

**DISEÑO DE UNA ADQUISICIÓN SÍSMICA 3D PARA EL CAMPO ESCUELA
COLORADO**

JAVIER CAMILO MATEUS RIVERA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2010

**DISEÑO DE UNA ADQUISICIÓN SÍSMICA 3D PARA EL CAMPO ESCUELA
COLORADO**

JAVIER CAMILO MATEUS RIVERA

Trabajo de grado para optar el título de Geólogo

DIRECTOR

SAÚL ERNESTO GUEVARA OCHOA

MSc. en Geofísica

CODIRECTORES

Jorge Eduardo Pinto Valderrama

MSc. En Informática

William Mauricio Agudelo Zambrano

PhD. en Geofísica.

ASESOR

Francisco Gamboa Ortega

Físico.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FÍSICO-QUÍMICAS

ESCUELA DE GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2010

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico con gran cariño a Dios por acompañarme en todo momento, a mis padres Miguel, Cleofelina y mis hermanos Ricky y Laura por ser mi apoyo, mi fortaleza y mi ejemplo a seguir en cada etapa de mi vida.

A mis primos Natalita y Darío y mi tía Ilsa por albergarme en su hogar, por considerarme como un miembro más de su familia y apoyarme en todo momento.

A mis dos abuelitas, Alida y Susana por brindarme su cariño y amor, por sus sabios consejos y ser mi ejemplo de vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi Director Saúl Guevara por su apoyo incondicional, por ser mi maestro, por sus buenos deseos y sabios consejos.

A Francisco Gamboa y María Teresa por ser pacientes y enseñarme a manejar algunos programas, aconsejarme y ayudarme a sacar adelante este proyecto.

Al Instituto Colombiano del Petróleo y en especial a las personas del departamento de geofísica como William Agudelo, Alexandra Plata, Andrés Calle, Danny Rueda y Sandra Becerra.

Al grupo de investigación PETROSISMICA pues allí nació mi gusto por la geofísica y le debo todo lo que he aprendido en este campo de investigación. A su director Andrés Calle, a Lorena Giraldo, Ingrid Tello, Elkin Hernández, Wilson Ibañez y Cristian Zafra porque pasamos gratos momentos durante mi estadía en el grupo de investigación y aún seguimos siendo muy buenos amigos.

A Leydy Valencia por ser mi apoyo durante todo este tiempo y porque ocupa un lugar muy especial en mi vida.

A mis amigos de la escuela de geología con los que compartí desde un principio y que me han brindado su amistad incondicional durante todo este tiempo como Oscar Llamosa, Diego Gómez, Mayra Vargas, Adriana Prada, Adriana Castro, Álvaro Solano, Carlos Hernández y Karl Leonard.

A las personas valiosas que tuve la oportunidad de conocer durante este largo camino y que han sido buenos amigos como Heber Bueno, Ever Gonzalez, Aura Uribe, Gabriel Mendoza, Xavier Gómez, Erich Caballero y Carlos Mejía, a todos ellos los llevo en mi corazón.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCION | 16 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 18 |
| 2. OBJETIVOS..... | 19 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL | 19 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS | 19 |
| 3. MARCO TEÓRICO | 20 |
| 3.1 SÍSMICA DE REFLEXIÓN | 20 |
| 3.1.1 Punto común en profundidad ó CDP | 22 |
| 3.1.2 Cubrimiento ó <i>Fold</i> | 23 |
| 3.2 ADQUISICIÓN SISMICA 3D | 24 |
| 3.3 DISEÑO DE UNA ADQUISICIÓN SISMICA 3D | 30 |
| 3.3.1 Parámetros de diseño..... | 31 |
| 3.4 TEORÍA DE TRAZADO DE RAYOS | 43 |
| 4. MARCO GEOLÓGICO..... | 46 |
| 4.1 LOCALIZACIÓN | 46 |
| 4.1.1 Estratigrafía | 47 |
| 4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL DE LA CUENCA..... | 53 |
| 4.2.1 Estructura del Campo Colorado..... | 54 |
| 4.3 IMPLICACIONES DE LA GEOLOGIA EN EL DISEÑO DE PARAMETROS | 56 |
| 5. METODOLOGÍA | 58 |
| 5.1 Recopilación de Información | 59 |
| 5.1.1 Sísmica 2D del Campo Colorado..... | 59 |
| 5.1.2 Cálculo de las frecuencias en la formación objetivo (Fm Mugrosa.) | 62 |
| 5.1.3 Cálculo del buzamiento de las formaciones objetivo | 70 |
| 5.1.4 Cálculo de la profundidad del objetivo geológico | 72 |
| 5.1.5 Cálculo de las velocidades RMS en los objetivos | 73 |
| 5.2 CÁLCULO DE LOS PARAMETROS BASICOS DEL DISEÑO 3D | 80 |
| 5.2.1 Frecuencia máxima (Fmax) | 81 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.2 Tamaño del Bin..... | 82 |
| 5.2.3 Intervalo de Fuentes (SI) y Receptores (RI) | 84 |
| 5.2.4 <i>Fold</i> | 84 |
| 5.2.5 Máximo <i>Offset</i> y Mínimo <i>Offset</i> (X_{max} y X_{min}) | 85 |
| 5.3 GENERACIÓN DEL DISEÑO SÍSMICO 3D | 86 |
| 5.3.1 PARAMETROS DEL DISEÑO SISMICO 3D | 86 |
| 5.3.2 Diseños sísmicos iniciales | 92 |
| 5.3.3 Optimización de los parámetros de diseño | 96 |
| 5.3.4 Análisis del área de Adquisición. | 99 |
| 5.4 PREPARACIÓN DEL MODELO GEOFÍSICO | 102 |
| 5.4.1 Cargar las superficies al programa de modelado por trazado de rayos | 103 |
| 5.4.2 Asignarles valores de velocidad de onda P, onda S y Densidad para cada uno de los intervalos entre 2 interfaces..... | 105 |
| 6. RESULTADOS..... | 109 |
| 6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO..... | 116 |
| 7. CONCLUSIONES | 117 |
| 8. RECOMENDACIONES..... | 119 |
| 9. BIBLIOGRAFIA | 120 |

LISTA DE FIGURAS.

| | |
|--|----|
| Figura 1 Esquema del recorrido de los rayos reflejados en tres capas para una posición de tiro y dos estaciones receptoras (geófonos). Debido a que el tiempo de llegada de las ondas aumenta con el offset, las reflexiones quedan marcadas en el registro sísmico como trayectorias hiperbólicas..... | 21 |
| Figura 2. Método sísmico de reflexión en 2D..... | 21 |
| Figura 3. Punto en el subsuelo iluminado por varios rayos procedentes de diferentes pares Fuente-Receptor. | 23 |
| Figura 4. Diagrama que representa gráficamente los términos Dirección <i>Inline</i> y <i>crossline</i> , fuentes, receptores e intervalos entre ellos, líneas de fuentes y receptores, Offset, Xmin, Bin y Box. | 25 |
| Figura 5. Definición de <i>Patch</i> y <i>Template</i> y su relación con otros términos..... | 26 |
| Figura 6. Diagrama que ilustra la relación del Patch con Xmax..... | 27 |
| Figura 7. Resumen de los principales términos utilizados en adquisición sísmica 3D. El <i>Midpoint</i> y el reflector están en subsuelo mientras que los demás parámetros están en superficie..... | 29 |
| Figura 8. Profundidad de la Formación objetivo principal y secundaria de la adquisición sísmica..... | 33 |
| Figura 9. Velocidad <i>RMS</i> (línea punteada) y velocidad de intervalo (línea continua). La línea punteada viaja a velocidad de apilamiento, o sea V_n , y demora un tiempo equivalente a las flechas llenas, que viajan con velocidad de intervalo, V_i | 35 |
| Figura 10. Relación de Fold Taper con la apertura de migración y el Fold total. ... | 41 |
| Figura 11. Elementos de un modelo sísmico para ejecutar el trazado de rayos. ... | 43 |
| Figura 12. Propagación de los rayos a través de un modelo sísmico. Estos rayos salen de una fuente y llegan a varios receptores..... | 45 |
| Figura 13 Localización general del área de estudio..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 14. Columna generalizada de la Cuenca del Valle medio del Magdalena. Dentro del recuadro rojo se encuentran las formaciones de interés para el proyecto. | 48 |
| Figura 15. Corte Geológico de la cuenca del Valle Medio del Magdalena. | 54 |
| Figura 16. Línea sísmica DM-89-1440. Sentido NW-SE. | 55 |
| Figura 17. Mapa geológico del Centro de la Cuenca de VMM. El campo Colorado se encuentra dentro del círculo verde. | 56 |
| Figura 18. Metodología planteada para el desarrollo de este proyecto. | 58 |
| Figura 19. Geometría de adquisición del Proyecto San Luis 1995. | 61 |
| Figura 20. Geometría de adquisición del Proyecto De Mares 1987. | 62 |
| Figura 21. Ubicación espacial dentro del campo Colorado de las líneas sísmicas utilizadas en este proyecto. | 62 |
| Figura 22. Línea SL-1995-1420. Ubicación del pozo dentro de la línea en tiempo. | 64 |
| Figura 23. Medición de un periodo de la traza en 4 diferentes CDP´s a diferentes tiempos (vertical) dentro de la Línea SL-1995-1420. | 65 |
| Figura 24. Línea SL-1995-1290. Ubicación del pozo COL 18 (CDP 1000) dentro de la línea en tiempo. | 66 |
| Figura 25. Medición de un período de la traza en 3 diferentes CDP´s a diferentes tiempos (vertical) dentro de la Línea SL-1995-1290. | 67 |
| Figura 26. Carga de geometría de la línea DM-1987-1470. | 69 |
| Figura 27. Frecuencias de la línea sísmica DM-1987-1470. | 69 |
| Figura 28. Diagrama de dispersión del registro <i>Dipmeter</i> en los 18 pozos | 70 |
| Figura 29. Estereoneta de los datos <i>Dipmeter</i> del Campo Colorado | 71 |
| Figura 30. Variación de la profundidad de la Fm. Mugrosa en los 75 pozos. | 72 |
| Figura 31. Línea sísmica DM-1987-1470E. Podemos observar que los reflectores interpretados se encuentran desde los 700 a 1600 ms en los bloques donde se encuentran los pozos. | 74 |
| Figura 32. Diagrama de dispersión de las velocidades Vs la profundidad en 3 puntos de tiro distintos. Dentro del círculo se encuentran los valores de interés. | 75 |

| | |
|---|-----|
| Figura 33. Línea sísmica SL-1995-1290. Dentro del círculo se observa el anticlinal de colorado. | 76 |
| Figura 34. Velocidad RMS vs Profundidad. Conociendo el intervalo de tiempo, se puede hallar la velocidad RMS que se busca. | 77 |
| Figura 35. Sección sísmica SL-1995-1420. La discordancia del Eoceno-paleoceno se encuentra cerca de los 1000 ms y sirve como límite para el intervalo de tiempo. | 78 |
| Figura 36. Velocidad RMS vs Profundidad. Conociendo el intervalo de tiempo, se puede hallar la velocidad RMS que se busca. | 78 |
| Figura 37. Área inicial del diseño sísmico 3D..... | 89 |
| Figura 38. Área total de adquisición..... | 92 |
| Figura 39. Diseño # 1 modelado en OMNI 3D | 93 |
| Figura 40. Diseño # 2 modelado en OMNI 3D | 94 |
| Figura 41. Diseño # 3 modelado en OMNI 3D | 95 |
| Figura 42. Optimización del diseño # 1 | 98 |
| Figura 43. Optimización del Diseño # 2 | 99 |
| Figura 44. Optimización del Diseño # 3 | 99 |
| Figura 45. Corte paralelo a la dirección de buzamiento. a) mayores buzamientos del flanco izquierdo del anticlinal. b) Mayor buzamiento del flanco derecho del anticlinal..... | 100 |
| Figura 46. Corte en la dirección del rumbo. Los mayores buzamientos se encuentran hacia el norte del anticlinal..... | 101 |
| Figura 47. Trazado de rayos “cero offset” en corte de buzamiento. Se observa la trayectoria de los rayos a partir de la base de la Fm. Esmeraldas (color café claro). | 101 |
| Figura 48. Corte en la dirección del eje del anticlinal. Los rayos salen de la base de la Fm. Esmeraldas. | 102 |
| Figura 49. a) puntos XYZ para cada interface. b). superficie generadas a partir de la nube de puntos | 104 |
| Figura 50. Interfaces del modelo geofísico en el programa NORSAR 3D..... | 105 |

| | |
|---|-----|
| Figura 51. Modelo geofísico con V_p , V_s y ρ para cada bloque. La escala de colores indica la velocidad en cada bloque. La superficie color lila representa la topografía y las líneas negras son las fuentes (dirección Y) y receptores (dirección X) del diseño sísmico..... | 108 |
| Figura 52. Cruce de rayos en modelado cero offset. Los receptores en esta zona no captan todas las trayectorias de los rayos. | 109 |
| Figura 53. <i>Fold</i> calculado a partir del modelado por trazado de rayos sobre Mugrosa C3 con el diseño # 1. | 110 |
| Figura 54. Vista de planta del <i>Fold</i> calculado en la subzona C3 con el diseño #1. | 111 |
| Figura 55. <i>Fold</i> calculado a partir del modelado por trazado de rayos sobre Mugrosa C3 con el diseño # 2. | 112 |
| Figura 56. Vista de planta del <i>Fold</i> calculado en la subzona C3 con el diseño # 2. | 113 |
| Figura 57. <i>Fold</i> calculado a partir del modelado por trazado de rayos sobre Mugrosa C3 con el diseño # 3. | 114 |
| Figura 58. Vista de planta del <i>Fold</i> calculado en la subzona C3 con el diseño # 3. | 115 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Frecuencias de las líneas en los reflectores de interés | 63 |
| Tabla 2. Velocidades RMS en 3 líneas sísmicas distintas para las mismas formaciones. | 74 |
| Tabla 3. Resumen de los datos de entrada para el cálculo de parámetros del diseño 3D..... | 79 |
| Tabla 4. Datos de entrada para el cálculo de parámetros básicos del diseño..... | 80 |
| Tabla 5. Cálculo de la frecuencia máxima para línea sísmica. | 81 |
| Tabla 6. Tamaño del Bin | 82 |
| Tabla 7. Tamaño del Bin en función de la resolución lateral. | 83 |
| Tabla 8. Cálculo del <i>Fold</i> para las 3 líneas sísmicas..... | 84 |
| Tabla 9. Resumen de los parámetro básicos obtenidos..... | 86 |
| Tabla 10. Flujo de trabajo propuesto por Cordsen | 88 |
| Tabla 11. Cálculo del <i>Fold</i> inline y xline. | 89 |
| Tabla 12. Cálculo de la apertura de migración | 90 |
| Tabla 13. Cálculo del <i>Fold</i> taper para los 6 diseños propuestos | 91 |
| Tabla 14. Nuevos valores para el diseño de parámetros. Con estos valores se elimina el <i>footprint</i> de los diagramas de <i>Fold</i> | 97 |
| Tabla 15. Velocidad de la onda P en el pozo Colorado 75 para cada Bloque. | 105 |
| Tabla 16. Velocidad de la onda S en el pozo Colorado 75 para cada Bloque. F1 y F2 corresponden a $(V_s)_{\text{arena}}$ y $(V_s)_{\text{arcilla}}$ respectivamente. | 107 |
| Tabla 17. Valores de V_p , V_s y RHOB del pozo colorado 75 para cada Bloque... | 107 |
| Tabla 18. Costo total de la adquisición 3D. | 116 |

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE UNA ADQUISICIÓN SÍSMICA 3D PARA EL CAMPO ESCUELA COLORADO¹

AUTORES: JAVIER CAMILO MATEUS RIVERA²

PALABRAS CLAVES: adquisición sísmica 3D, Diseño sísmico 3D, Fold, iluminación

DESCRIPCIÓN

El campo colorado actualmente tiene problemas de baja producción debido al taponamiento de las tuberías por parafinas y la complicada continuidad lateral del reservorio. Dentro de los planes de desarrollo del campo Colorado existe la posibilidad de realizar proyecto de adquisición de datos sísmicos 3D que permita encontrar nuevas zonas prospectivas y mejorar los modelos geológicos, petrofísicos y estructurales del yacimiento.

La sísmica de reflexión 3D es una herramienta en la exploración de hidrocarburos que permite adquirir de forma indirecta una imagen de la geometría del subsuelo. El diseño sísmico 3D es la etapa en la que se involucra datos sísmicos, datos geológicos y datos de pozo para determinar la configuración más apropiada para realizar una adquisición de datos sísmicos 3D. Para esto es necesario calcular los parámetros de adquisición que garanticen la calidad de los datos que se van a adquirir. Este proyecto está orientado al cálculo de estos parámetros utilizando una metodología que involucre datos de pozo, sísmicos y geológicos del campo.

El cálculo de parámetros se hizo siguiendo la metodología propuesta por Cordson et al, 2000 y utilizando una hoja de cálculo, luego se escogieron los diseños que cumplan con la restricción propuesta Cooper, 2004 para evaluar el Fold obtenido con estos diseños sísmicos 3D sobre un modelo geofísico del campo.

Los resultados obtenidos de los 3 diseños propuestos a partir del modelado por trazado de rayos muestran una buena iluminación de la principal zona productora del campo, pero luego de hacer un análisis económico se concluye que la opción más viable sería el diseño # 3 ya que muestra la mejor relación costo-beneficio.

¹ Proyecto de grado

² Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Geología.

Director M.Sc. Saúl E. Guevara

Codirectores: William M. Agudelo, Jorge E. Pinto.

ABSTRACT

TITLE: LAND 3D SEISMIC DESIGN TO COLORADO FIELD¹

AUTHOR: JAVIER CAMILO MATEUS RIVERA²

KEYWORDS: 3D seismic acquisition, 3D seismic design , Fold, illumination

DESCRIPTION

Colorado field have many problems of oil production due to well obstruction by paraffins and reservoir lateral continuity complicated. Actually, is necessary planning a 3D seismic acquisition to find new prospect zones and to improve petrophysical, structural and geologic models in Colorado field.

3D seismic reflection is a powerful tool for oil exploration and it allows acquiring an indirect imaging of the subsurface geometry. 3d seismic design is the initial stage and it involves seismic, well and geologic data to decide the best array for 3D seismic acquisition. For this, is necessary to calculate acquisition parameters that ensuring data quality. This project is focused in calculating the parameters using a methodology that involving well, seismic and geologic data field.

Parameters were calculated using the methodology proposal by Cordsen et al, 2000 and using a spreadsheet. Then I choose the designs according to Cooper restriction to test fold getting from these designs over a geophysics field model.

The results of the 3 proposed designs from raytracing modeling show good illumination in the main reservoir of the field, but after to make an economic analysis concluded that the most feasible option would be design # 3 because it shown the best cost-effective relation.

¹ Graduate project

² Universidad Industrial de Santander. Faculty of Physical and Chemical Engineering. Geology School.

Director: M.Sc. Saul E. Guevara

Codirectors: William M. Agudelo, Jorge E. Pinto.

INTRODUCCION

La sísmica 3D es un método geofísico que permite obtener una imagen indirecta del subsuelo e iluminar uno o varios horizontes de interés obteniendo un volumen de datos sísmicos en 3 dimensiones. Esto se logra ubicando una gran densidad de líneas receptoras (geófonos) y fuentes que están ubicados a cortas distancias y cubren un área en superficie y no una línea como sucede en la sísmica 2D, permitiendo que los datos sísmicos tengan continuidad dentro del volumen obtenido. De manera indirecta, y con el apoyo de información geológica y de pozos, puede obtenerse además información sobre propiedades claves del yacimiento como litologías, presencia de fracturas, de hidrocarburos (especialmente gas) e incluso porosidades.

A partir del cubo sísmico 3D pueden obtenerse secciones bidimensionales que representan de manera aproximada cortes verticales de la tierra en cualquier dirección, incluso siguiendo trayectorias formadas por segmentos de líneas rectas que permiten interceptar las posiciones de pozos presentes en el área.

Este trabajo esta exclusivamente enfocado a la fase de diseño sísmico 3D y es la etapa inicial de un proyecto de adquisición sísmica 3D que realizará el Campo Escuela Colorado para obtener información que permita mejorar los modelos geológicos, geofísicos y petrofísicos, proponer nuevas zonas de interés y poder aumentar la producción de crudo del campo.

El objetivo de este proyecto es plantear un diseño sísmico que tenga en cuenta aspectos geológicos, geofísicos y ambientales con el fin de optimizar la grilla de adquisición, minimizar el impacto ambiental y garantizar buena calidad de los datos.

En primer lugar se analizan los datos sísmicos y geológicos existentes para determinar los parámetros del diseño 3D y poder plantear varios diseños con diferentes características. Por último, los diseños planteados se evalúan sobre un modelo estructural del campo utilizando un programa de modelamiento y trazado de rayos para analizar con cual modelo se obtienen datos sísmicos de mayor calidad.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La exploración del Campo Colorado inicio en los años 30, con 7 pozos perforados. En los años 60's el campo llego a su máxima producción con 1765 BOPD, debido a que en ese momento el campo contó con la mayor cantidad de pozos (75 pozos) en funcionamiento, pero luego de un corto periodo la producción comenzó a decaer súbitamente hasta los 430 BOPD (Ecopetrol, 2003), debido al taponamiento de los pozos por parafinas y a la complicada continuidad lateral del yacimiento y el poco espesor de las areniscas de la formación Mugrosa.

Actualmente la Universidad Industrial de Santander está a cargo del manejo del Campo y pretende mejorar el rendimiento y la producción en los pozos (activos o inactivos) o zonas que no se han explorado por falta de información.

Por lo anterior se plantea la idea de realizar una adquisición sísmica 3D de onda P que permita obtener una imagen más exacta de la estructura y con suficiente resolución para identificar los objetivos estratigráficos del campo.

A partir de esto se obtiene un volumen de información sísmica continua con la cual se podrá entender y mejorar los modelos geológicos, geofísicos, petrofísicos y estructurales del campo para prospectar nuevas zonas de interés y poder aumentar la producción del campo. Como primera parte de ese proyecto, se va a hacer el diseño sísmico 3D como soporte técnico para dicha adquisición.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un diseño de una adquisición sísmica 3D para aplicarlo en el campo escuela Colorado.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar los datos sísmicos y geológicos existentes del campo para conocer características relacionadas con frecuencias, velocidades RMS, Fold 2D, geometrías de las líneas sísmicas 2D, buzamientos, profundidades y espesores de los objetivos geológicos.
- Calcular los parámetros básicos del diseño utilizando los datos geológicos y sísmicos del campo.
- Realizar el diseño sísmico 3D del Campo a partir de los parámetros básicos calculados inicialmente.
- Optimizar el diseño sísmico 3D ajustando los parámetros de diseño para eliminar el *footprint*.
- Analizar la iluminación de los objetivos geológicos obtenida de los diseños 3D a partir de un modelado por trazado de rayos aplicado sobre un modelo estructural 3D existente del campo.
- Evaluar los diseños propuestos de acuerdo a la mejor relación costo beneficio.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 SÍSMICA DE REFLEXIÓN

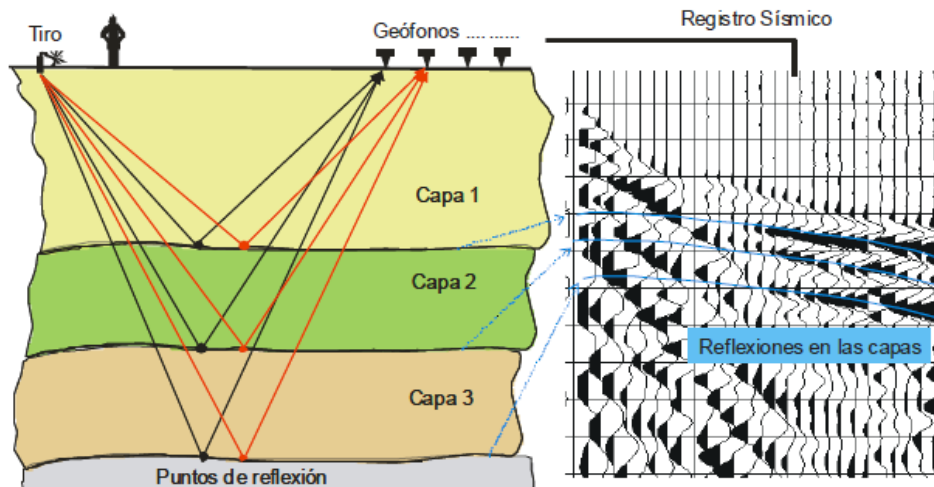
Los métodos sísmicos representan una de las técnicas geofísicas más importantes y predominan sobre otros métodos de exploración debido a la calidad de la imagen obtenida del subsuelo y gran penetración en profundidad, siendo utilizados principalmente en exploración petrolera

El método sísmico de reflexión permite obtener información geológica a partir de las características de las ondas P también conocidas como ondas longitudinales o compresionales. Estas ondas se propagan por el subsuelo mediante deformaciones compresivas y extensivas en la dirección de propagación de la onda y son reflejadas en las interfaces que separan dos medios de propiedades diferentes. El método sísmico se basa en la medición de los tiempos de viaje de las ondas reflejadas en las superficies de contacto entre medios con distinta impedancia acústica (Procesado de sísmica de reflexión superficial).

A partir de las características de amplitud, frecuencia y fase de las ondas es posible determinar propiedades petrofísicas del yacimiento, por ejemplo, un estudio de la amplitud de las ondas versus el offset (AVO), permite encontrar fluidos dentro de la roca. El uso de atributos sísmicos derivados de la amplitud permite extraer información estratigráfica del reservorio, los atributos derivados de la fase resaltan la continuidad o discontinuidad de los eventos sísmicos proporcionando información estructural y con los atributos derivados de la frecuencia es posible observar cambios en el espesor y en las propiedades acústicas de las rocas (Greg Partyka, 1998 en Valencia, 2010).

