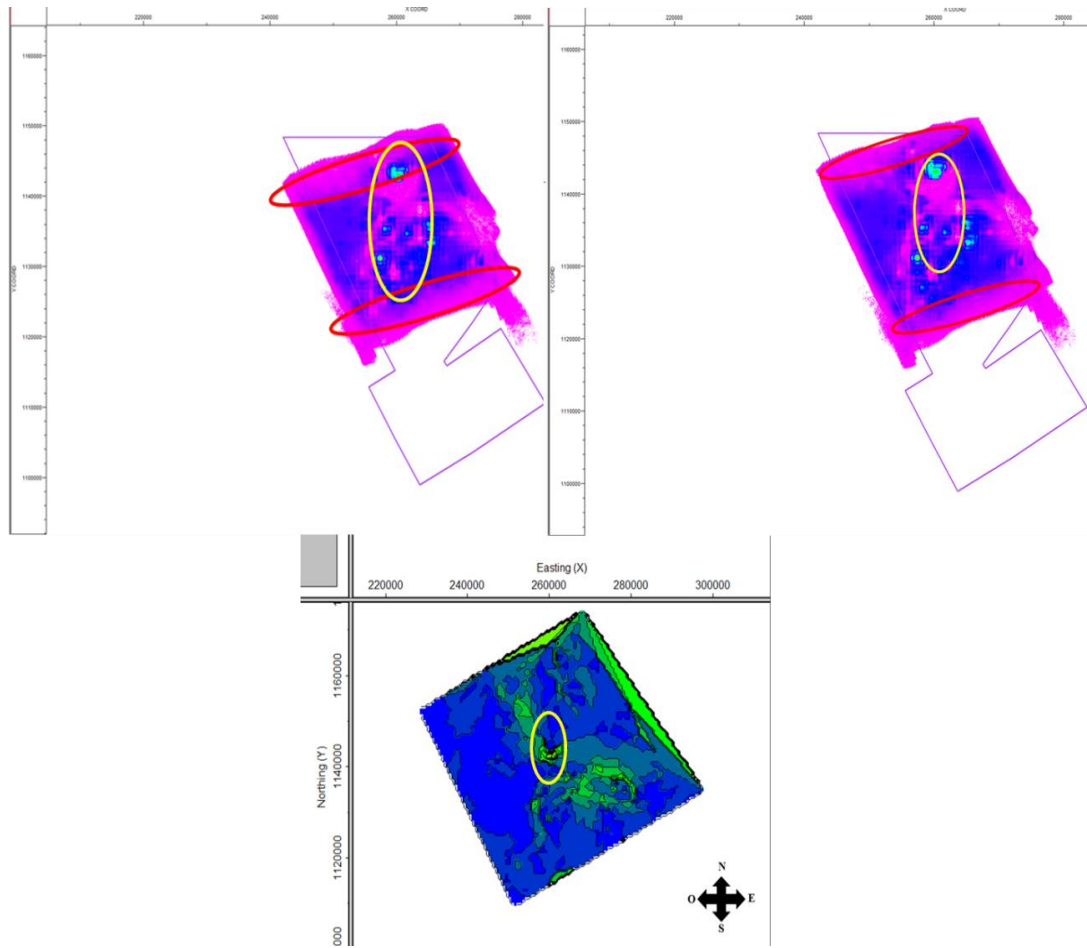


Figura 5.49 Mapa de cobertura CRP para la superficie E11, en la parte superior derecha corresponde al diseño 1, izquierda diseño 2. En la amarilla se indica zona de difracción, comparándola con el mapa de buzamiento para esta superficie identificando posibles eventos que la causan.

En ambos diseños notamos un mínimo de cobertura hacia el norte del mapa, parte de este problema se puede deber a que no se dispararon las líneas fuente más al norte. Esta cobertura debería de aumentar si contribuyeran las trazas generadas por todas las fuentes apagadas. A esto se suma eventos que puedan ocasionar difracción. Haciendo comparación con el mapa de contornos generado para esta superficie notamos que en la zona de difracción hay un evento característico que podría ser el que origine esta dispersión de energía (figura 5.48), lo que trae como consecuencia que se pierda cobertura CRP en la zona adyacente del máximo, debido a que los puntos de reflexión

se concentran en este evento

También se compara el mapa de contorno de la superficie E11 con los mapas de cobertura CRP de ambos diseños y podemos asociar en elemento geológico señalado en la figura, como el origen de la difracción para esta área (figura 5.49).