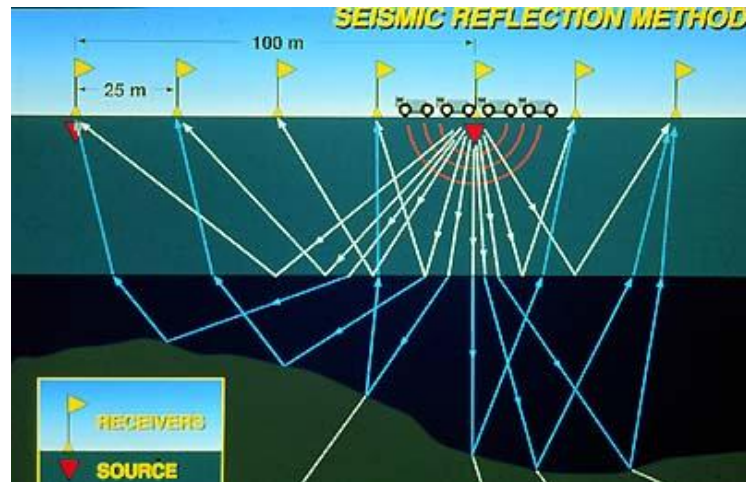
El experimento básico del método sísmico de reflexión, consiste en activar una fuente de energía colocada en la superficie del terreno, la cual genera ondas que viajan por el subsuelo y al encontrar una interface que separa dos medios de propiedades elásticas diferentes, estas se reflejan. Luego estas ondas que están representadas por rayos y que son reflejadas de acuerdo a la ley de Snell, son detectadas por sismómetros o geófonos que están ubicados en la misma superficie del terreno (Guevara, 2006). (Figura 1) El medio que genera la onda sísmica se conoce en general como Fuente (*source*) y el que la detecta como receptor (*receiver*). (Figura 2)

Figura 1 Esquema del recorrido de los rayos reflejados en tres capas para una posición de tiro y dos estaciones receptoras (geófonos). Debido a que el tiempo de llegada de las ondas aumenta con el offset, las reflexiones quedan marcadas en el registro sísmico como trayectorias hiperbólicas



Fuente: Procesado de sísmica de reflexión superficial.

Figura 2. Método sísmico de reflexión en 2D.



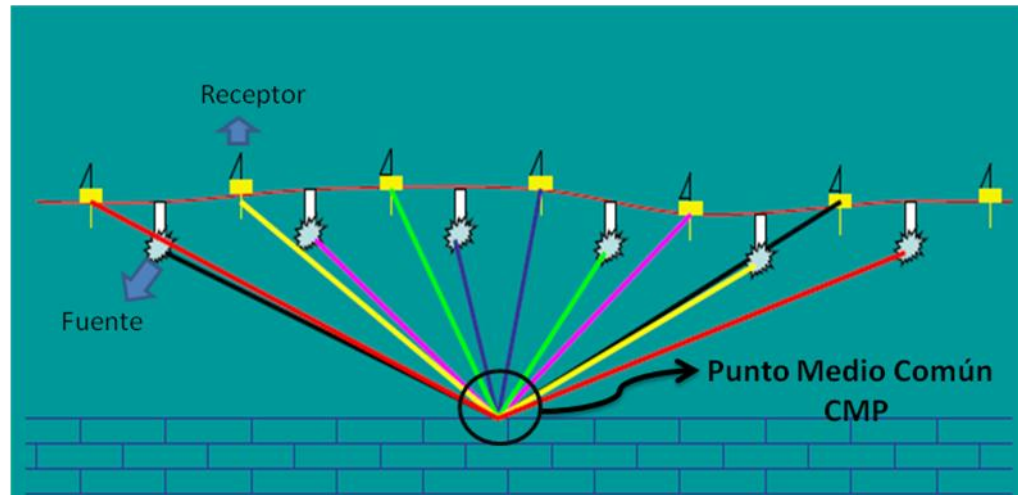
Fuente: <http://www.lithoprobe.ca/Images/slidesets/tools/lp56m.jpg>

Es necesario iluminar varias veces el mismo punto en el subsuelo, y luego sumar los datos resultantes para cada punto. Para tal fin se colocan fuentes y receptores de tal forma que cada punto de interés sea iluminado por varios rayos.

3.1.1 Punto común en profundidad ó CDP

El punto iluminado en el subsuelo se conoce como CDP por su nombre en inglés *Common Depth Point*, implicando que existe un punto común en profundidad al cual se le pueden asignar los datos provenientes de varias fuentes y receptores. Sin embargo, es difícil asegurar cual es el punto de reflexión, ya que este puede variar dependiendo del buzamiento. Así, en el caso más general se prefiere usar CMP, sigla de *Common Mid Point*, o sea punto medio común o punto intermedio entre fuente y receptor, significando con esto que se agrupan las trazas correspondientes al mismo punto intermedio entre fuente y receptor, las cuales solo corresponden al mismo punto de reflexión en el subsuelo para el caso de estratos planos, paralelos y horizontales (Álvarez, 1999) (Figura 3).

Figura 3. Punto en el subsuelo iluminado por varios rayos procedentes de diferentes pares Fuente-Receptor.



Fuente: Alfonso, 2009.

3.1.2 Cubrimiento ó *Fold*

La suma de estos datos en ese punto común se le conoce como Cubrimiento o *Fold*. Este parámetro es una medida de la redundancia de los datos dentro un área que está determinada por la distancia entre fuentes y receptores.

El *Fold* es importante porque determina que tanta redundancia de datos es necesaria para iluminar un objetivo geológico de forma adecuada. Para calcularlo es necesario analizar información sísmica 2D existente y determinar si el *Fold* obtenido en sísmica 2D era adecuado o si por el contrario, se requiere un mayor *Fold* en el nuevo 3D que permita disminuir los ruidos o atenuaciones del subsuelo y obtener una mejor imagen de los objetivos geológicos.

Las características de la información obtenida dependen de la recopilación de los datos (diseño y adquisición) y de su procesamiento, durante estas etapas se busca separar la señal del ruido para obtener una señal de buena calidad.

3.2 ADQUISICIÓN SISMICA 3D

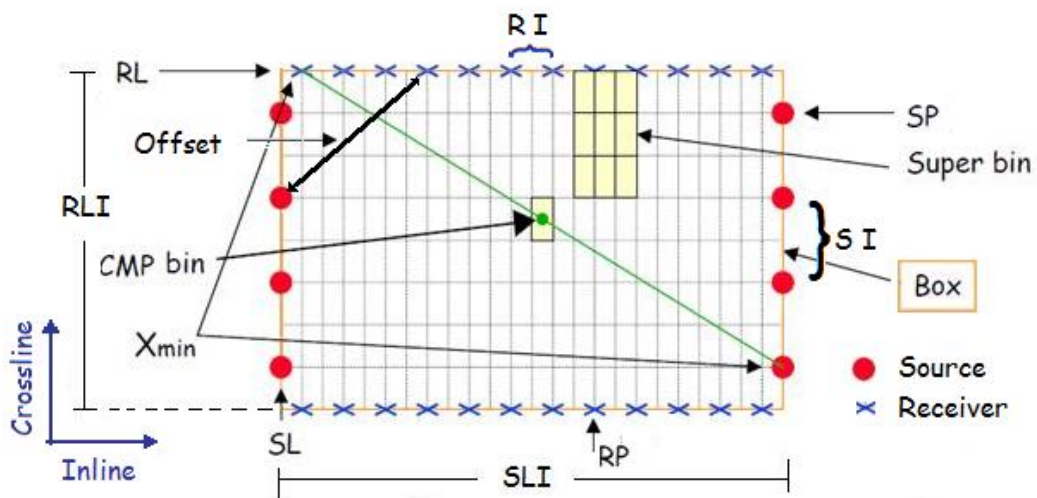
Para entender los conceptos fundamentales de la adquisición es necesario comprender el significado de los términos utilizados en el diseño de una sísmica 3D (Figura 4).

- Dirección *Inline*: Dirección paralela a la línea de receptores.
- Dirección *crossline*: Dirección perpendicular a la línea de receptores. También es conocida como *X-line*.
- *Offset*: Se refiere a la distancia entre una fuente y un receptor cualquiera.
- Línea de Fuentes ó *Source Line* (SL): Es una línea en la cual se encuentra ubicadas las fuentes espaciadas en intervalos regulares.
- Línea de Receptores ó *Receiver Line* (RL): Es una línea en la cual los receptores son establecidos en intervalos regulares.
- Intervalo de Fuentes: Se denomina con la sigla SI (*source interval*). La separación de las fuentes está relacionada con el objeto de estudio y la resolución deseada.
- Intervalo de Receptores: Se denomina con la sigla RI (*receiver interval*). Mientras menor sea el intervalo entre las estaciones receptoras mayor será la resolución espacial puesto que la frecuencia máxima adquirida será mayor.
- SLI: Es el intervalo entre una y otra línea de receptores.
- RLI: Es el intervalo entre una y otra línea de fuentes.
- Caja ó *Box*: Esta definida como el área que se encuentra entre 2 adyacentes RLI (*receiver line interval*) y 2 adyacentes SLI (*source line*

interval). La caja normalmente representa la superficie más pequeña de un estudio en 3-D que contiene toda la información estadística dentro del área del Fold.

- Punto Medio ó *Mid Point*: Es el punto localizado exactamente en medio de la fuente y un receptor cualquiera. Por ejemplo, Si tenemos un *Patch* con 480 receptores, entonces cada fuente podrá crear 480 midpoints.
- CMP Bin ó Bin: es la extensión a 3-D del concepto de punto medio común CMP de la sísmica 2-D. Usualmente es un área rectangular o cuadrada de dimensiones $SI/2 * RI/2$. Todas las trazas que quedan dentro de esta área se asume que pertenecen al mismo CMP y se apilan (promedian) para formar la traza resultante en ese *CMP*. El número de trazas en un Bin se denomina multiplicidad o cubrimiento (*Fold*).
- Xmin: Es el mayor offset mínimo, es decir la mínima distancia que se requiere para registrar el evento de interés más somero.

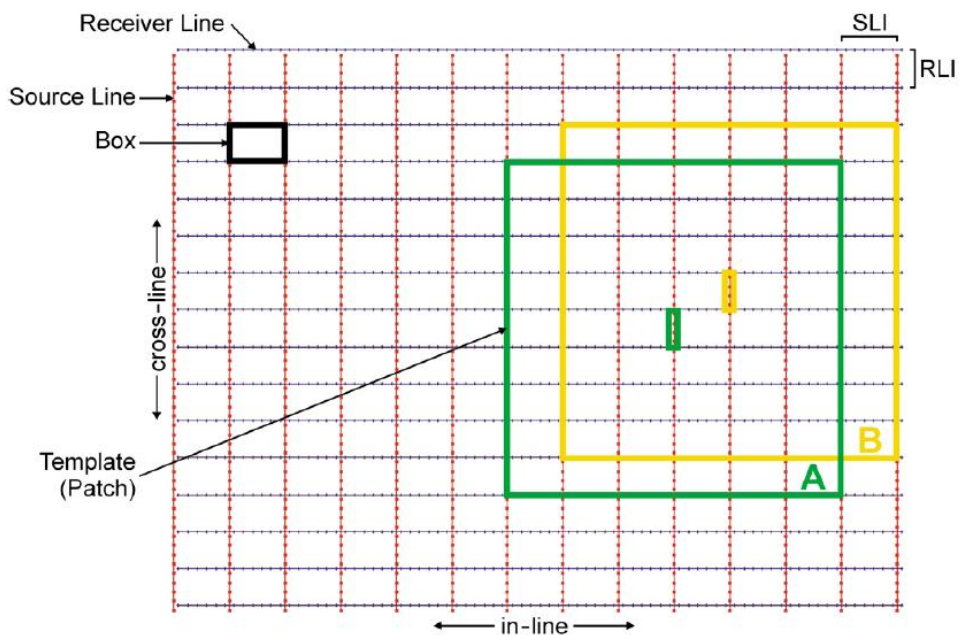
Figura 4. Diagrama que representa gráficamente los términos Dirección *Inline* y *crossline*, fuentes, receptores e intervalos entre ellos, líneas de fuentes y receptores, Offset, Xmin, Bin y Box.



Fuente: Modificado de Álvarez, 1999.

- *Patch*: Un *Patch* se refiere a todos los receptores activados que registran datos de cualquier fuente. El *Patch* usualmente forma un rectángulo varias líneas de receptores paralelas. El *Patch* se mueve alrededor de la superficie para ocupar diferentes posiciones.
- *Template*: Combinación de un *Patch* particular que registra un número de disparos que se conoce como Salvo.
- Salvo: Grupo de puntos de tiro que se registran con un mismo *Patch* (Figura 5).

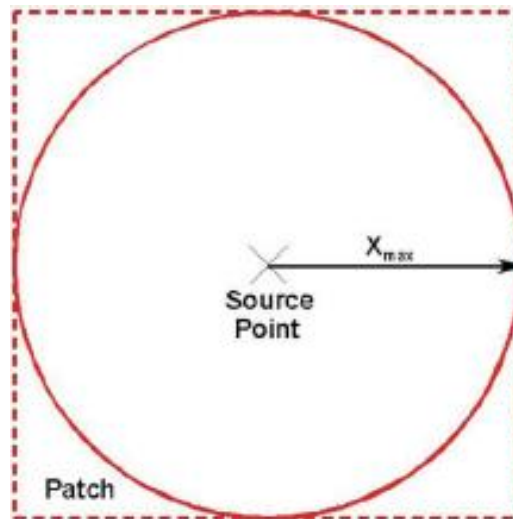
Figura 5. Definición de *Patch* y *Template* y su relación con otros términos.



Fuente: Cordsen (2000)

- *Fold*: Es el número de *midpoints* que son apilados dentro de un *CMP Bin*. El *Fold* varía de Bin a Bin y también para diferentes *Offsets*. Es el número de *midpoints* por Bin. A Mayor *Fold* mayor iluminación
- *Fold Taper*: Es el área del estudio cuya cobertura será menor a la cobertura máxima y por ende, poseerá la menor relación señal/ruido (*S/N*) del proyecto. Un valor práctico es la longitud del *Template* dividido entre cuatro (Cordsen et. al., 2000).
- *Xmax*: Es el máximo *offset* registrado el cual depende de la estrategia de disparos y del tamaño del *Patch*. Es usualmente la distancia media de la diagonal del *Patch*. Un *Xmax* amplio es necesario para registrar eventos profundos (Figura 6).

Figura 6. Diagrama que ilustra la relación del Patch con *Xmax*.



Fuente: Cordsen, 2000.

- *Aliasing espacial*: se debe a un muestreo inadecuado de la señal. La forma común de evitarlo es controlando la distancia entre receptores. El *aliasing*

espacial es especialmente crítico en áreas con buzamientos pronunciados puesto que las trazas que se suman en un *bin* se encuentran en desfase. Sus efectos sobre secciones no migradas es la producción de eventos falsos y en secciones migradas la generación de ruido no coherente (Espinoza, 2002).

- *Muestreo de los datos*: El muestreo consiste en el proceso de conversión de señales continuas a señales discretas en el tiempo. Este proceso se realiza midiendo la señal en momentos periódicos del tiempo.
- *Ruido*: Representa cualquier señal no deseada en un registro sísmico que deteriora la calidad de los datos obtenidos. es causado por cualquier energía sísmica no deseada, por ejemplo, *ground roll*, actividad humana, capa meteorizada o eventos aleatorios que ocurran en el subsuelo. (<http://www.glossary.oilfield.slb.com/Display.cfm?Term=noise>).

Este ruido se puede clasificar en ruido aleatorio y ruido coherente.

El ruido aleatorio es aquel que no tiene correlación traza a traza, tanto espacial como temporal. Este ruido se puede atenuar utilizando filtros pasabanda, realizando un apilado de los datos, utilizando un arreglo de geófonos por canal, incrementando los puntos de disparo y aumentando el fold. (Yilmaz, 2008)

El ruido coherente es energía sísmica indeseada que tiene una fase consistente traza a traza, como lo son el *ground roll*, los múltiples y las ondas guiadas. (<http://www.glossary.oilfield.slb.com/Display.cfm?Term=coherent%20noise>). Para eliminar este ruido es necesario aplicar filtros F-K, deconvolución, apilado y migración de los datos.

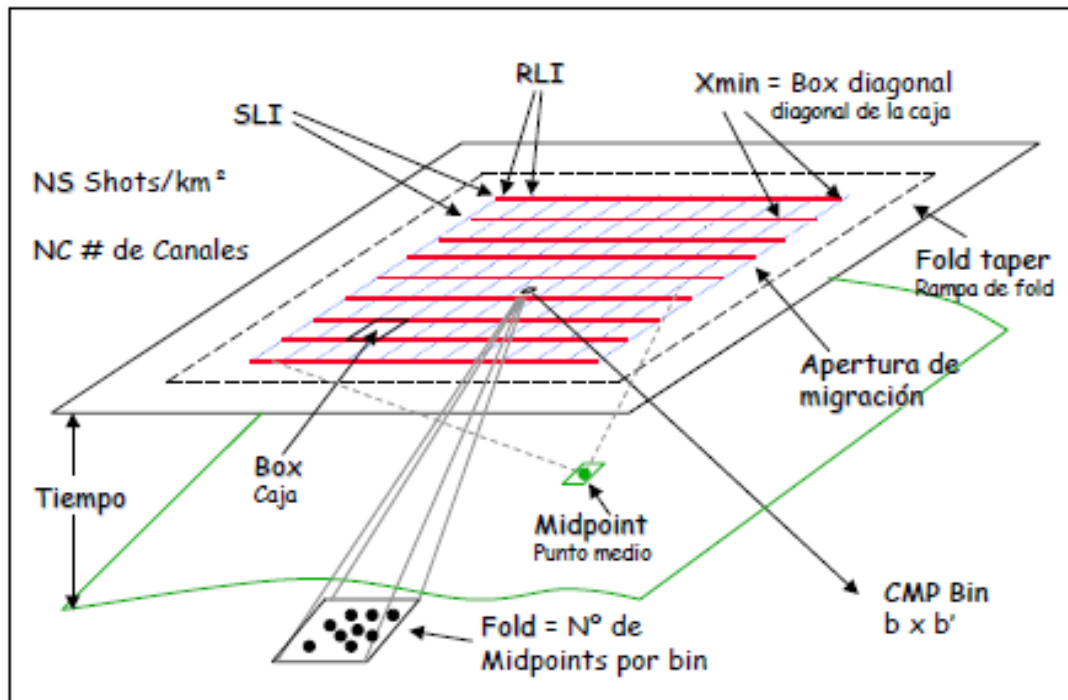
- *Resolución:* se refiere a lo cerca que 2 puntos pueden estar, y que se puedan diferenciar. En sismica se definen dos tipos de resolución: vertical y lateral. La resolución vertical depende de la longitud de onda dominante y la resolución lateral depende de la zona de fresnel que está relacionada con el espesor lateral del objetivo geológico (Yilmaz, 2008). La resolución requerida depende del objetivo geológico que se pretenda observar en las imágenes sísmicas, para identificar ambientes fluviales es necesaria una sismica de alta resolución.

En el numeral 5.2.2 se muestra una descripción más detallada de este concepto para calcular el tamaño del bin.

- *Footprint.* Es un patrón de ruido que está altamente correlacionado a la geometría de distribución de las líneas de fuentes y receptores en un tendido sísmico. Estas marcas o huellas afectan los datos adquiridos y son causadas por un muestreo espacial irregular originando problemas a la hora de procesar estos datos. (Duarte, 2010).

Resumiendo todos los parámetros nombrados anteriormente, se puede observar en la Figura 7 la relación de los parámetros que están ubicados en superficie y los que están en el subsuelo (línea color verde).

Figura 7. Resumen de los principales términos utilizados en adquisición sísmica 3D. El *Midpoint* y el reflector están en subsuelo mientras que los demás parámetros están en superficie.



Fuente: Alvarez, 1999.

3.3 DISEÑO DE UNA ADQUISICIÓN SÍSMICA 3D

La etapa del diseño en un proyecto de adquisición sísmica 3D es la primera de cuatro fases que son diseño, adquisición de los datos, procesamiento e interpretación. Por diseño se entiende la selección de la geometría de las líneas de fuentes y receptores, así como de todos los parámetros relevantes para la adquisición del programa sísmico.

Para realizar un buen diseño sísmico 3D es necesario calcular parámetros óptimos de diseño y adquisición teniendo en cuenta consideraciones geológicas como, profundidades, espesores y buzamientos de los objetivos, velocidades sísmicas y el objetivo del programa sísmico, si es estratigráfico o estructural. Consideraciones geofísicas que están relacionadas con presencia de ruido al momento de realizar la adquisición, múltiples, estáticas, cálculo de velocidades. Por último están las

consideraciones ambientales que juegan un papel importante debido a que en la sísmica 3D se dan en patrones repetitivos que pueden impactar la vegetación o afectar fuentes de agua y otras zonas ambientalmente sensibles. Al realizar un diseño cuidadoso y que considere todos los posibles riesgos ambientales del programa a menudo ayuda a disminuir aún más el impacto negativo de la adquisición.

Este proyecto está enfocado en generar modelos que permitan analizar las ventajas y desventajas entre ellos variando los parámetros del diseño, por esto, se hace énfasis en las consideraciones que están estrechamente relacionadas con el diseño principalmente.

3.3.1 Parámetros de diseño

Algunos de los parámetros de adquisición más importantes en el diseño sísmico 3D son tamaño del Bin, *Fold*, dimensiones de la caja, orientación y separación de las líneas de disparo y receptores, geometría del *Patch*, tamaño del salvo frecuencia máxima y *Offset* máximo. Todos estos parámetros se pueden calcular por medio de ecuaciones y son parámetros básicos que están relacionados con los objetivos o requerimientos del programa sísmico. A partir de estos parámetros se derivan otros que están relacionados con la geometría y el diseño como el número de canales, distancia entre disparos, número de disparos por salvo, entre otros.

3.3.1.1 Datos de entrada en los parámetros básicos de diseño

En un diseño sísmico 3D los datos de entrada en las ecuaciones de los parámetros básicos dependen de características geológicas y geofísicas del campo. Para las primeras, los valores se obtienen a partir de: profundidad, mayores buzamientos y espesores de los objetivos; en las geofísicas es necesario

buscar las velocidades en los objetivos a partir de información sísmica 2D existente o utilizando registros sísmicos.

3.3.1.1.1 Cálculo de frecuencias en líneas sísmicas 2D

Las frecuencias en los datos sísmicos me determinan la máxima resolución que se logra obtener de un reflector. Esto tiene una gran importancia al momento de realizar una diseño 3D porque determina en gran parte la geometría y las dimensiones internas fuentes y receptores dependiendo del tamaño del objetivo geológico que pretendamos llegar a observar con el diseño. El objetivo más delgado determina la frecuencia máxima (o más precisamente el ancho de banda mínimo) que se requiere. Este valor puede ser imposible o impráctico y con frecuencia se recurre a algún tipo de compromiso, por ejemplo no tener reflexiones independientes para el tope y la base del intervalo de interés.

Una forma adecuada de determinar el contenido de frecuencias en los objetivos es hacer un análisis espectral en líneas sísmicas 2D para determinar que rangos de frecuencias se lograron alcanzar con los parámetros de diseño con los que se tomaron esas líneas 2D. También es posible realizar un cálculo de frecuencias de forma manual en los objetivos identificando los reflectores de interés en esas líneas sísmicas.

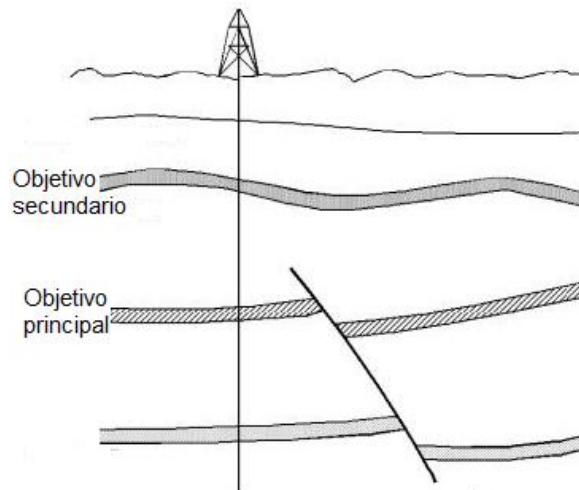
3.3.1.1.2 Cálculo de la profundidad de los objetivos geológicos.

Para calcular los rangos de profundidad que se encuentran las formaciones objetivo, es necesario contar con registros de pozo que permitan definir con exactitud la profundidad de estas formaciones a lo largo del campo.

La sísmica 3D debe estar diseñada para iluminar un objetivo principal. Este objetivo principal determina los parámetros de adquisición y los costos económicos de la adquisición. De acuerdo a la profundidad que se encuentre,

estos parámetros van a cambiar para obtener una mayor resolución que es lo se busca con este tipo de sísmica (Figura 8).

Figura 8. Profundidad de la Formación objetivo principal y secundaria de la adquisición sísmica.



Fuente: Modificado de Cordsen, 2000.

La formación objetivo más somera determina el X_{min} y la más profunda el *offset* máximo o X_{max} . También determina hasta cierto punto las características de la fuente de energía y la geometría del diseño.

3.3.1.1.3 Cálculo del Buzamiento en las formaciones objetivo.

El ángulo de buzamiento es uno de los factores críticos dentro del diseño sísmico 3D debido a que buzamientos de alto grado aumentan el tamaño del diseño y hace necesario ubicar receptores a grandes distancias para poder registrar las ondas reflejadas por estas superficies de acuerdo con la ley de Snell. Todo esto al final se traduce en un mayor costo del programa sísmico.

Estos valores se extraen de líneas sísmicas procesadas e interpretadas o de registros como el Dipmeter.

El máximo buzamiento (en combinación con la velocidad y la frecuencia) determina el tamaño máximo del Bin en las direcciones inline y x-line. En combinación con la velocidad determina las aperturas de migración.

3.3.1.1.4 Velocidades sísmicas RMS en los objetivos.

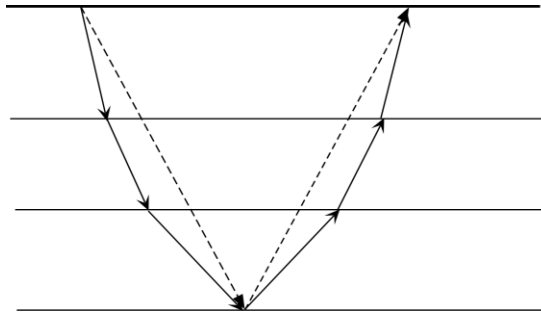
Las velocidades sísmicas de las rocas varían dependiendo de diferentes factores como el tipo de roca, el grado de compactación, la saturación de fluidos, la profundidad, etc.

Cada estrato tiene una velocidad determinada que influye en la trayectoria de los rayos que atraviesen este estrato, las velocidades más bajas se encuentran normalmente en profundidades someras y aumenta con la profundidad.

La mínima velocidad de interés, en combinación con la máxima frecuencia necesaria y el máximo buzamiento esperado determinan el tamaño del Bin. En combinación con los buzamientos determina las aperturas de migración.

Dix, (1956) en Alvarez, (1999) hizo una aproximación a la velocidad geológica correspondiente a un estrato por medio de la velocidad de intervalo V_{INT} , definida como la velocidad de un estrato (velocidad entre dos interfaces), dado que se puede obtener una velocidad sísmica para esas interfaces. Primero es necesario definir una aproximación, llamada *Velocidad RMS* (Root Mean Square) o “velocidad raíz media cuadrática”, que viene a ser aproximadamente un promedio de las velocidades de todos los estratos hasta llegar a la interface de interés (Figura 9).

Figura 9. Velocidad *RMS* (línea punteada) y velocidad de intervalo (línea continua). La línea punteada viaja a velocidad de apilamiento, o sea V_n , y demora un tiempo equivalente a las flechas llenas, que viajan con velocidad de intervalo, V_i



Fuente: Guevara, 2006.

De acuerdo con esta relación, Dix logró llegar a una ecuación que relacionaba estas 2 velocidades de la siguiente forma (ecuación 1):

$$V_i^2 = \frac{V_n^2 t_n - V_{n-1}^2 t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \quad (1)$$

Donde V_i es la velocidad del intervalo i , el cual está limitado por las interfaces n y $n-1$, t_n es el tiempo doble de viaje para *offset* cero en la interface n , y V_n es la velocidad *RMS*.

De esta manera, usando esta ecuación, es posible obtener una aproximación a la velocidad de intervalo si se tienen las velocidades de apilamiento obtenidas de los datos sísmicos. Esta es una primera, y muy usada, aproximación a la velocidad geológica.

3.3.1.2 Ecuaciones para el cálculo de parámetros

3.3.1.2.1 Ecuaciones para calcular Fold

Es el número de trazas de campo que contribuyen a una traza apiladas, también se puede definir como el número puntos medios dentro de un CMP Bin.

Cordsen (2000) propone una regla de oro utilizada por muchos diseñadores para calcular el *Fold* 3D a partir del *Fold* 2D siempre que la relación señal/ruido sea buena (ecuación 2):

$$Fold\ 3D = \frac{1}{2} fold\ 2D \quad (2)$$

Krey 1987 (en Cordsen 2000) demostró que el *Fold* 3D y el *Fold* 2D están relacionados y que esta relación depende de la frecuencia y de una constante de acuerdo a la ecuación (3):

$$Fold\ 3D = fold\ 2D * frecuencia * 0.01 \quad (3)$$

Krey (1987), propone una ecuación para calcular *Fold* 3D que involucra el *Fold* 2D, la velocidad, el tamaño del Bin y la distancia entre *CDP* de líneas sísmicas 2D o tamaño de Bin 2D, lo cual garantiza un valor más exacto para el cálculo de este parámetro (ecuación 4).

$$Fold\ 3D = \frac{Fold\ 2D * Area\ del\ Bin * Frecuencia * \Pi * 0.401}{distancia\ CDP\ 2D * Velocidad} \quad (4)$$

Galbraith, 2000 utiliza una ecuación que permite calcular el *Fold* en función del *Offset* y de las distancias entre líneas de fuentes y receptores (ecuación 5):

$$Fold\ 3D = \frac{\pi * offset^2}{4 * SLI * RLI} \quad (5)$$

El *Fold* se puede dividir en dos componentes, *Fold inline* y *Fold Xline*, que al multiplicarlas da como resultado el *Fold* total.

El *Fold inline* se calcula de la siguiente forma (ecuación 6):

$$Fold\ inline = \frac{\# \text{receptores} * RI}{2 * SLI} \quad (6)$$

El *Fold Xline* se calcula de acuerdo a la siguiente expresión (ecuación 7):

$$Fold\ Xline = \frac{\text{Numero de lineas receptoras}}{2} \quad (7)$$

El *Fold* total nominal es el producto de las dos ecuaciones anteriores (ecuación 8):

$$Fold\ total = Fold\ Inline * Fold\ Xline \quad (8)$$

3.3.1.2.2 Ecuaciones para el cálculo del Bin

El Bin es el área sobre la cual las trazas son apiladas. Esto indica que todas las trazas que pertenezcan al mismo Bin serán apiladas y contribuirán al Fold de ese bin (Cordsen, 2000).

La selección del *Fold* y del Bin van de la mano ya que el fold es una función cuadrática de la longitud de un lado de Bin, además el fold es igual número de trazas en un Bin (Alvarez, 1999).

Las dimensiones del Bin son $SI/2$ y $RI/2$ en la dirección Inline y XLine respectivamente. La forma preferida del Bin es cuadrado ya que permitir registrar información de diferentes direcciones para resolver cambios geológicos en cualquier dirección (Cordsen, 2000).

Morse (1992) en Cordsen (2000) propone una ecuación para calcular el tamaño del Bin en función de la velocidad RMS mínima, el máximo ángulo de buzamiento y la frecuencia máxima del objetivo (ecuación 9).

$$Bin = \frac{V_{RMS}}{4 * Fmax * \sin \varnothing max} \quad (9)$$

Donde V_{RMS} es la mínima velocidad RMS de interés (probablemente la que corresponda al objetivo más somero) en m/s, $Fmax$ es la máxima frecuencia en Hz que se espera en los datos y $\varnothing max$ es el máximo buzamiento de interés.

Este tamaño del Bin normalmente se “redondea” a valores tales como 15, 20, 25 o 30 metros. El mismo cálculo se lleva a cabo en las direcciones de buzamiento y de rumbo, utilizando para ello los correspondientes valores del ángulo de buzamiento. En la mayoría de los casos, el Bin se escoge cuadrado o rectangular (con una de las dimensiones el doble de la otra). Cuando el Bin es cuadrado se garantiza un mejor muestreo de los datos de campo (Alvarez, 1999).

El tamaño del Bin se puede determinar teniendo en cuenta estos 3 factores: Tamaño del objetivo, la máxima frecuencia “unaliased” producida por el buzamiento que sería la misma ecuación de Morse y la resolución lateral del objetivo (Cordsen et al. 2000)

- Tamaño de objetivo: Normalmente 2 o 3 trazas deben pasar por el objetivo, lo cual permitiría ver el objetivo en una imagen 3D (Cordsen, 2000). Según

lo anterior, se debe asegurar que el tamaño del Bin cumpla con la siguiente relación (ecuación 10):

$$\text{Tamaño_del_Bin} \leq \frac{\text{Tamaño_del_objetivo}}{3} \quad (10)$$

- Resolución lateral del objetivo: Determina que tamaño del Bin es necesario para resolver el tamaño lateral del objetivo geológico. Esta resolución debe estar entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ de la longitud de onda dominante (Cordsen, 2000). La ecuación (11) permite calcular este valor:

$$\text{Bin} = \text{Velocidad} / (N * \text{frecuencia dominante}) \quad (11)$$

Donde N varía de 2 a 4.

3.3.1.2.3 Distancia entre Fuentes y receptores.

Una vez seleccionado el tamaño del Bin, los intervalos de fuentes y receptores quedan definidos como el doble de las correspondientes dimensiones del Bin, en este caso las dimensiones del Bin se tomaron cuadradas para garantizar un buen muestreo azimutal.

Corsen et al, 2000. Propone una relación simple entre las dimensiones del Bin y las distancias entre fuentes y receptores (ecuación 12 y 13):

$$\text{SI} = 2 * \text{Bin Xline} \quad (12)$$

$$\text{RI} = 2 * \text{Bin Inline} \quad (13)$$

En datos terrestres, normalmente el intervalo de disparo es mayor o igual que el de grupo, dado el costo de perforación de los pozos para los explosivos o los problemas de acceso de los vibradores. En datos marinos la situación puede ser al contrario.

3.3.1.2.4 Offset Máximo o Xmax

De acuerdo con la definición del numeral 3.2 El offset máximo depende de la profundidad de los objetivos. Para un modelo de capas planas paralelas, el Offset máximo es igual a la profundidad del objetivo mas profundo (ecuación 14):

$$X_{max} \geq \text{Profundidad del objetivo mas profundo} \quad (14)$$

Esta distancia representa una diagonal entre el par fuente-receptor más distantes dentro del *patch*. Es recomendable medir Xmax a lo largo de la diagonal del *patch* para garantizar el apilamiento de todas las trazas registradas (Cordsen, 2000).

3.3.1.2.5 Offset mínimo o Xmin

Para geometrías ortogonales Xmin se determina de acuerdo con la siguiente ecuación 15:

$$X_{min}: (RL^2 + SL^2)^{1/2}. \quad (15)$$

3.3.1.2.6 Aspect Ratio

Esta definido por la relación entre la dimensión *Crossline* del *Patch* dividido por la dimensión *Inline* del *Patch*. Esta relación indica como sera el muestreo o registro de la información para diferentes direcciones o azimut. Registros con *aspect ratio* menores a 0.5 son considerados como *narrow azimuth* e indican que solo se registrara información de algunas direcciones, mientras que un *patch* con *aspect ratio* mayor a 0.5 son *wide azimuth* y permiten registrar información en la mayoría de las direcciones (Cordsen,2003). Este valor se relaciona con la dimensiones del *patch* de la siguiente forma (ecuación 16)

Aspect Ratio: Patch Xline / Patch Inline

(16)

3.3.1.2.7 Apertura de migración

Es una franja del diseño de la adquisición sísmica que debe agregarse al área de cubrimiento completo (*full fold*) del programa para permitir una apropiada migración de cualquier evento buzante. Esta medida puede variar, y con frecuencia varía, para los diferentes lados del programa (Alvarez, 1999) (Figura 10). Esta área aumenta en función de la profundidad y principalmente del ángulo de buzamiento de los reflectores o formaciones geológicas de la siguiente forma (ecuación 17):

Apertura de migración = $Z * \tan(\theta)$

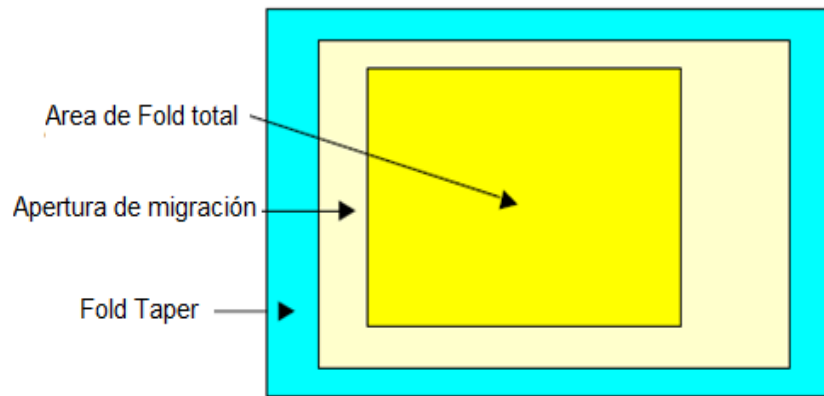
(17)

Donde Z es la profundidad del objetivo de interés más profundo y θ es el buzamiento de esa formación o reflector.

3.3.1.2.8 Ecuaciones para calcular *Fold Taper*.

Otro factor importante a la hora de calcular el *Fold*, es el *Fold taper*. Este parámetro define el área que se debe agregar al diseño sísmico 3D para conseguir cubrimiento completo hasta la frontera de la apertura de migración (Figura 10).

Figura 10. Relación de *Fold Taper* con la apertura de migración y el *Fold* total.



Fuente: Álvarez, 1999

El ancho y el largo de este parámetro no necesariamente es el mismo por lo que sería necesario calcularlos por separado de la siguiente forma (ecuación 18 y 19):

$$Fold\ Taper\ inline = \left(\frac{Fold\ inline}{2} - 0.5 \right) * SLI \quad (18)$$

$$Fold\ Taper\ Xline = \left(\frac{Fold\ Xline}{2} - 0.5 \right) * RLI \quad (19)$$

Cordsen (2000) propone como regla de oro que el *Fold taper* es aproximadamente igual a $\frac{1}{4}$ de las dimensiones del *Patch* en las direcciones del *Fold taper*.

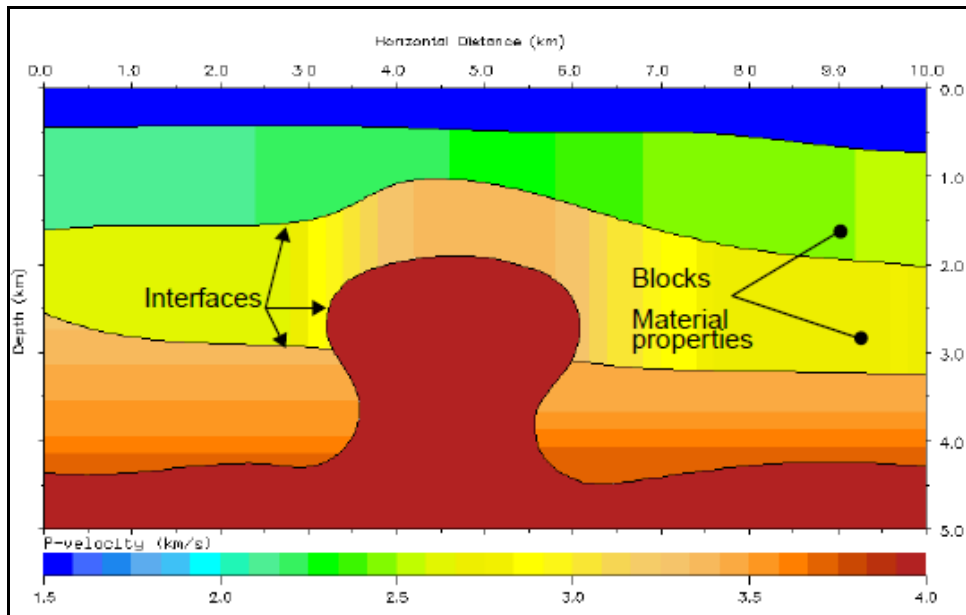
3.4 TEORÍA DE TRAZADO DE RAYOS

El trazado de rayos es un método que sirve para simular la propagación de ondas sísmicas en el subsuelo por medio de rayos que salen de una fuente hasta llegar a un grupo de receptores. Este proceso permite calcular cantidades importantes (tiempo de viaje de las ondas, amplitudes, ángulos de reflexión, *Offsets* entre otros) ligadas a la propagación de ondas sísmicas a través de un medio de capas. El trazado de rayos se puede clasificar como una solución aproximada de la ecuación de onda sísmica válido para altas frecuencias. La propagación de estos rayos se basa en la ley de Snell y son aquellos que siguen las leyes geométricas de reflexión y transmisión en todas las interfaces.

Para ejecutar esta técnica en el programa de trazado de rayos NORSAR 3D es necesario contar con un modelo sísmico que sirva como medio de propagación de los rayos. Este modelo debe tener tres elementos básicos (Figura 11) que son:

- Interfaces: representan las superficies de discontinuidad entre las propiedades de la roca. En sísmica corresponden a los horizontes interpretados de sísmica 2D, 3D o registros de pozos.
- Bloques: Están definidos por el volumen o área entre las interfaces. Está delimitado por dos interfaces.
- Propiedades del material: son asignadas a cada bloque. Son velocidad de la onda P (V_p), velocidad de la onda S (V_s) y la densidad (ρ). Estas propiedades se pueden obtener de registros de pozo.

Figura 11. Elementos de un modelo sísmico para ejecutar el trazado de rayos.



Fuente: User's Guide Norsar 3D Ray Modelling Versión 5.3

El trazado de rayos se puede clasificar en:

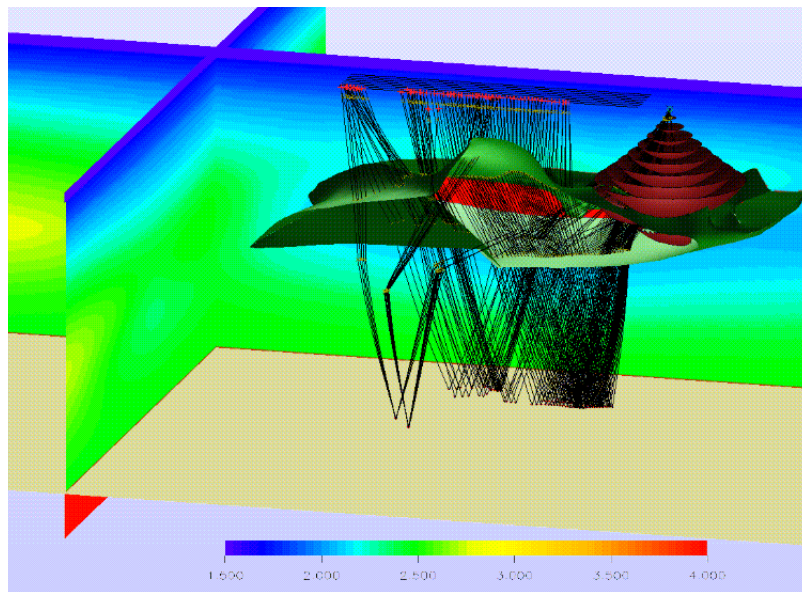
- Trazado de rayos cinemático.
- Trazado de rayos dinámico

El trazado de rayos cinemático calcula la localización de las trayectorias de los rayos y el tiempo de viaje de estos a lo largo de estas trayectorias. El trazado de rayos cinemático solo necesita la velocidad de la onda dentro del modelo de bloques sísmicos, es decir, velocidad de las ondas P y S.

El trazado de rayos dinámico también calcula las propiedades dinámicas del campo de onda, como el factor de propagación geométrico, la curvatura del frente de onda y los coeficientes de amplitud a lo largo de las trayectorias de los rayos. Adicional a las velocidades de las ondas P y S, el trazado dinámico de rayos necesita una función de densidad. Usando un trazado dinámico de rayos se puede obtener suficiente información acerca del campo de onda para calcular sismogramas sintéticos en los receptores a los que llegan los rayos.

Luego de realizar un modelado por trazado de rayos se obtiene el tiempo de viaje, la amplitud y punto de reflexión de las ondas representadas por los rayos. Con esta información se generan mapas de iluminación en las interfaces que muestran los resultados de disparar el diseño sísmico 3D sobre el modelo estructural (figura 12).

Figura 12. Propagación de los rayos a través de un modelo sísmico. Estos rayos salen de una fuente y llegan a varios receptores.



Fuente: User's Guide Norsar 3D Ray Modelling Versión 5.3

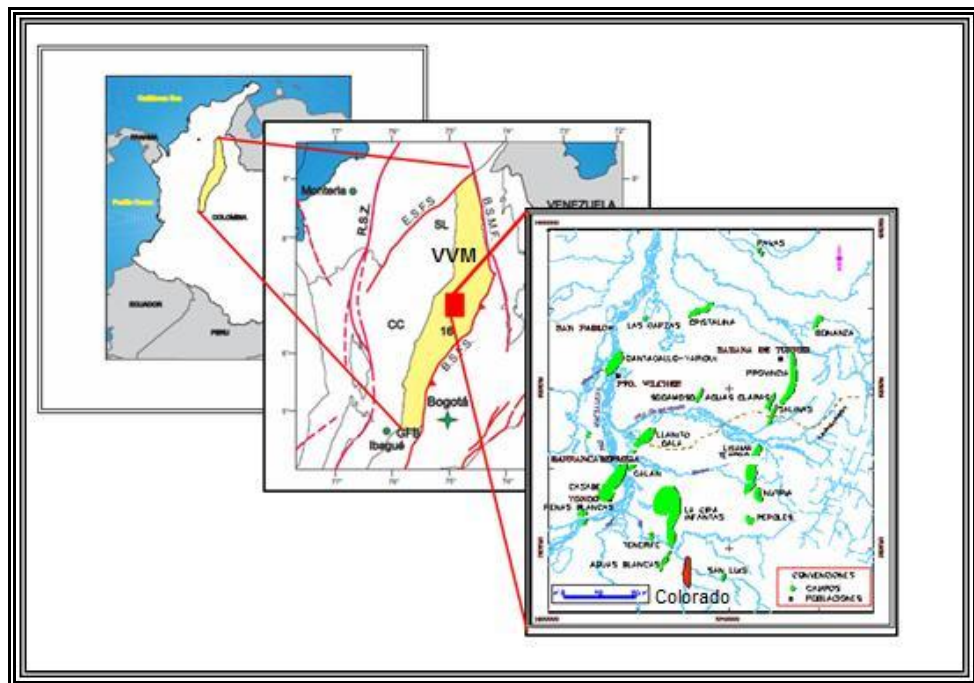
4. MARCO GEOLÓGICO

4.1 LOCALIZACIÓN

El Campo Colorado está localizado en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) en el Piedemonte Occidental de la Cordillera Oriental en el departamento de Santander, Municipio de San Vicente de Chucurí, Corregimiento de Yarima, Vereda Los Colorados.

Limita al noroeste con el municipio de Barrancabermeja y al norte con el Campo La Cira – Infantas. Geográficamente el Campo se encuentra entre las coordenadas X= 1'036.000 - 1'040.500 Este y Y= 1'238.000 – 1'.247.500 Norte, con origen Bogotá (Zafra, 2009) (Figura 13.).

Figura 13 Localización general del área de estudio.



Fuente: Modificado de Colombian Sedimentary Basins, 2007

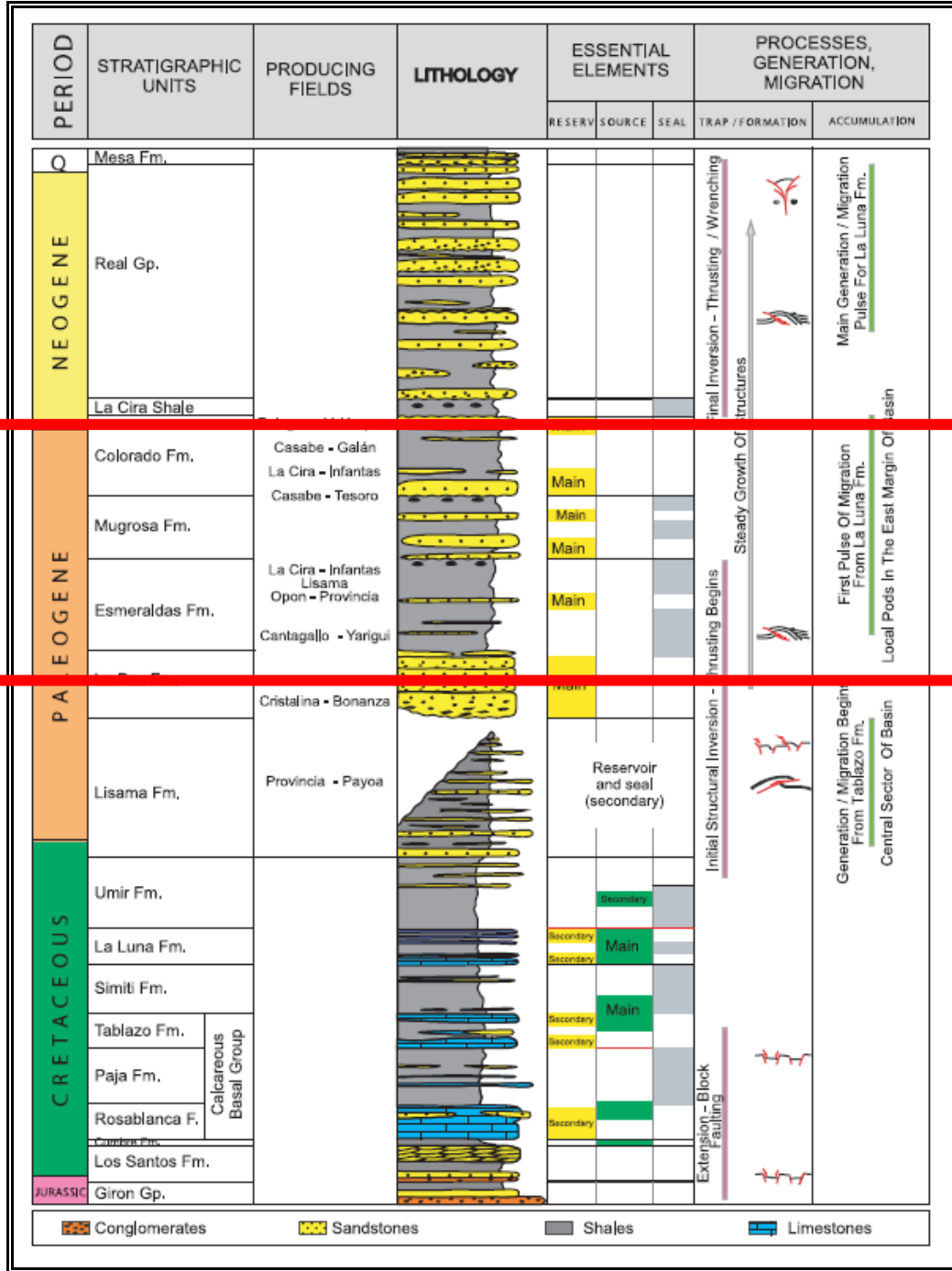
4.1.1 Estratigrafía

La secuencia estratigráfica del Valle Medio del Magdalena (VMM) fue inicialmente descrita por Morales et al. (1958) y modificada por Etayo et al. (1958) en Zafra, (2009).