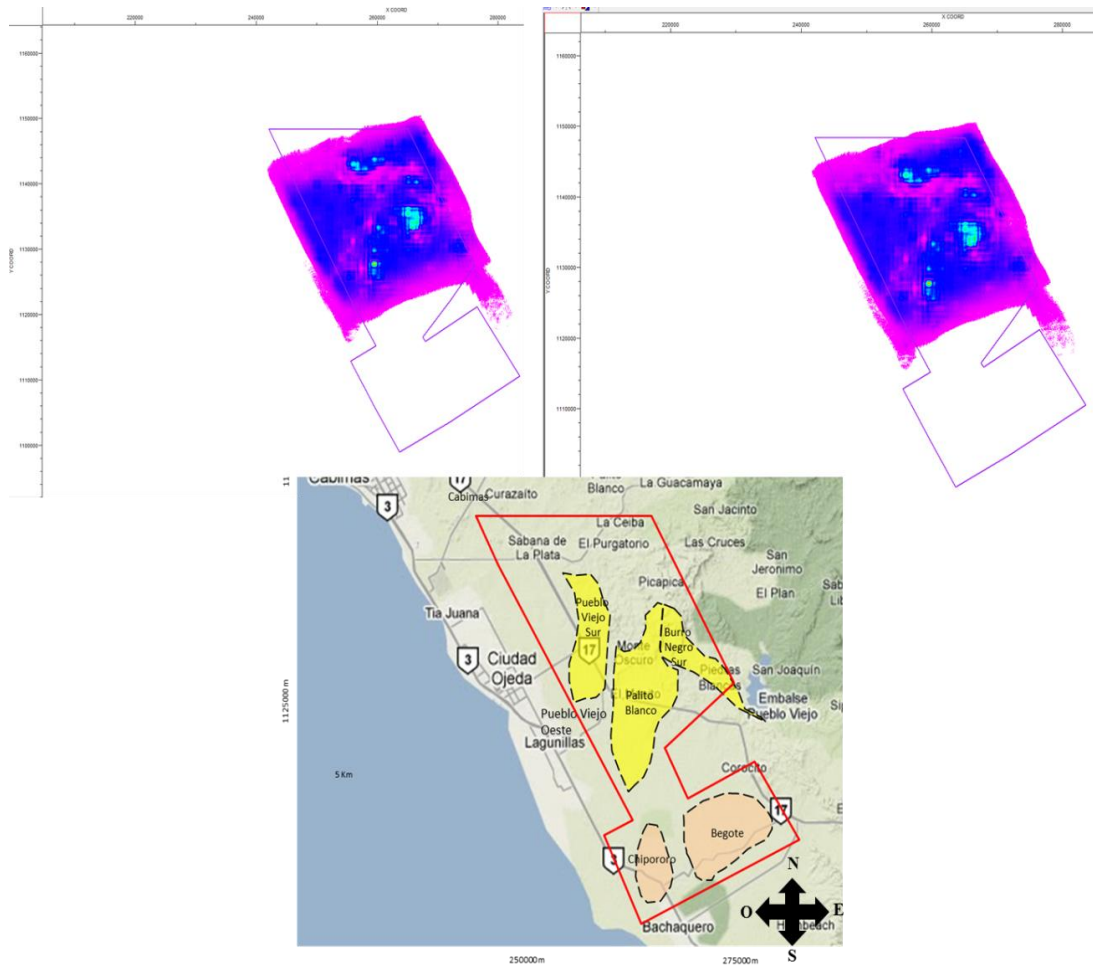


Figura 5.50 Mapa de cobertura CRP para la superficie E14, en la parte superior derecha corresponde al diseño 1, izquierda diseño 2. El mapa inferior corresponde a la ubicación de los prospecto en el área de estudio