La cuenca del Valle Medio del Magdalena presenta en su columna estratigráfica formaciones con Rocas Sedimentarias que van desde el Jurásico hasta el Cuaternario depositados en diferentes ambientes tales como continental, deltaico, de marino somero, y de litoral. (Duque, 2003). (Figura 14)

Las formaciones Esmeralda, Mugrosa y Colorado constituyen las unidades almacenadoras de hidrocarburos en la cuenca del Valle Medio del Magdalena. En el Campo Colorado el reservorio principal se encuentra en la zona C de la Formación Mugrosa de edad Paleógeno. A continuación se presenta una breve descripción de estas unidades.

Figura 14. Columna generalizada de la Cuenca del Valle medio del Magdalena. Dentro del recuadro rojo se encuentran las formaciones de interés para el proyecto.



Fuente: Colombian sedimentary basin, ANH (2006)

3.1.1.1 ROCAS DEL PALEÓGENO

La secuencia sedimentaria del Paleógeno en el Campo Colorado corresponde al intervalo Paleoceno–Reciente.

Las rocas sedimentarias son predominantemente de origen continental y fueron depositadas en una cuenca de antepaís. Posteriormente y hasta el reciente la depositación se dió en una cuenca intermontana como parte de un cinturón deformado, producto del levantamiento de las Cordilleras Central y Oriental (Barrero, 1979, Colleta et al., 1990; Dengo & Covey, 1993; Cooper et al., 1995 en Zafra, 2009).

La secuencia terciaria del VMM ha sido subdividida desde el punto de vista regional y de producción en las unidades operacionales A, B, C, D y E. Suárez (1996) utiliza un esquema crono–estratigráfico en el cual las unidades deposicionales se encuentran limitadas por discordancias y son denominadas informalmente por dicho autor como Tectonosecuencias, debido a su relación con eventos tectónicos ocurridos durante esta época en la Cuenca del VMM. La estratigrafía de base a techo corresponde a las formaciones Lisama, La Paz (Zona E), Esmeraldas (Zona D), Mugrosa (Zonas B y C), Colorado (Zona A), además del Grupo Real y el Grupo Mesa.

FORMACIÓN LISAMA (PALEOCENO)

La Formación Lisama se depositó en respuesta al cambio desde condiciones marinas (Formación Umir) a deltaicas, generando una secuencia regresiva de lodolitas, lutitas abigarradas, areniscas de grano fino a medio con cemento ferruginoso y mantos de carbón.

Su espesor es muy variable, especialmente en sentido E-W, notándose un incremento gradual hacia el sinclinal de Nuevo Mundo, donde parece haber tenido su máximo desarrollo con un espesor de aproximadamente unos 1065 metros (Valderrama R y Pérez V.1977 en Zafra, 2009).

El contacto inferior es transicional con la Formación Umir en el sector del Sinclinal de Nuevo Mundo. El contacto superior con la Formación La Paz está marcado por la discordancia angular del Eoceno medio. Las unidades que descansan sobre esta discordancia son variables a través de todo el VMM

FORMACIÓN LA PAZ (*EOCENO MEDIO-SUPERIOR*)

Está dividida en tres miembros, el inferior de areniscas grises masivas conglomeráticas (Toro), el miembro medio shales grises en grandes paquetes y el miembro superior de areniscas gruesas. Presenta un espesor que claramente puede alcanzar los 1000 m, con porosidades y permeabilidades optimas, lo cual hace que sean consideradas como rocas reservorio.

Esta formación corresponde a un ambiente de depositación de tipo fluvial en presencia de condiciones oxidantes, confiriéndole una coloración rojiza (Suárez, 1996 en Zafra, 2009).

Su contacto inferior con la Formación Lisama es discordante, mientras que el contacto superior es concordante con la Formación Esmeraldas.

FORMACIÓN ESMERALDAS (*EOCENO TARDÍO*)

La Formación Esmeraldas se encuentra suprayaciendo la Formación La Paz y abarca la mayor parte del Eoceno tardío, con un espesor que puede alcanzar unos 1.500 pies.

Litológicamente está compuesta de espesos intervalos de lodolitas y limolitas oscuras con delgados mantos de carbón depositados en ríos meándricos (Rubiano, 1995 en Zafra, 2009); el límite de la Formación Esmeraldas esta dado por un nivel rico en moluscos de agua dulce y palinomorfos denominado "Horizonte Fosilífero Los Corros"

FORMACIÓN MUGROSA (*OLIGOCENO – MIOCENO INFERIOR*)

La Formación Mugrosa tiene un espesor que varía desde 1.900 a 2.400 pies y está compuesta por intercalaciones de areniscas de grano fino y lodolitas

varicoloreadas, acumuladas dentro de un ambiente de sistemas de ríos meándricos (Rubiano, 1995 en Zafra, 2009).

La Formación Mugrosa se encuentra subdividida en Zona B y Zona C para efectos operacionales (Waring, 1931 en Zafra, 2009). Las zonas B y C se subdividen en B₀, B₁, B₂, B₃ y C₁, C₂ y C₃.

Fonseca y García (2009) en su trabajo de grado realizaron una descripción sedimentológica de cada subzona de la Formación Mugrosa y cuantificaron los espesores promedio de los paquetes arenosos.

La sección inferior denominada Zona C (MZC), está compuesta de areniscas gris verdosa y gris clara, de grano fino a grano medio, feldespática, ocasionalmente calcárea, con estratificación cruzada y geometría lenticular; alternando con arcillolitas gris clara y pardo amarillas, abigarradas.

- En la subzona C₁ los mayores espesores de arenas se encuentran hacia la parte central del campo con intervalos entre 200 y 250 ft de espesor neto, el ancho de estos cuerpos es en promedio 150 a 200 m. la continuidad lateral es muy buena.
- En la subzona C₂ los mayores espesores de arenas se encuentran hacia la parte Central-oeste de 180- 230 ft de espesor, siguiendo la orientación anteriormente mencionada. El ancho de estos cuerpos es aproximadamente de 200 a 250 m, la continuidad lateral que presentan estos cuerpos arenosos es alta.
- En la subzona C₃ los mayores espesores de arenas se encuentran hacia la parte Central del campo con intervalos entre 80 y 100 ft, el ancho de estos cuerpos es en promedio de 100 a 200 m.

La sección superior corresponde a Zona B (MZB), y comprende una alternancia de areniscas de color gris verdosa, de grano fino a grano medio, con matriz arcillosa,

selección regular, carbonosa y arcillolitas ligeramente arenosas, de color pardo amarillo.

- La subzona B₀ no posee ninguna continuidad lateral entre sus pocos cuerpos arenosos, por esto no tiene ninguna importancia como roca reservorio, pero sí constituye un sello regional.
- La subzona B₁ también tiene poco continuidad lateral, tiene un promedio de arenas que varía entre los 14 y los 35 ft de espesor.
- En la subzona B₂ el ancho de los paquetes arenosos es de 200 metros y el espesor promedio que mejor continuidad lateral muestra está entre los 10 y los 15 ft.
- La subzona B₃ no tiene ninguna o poca importancia como roca reservorio, sus cuerpos tienen poco espesor y la interconectividad entre los paquetes es mínima. Esta subzona representa un sello regional para la Formación Mugrosa.

Esta Formación sería equivalente a la denominada Tectonosecuencia 2 .(Suárez, 1996, en Zafra, 2009)

El tope de la Formación Mugrosa esta dado por el horizonte fosilífero de Mugrosa, el cual consta de shales gris verdosos, carbonosos, glauconíticos, en el que se encuentra englobado una fauna de moluscos que se conoce como el “Horizonte fosilífero de Mugrosa”.

FORMACIÓN COLORADO (*MIOCENO INFERIOR A MIOCENO MEDIO*)

La Formación Colorado consiste de un nivel inferior el cual está compuesto de arcillolitas pardo rojizas, pardo amarillas y gris claras, ligeramente arenosas, masivas, con intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano fino a conglomeráticas y matriz arcillosa. Seguido de un nivel superior de areniscas conglomeráticas, friables, compuestas de cuarzo y una alta proporción de chert amarillo y negro con una matriz arcillosa. Presenta un espesor de 210 metros hasta 914 metros.

El ambiente de depositación de esta unidad es un ambiente con condiciones de alta oxidación, lo cual indica que es un ambiente continental (Morales, 1958).

La Formación Colorado se caracteriza por una amplia distribución al oeste de la falla de la Salina y debido a que el ambiente de sedimentación es continental de tipo fluvial. (Wheeler, 1935 en Zafra, 2009).

Esta formación presentan rocas reservorio con buena porosidad entre un 15 – 20% y permeabilidades entre 20 – 600 mD. El contacto inferior está dado por los fósiles de Mugrosa. Esta secuencia corresponde a la tectonosecuencia 3 de Suárez (1996).

4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL DE LA CUENCA

El VMM constituye una depresión tectónica con dos márgenes bien diferenciadas: un borde pasivo al occidente caracterizado por una geometría monoclinas con presencia de truncamientos de las formaciones Cretácicas que desaparecen hacia la Cordillera Central bajo sedimentos terciarios. Hacia la Cordillera Oriental la deformación se incrementa con un complicado margen compresional (Martínez et al., 1989) (Figura 15), de tal manera que el subsuelo del Cretáceo es cada vez más antiguo hacia el Oeste y el Cretáceo superior se restringe al Este del VMM.

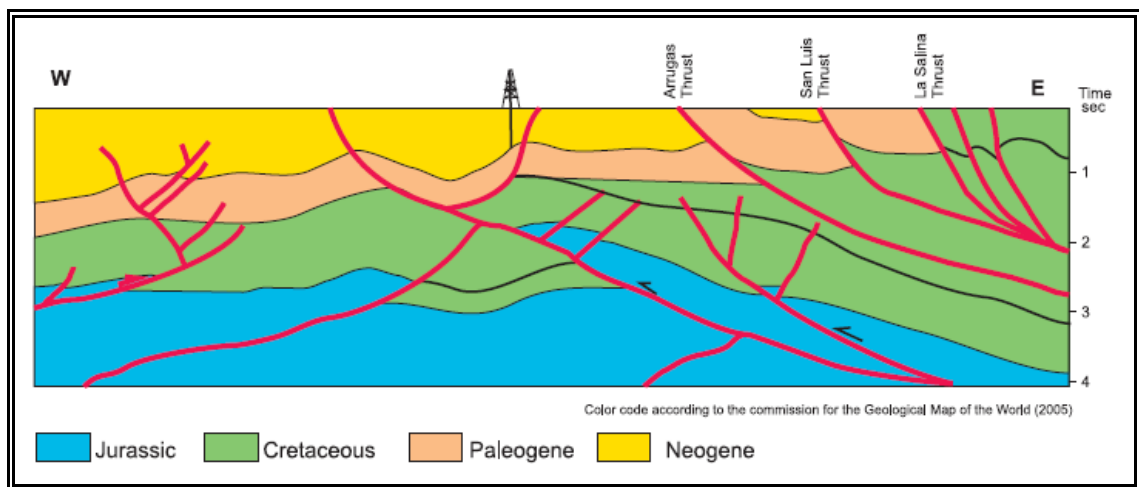
Sobre este subsuelo descansan discordantemente las rocas de la secuencia sedimentaria del Terciario extendida heterogéneamente por toda la cuenca del VMM, cuya base presenta una relación de “onlap” hacia el borde oeste de la cuenca.

Dentro de las estructuras predominantes en la zona existen las siguientes tendencias:

- Anticlinales con dirección preferencial Noreste, con cabeceo al Norte.

- Mega falla de rumbo que corresponde a la prolongación Norte de la denominada Falla de Casabe.
- Fallas normales con los bloques orientales hundidos.
- Fallas transcurrentes satélites como resultado de fallas de basamento reactivadas.(Zafra, 2009).

Figura 15. Corte Geológico de la cuenca del Valle Medio del Magdalena.



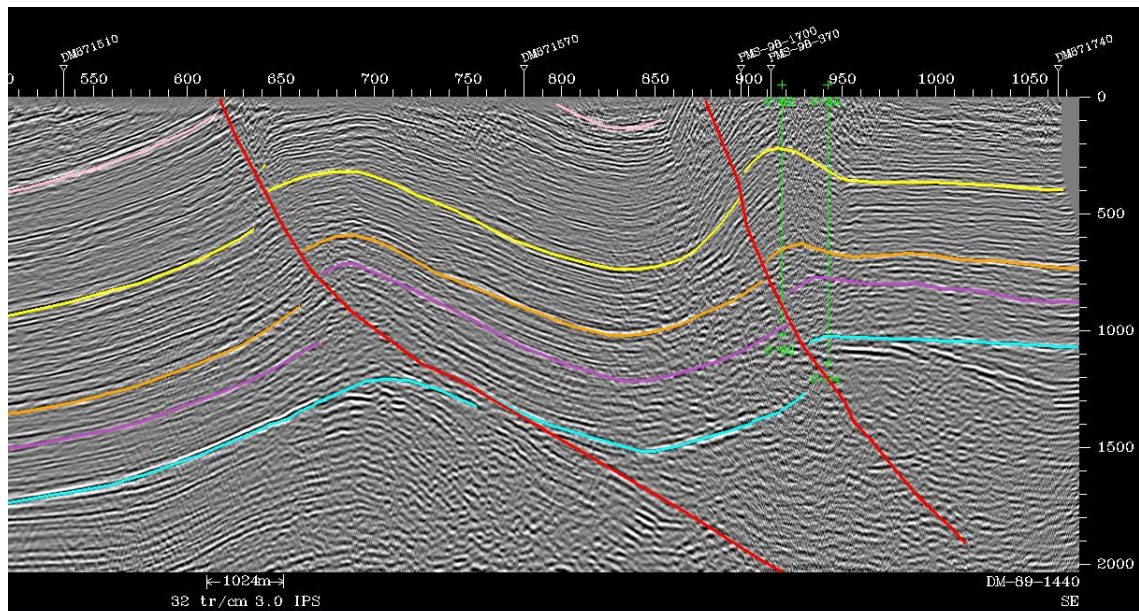
Fuente: Colombian sedimentary basin, ANH (2006)

4.2.1 Estructura del Campo Colorado

De la sísmica disponible en el área cercana al campo se infiere una geometría anticlinal (Valencia y Castro, 1979 en Duque, 2003). Esta estructura geológica está conformada por un anticlinal elongado asimétrico, cuyo flanco más extenso buza al oriente y el más corto hacia el occidente con inclinaciones entre 25 a 45°, con eje N-S y cabeceo hacia el norte, limitado al Este por La Falla de Colorado, la cual es inversa (Duque, 2003) (Figura 16). Este anticlinal se encuentra dividido en

siete bloques separados por 6 fallas de tipo inverso y una normal que van en sentido SW-NE, cabalgándose unos a otros hacia el norte (Duque, 2003). Esta estructura fue definida principalmente a partir de la correlación de registros de pozo, identificándose un sistema de fallas satélite SW-NE en el bloque colgante de la Falla de Colorado; 6 fallas de tipo inverso y una normal que evidencia relajación del sistema de esfuerzos compresivos dominante, hacia el norte de la estructura (Duque, 2003).

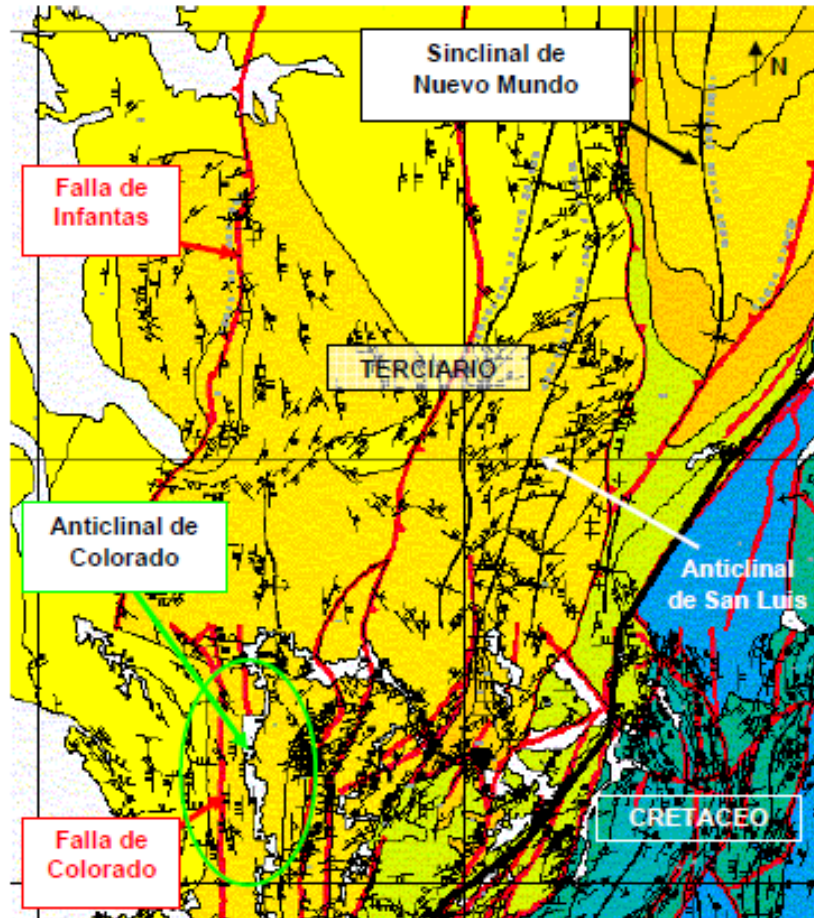
Figura 16. Línea sísmica DM-89-1440. Sentido NW-SE.



Fuente: Informe AIP-ANSALL para Ecopetrol (2003)

El Anticlinal de Colorado está limitado regionalmente por rasgos estructurales en sentido N-S y SSW-NNE tales como: la Falla de Infantas al NNW, el Anticlinal de San Luis al ENE, la Falla de La Salina y el Sinclinal de Nuevo Mundo al NE (Duque, 2003) (Figura 17).

Figura 17. Mapa geológico del Centro de la Cuenca de VMM. El campo Colorado se encuentra dentro del círculo verde.



Fuente: Informe AIP-ANSALL para Ecopetrol (2003)

4.3 IMPLICACIONES DE LA GEOLOGIA EN EL DISEÑO DE PARAMETROS

Es importante conocer cuáles son los objetivos geológicos para los que se está diseñando la adquisición sísmica 3D.

El objetivo geológico principal del campo es la subzona C de la formación Mugrosa ya que constituye el principal reservorio del campo.

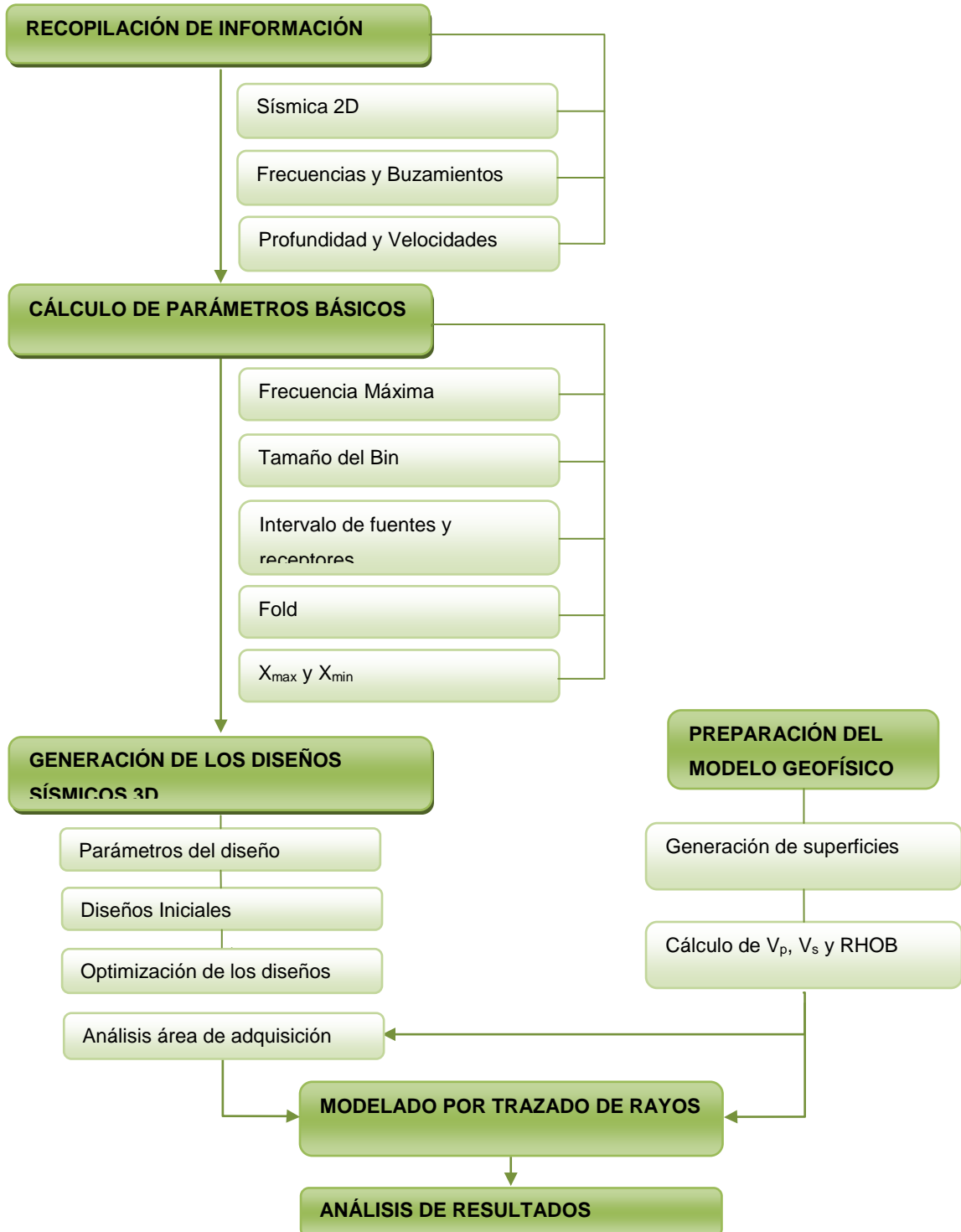
Otro factor importante es la resolución que se requiere en la sísmica para observar los objetivos de menor espesor, en este caso el diseño debe garantizar que podrá obtenerse una imagen clara del conjunto de canales amalgamados de menor

espesor en la Fm. Mugrosa. Las dimensiones de estos cuerpos arenosos serian de 14m de espesor vertical promedio y de 100 a 400m de extensión lateral.

Por último, es necesario conocer las profundidades a las que se encuentran los objetivos geológicos para determinar la profundidad máxima que se requiere para tener una imagen clara del objetivo en ese punto. Este valor se puede obtener de los registros de pozo y se muestra en numeral 5.1.4.

5. METODOLOGÍA

Figura 18. Metodología planteada para el desarrollo de este proyecto.



Para el desarrollo del proyecto se planteó una metodología de trabajo que permitió a partir de la integración de la sísmica e información de pozo, alcanzar los objetivos propuestos y proponer un diseño sísmico 3D ajustado a las necesidades del campo Colorado (Figura 18).

5.1 Recopilación de Información

La primera fase de la investigación consistió en la recopilación bibliográfica de líneas sísmicas 2D que permiten obtener valores de frecuencias y velocidades sísmicas RMS, registros de pozo *Dipmeter* para determinar el buzamiento de las zonas productoras y la profundidad de la formación productora (Fm. Mugrosa) en los 75 pozos que tiene el campo.

En este proyecto se utilizó información de 3 líneas sísmicas que son: DM-1987-1470, SL-1995-1290 y SL-1995-1420. 18 registros de pozo *Dipmeter* y por último, para determinar la variación en profundidad de la formación objetivo o productora (Fm Mugrosa), se utilizaron los 75 pozos para tener un mejor control.

Estos valores son los datos de entrada para el cálculo de los parámetros básicos de un diseño sísmico 3D como los son el *Fold*, la Frecuencia máxima, el tamaño del Bin y el intervalo de fuentes y receptores.

5.1.1 Sísmica 2D del Campo Colorado

En el campo colorado se han realizado tres programas sísmicos 2D, programa De Mares 1987, programa San Luis 1995 y el Proyecto PMS.

Para realizar este proyecto se utilizaron líneas sísmicas del programa De Mares 1987 y el programa San Luis 1995. Las características de estas adquisiciones se muestran a continuación.

5.1.1.1 Programa San Luis 1995

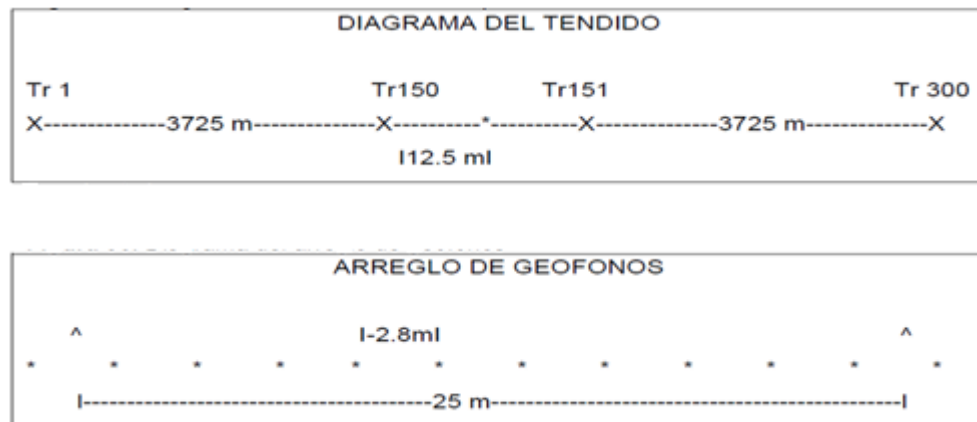
El programa San Luis cuenta con 25 líneas sísmicas que suman 508.850 Kilómetros de los cuales buena parte atraviesa el campo. Estas líneas sísmicas fueron adquiridas y procesadas por la empresa GAPS entre 1995 y 1996. Los resultados según el informe entregado por esta compañía dan una buena calidad de los datos procesados a pesar de la muy complicada geología estructural y de la respuesta intrínseca de las rocas cretácicas.

Los parámetros utilizados para esta adquisición (Figura 19) se encuentran en la siguiente lista:

- parámetros de adquisición: 300 canales, 4 canales auxiliares,
- cubrimiento máximo (FOLD) de 150
- tendido simétrico.
- *Fuente:* Dinamita Sismigel
- *Distancia entre Pozos:* 25m.
- *Arreglo de fuente:* 1,3 y 4 pozos entre estacas.
- *Profundidad:* 33,12 y 10pies
- *Carga:* 1800,900 y 1350 gramos.
- *Receptores:* GS 20 DX- 10Hz
- *Distancia entre grupos:* 25m
- *Geófonos por grupo:* 12
- *Distancia entre geófonos:* 2.08m
- *Dispositivos de geófonos:* centrado en estaca
- *Longitud de Registro:* 7 segundos
- *Intervalo de muestreo:* 2 milisegundos.

La grafica muestra el diagrama de tendido del programa San Luis 1995 y la distribución de los arreglos de geófonos.

Figura 19. Geometría de adquisición del Proyecto San Luis 1995.



Fuente: Autor.

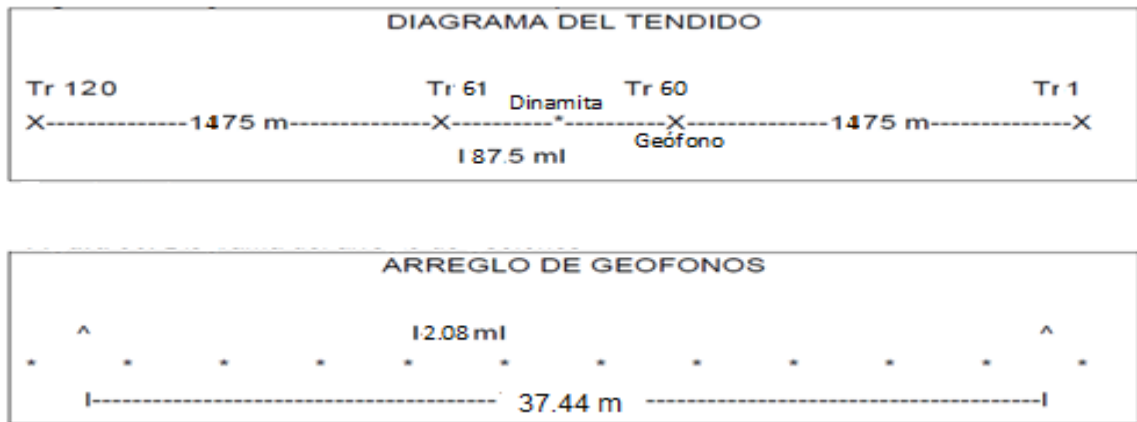
5.1.1.2 Proyecto DE MARES 1987

En el proyecto DE MARES 1987 la compañía encargada de hacer la adquisición fue G.S.I. Los parámetros de adquisición fueron los siguientes (Figura 20):

- Tipo de instrumento: DFS-V
- Intervalo de muestreo: 2 msec
- Longitud del registro: 5 seg
- Número de canales: 120
- Fuente de energía: Dinamita
- Profundidad de la fuente: 60 Ft
- Tamaño de la carga: 4 Libras
- Patrón de geófonos: 18 en línea
- Distancia entre los Geófonos: 2.08 m
- Distancia entre grupos: 25 m
- Distancia entre puntos de disparo: 100 m
- Fold 2D o cubrimiento en el subsuelo: 15

- La grafica muestra el diagrama de tendido del programa San Luis 1995 y la distribución de los arreglos de geófonos.

Figura 20. Geometría de adquisición del Proyecto De Mares 1987.

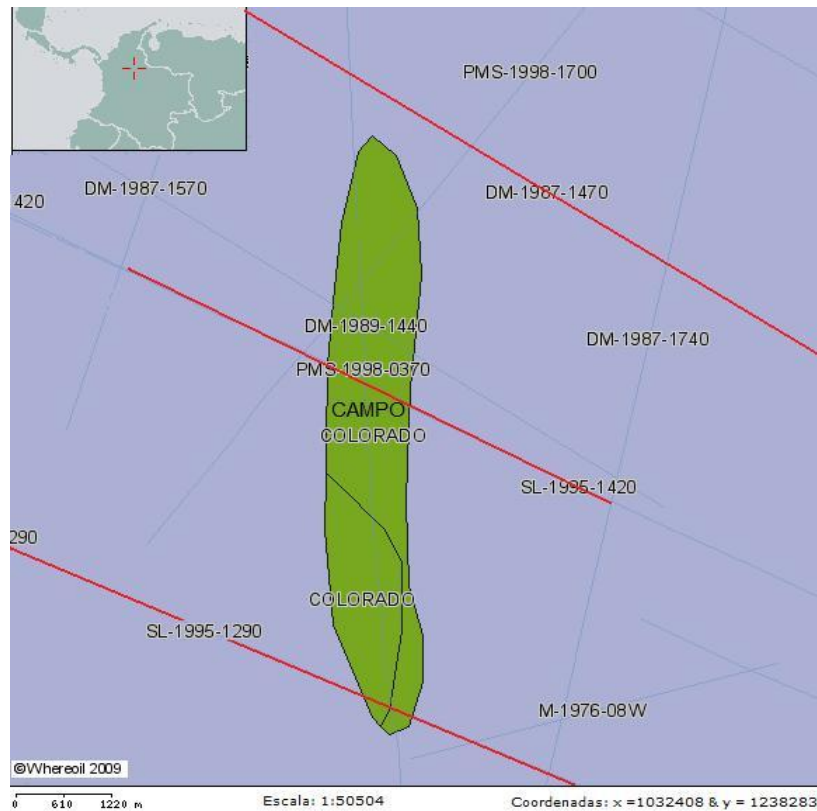


Fuente: Autor

5.1.2 Cálculo de las frecuencias en la formación objetivo (Fm Mugrosa.)

En este estudio se analizaron las líneas DM-1987-1470, SL-1995-1420 y SL-1995-1290 (Figura 21), se obtuvieron valores de frecuencia en datos crudos (sin procesar) y datos procesados. A la línea DM-1987-1470 fue necesario cargarle la geometría para poder realizar el análisis de frecuencias en datos crudos. Las líneas SL-1995-1420 y SL-1995-1290 ya estaban procesadas.

Figura 21. Ubicación espacial dentro del campo Colorado de las líneas sísmicas utilizadas en este proyecto.



Fuente: <https://www.epis.com.co/WhereoilMap/protected/displayMap.faces;jsessionid=89C04DE6388BA33EA525B76FB37599CF>

La tabla 1 relaciona los diferentes valores de frecuencia para cada línea a diferentes intervalos de tiempo

Tabla 1. Frecuencias de las líneas en los reflectores de interés

| Línea Sísmica | T=Intervalo de tiempo(ms) | de | Frecuencia dom [Hz] |
|---------------|---------------------------|----|---------------------|
|---------------|---------------------------|----|---------------------|

| | | |
|---------------------|----------------|-------------|
| SL-1995-1420 | R1 [560-577] | F1 58.82 Hz |
| | R2 [350-376] | F2 38.46 Hz |
| | R3 [394-418] | F3 41.66 Hz |
| | R4 [943-972] | F4 34.48 Hz |
| SL-1995-1290 | R1 [980-1008] | F1 35.71 Hz |
| | R2 [1019-1039] | F2 50.0 Hz |
| | R3 [678-704] | F3 38.46 Hz |
| DM-1987-1470 | R1 [880-916] | F1 27.77 Hz |
| Datos crudos | R2 [784-812] | F2 35.71 Hz |

Para medir de forma directa estos valores fue necesario visualizar los datos sísmicos en forma de trazas y luego hacer un zoom en el intervalo de tiempo y de CDP que garantizara que la información corresponda con el objetivo geológico de interés (figura 22) y así poder medir un período de tiempo para después obtener la frecuencia del mismo.

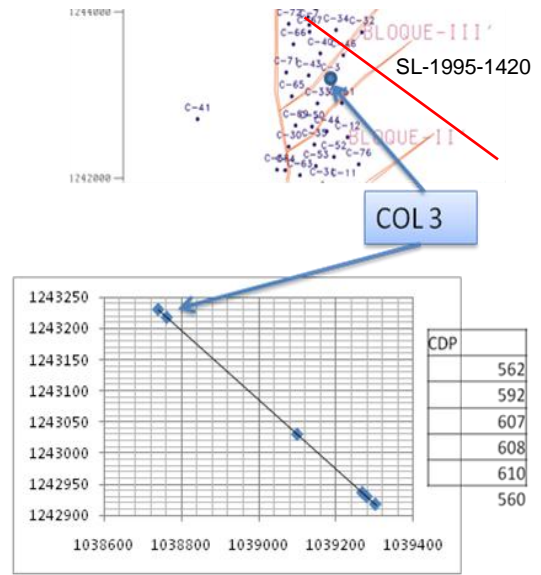
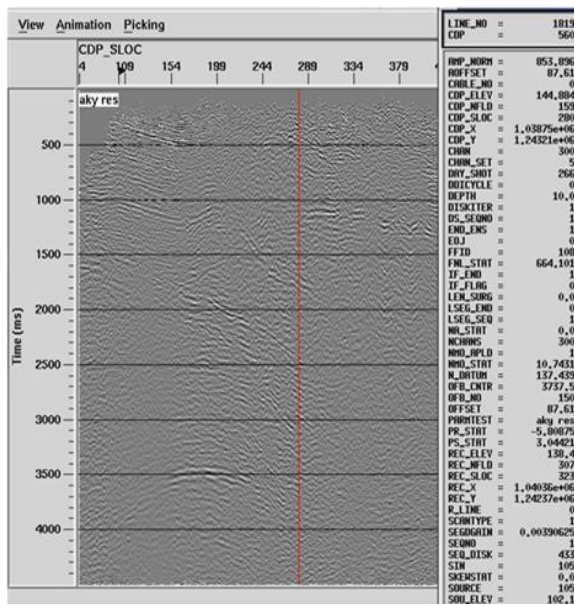
5.1.2.1 Frecuencias de la línea SL-1995-1420

La línea sísmica fue procesada en la tesis de pregrado de Zafra, 2009. La línea vertical roja en la figura 23 representa la ubicación del pozo COL 3 que corresponde al CDP 560 (CDP_SLOC 280). Se tomaron valores de frecuencias en 4 CDP's distintos que están cercanos al CDP del pozo COL 3.

El procedimiento para medir las frecuencias en las 3 líneas fue el mismo, tomar un período de tiempo de la traza que se encuentre dentro de las reflexiones objetivo y calcular el inverso de este tiempo para obtener su frecuencia.

Los tiempos medidos se encuentran por encima de la discordancia del Eoceno paleoceno la cual es la base de las formaciones depositadas durante el terciario.

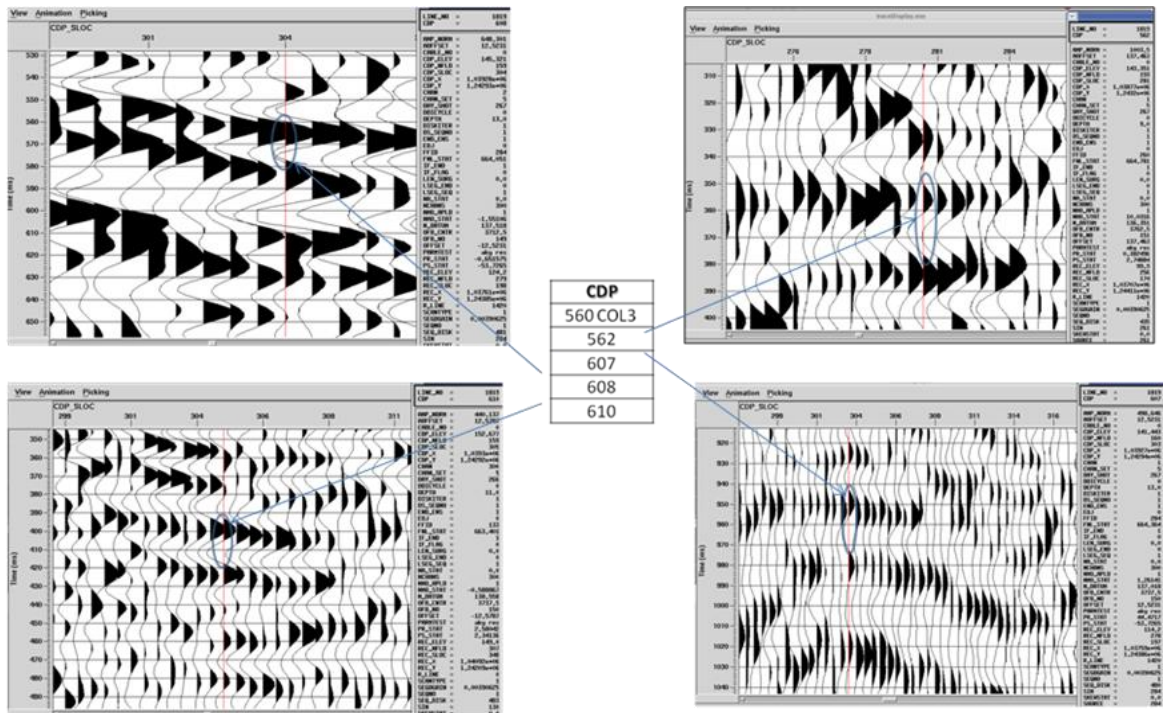
Figura 22. Línea SL-1995-1420. Ubicación del pozo dentro de la línea en tiempo.



Fuente: Autor

La medición se hizo en reflectores que mostraran buena continuidad. Los valores de frecuencia para la línea SL-1995-1420 varían entre 35 y 59 Hz (Figura 23).

Figura 23. Medición de un periodo de la traza en 4 diferentes CDP's a diferentes tiempos (vertical) dentro de la Línea SL-1995-1420.

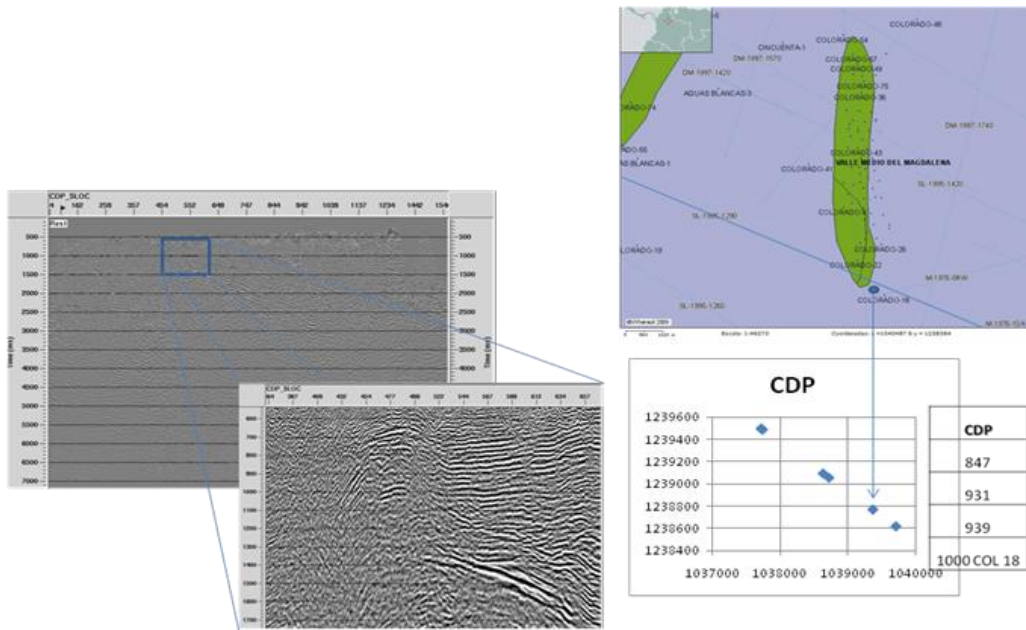


Fuente: Autor

5.1.2.2 Frecuencias de la línea SL-1995-1290

En la Figura 24 podemos observar la línea sísmica SL-1995-1290 ubicada al sur del campo. Hacia el sur el anticlinal es más apretado que en la parte central y también se observa una buena resolución de la estructura. En esta línea se tomaron los valores cercanos al pozo COL 18.

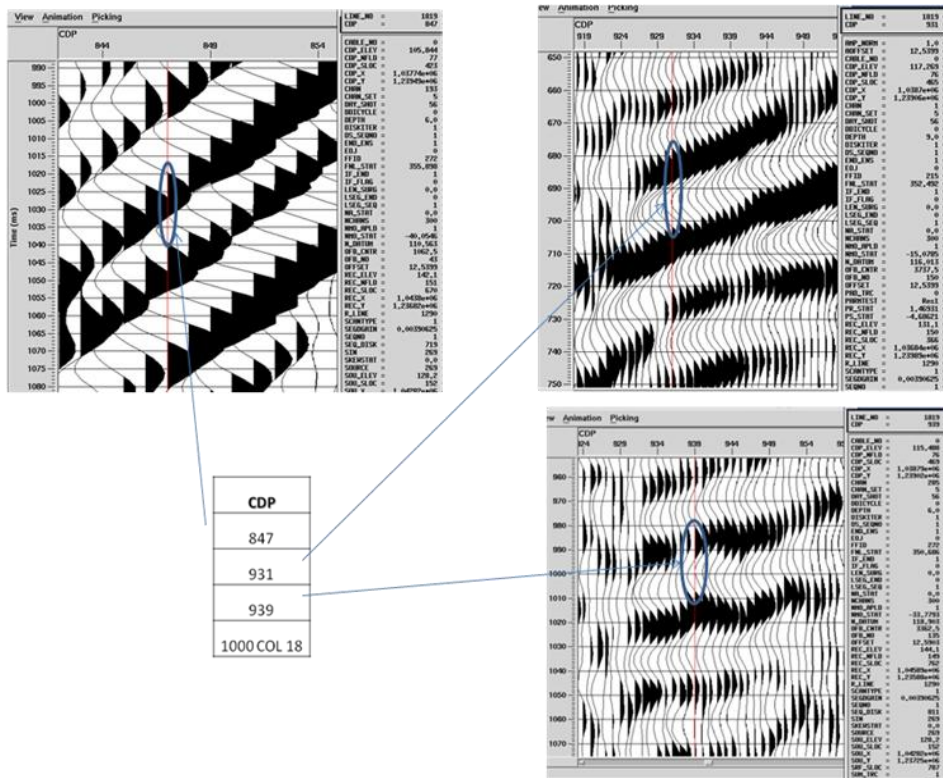
Figura 24. Línea SL-1995-1290. Ubicación del pozo COL 18 (CDP 1000) dentro de la línea en tiempo.



Fuente: Autor

La figura 25 corresponde a las medidas tomadas en la línea sísmica SL-1995-1290. Para esta línea se tomaron datos en 3 diferentes CDP's, todos cercanos al pozo COL 18 y se observa una muy buena continuidad de los reflectores. Los valores de frecuencia varían de 35 a 39 Hz

Figura 25. Medición de un período de la traza en 3 diferentes CDP's a diferentes tiempos (vertical) dentro de la Línea SL-1995-1290.



Fuente: Autor

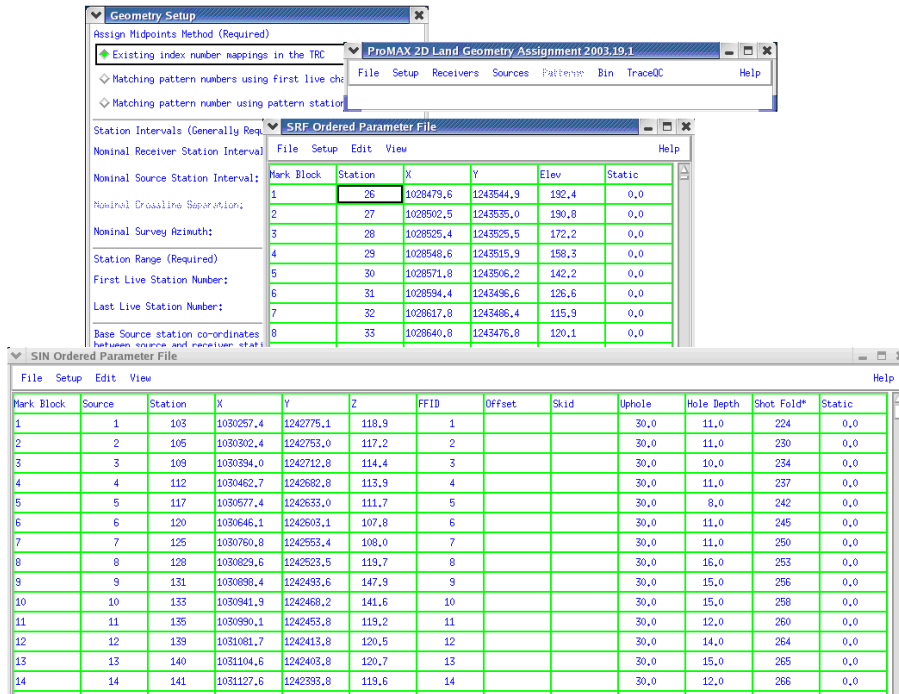
5.1.2.3 Frecuencias de la línea DM-1987-1470

La línea 1470 del programa sísmico De Mares 1987 a diferencia de las anteriores, se encuentra sin procesar, por lo que fue necesario cargarle la geometría para poder ubicar los disparos que están cercanos a los pozos del campo.

5.1.2.3.1 Geometría de la línea DM-1987-1470.

En la geometría se configura el diseño de adquisición (coordenadas X, Y, Z), offset, azimut, profundidad del agua, profundidad de los receptores y de la fuente etc., utilizando los archivos UKOOA y el reporte del observador, con el objetivo que cada traza quede perfectamente ubicada (Figura 26).

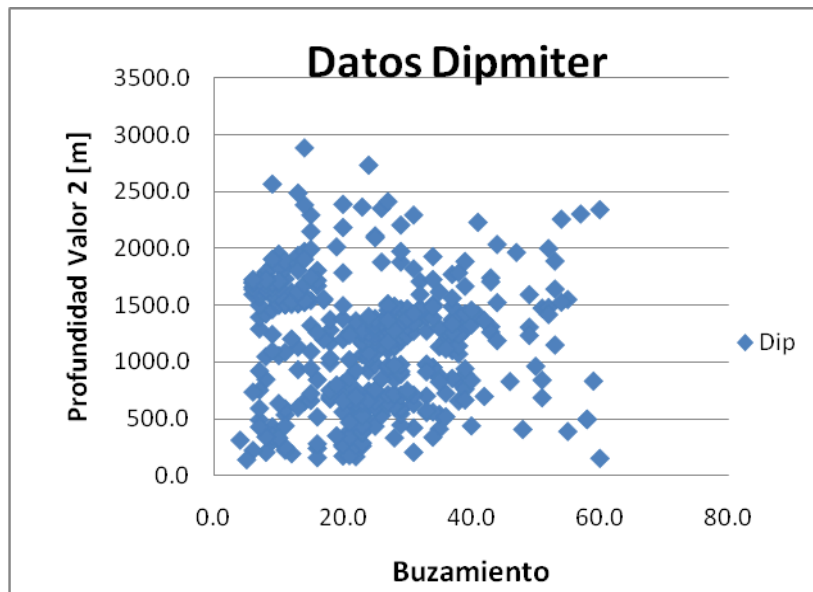
Figura 26. Carga de geometría de la línea DM-1987-1470



Fuente: Autor

La figura 27 muestra los intervalos de tiempo medidos en la línea sísmica DM-1987-1470. Debido a que los datos están son procesar, es posible analizar frecuencias que no tienen ninguna ganancia o filtrado y que muestran la respuesta del subsuelo.

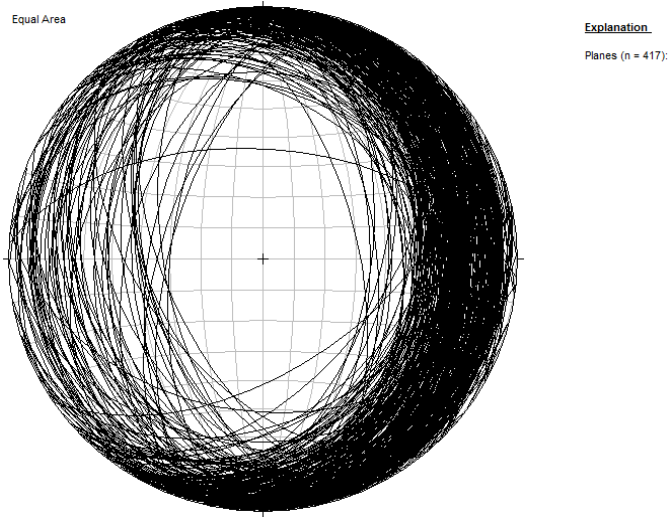
Figura 27. Frecuencias de la línea sísmica DM-1987-1470.



Fuente: Autor

Utilizando una estereoneta es posible observar que la estructura del campo está determinada por dos flancos bien definidos en dirección E-W que confirman la estructura anticlinal propuesta por Valencia y Castro (1979). Se observa una gran densidad de datos en el flanco oriental pues allí se encuentran la mayoría de los pozos y que su flanco occidental tiene mayores ángulos de buzamiento (60 grados) (Figura 29).