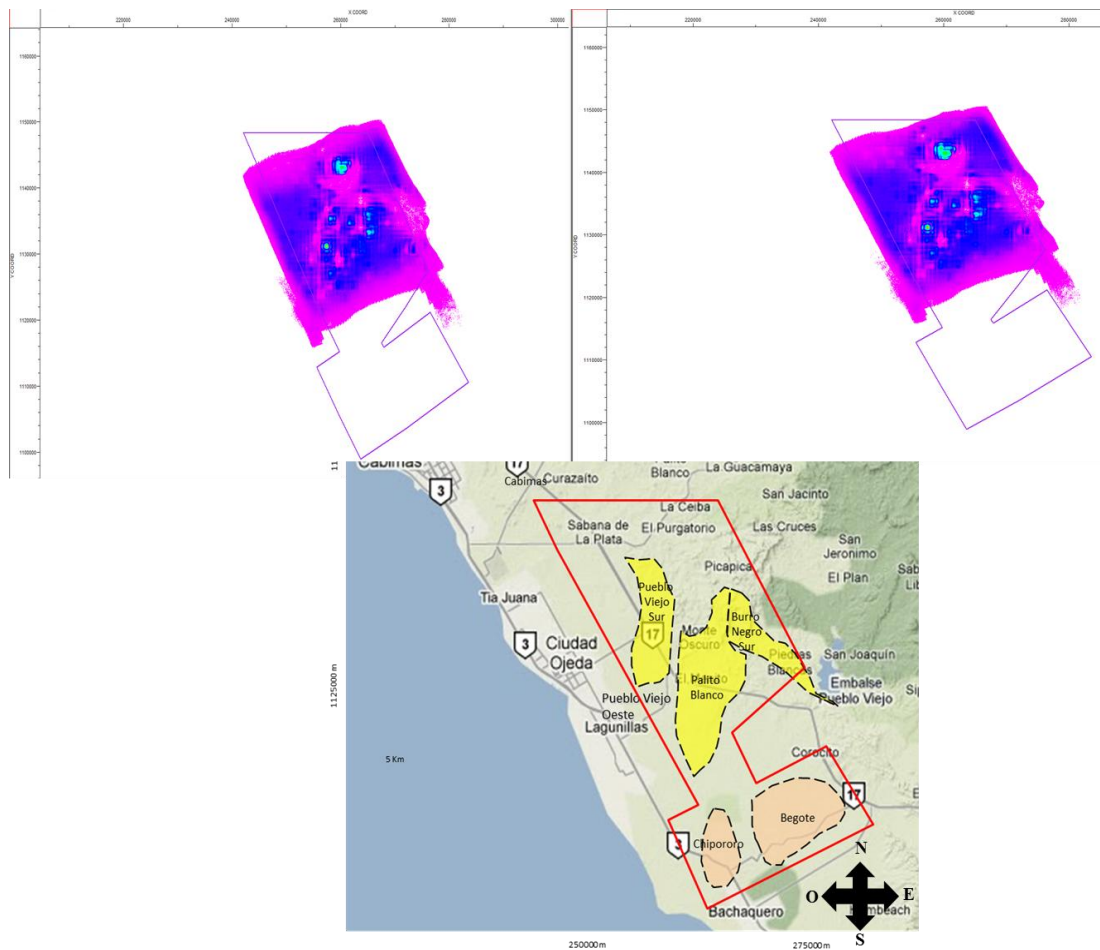


Figura 5.51 Mapa de cobertura CRP para la superficie EII, en la parte superior derecha corresponde al diseño 1, izquierda diseño 2. El mapa inferior corresponde a la ubicación de los prospectos en el área de estudio

Este análisis de cobertura CRP permite visualizar que ambos diseños iluminan casi toda la zona del proyecto ya que ambos diseños se ve una cobertura bastante cercana a la cobertura CMP diseñada. La cobertura CRP que vemos en el extremo norte y sur del mapa puede incrementar en el momento que sea disparadas todas las líneas. En términos cualitativos, las zonas en la que están ubicados los prospectos son de buena cobertura CRP siendo esta levemente mayor ara el primer diseño. (Figura5.50 y 5.51).

Para los prospectos ubicados al sur del área no se logró completar el trazado de rayo

debido a que el modelo geológico suministrado por la Gerencia de Proyecto no se extiende hasta estas coordenadas, por lo cual no podemos hacer un estudio de cobertura CRP para esta área, aunque cabe destacar que según la tabla 4.2 los prospectos ubicados al norte, tiene un carácter de mayor prioridad ya que acumulan mayor porcentaje de crudo. Esto quiere decir que ambos diseños satisfacen de una buena manera las necesidades de iluminación para los prospectos donde el interés de exploración es mayor, esto fue facilitado gracias a cada análisis detallado anteriormente explicado que permitieron optimizar e innovar el proceso de diseño para lograr que los resultados teóricos sean los más parecidos a los que se obtendrán en el momento de la adquisición.