Figura 29. Estereoneta de los datos Dipmeter del Campo Colorado



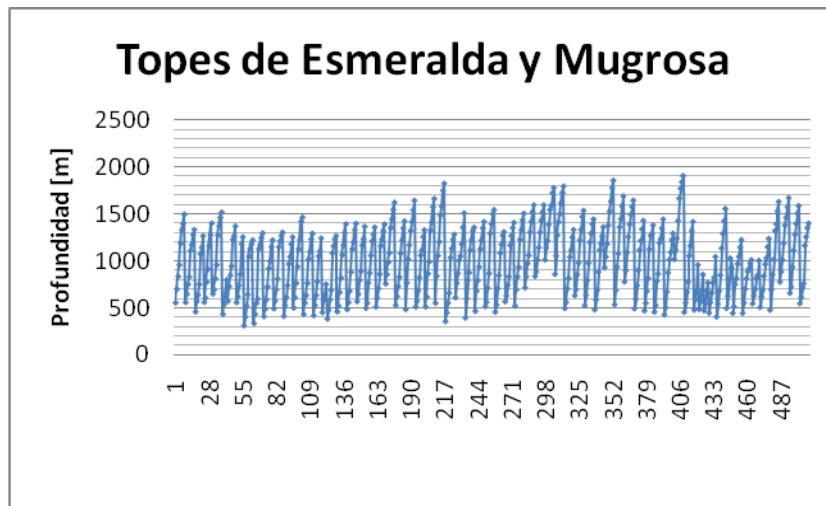
Fuente: Autor

5.1.4 Cálculo de la profundidad del objetivo geológico

En el Campo Colorado las formaciones productoras son Terciarias, entre ellas están la formación Esmeralda, Mugrosa y Colorado en orden estratigráfico.

Para calcular la profundidad de las formaciones u objetivos geológicos que se quieren iluminar con el diseño 3D a través de todo el anticlinal, es necesario tener una buena cantidad de pozos que permita determinar con exactitud a qué profundidad se encuentran estas formaciones y como varían debido a la estructura del campo. En la figura 30 se puede observar que la profundidad más somera se encuentra a 308 m que corresponde al tope de la Fm. Mugrosa y la más profunda está a 1906 m que corresponde al tope de la Fm. Esmeraldas.

Figura 30. Variación de la profundidad de la Fm. Mugrosa en los 75 pozos.



Fuente: Autor

5.1.5 Cálculo de las velocidades RMS en los objetivos

Para conocer mejor como es la distribución del campo de velocidades dentro de las formaciones objetivos, se toman varias líneas sísmicas, procesadas y en datos crudos, que pasen por el Campo Colorado para extraer valores de velocidad RMS dentro de los rangos de tiempo que se encuentran los reflectores de interés en estas líneas 2D.

En este estudio analizaron las líneas DM-1987-1470E, SL-1995-1420 y SL-1995-1290.

La mínima velocidad de interés, en combinación con la máxima frecuencia necesaria y el máximo buzamiento esperado determinan el tamaño del Bin. En combinación con los buzamientos determina las aperturas de migración (Álvarez, 1999).

La tabla 2 muestra los valores medidos para cada una de las 3 líneas sísmicas.

Tabla 2. Velocidades RMS en 3 líneas sísmicas distintas para las mismas formaciones.

| Líneas sísmicas | Velocidad RMS mínima y máxima |
|-----------------|--|
| SL-1995-1290 | V1: 2988 m/s V2: 3375 m/s |
| SL-1995-1420 | V1: 2519 m/s V2: 3500 m/s |
| DM-1987-1470E | V1: 2791-2865 m/s V2: 3517-3566 m/s |

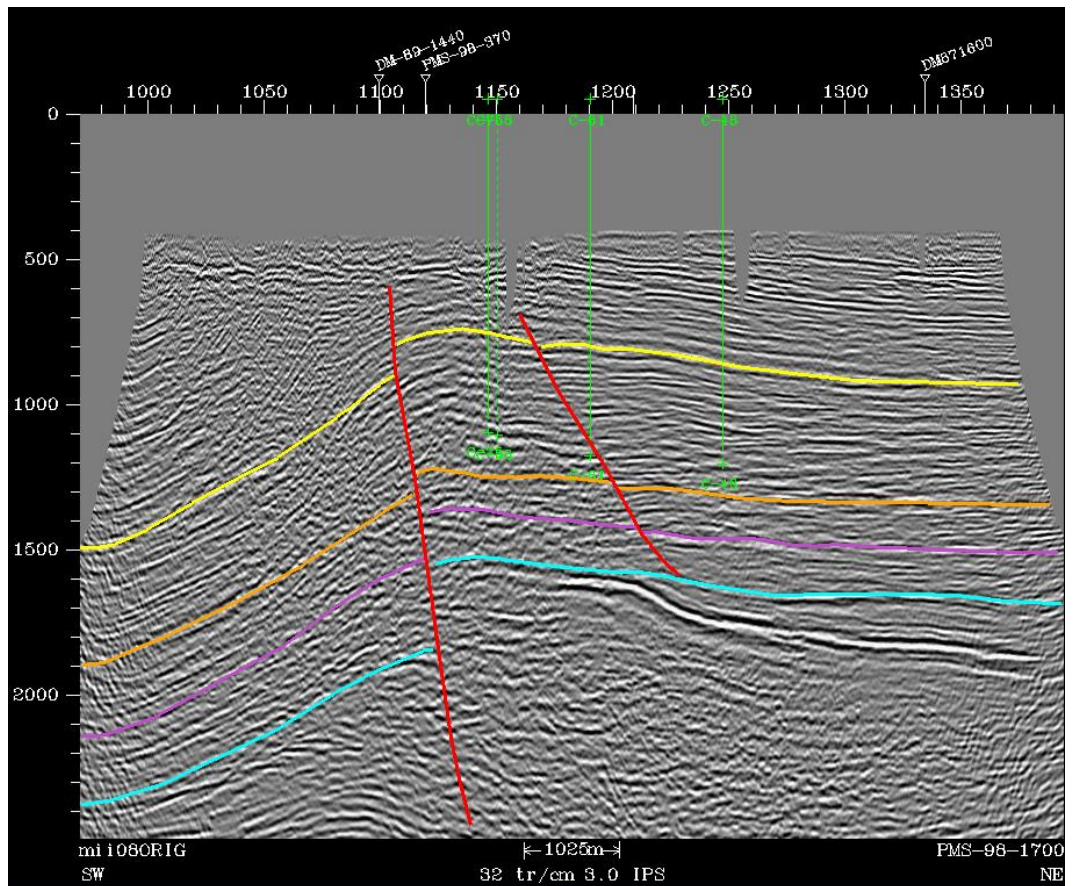
Fuente: Autor

5.1.5.1 Velocidades RMS para la línea DM-1987-1470E

Las velocidades sísmicas RMS se obtienen a partir de líneas sísmicas procesadas. Durante la fase de procesamiento, al momento de picar la semblanza, es posible obtener un campo de velocidades RMS de toda línea. Ubicando la zona de interés (número de CDP o puntos de disparo) en superficie y conociendo los tiempos a los cuales se encuentran los reflectores de interés, podemos definir los valores de velocidad RMS.

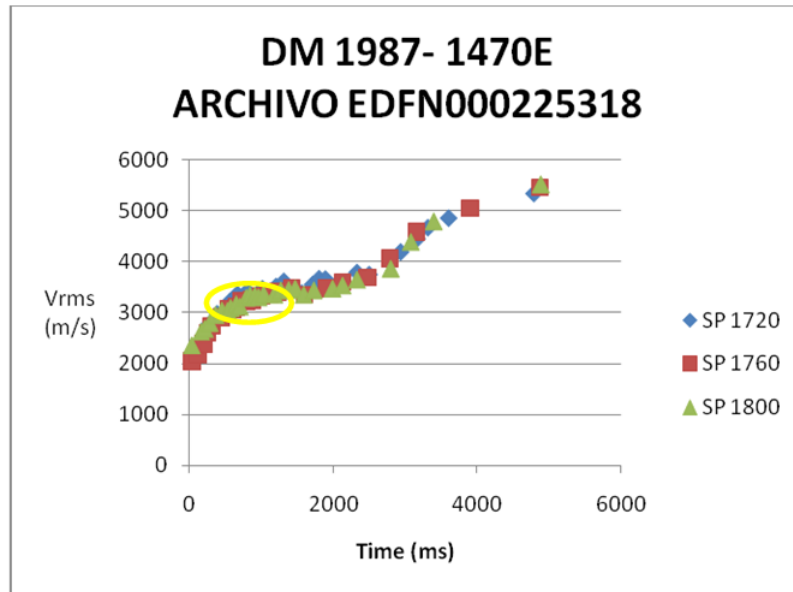
De la línea DM-1987-1470E se obtuvieron las velocidades RMS entre los intervalos de disparo 1700 a 1800, y solo se observaron los valores de velocidad entre los 700 y 1600 ms (figura 31 y 32)

Figura 31. Línea sísmica DM-1987-1470E. Podemos observar que los reflectores interpretados se encuentran desde los 700 a 1600 ms en los bloques donde se encuentran los pozos.



Fuente: Informe AIP-ANSALL para Ecopetrol (2003)

Figura 32. Diagrama de dispersión de las velocidades Vs la profundidad en 3 puntos de tiro distintos. Dentro del círculo se encuentran los valores de interés.

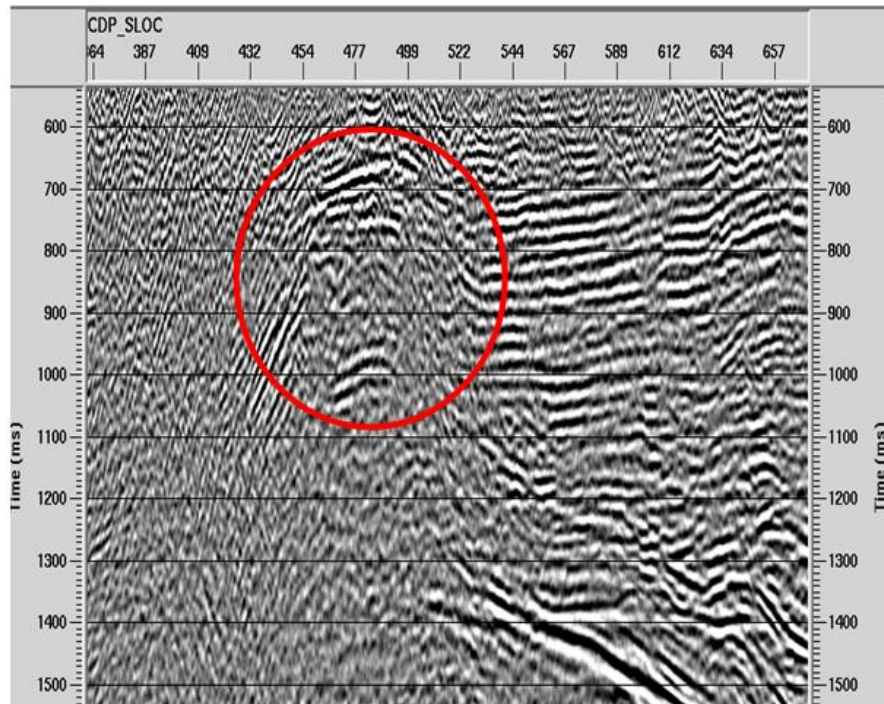


Fuente: Autor

5.1.5.2 Velocidades RMS para la línea SL-1995-1290

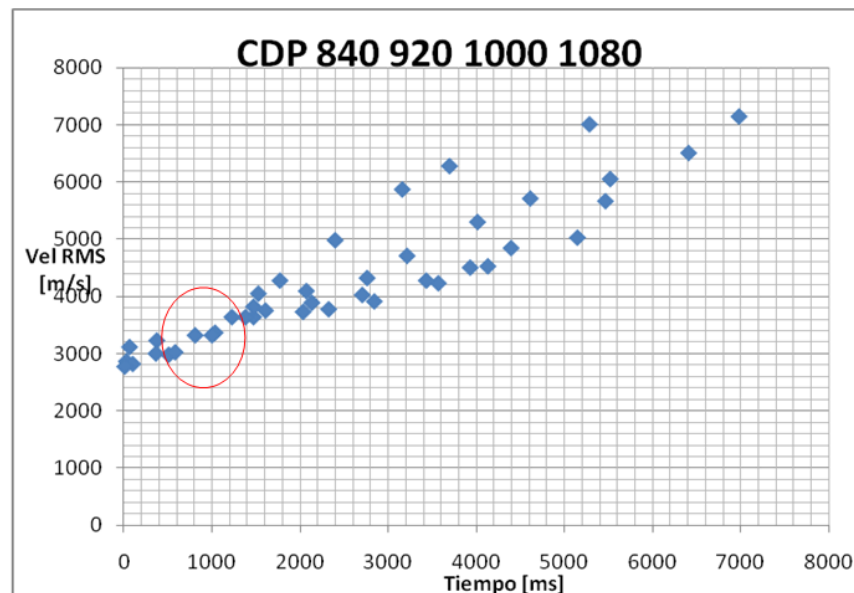
Para la línea sísmica SL-1995-1290 se realizó el mismo procedimiento. Se analizó la línea entre el CDP 840 y 1080, y el intervalo de tiempo fue entre 620 y 1100 ms (Figuras 33 y 34)

Figura 33. Línea sísmica SL-1995-1290. Dentro del círculo se observa el anticlinal de colorado.



Fuente: Autor

Figura 34. Velocidad RMS vs Profundidad. Conociendo el intervalo de tiempo, se puede hallar la velocidad RMS que se busca.

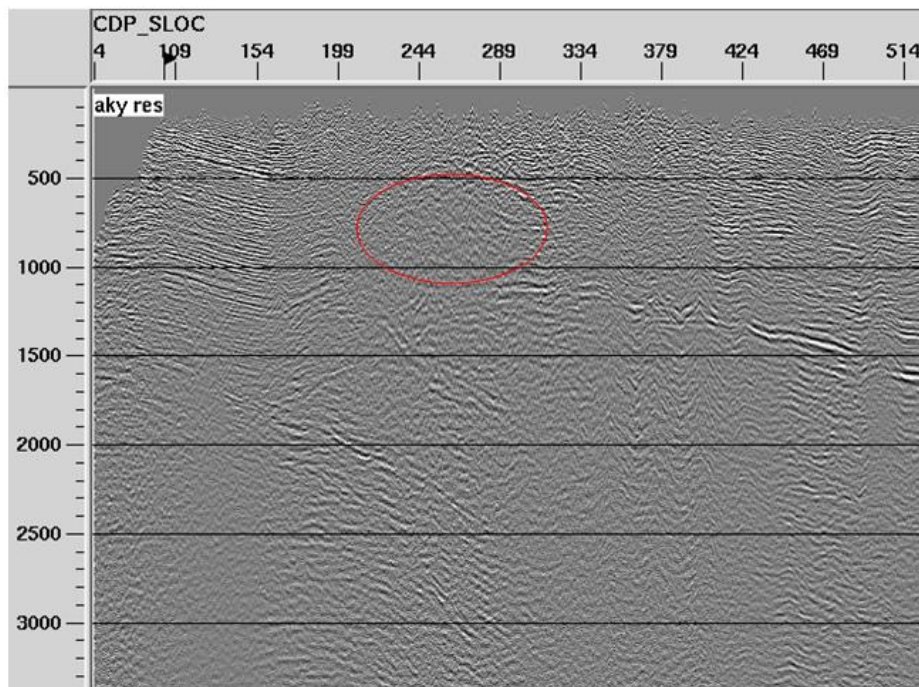


Fuente: Autor.

5.1.5.3 Velocidades RMS para la línea SL-1995-1420

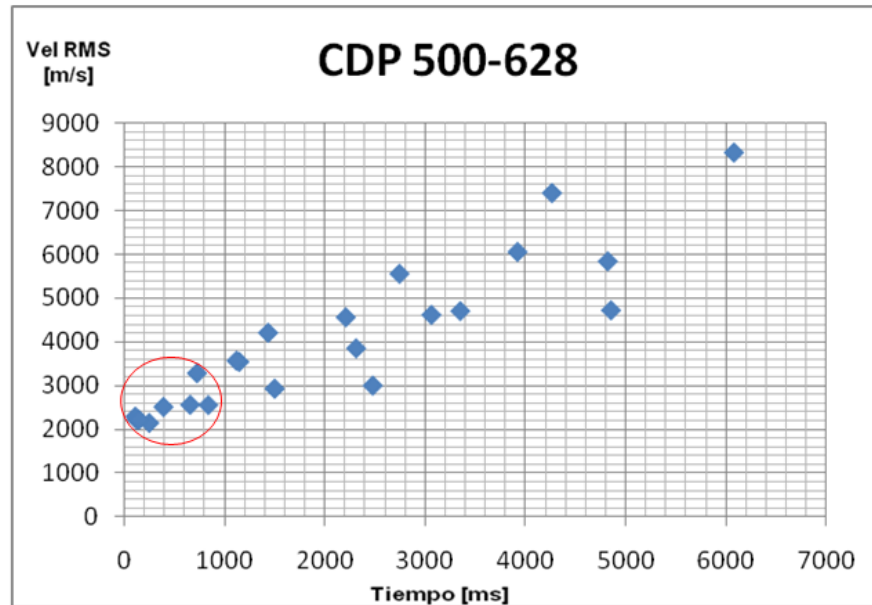
De la misma forma se llevó a cabo este procedimiento para la línea sísmica SL-1995-1420. Se analizó la línea entre el CDP 500 y 628, y el intervalo de tiempo fue entre 350 y 1000 ms. (Figuras 35 y 36)

Figura 35. Sección sísmica SL-1995-1420. La discordancia del Eoceno-paleoceno se encuentra cerca de los 1000 ms y sirve como límite para el intervalo de tiempo.



Fuente: Autor

Figura 36. Velocidad RMS vs Profundidad. Conociendo el intervalo de tiempo, se puede hallar la velocidad RMS que se busca.



Fuente: Autor.

La siguiente tabla resume los valores máximos y mínimos de entrada para el cálculo de los parámetros básicos y del diseño sísmico 3D en el campo Colorado.

Tabla 3. Resumen de los datos de entrada para el cálculo de parámetros del diseño 3D.

| Parámetros | Valores mínimos y máximos |
|--|---|
| Frecuencia Dominante | menor:68.96 Hz Mayor: 117.6 Hz |
| Buzamiento | Mayor: 60° Menor: 8° Mayor estadístico: 44° |
| Profundidad del objetivo (Fm. Mugrosa) | Más somero: 308.51 m Más profundo:1906.21 m |

| | | |
|---|--------------------------------------|--|
| Velocidad RMS | SL 1290 | V1: 2988 m/s V2: 3375 m/s |
| | SL 1420 | V1: 2519 m/s V2: 3500 m/s |
| | DM 1470E | V1: 2791-2865 m/s V2: 3517-3566 m/s |
| Velocidad a partir de DT En el pozo COL 75 | V1: 2257 m/s V2: 5583 m/s | T Mugrosa T Esmeralda |
| Área del campo | A1: 7.621637 Km2 A2: 13.62471 Km2 | EPIS Pozos |

Fuente: Autor.

5.2 CÁLCULO DE LOS PARAMETROS BASICOS DEL DISEÑO 3D

Con la información calculada anteriormente el paso a seguir es calcular los parámetros que están ligados a las características del subsuelo y la profundidad del objetivo, estos valores representan las medidas mínimas que requiere el levantamiento sísmico para tener datos de buena calidad.

Tabla 4. Datos de entrada para el cálculo de parámetros básicos del diseño

| Datos de entrada | Valores |
|-------------------------|---------------|
| Buzamientos | 60° |
| Profundidad al objetivo | 1907m |
| Velocidad | 2519 -3517m/s |
| Frecuencia Dominante | 28-59 Hz |
| Fmax Esperada | ? |

| | |
|--------------------------------|--------|
| Tamaño lateral del objetivo | 100 m |
| Resolución vertical pretendida | 14-20m |
| Fold 2D SL1290 | 150 |

Fuente: Autor

5.2.1 Frecuencia máxima (Fmax)

Se escoge buscando tener suficiente resolución vertical para poder obtener una imagen discernible del objetivo de menor espesor vertical. La suposición básica es que para obtener una imagen discernible de una capa de espesor ΔZ se requiere una onda cuya longitud de onda (λ) sea como máximo $4 \cdot \Delta Z$. Esto impone una restricción en la frecuencia máxima dada por:

$$F_{\max} = \text{Velocidad} / (4 \cdot \Delta Z) \quad (20)$$

Las velocidades se obtienen de las líneas sísmicas que se utilizaron en este proyecto.

Los espesores de las arenas de la Fm mugrosa se obtuvieron de la tesis de Fonseca y García 2009 en donde definen espesores y extensión lateral de arenas neta para cada subzona de esta formación. El menor espesor vertical estos cuerpos arenosos promedia los 14m y la extensión lateral varia de 100 a 400m pero se toma el valor menor para garantizar la resolución de todos los cuerpos arenosos. Los valores de frecuencia dominante se calcularon utilizando la ecuación 20 y considerando el espesor de los cuerpos arenosos de 13 metros.

La tabla 5 muestra los resultados de este cálculo:

Tabla 5. Cálculo de la frecuencia máxima para línea sísmica.

| Línea sísmica | Velocidad [m/s] | F dominante [Hz] | F max[Hz] |
|---------------|-----------------|-------------------------|----------------|
| SL 1420 | 2519 | 58.82 38.46 | 48.44 |
| SL 1290 | 3500 2988 | 41.66 34.48 35.71 | 67.31 57.46 |
| DM 1470E | 3375 2791 | 50 38.46 27.77 | 64.90 53.67 |

5.2.2 Tamaño del Bin

De acuerdo con la ecuación de Morse (ecuación 9), se calcularon los siguientes valores relacionados en la tabla 6.

Tabla 6. Tamaño del Bin

| Línea sísmica | Velocidad | F max | Buzamiento | Bin |
|---------------|-----------|-------|------------|-----|
| SL 1420 | 2519 | 44.98 | 60 | 16 |
| | 3500 | 62.50 | 60 | 16 |
| SL 1290 | 2988 | 53.36 | 60 | 16 |
| | 3375 | 60.27 | 60 | 16 |
| DM 1470E | 2791 | 49.84 | 60 | 16 |
| | 3517 | 62.80 | 60 | 16 |

Fuente: Autor.

También es necesario garantizar que al menos 3 trazas pasen por el objetivo (extensión lateral) para obtener una imagen clara del objetivo, entonces es necesario que el tamaño del Bin cumpla con la ecuación 10:

$$\text{Tamaño del Bin} \leq 100/3 = 33.33 \text{ m}$$

Otro cálculo hace referencia a la resolución lateral esperada.

Un tamaño de Bin menor que un cuarto de la longitud de onda de la frecuencia dominante lleva a un sobre-muestreo, y a su vez un tamaño de celda mayor que la mitad de la frecuencia dominante da como resultado el efecto contrario, es decir sea muestreo espacial deficiente, se calculó el tamaño de celda ideal para estas dos condiciones $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda dominante de acuerdo con la ecuación 11.

Tabla 7. Tamaño del Bin en función de la resolución lateral.

| Línea sísmica | Velocidad | F dom | R lateral [1/2] | R lateral [1/4] |
|---------------|-----------|-------|-----------------|-----------------|
| SL 1420 | 2519 | 38.46 | 32.74830993 | 16.37415497 |
| | 3500 | 41.66 | 42.00672108 | 21.00336054 |
| SL 1290 | 2988 | 35.71 | 41.83702044 | 20.91851022 |
| | 3375 | 50 | 33.75 | 16.875 |
| DM 1470E | 2791 | 27.77 | 50.25207058 | 25.12603529 |
| | 3517 | 35.71 | 49.24390927 | 24.62195463 |

Fuente: Autor.

Según la tabla 7 los tamaños de celda ideales para el objetivo deberían estar entre los: 16 y 50 m. Este cálculo fue hecho observando básicamente las frecuencias dominantes recuperadas de la sísmica 2D.

En resumen se tienen 3 posibles valores para el tamaño del Bin que son 16, 33 y 50 metros.

Es necesario tomar el menor tamaño de Bin ya que esto le da mayor resolución a la sísmica. Para calcular el tamaño de este Bin se consideró el espesor de los cuerpos arenosos de la Fm. Mugrosa que son producidos por una amalgamación de muchos canales.

Si se quisiera llegar a observar estos canales individualmente con sísmica sería casi que imposible ya que estos no exceden los 5 metros de espesor y no se extienden más de 15 metros de ancho (Fonseca y García 2009). Un Bin pequeño ayuda a mejorar la resolución de la sísmica ya que permite identificar cuerpos de menor tamaño.

Finalmente las dimensiones del Bin fueron redondeadas a 15 siguiendo las recomendaciones propuestas por Álvarez (1999). Las dimensiones finales del Bin Serian de 15*15 m.

5.2.3 Intervalo de Fuentes (SI) y Receptores (RI)

Los intervalos de fuentes y receptores quedan definidos como el doble de las correspondientes dimensiones del Bin.

El intervalo de fuentes (SI) sería de 30m al igual que el intervalo de receptores.

5.2.4 Fold

De acuerdo con la ecuación de Krey (ecuación 4) y utilizando los siguientes datos de entrada, se calcula el Fold.

Tabla 8. Cálculo del *Fold* para las 3 líneas sísmicas

| Línea sísmica | Velocidad | Frecuencia máxima | Bin 3D | Bin 2D | Fold 2D | Fold 3D Krey |
|---------------|-----------|-------------------|--------|--------|---------|--------------|
| SL 1420 | 2519 | 44.98 | 15 | 12.5 | 150 | 60.74 |
| | 3500 | 62.50 | 15 | 12.5 | 150 | 60.74 |
| SL 1290 | 2988 | 53.36 | 15 | 12.5 | 150 | 60.74 |
| | 3375 | 60.27 | 15 | 12.5 | 150 | 60.74 |
| DM 1470E | 2791 | 49.84 | 15 | 12.5 | 15 | 6.07 |
| | 3517 | 62.80 | 15 | 12.5 | 15 | 6.07 |

Fuente: Autor

El mejor *Fold* calculado con la ecuación da un valor de 65.41, esto representa el mínimo valor esperado de cubrimiento, es decir, el *Fold* esperado debería ser mayor o igual a este valor para que cumpla con los requerimientos impuestos por las características del subsuelo.

5.2.5 Máximo *Offset* y Mínimo *Offset* (X_{max} y X_{min})

El *offset* máximo depende de la profundidad de los objetivos, en este caso se tomaron los valores obtenidos de los registros de pozo en los que la mayor profundidad registrada de la base de la formación Mugrosa esta a 1906 metros.

El *offset* mínimo depende de la profundidad del objetivo más somero. La profundidad más somera de la formación Mugrosa es de 310 m que corresponde al X_{min} .

La tabla 9 muestra los valores obtenidos para los diferentes parámetros básicos del diseño

Tabla 9. Resumen de los parámetro básicos obtenidos

| Fmax [Hz] | Tamaño del Bin [m] | SI y RI [m] | Fold 3D | Xmin [m] | Offset Máximo [m] |
|------------------|---------------------------|--------------------|----------------|-----------------|--------------------------|
| 44.98 - 68.80 | 15*15 | 30 y 30 | 60.74 | 310 | 2000 |

Fuente: Autor

5.3 GENERACIÓN DEL DISEÑO SÍSMICO 3D

5.3.1 PARAMETROS DEL DISEÑO SISMICO 3D

5.3.1.1 Tipo de programa

Los programas sísmicos se pueden clasificar de acuerdo al muestreo azimutal que se registre en adquisición de “*Wide azimuth*” o “*narrow azimuth*”. Este muestreo depende directamente de las dimensiones del *Patch* de adquisición o del valor de *Aspect Ratio*. Valores de *Aspect Ratio* menores a 0.5 clasifican un programa sísmico en *Narrow Azimuth* y por encima de 0.5 lo clasifica como *Wide Azimuth* (Cordsen et al., 2000).

Un buen muestreo azimutal es necesario cuando los objetivos geológicos tienen grandes cambios tanto laterales como verticales. Este es el caso de la Formación Mugrosa, ya que su ambiente de depositación es fluvial, por esta razón el programa debería tener un *Aspect ratio* mayor de 0.5.

5.3.1.2 Xmax ó offset máximo Inline y Xline

El offset máximo define las dimensiones del *Patch*. En este proyecto el *offset* máximo es de 2859 m. Ahora hay que definir las dimensiones *inline* y *Xline* de X_{max} .

Para calcular estas dimensiones Cordsen et al., 2000 propone una regla llamada "85%" en la cual se puede reducir el tamaño del *Patch* y obtener un *Aspect Ratio* de un valor de 0.85 garantizando un buen muestreo azimutal. Esta regla se demuestra teóricamente en el numeral 3.4 del libro *Planning Land 3-D Seismic Surveys* y también es demostrada en un artículo de Cooper (2004) de forma práctica mostrando que utilizando el 85% de la distancia X_{max} , se optimiza el tamaño del *Patch* en la dirección de los receptores en un 99%.

Cordsen et al., 2000 definieron las siguientes ecuaciones para poder determinar la dimensión *Inline* y *X-line* de X_{max} .

$$X_r = 0.85 * X_{max} \quad (21)$$

$$X_s = 0.85 * X_r \quad (22)$$

En donde X_r representa la dimensión *Inline* de X_{max} y X_s la dimensión *X-line* de X_{max} .

Los valores de X_r y X_s para un X_{max} de 1906m son los siguientes:

$$X_r = 1700\text{m.}$$

$$X_s = 1445\text{m.}$$

5.3.1.3 Xmin y otros parámetros

Cordsen et al., 2000 propone una estrategia de diseño para calcular el número de canales (receptores) por *Patch* (NC), número de fuentes por km^2 (NS) y el número

de líneas receptoras por *Patch* (NRL) a partir del *Fold*, Bin, Xmin y las dimensiones *Inline* y *Xline* de *Xmax*

La estrategia inicia, asignándole valores a SLI desde valores inferiores a Xmin hasta 2*Xmin avanzando en múltiplos del intervalo de receptores (RI) y luego a partir de estos valores se definen el resto de parámetros utilizando una hoja de cálculo.

Las ecuaciones utilizadas en la tabla 10 para cada columna son las siguientes:

Tabla 10. Flujo de trabajo propuesto por Cordsen

| Col 2 | | Col 3 | | Col 4 | | Col 5 | | Col 6 | | Col 7 | |
|--|--|--|--|---------------------------------------|--|--------------------------------|--|-------------------------------|--|--|--|
| $NS = \frac{1}{2 * Bin * SLI * 10^{-6}}$ | | $NC = \frac{Fold3D}{NS * Bin^2 * 10^{-6}}$ | | $NRL = \frac{NC}{1 + \frac{Xr}{Bin}}$ | | $RLI = \frac{2 * Xs}{NRL - 1}$ | | $Xmin = \sqrt{SLI^2 + RLI^2}$ | | $\frac{\#Canales}{linea} = \frac{NC}{NRL}$ | |

| | Input | | | 3D-Bin | Fold 3D | Xmax Xline (Xs) | Xmax Inline (Xr) | Xmax |
|---------------|-------|-----|------|--------|---------|-----------------|------------------|---------|
| | SLI | NS | NC | NRL | RLI | Xmin | #Ch/Line | SLI/RLI |
| | | | | 15 | 60.74 | 1445 | 1700 | 2231.15 |
| Diseño | | | | | | | | |
| 1 | 210 | 159 | 1701 | 15 | 208 | 296 | 114.3333333 | 1.008 |
| 2 | 240 | 139 | 1944 | 17 | 181 | 300 | 114.3333333 | 1.329 |
| 3 | 270 | 123 | 2187 | 19 | 159 | 314 | 114 | 1.693 |
| 4 | 300 | 111 | 2430 | 21 | 143 | 332 | 114.3333333 | 2.102 |
| 5 | 330 | 101 | 2673 | 23 | 129 | 354 | 114.3333333 | 2.555 |
| 6 | 360 | 93 | 2915 | 25 | 118 | 379 | 114.3333333 | 3.052 |
| 7 | 390 | 85 | 3158 | 28 | 109 | 405 | 114.3333333 | 3.593 |
| 8 | 420 | 79 | 3401 | 30 | 101 | 432 | 114.3333333 | 4.178 |

Fuente: Autor

Según Cooper (2004) es aconsejable que la relación SLI/RLI este dentro de un rango de 0.5 a 2 para optimizar el diseño y disminuir los costos. De acuerdo a esto solo entrarían las 3 primeras filas de la tabla 10 (subrayadas con color amarillo).

5.3.1.4 Fold Inline y Xline

A partir de los valores calculados de número de canales por línea, NRL, SLI y RI, se calculan las componentes inline y X-line del Fold.

Tabla 11. Cálculo del Fold inline y xline.

| Col 3 | Col 4 | Col 5 |
|--|---|--|
| $\text{Fold Inline} = \frac{\# \text{ canales por línea} * \text{RI}}{2 * \text{SLI}}$ | $\text{Fold X - line} = \frac{\text{NRL}}{2}$ | $\text{Fold total} = \text{Fold Inline} * \text{Fold Xline}$ |

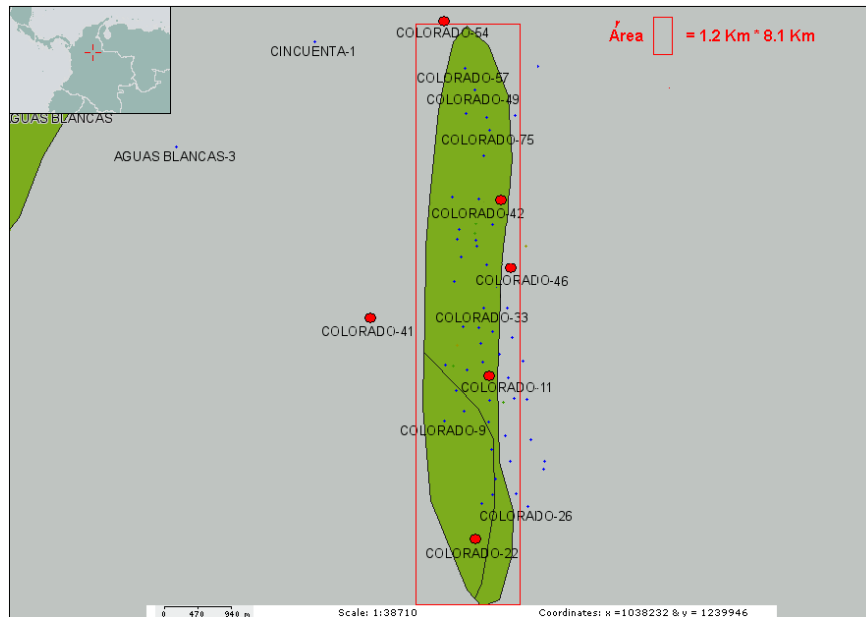
| | Input | #Ch/line | 163 | RI | 20 |
|--------|-------|----------|----------------|---------------|---------------|
| Diseño | SLI | NRL | Fold Inline | Fold Xline | Total Fold |
| 1 | 210 | 15 | 8.17 | 7.44 | 60.73 |
| 2 | 240 | 17 | 7.15 | 8.50 | 60.73 |
| 3 | 270 | 19 | 6.35 | 9.56 | 60.73 |

Fuente: Autor

5.3.1.5 Area inicial de la adquisición

Se definió el polígono de entrada o área de interés geológico a partir del área del campo que se muestra en el mapa interactivo de la base de datos EPIS (Figura 38). A partir de este se definió una franja variable (optimización del área final de adquisición) en función de los ángulos de buzamiento y de las profundidades del tope del buzamiento en puntos específicos del borde del polígono de interés geológico.

Figura 37. Área inicial del diseño sísmico 3D



Fuente: Autor

5.3.1.5.1 Apertura de Migración.

Para calcular la apertura de migración se utilizó la información de los registros Dipmeter del campo y la profundidad de la Base de la Fm Esmeraldas en algunos pozos que se encuentran en la periferia del campo (Figura 38).

La tabla 12 muestra los resultados obtenidos

Tabla 12. Cálculo de la apertura de migración

| Pozo | Profundidad (metros) | Buzamiento (Grados) | Apertura de Migración (Metros) |
|-------------|----------------------|---------------------|--------------------------------|
| Colorado 54 | 1855 | 8 | 261 |
| Colorado 42 | 2120 | 60 | 3672 |
| Colorado 46 | 2120 | 60 | 3672 |

| | | | |
|-------------|------|----|------|
| Colorado 11 | 2120 | 60 | 3672 |
| Colorado 22 | 1463 | 8 | 206 |
| Colorado 41 | 2120 | 60 | 3672 |

Fuente: Autor

Este valor corresponde al área que debe agregarse inicialmente al diseño para tener un área de *Fold* total junto con el *Fold taper*.

5.3.1.5.2 *Fold Taper*

El *fold taper* es otra franja que se debe agregar al diseño sísmico 3D con el objetivo de obtener cubrimiento completo hasta la frontera de la apertura de migración (Alvarez, 1999).

La tabla 13 muestra los valores obtenidos.

Tabla 13. Cálculo del *Fold taper* para los 6 diseños propuestos

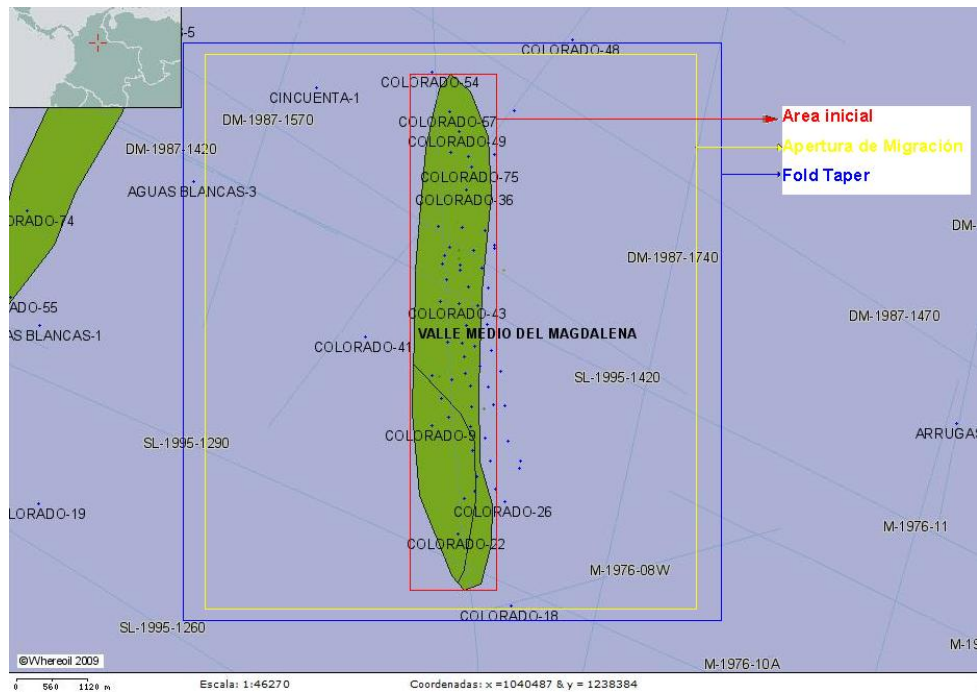
| Diseño | Fold Inline | Fold Xline | Fold taper | |
|--------|-------------|------------|------------|------------------|
| | | | Inline | Fold taper Xline |
| 1 | 8.17 | 7.44 | 752.5 | 670.42 |
| 2 | 7.15 | 8.50 | 737.5 | 677.34 |
| 3 | 6.35 | 9.56 | 722.5 | 682.63 |

Fuente: Autor

Al sumar el área inicial, la apertura de migración y el *Fold taper* tenemos el área total de adquisición (Figura 38) que teóricamente se necesita para tener el *Fold* deseado.

Las dimensiones iniciales del área total de adquisición serían de 9249m en dirección *inline* por 9216m en la dirección *crossline*.

Figura 38. Área total de adquisición.



Fuente: Autor

5.3.2 Diseños sísmicos iniciales

Con la información obtenida de los 6 posibles diseños (tablas 10 a 13), se ingresaron los datos a un programa de diseño sísmico 3D (Omni 3D).

Luego de realizar los diseños se hizo un análisis inicial de la cobertura o *Fold* que generaban estos diseños sísmicos. Este análisis se hizo asumiendo un modelo de capas planas y evaluó el cubrimiento a una profundidad de 2231 m de profundidad que corresponde al valor del *offset* máximo ó *Xmax*.

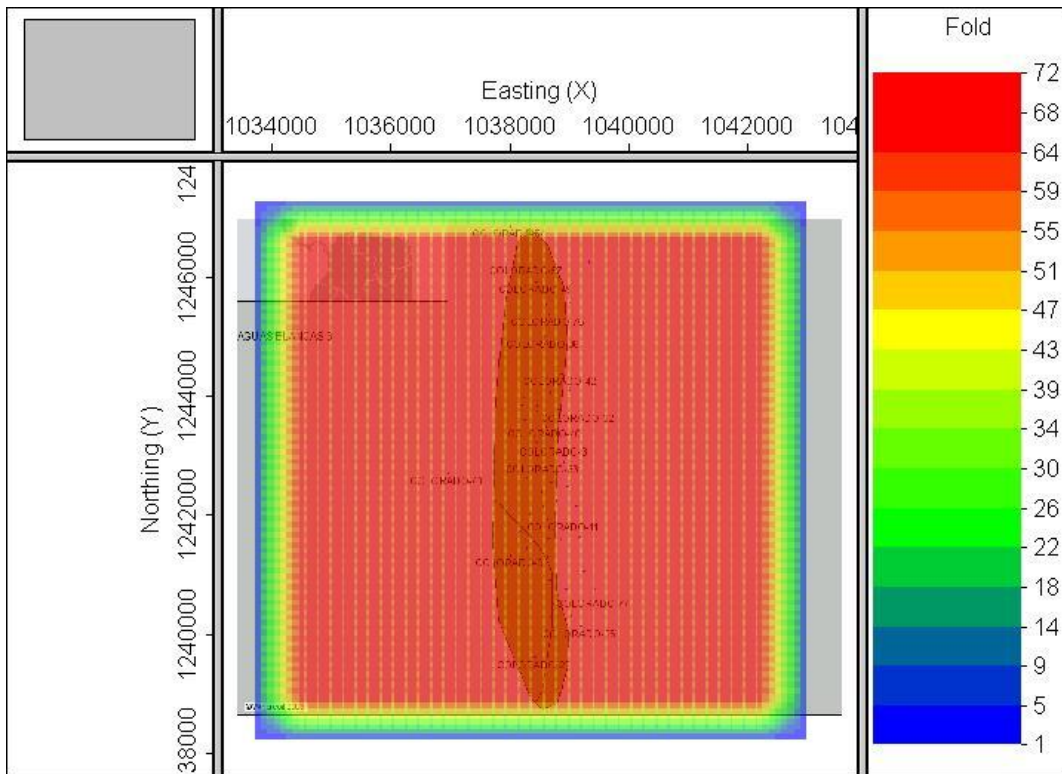
A las imágenes de los diseños sísmicos propuestos se les aplicó una transparencia para poder observar la ubicación del campo. Los resultados obtenidos fueron los siguientes

Diseño sísmico #1. Con esta configuración se obtiene un *Fold* de 72. La franja roja indica el área necesaria para obtener una buena iluminación de los objetivos que tienen altos buzamientos. Las líneas de receptores se encuentran orientadas en la horizontal y las líneas de fuentes en la vertical.

Se observan unas franjas o bandas alternantes de color amarillo dentro del área de *Fold* de color rojo llamadas "*Footprint*". Estas huellas ocasionan variaciones en el *Fold* y son producidas por una mala escogencia en los valores de los parámetros del diseño.

En geometrías regulares u ortogonales el *footprint* aparece de forma periódica (Cordsen, 2004) (Figura 39).

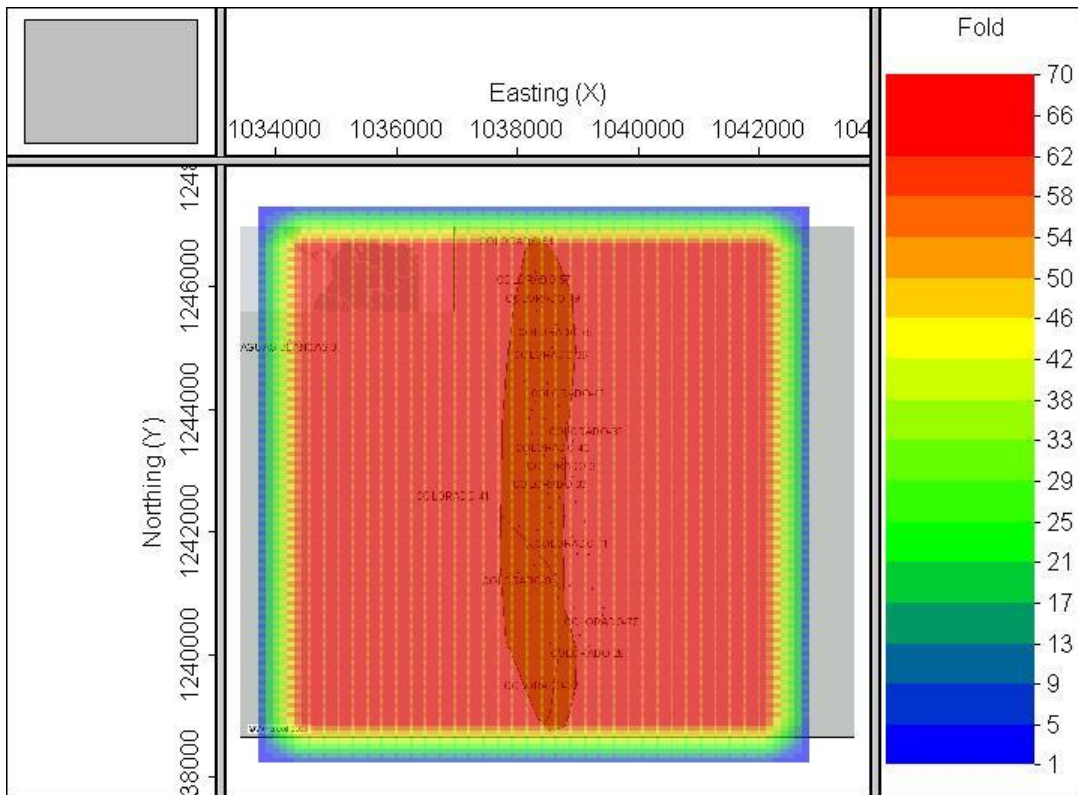
Figura 39. Diseño # 1 modelado en OMNI 3D



Fuente: Autor

Diseño # 2. El Fold máximo calculado para este diseño es de 70. En la grafica se puede observar que las franjas amarillas que están en posición vertical son discontinuas como sucede con el diseño #1, lo que indica que también existen otras franjas en posición horizontal aunque estas no sean tan visibles. En este caso las franjas verticales tienen valores menores al *Fold* predominante (entre 46 y 50 Fold) (Figura 40).

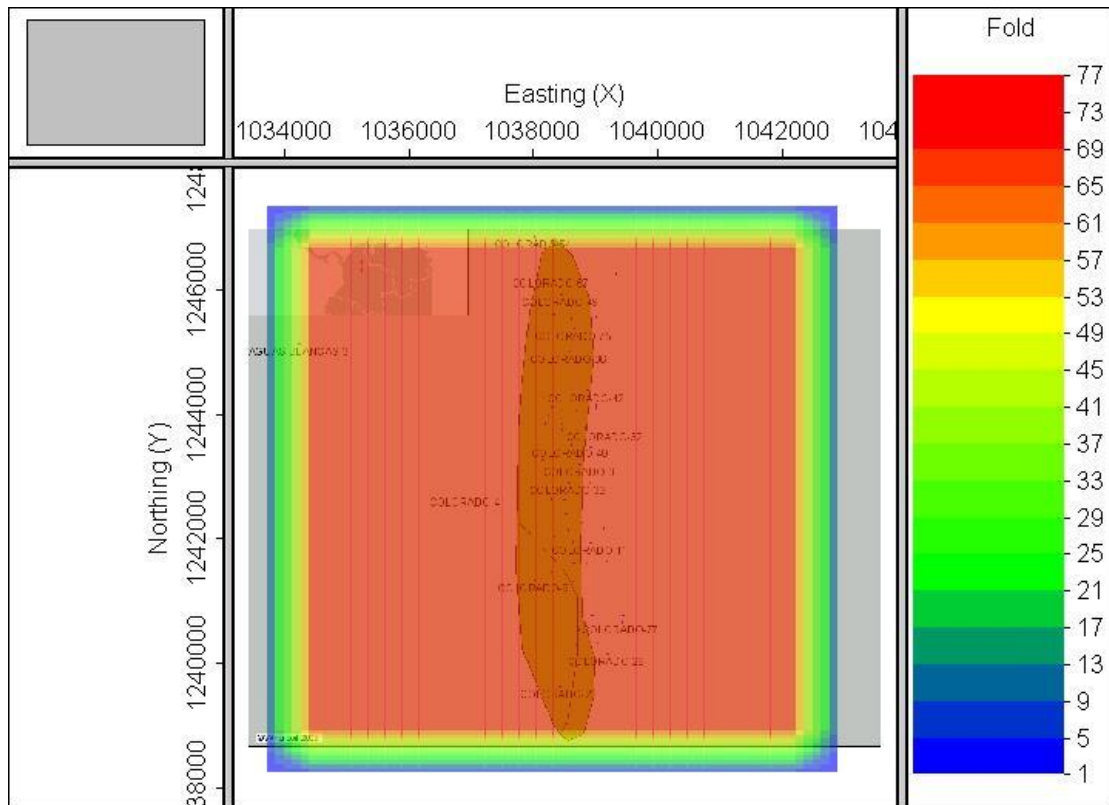
Figura 40. Diseño # 2 modelado en OMNI 3D



Fuente: Autor.

Diseño #3. Muestra un *Fold* de 77 y también presenta *footprint* pero con franjas orientadas verticalmente. En este diseño aparece un valor de *Fold* más alto pero solo en el *footprint* (Figura 41).

Figura 41. Diseño # 3 modelado en OMNI 3D



Fuente: Autor

5.3.3 Optimización de los parámetros de diseño

En los diseños mostrados se observa que la mayoría presentan bandas alternantes o *Footprint*. Cuando se realiza un diseño siempre se busca que la cobertura o *Fold* se mantenga constante a través del área de interés con el fin de garantizar que todos los datos tengan el mismo valor de *Fold*.

Para eliminar el *footprint* es necesario recalcular los valores del diseño modificando algunos parámetros que son más flexibles que otros. Los parámetros que se pueden modificar son X_{max} , X_{min} , las distancias entre líneas de fuentes y receptores y el número de canales.

Parámetros como el tamaño del Bin y el intervalo de fuentes y receptores no son tan flexibles y por eso es necesario mantenerlos.

Para recalculer estos parámetros es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- El *Fold Inline* y *Xline* deben ser números enteros
- El *Fold Xline* deber ser un número par.
- El número de líneas receptoras en el *Patch* debe ser un número par.
- SLI y RLI deben ser múltiplos del intervalo entre líneas de fuentes y receptores respectivamente (Recomendaciones capacitación Omni 3D).