5.17 Análisis económico

El costo total de una adquisición sísmica 3D depende de las características del diseño y del área total de la adquisición. Una estimación del costo total de la sísmica se puede calcular a partir del número total de disparos o fuentes y con el conocimiento del valor unitario de estos disparos.

El precio unitario del disparo se ve influido por las condiciones del terreno, el tamaño del proyecto, ya que una geología más complicada aumentará el valor de esta así como también un mayor número de tiros tendrá un valor menor al de un proyecto de menor envergadura.

En la zona de la costa oriental del lago del Edo. Zulia fue calculado que el punto de tiro tiene un costo alrededor de 2500 \$, que por razones de confidencialidad de datos por parte de la empresa no se puede dar un desglose detallado de este costo.

Tabla 5.9 Tabla de costos asociados a cada diseño

	Diseño 1	Diseño 2
Costo del disparo (\$)	2500	2500
Densidad de disparo por km ²	28,66	26,62
Área de la adquisición (km ²)	1623	1623
Total de disparos	46516	43200
Valor por km ²	71650	66550
Valor total (\$)	116290000	108000000

Al comparar los costos entre ambos diseños podemos notar que el diseño 1 es más costoso que el diseño 2, lo cual es lógico debido a que este tiene una densidad de disparo mayor a la del segundo diseño.

Tener un mayor número de tiros en el diseño 1 contribuye a que se tenga un mayor muestreo de la zona, con este diseño; lo cual beneficia la calidad de los datos obtenido a través de este arreglo como se puede notar en los anteriores análisis. El conociendo de esta información será de gran aporte al momento de tomar una decisión técnico-económica final.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Los levantamientos sísmicos realizados anteriormente en la zona, poseen una frecuencia máxima alrededor de los 50 hz, valor que permite resolver un espesor de 100 a 150 pies, el cual es requerido por la Gerencia de Proyectos Exploratorios Occidente para el Levantamiento ZON fase 2.

Debido a la alta complejidad estructural que presenta la zona a iluminar mediante adquisición sísmica 3D, se seleccionó un bin de 25x25 m, el cual se comprobó posee el tamaño óptimo para el muestreo de la señal sin aliasing espacial.

La presencia de un domo en la superficie Colon no es determinante para la selección del buzamiento máximo, ya que este elemento geológico sólo se presenta en esta superficie, por lo cual se decidió tomar un buzamiento máximo de 30°, el cual constituye un valor representativo del buzamiento para toda el área.

El valor del *offset* “mínimo máximo” está influenciado por el valor de la cobertura requerida (necesaria para establecer el intervalo entre líneas receptoras) y de la definición del reflector más somero de interés.

Ya que la complejidad estructural del modelo geológico produce un aumento de los valores de *offset* máximo hacia la zona central del modelo, cuya asunción sobreestimaría la iluminación en profundidad de los objetivos en el resto del área, se decidió seleccionar el valor de *offset* máximo (6500 m) sin la influencia de este elemento geológico.

Para los dos diseños generados, los análisis de distribución de *offset* aseguran una buena contribución. de diversas longitudes de *offset* y una redundancia de trazas, siendo el diseño 1 levemente mejor en este último análisis; cumpliendo ambos el objetivo de poseer la característica “narrow azimuth”.

El diagrama de araña para ambos diseños muestra una adecuada distribución

azimutal muy similar para ambos diseños, mostrándose una buena contribución radial de *offset* lejanos, medios y cercanos; por lo cual se afirma que los dos diseños permitirán que la energía que llegue a ser difractada por los eventos geológicos presentes en el área, podrá ser muestreada. Esto en virtud de los resultados del análisis del Diagrama de Rosa, donde los *offset* entre 800m y 4500 m (cercanos y medios) contribuyen en los 360° del levantamiento y los lejanos con un azimutuh de 110° a 230° y 310° a 40°

Los resultados de los análisis de “unique fold” y “redundant fold” indican que el 90% de las trazas a ser generadas por la adquisición sísmica, no se repiten en un mismo bin. Esto garantiza una buena relación señal ruido (S/R), contribuyendo a la atenuación del ruido en el apilado de dichas trazas.

Los estudios de los análisis de atenuación por número de onda, muestran una atenuación de -33 a -50 dB y de -24 a -57 dB hacia los extremos alejados del bin para los diseños 1 y 2 respectivamente; lo cual indica que en ambos los eventos de baja velocidad tipo ground roll serán atenuados mientras los de alta velocidad asociados a reflexiones tendrán una mínima atenuación. Esta característica en la atenuación estará presente tanto en dirección inline como crossline, ya que ambos diseños poseen un bin cuadrado y de la misma dimensión.

Debido a que el estudio del análisis de la respuesta del apilado, no arrojó un resultado concluyente sobre la atenuación de las trazas para ambos diseños, se realizó un análisis de la desviación estándar de la amplitud. Esta arrojó una mayor variación de la amplitud para el segundo diseño, lo cual es consistente con su relación de aspecto (0.71) de su caja, haciendo que la variación de amplitud bin a bin sea mayor en el diseño 2. Esto lo hará más susceptible a la presencia del “footprint” durante la adquisición, sin embargo esta “desventaja” no es significativa dado el carácter de iluminación estructural que persigue la adquisición.

El análisis de cobertura en CRP para ambos diseños es muy cercana a la cobertura CMP diseñada, presenta una buena iluminación del área en general del proyecto

(levemente mejor para el primer diseño), por lo que no se sugirieron modificaciones a los diseños propuestos ya que se considera que las condiciones de iluminación del subsuelo se logran satisfacer a excepción de pequeñas zonas puntuales en donde la cobertura disminuye hasta valores de 16.

El análisis económico efectuado indica que el diseño 1 tiene un costo mayor al del diseño 2, debido a la mayor cantidad de disparos del primero, ocasionando que el diseño 1 otorgue un mayor muestreo de los objetivos a iluminar en profundidad.

RECOMENDACIONES

Dada la ausencia de un modelo geológico que incluya los leads Chipororo y Begote, se recomienda utilizar la información disponible que exista para calcular los parámetros de adquisición adecuados para la iluminación de estos objetivos.

De igual forma se recomienda una vez obtenidos los parámetros óptimos de adquisición de los leads Chipororo y Begote, evaluar su posible empalme con el diseño seleccionado del presente trabajo de grado, a fin de obtener un eventual bin de adquisición único para todos los objetivos exploratorios.

A fin de obtener mayor cantidad de datos para un muestreo adecuado y representativo del área a ser objeto de iluminación mediante adquisición sísmica, en particular la frecuencia dominante, se recomienda procesar y/o reprocesar líneas sísmicas adicionales a las utilizadas en el presente trabajo de grado.

Con el propósito de poder definir con mayor exactitud valores de algunos parámetros del diseño como el *offset* máximo y mínimo, se recomienda se realice la interpretación sísmica de un mayor número de secciones y líneas sísmicas presentes en el área.

Debido a los resultados de cobertura CRP en zonas puntuales con baja cobertura en relación con la cobertura diseñada, se recomienda tomar en cuenta este eventual comportamiento de los datos adquiridos en campo, para el procesamiento sísmico de los mismos

Al comparar en conjunto los resultados de los análisis realizados a los diseños 1 y 2, dada la escasa diferencia en calidad de datos y sobre la base de optimización de costos, se recomienda ejecutar la adquisición correspondiente al diseño 2.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Audemard, F. (1991). "*Tectonics of Western Venezuela*". Tesis Doctoral, Rice University, Houston Texas, USA.

Autores varios. (2013). 3D Desing Basics – P wawe. Ion [Charged with innovation].[Página Web en Línea]. <http://www.iongeo.com/> [Consulta: 2013, Mayo, 3]

Balaguera, A., (2010). "*Diseño y optimización de parámetros de adquisición para un levantamiento sísmico 3D, ubicado en un bloque del Área Junín, Faja Petrolífera del Orinoco*". Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas-Venezuela

Benguigui A y Páez A, 2006. "*Proyecto Tigre - Pueblo viejo estudios regionales del sistema petrolífero exploración*" PDVSA Exploración y Producción. P 9-73

Calleja R, (1998) "*Cuenca del lago de Maracaibo Geología II*". La Universidad del Zulica. P 3-71.

Chaouch, A y Mari J, (2006). "*3-D Land Seismic Surveys: Definition of Geophysical Parameters*". Oil and Gas Science and Technology. Vol 61, No 5. P 611-630.

Contreras O, Pacheco J y Larrazábal G, (2008). "*Trazado de rayos sísmicos usando un algoritmo genético*". Revista ingeniería UC . Vol. 15, No 1,P 50-58.

Cooper, J., Margrave F., Lawton 2007, "*Simulations of seismic acquisition footprint: CREWES Research Report*", 19, 28.1-28.20p

Cordsen, A., Galbraith, M. y Peirce, J., (2000). "*Planning Land 3-D Seismic Surveys.Geophysical Developments*".Series N° 9. Society of Exploration Geophysicist. USA.

De Toni B, Loureiro D, Colletta B, Roure F, Gou Y; Marquez C, (1994) “*Análisis geológico integrado de las cuencas de Barinas Y Maracaibo. Síntesis estructural*”. INTEVEP, P. 5 – 106.

Falconer, S., (2008). “*Footprint removal: Master`s thesis*”, University of Houston.

GEDCO (2012). Notas técnicas de OMNI. Disponible en Internet: <http://www.gedco.com/omni/TechNotes/TechNote-OW.htm>. Consultado el 25 de Abril de 2013.

Gesbert, S., (2002), “*From acquisition footprints to true amplitude: Geophysics*”, Pag 67, 830-839.

Granda A, Cambero J, (2000). “*Comentarios al método sísmico de reflexión en sus aplicaciones en el ámbito de la geotecnia y la hidrogeología*” Ingeopress.

Ghosh S, Pestman P, Melendez L, Bartok P, Lorente M, Duran I, Pitelli R, Rull V, Mompart L, White C, Dominguez C, Oropeza S, Travoglio F. (1995). “*Síntesis Geológica, Marco secuencial y perspectivas exploratorias del Eoceno de la Cuenca Maracaibo*” Informe Maraven EPC-13494. P 1-59.

González de Juana C, De Arozena I, Picard X. 1980. “*Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petro líferas*”. Caracas, Ed. Foninves, Tomo I y II.

Herrera Y, Cooper N, 2010 “*Manual para la adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia*”. Universidad de Colombia. P 18-118.

IASPEI (2006). “*New Manual of Seismological Observatory Practice*”. Volumen 1. P 2 – 12.

Knott, C. (1989), “*Reflexión y refracción de ondas elásticas con aplicaciones sismológicas*”. Philosophical Magazine 48. p. 64-97.

Lugo J, Mann P (1995).“*Jurassic-Eocene tectonic Evolution of Maracaibo Basin*”, Venezuela.A.A.P.G.Mem. 62: 699-725

Margrave, G. y Manning, P. (2004).“*Seismic Modelling: An Essential Interpreters Tool*” Calgary: CSEG National Convention.

Magrave, G., Cooper, J., (2007) “*Seismic Modelling in 3D for Migration Testing: CREWES Research Report*”, CREWES Project, Annual Research Report, Volume 9. Pag 19-25.

PDVSA-CGG (1991) *Proyectos Zulia-Oriental, Informe Final.*

PDVSA-CGG,(1997) *Informe Final De Procesamiento De Datos Sísmicos Oro Negro 2D.*

PDVSA-MARAVEN (1995). *Reporte Final levantamientos Sísmico Lagunillas - Bachaqueros*

PDVSA-SOLOPETROL (1997) *Adquisición De Datos Sísmicos En El Área De Bachatero, Informe Final.*

Pérez, G. (2008). *Modelado 3D de velocidades interválicas de Onda P a partir de registros de pozo. Campo Santa Bárbara.* Tesis de Pregrado. Universidad SimónBolívar. Caracas, Venezuela.

Pestman, P., Ghosh S, Meléndez L, Lorente, (1998), “*Marco tectonoestratigráfico y paleogeografía de la Cuenca de Maracaibo y áreas vecinas durante el Paleógeno,*” Bol. Soc. Venezolana de Geol. Vol.23.1, pp. 28-45.

Ruiz Muñoz David (2004) “*Manual de Estadísticas*” Eumed-net. Pag 11 -20

Schlumberger (1997). “*Evaluación de pozos*”. Caracas Venezuela. Cap 1, P. 3- 28.

Talukdar S, Marcano F, 1994 *“Petroleum Systems of the Maracaibo Basin, Venezuela”* Cap 29, P 463-480

Verdugo Hernan (1993) *“Difracción e interferencia- principio de Huygenst”*.P. 1-8

Vermeer,. (1998) *3-D symmetric sampling, Geophysics, G.J.O 63*, Pag 1629-1647.