Basados en estas consideraciones se recalcularon los parámetros de diseño haciendo una aproximación de los valores de *Fold* al número entero más próximo y utilizando las ecuaciones 23 a 25 (Cordsen et al, 2000):

$$\text{Fold Inline} = 2 \cdot X_r / (2 \cdot \text{SLI}) \quad (23)$$

$$\text{Fold Xline} = 2 \cdot X_s / (2 \cdot \text{RLI}) \quad (24)$$

$$X_s = \text{RLI} \cdot (\text{NRL} - 1) / 2 \quad (25)$$

Los valores obtenidos para cada diseño fueron los siguientes (Tabla 14):

Tabla 14. Nuevos valores para el diseño de parámetros. Con estos valores se elimina el *footprint* de los diagramas de *Fold*.

| Diseño | | Datos de entrada | | Bin | Fold | Xmax Xline (Xs) | Xmax Inline (Xr) | Xmax | Dip |
|--------|-----|------------------|-----|-----|------|--------------------|---------------------|-------------|------------|
| | | | | 1 | 15 | 64 | 1560 | 1680 | 2292.60 |
| SLI | NS | NC | NRL | RLI | Xmin | #Ch/Line | SLI/RLI | Fold Inline | Fold Xline |
| 210 | 159 | 1792 | 16 | 210 | 297 | 112 | 1.000 | 8 | 8 |

| Diseño | Datos de | Bin | Fold | Xmax | Xmax | Xmax | Dip |
|--------|----------|-----|------|------|------|------|-----|
|--------|----------|-----|------|------|------|------|-----|

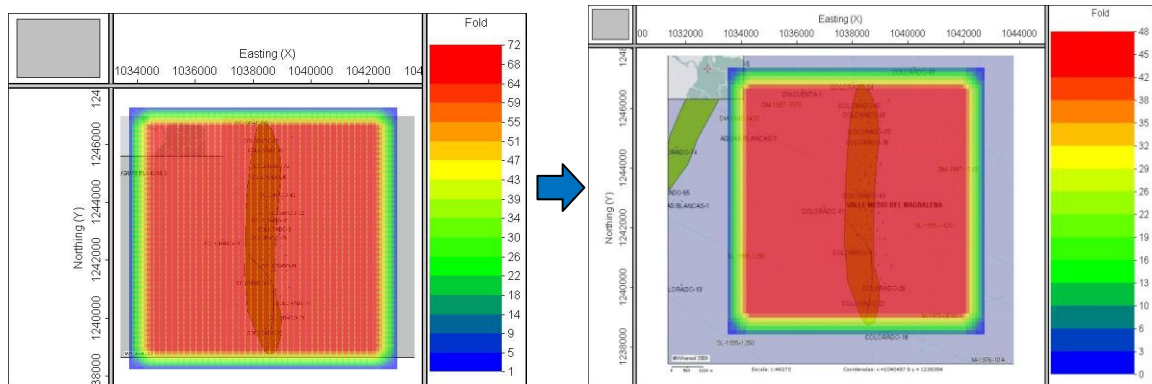
| | | | | | | | | | |
|-----|-----|---------|-----|-----|------|------------|-------------|-------------|------------|
| 2 | | entrada | | | | Xline (Xs) | Inline (Xr) | | |
| | | | | 15 | 70 | 1710 | 1680 | 2397.19 | 60 |
| SLI | NS | NC | NRL | RLI | Xmin | #Ch/Line | SLI/RLI | Fold Inline | Fold Xline |
| 240 | 139 | 2240 | 20 | 180 | 301 | 112 | 1.321 | 7 | 10 |

| | | | | | | | | | |
|-------------|-----|---------------------|-----|-----|------|--------------------|---------------------|-------------|------------|
| Diseño 3 | | Datos de entrada | | | | Xmax Xline (Xs) | Xmax Inline (Xr) | Xmax | Dip |
| | | | | 15 | 70 | 1710 | 1890 | 2548.76 | 60 |
| SLI | NS | NC | NRL | RLI | Xmin | #Ch/Line | SLI/RLI | Fold Inline | Fold Xline |
| 270 | 123 | 2520 | 20 | 180 | 325 | 126 | 1.488 | 7 | 10 |

Fuente: Autor

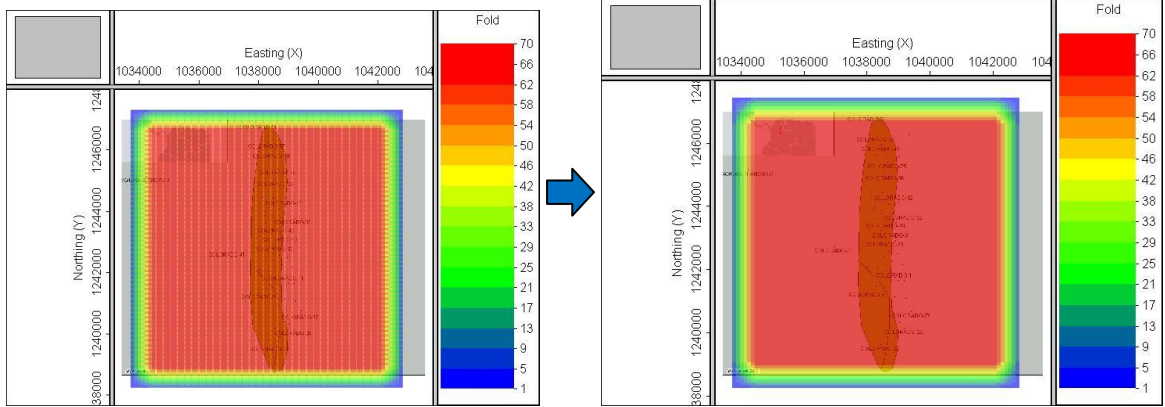
Con estos nuevos valores se logró eliminar el Footprint de los 3 diseños propuestos variando algunos parámetros dentro de rangos aceptables garantizando que los nuevos valores estuvieran por encima de las distancias y del cubrimiento (*Fold*) necesarios para iluminar los objetivos geológicos del campo (Figuras 42 a 44).

Figura 42. Optimización del diseño # 1



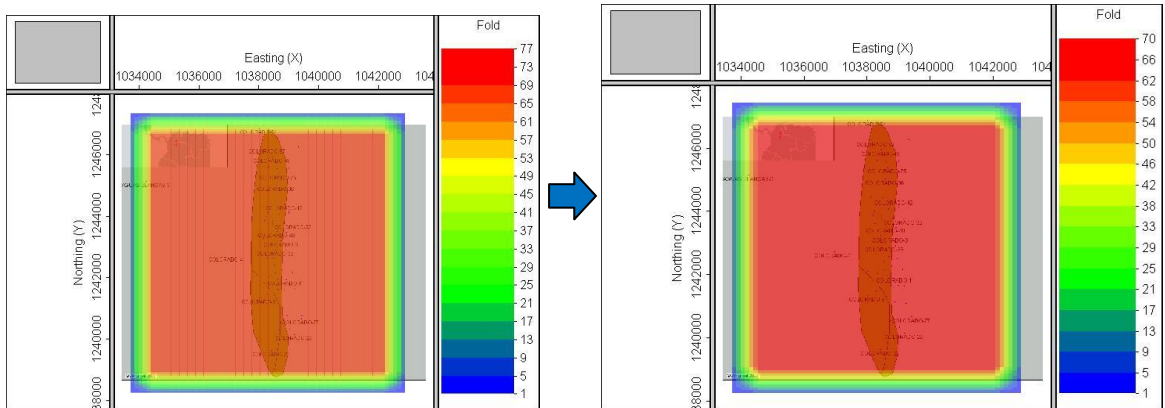
Fuente: Autor

Figura 43. Optimización del Diseño # 2



Fuente: Autor

Figura 44. Optimización del Diseño # 3



Fuente: Autor

5.3.4 Análisis del área de Adquisición.

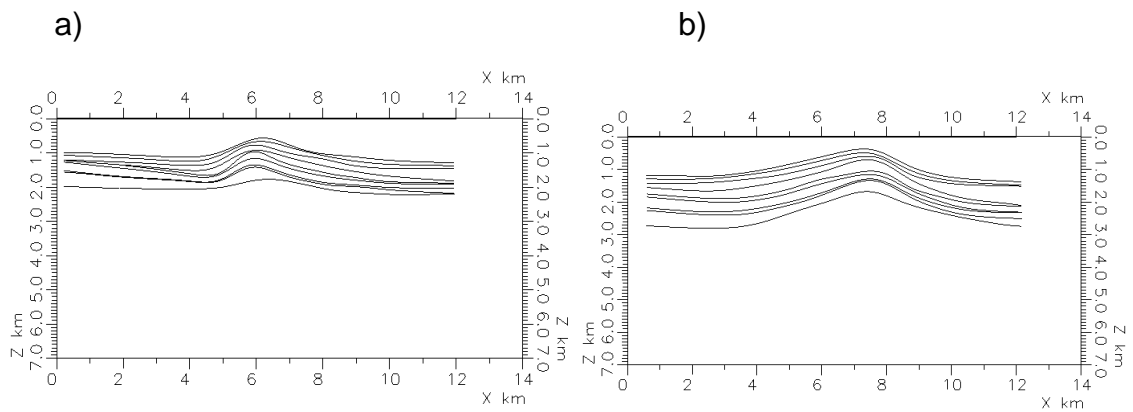
Con el modelo geofísico es posible realizar un modelado para determinar el área de adquisición a partir del trazado de rayos “Cero offset” y validar si el área de adquisición propuesta inicialmente es la adecuada para iluminar todo el campo.

Esta simulación asume un diseño sísmico en el cual cada par fuente-receptor se encuentra en un mismo punto donde los rayos registrados son perpendiculares al punto donde se reflejan. Para esto se hace un diseño de adquisición “hipotético” muy denso (fuentes y receptores) y muy grande para observar hasta dónde puede llegar en superficie los rayos que se reflejen en las interfaces.

Haciendo una revisión visual en cortes orientados en la dirección de rumbo y buzamiento de la estructura fue posible definir las zonas en las cuales los buzamientos de las capas eran mayores (Figura 45 y 46) y luego por medio del modelado por trazado de rayos “cero offset” se determinó la posición de llegada de los rayos provenientes de las interfaces más inclinadas con el fin de establecer un área de adquisición más precisa.

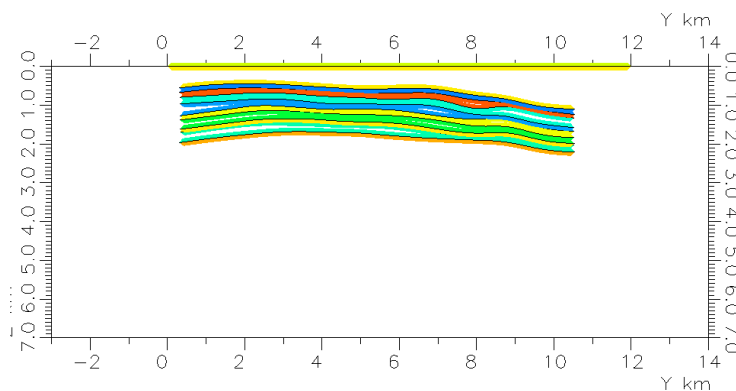
La figuras 45 y 46 muestran dos secciones en la dirección del buzamiento y una en la dirección del rumbo en las que se observa la mayor inclinación de las interfaces.

Figura 45. Corte paralelo a la dirección de buzamiento. a) mayores buzamientos del flanco izquierdo del anticlinal. b) Mayor buzamiento del flanco derecho del anticlinal



Fuente: Autor

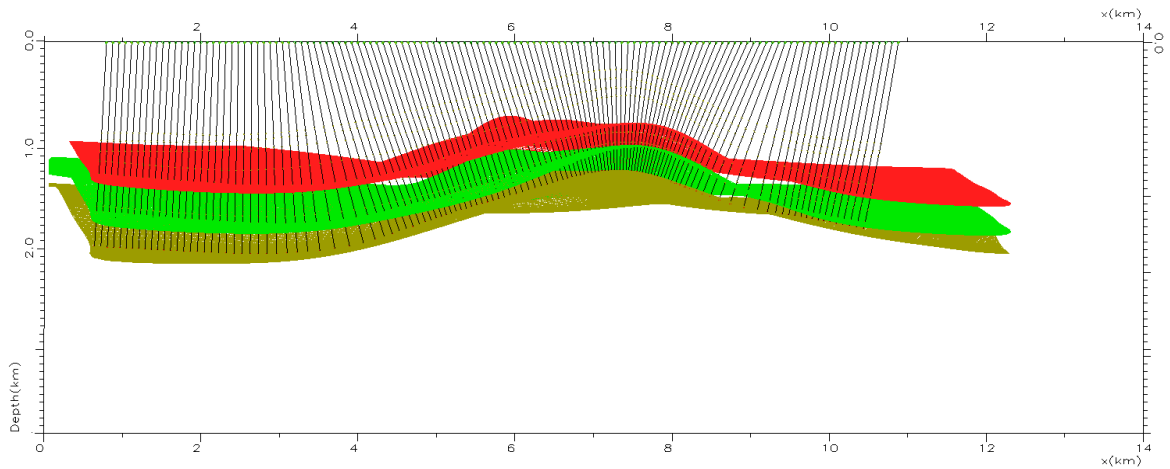
Figura 46. Corte en la dirección del rumbo. Los mayores buzamientos se encuentran hacia el norte del anticlinal.



Fuente: Autor

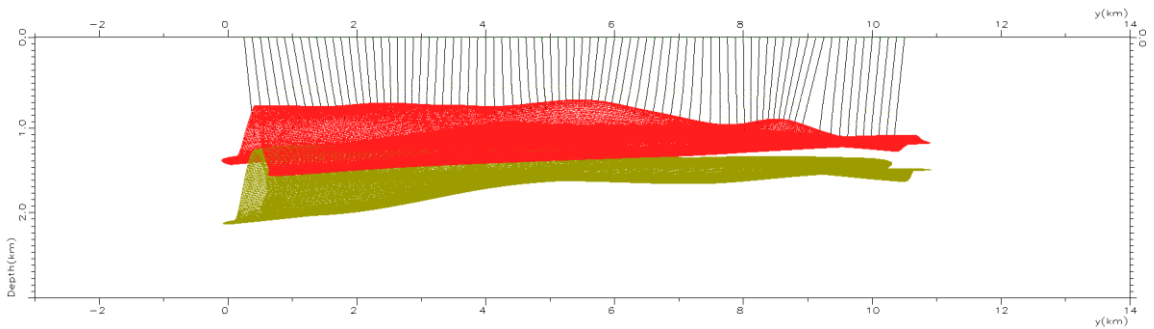
Analizando las diferentes secciones se determinó que el área adecuada para la adquisición es de $8.1 \times 10.2 \text{ Km}^2$. Aunque este valor es similar al calculado inicialmente fue posible reducir el tamaño en la dirección In-line (figura 47) y extenderlo en la dirección X-line (figura 49) de tal forma que la geometría del área de adquisición ya no es cuadrada, ahora es rectangular.

Figura 47. Trazado de rayos “cero offset” en corte de buzamiento. Se observa la trayectoria de los rayos a partir de la base de la Fm. Esmeraldas (color café claro).



Fuente: Autor

Figura 48. Corte en la dirección del eje del anticlinal. Los rayos salen de la base de la Fm. Esmeraldas.



Fuente: Autor.

5.4 PREPARACIÓN DEL MODELO GEOFÍSICO

El objetivo final de la metodología de trabajo es evaluar el cubrimiento (*Fold*) de los diseños sísmicos propuestos sobre un modelo geofísico del campo utilizando el trazado de rayos como una herramienta de simulación de la propagación de las

ondas en el subsuelo. Para realizar esta simulación es necesario crear un modelo geofísico que permita la propagación de las ondas.

Inicialmente se había calculado el *Fold* de cada uno de los diseños, pero este cálculo se hizo sobre un modelo de capas planas y horizontales. Esta suposición no se cumple en el campo ya que la estructura geológica predominante del campo es un anticlinal. Por esta razón es necesario evaluar el *Fold* de estos diseños pero disparados sobre un modelo estructural del campo para simular una adquisición sísmica verdadera y de esta forma evaluar si el *Fold* que inicialmente se calculó es similar al calculado con el trazado de rayos.

La metodología para realizar este modelado es la siguiente

- Cargar las superficies o topes formacionales al programa de modelado por trazado de rayos
- Asignarles valores de velocidad de onda P, onda S y Densidad para cada uno de los intervalos entre 2 interfaces.
- Cargar el diseño sísmico propuesto en el programa de modelado por trazado de rayos.
- Disparar el diseño sísmico sobre el modelo estructural del campo
- Comparar los resultados del cubrimiento (*Fold*) obtenidos del modelado por trazado de rayos con los obtenidos a partir del modelo de capas planas y horizontales.

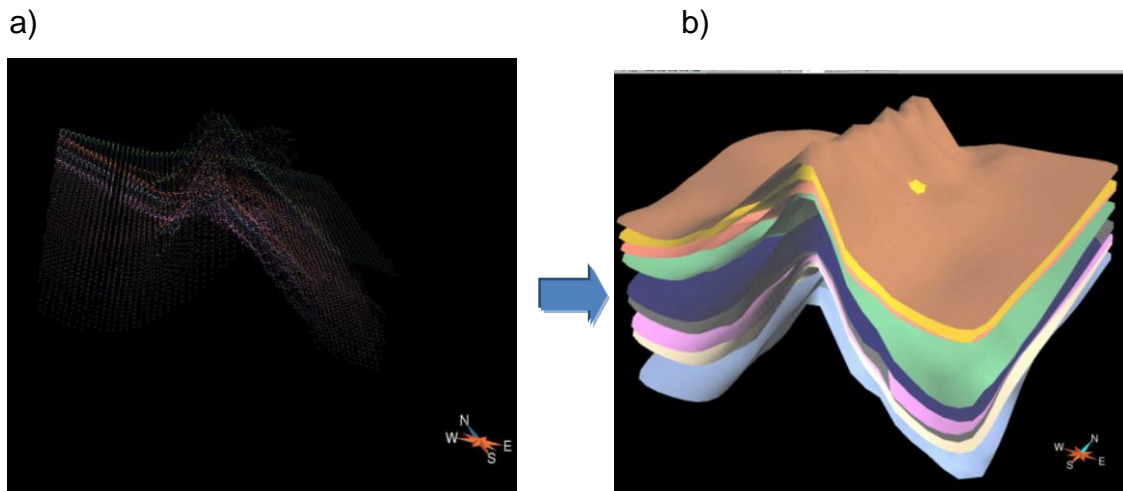
5.4.1 Cargar las superficies al programa de modelado por trazado de rayos

Para cargar estas superficies fue necesario hacer una conversión del formato en el que se encontraban. Cada tope formacional está definido por una gran cantidad de puntos que sumados tienden a formar una superficie pero siguen siendo puntos.

Para realizar el modelado es necesario convertir esa nube de puntos en superficies continuas sobre las cuales se reflejen los rayos que provienen de cada fuente.

La figura 49a muestra cada subunidad de la formación mugrosa, el tope y la base de la formación Esmeraldas representadas en una nube de puntos que luego fueron convertidas a superficies continuas en el programa GOCAD (Figura 49b).

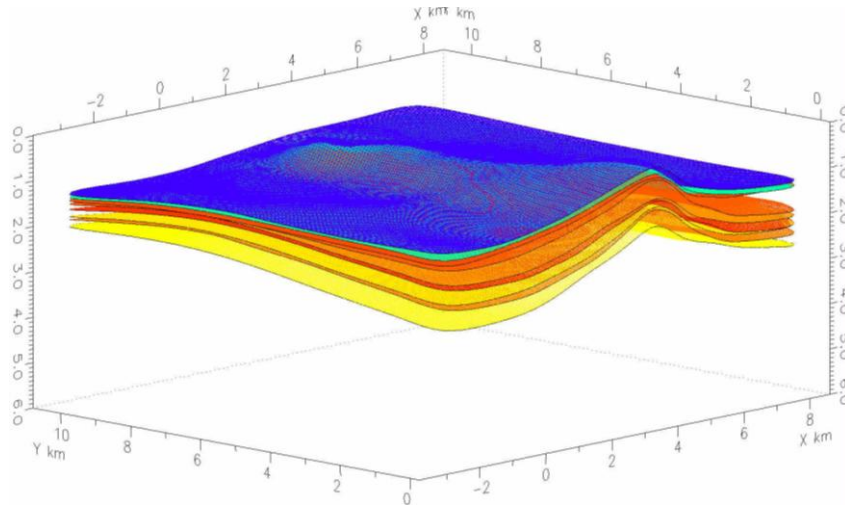
Figura 49. a) puntos XYZ para cada interface. b). superficie generadas a partir de la nube de puntos



Fuente: Autor

Estas superficies se cargaron al programa de trazado de rayos (NORSAR 3D). De base a tope se encuentran las siguientes superficies: Base Fm Esmeraldas, Tope Fm Esmeraldas, subzona C3, subzona C2, subzona C1, subzona B3, subzona B2, subzona B1 y B0 o fósiles de Mugrosa. Todas estas subzonas conforman la Fm Mugrosa (Figura 50).

Figura 50. Interfaces del modelo geofísico en el programa NORSAR 3D.



Fuente: Autor.

5.4.2 Asignarles valores de velocidad de onda P, onda S y Densidad para cada uno de los intervalos entre 2 interfaces.

Para calcular los valores de velocidad y densidad de cada formación se tomaron los registros DT, RHOB y SP del pozo colorado 75.

A partir del registro DT se obtuvo la velocidad de la onda P como lo muestra la tabla 15.

Tabla 15. Velocidad de la onda P en el pozo Colorado 75 para cada Bloque.

| Horizonte | Profundidad [m] | DT [us/ft] | Vp= 1/DT [km/s] |
|-------------------------|-----------------|------------|-----------------|
| Fósiles de Mugrosa (B0) | 775.01496 | 91.257485 | 3.34 |
| Base B0 - Tope B1 | 884.176032 | 83.5068493 | 3.65 |
| Base B1 - Tope B2 | 1008.147336 | 87.5862069 | 3.48 |
| Base B2 - Tope B3 | 1187.052744 | 83.6673072 | 3.643 |

| | | | |
|--------------------|-------------|------------|-------|
| Base B3 - Tope MZC | 1378.781088 | 84.6666667 | 3.6 |
| Base C1 - Topes C2 | 1460.689992 | 72.2274882 | 4.22 |
| Base C2 - Tope C3 | 1572.743616 | 70.2304147 | 4.34 |
| Tope F. Esmeraldas | 1670.965416 | 70.1819019 | 4.343 |
| Base F. Esmeraldas | 1778.408432 | 68.8036117 | 4.43 |

Fuente: Autor

A partir del registro SP y de Vp se calculó la Velocidad de la onda S (Vs) de la siguiente forma:

Se calcula el Volumen de arcilla y el volumen de arena en el registro SP para determinar el porcentaje de arcilla y de arena para cada intervalo y luego asignar esta fracción a la correspondiente Vs. Para el pozo colorado 75 las ecuaciones quedarían de la siguiente forma:

$$Vol_{arcilla} = (SP + 43.04800034) / (-4.7709999 + 43.04800034) \quad (26)$$

$$Vol_{arena} = 1 - Vol_{arcilla} \quad (27)$$

Castagna y Greenberg en Uden et al, 2003, proponen las siguientes 2 ecuaciones para calcular la velocidad de la onda S a partir de la velocidad de la onda P. Las constantes de estas ecuaciones se obtuvieron en pruebas de laboratorio realizadas por sus autores

$$(Vs)_{arena} = Vol_{arena} * (0.80416 * Vp - 0.85588) \quad (28)$$

$$(Vs)_{arcilla} = Vol_{arcilla} * (0.76969 * Vp - 0.86735) \quad (29)$$

Finalmente la Vs resultante quedaría de la siguiente forma:

$$Vs = (Vs)_{arena} * Vol_{arena} + (Vs)_{arcilla} * Vol_{arcilla} \quad (30)$$

La tabla 16 muestra los valores obtenidos de Vs para cada uno de los intervalos.

Tabla 16. Velocidad de la onda S en el pozo Colorado 75 para cada Bloque. F1 y F2 corresponden a $(V_s)_{\text{arena}}$ y $(V_s)_{\text{arcilla}}$ respectivamente.

| Horizonte | Vp[km/s] | SP | Vclay | Varena | F1 | F2 | $V_s = V_{\text{clay}} * f_2 + V_{\text{arena}} * f_1$ [km/s] |
|-------------------------|----------|-------|-------|--------|------|------|--|
| Fósiles de Mugrosa (B0) | 3.34 | -11.0 | 0.84 | 0.163 | 1.83 | 1.70 | 1.724 |
| Base B0 - Tope B1 | 3.65 | -21.2 | 0.57 | 0.430 | 2.08 | 1.94 | 2.001 |
| Base B1 - Tope B2 | 3.48 | -16.1 | 0.70 | 0.295 | 1.94 | 1.81 | 1.85 |
| Base B2 - Tope B3 | 3.643 | -8.5 | 0.90 | 0.098 | 2.07 | 1.94 | 1.95 |
| Base B3 - Tope MZC | 3.6 | -12.2 | 0.80 | 0.195 | 2.04 | 1.90 | 1.93 |
| Base C1 - Topes C2 | 4.22 | -21.7 | 0.56 | 0.441 | 2.54 | 2.38 | 2.45 |
| Base C2 - Tope C3 | 4.34 | -18.3 | 0.65 | 0.353 | 2.63 | 2.47 | 2.53 |
| Tope F. Esmeraldas | 4.343 | -17.5 | 0.67 | 0.332 | 2.64 | 2.48 | 2.529 |
| Base F. Esmeraldas | 4.43 | -15.9 | 0.71 | 0.290 | 2.71 | 2.54 | 2.59 |

Fuente: Autor

Para obtener la densidad de cada intervalo se utilizó el registro RHOB. La tabla 17 resume las velocidades y densidades obtenidas para cada uno de los bloques.

Tabla 17. Valores de Vp, Vs y RHOB del pozo colorado 75 para cada Bloque.

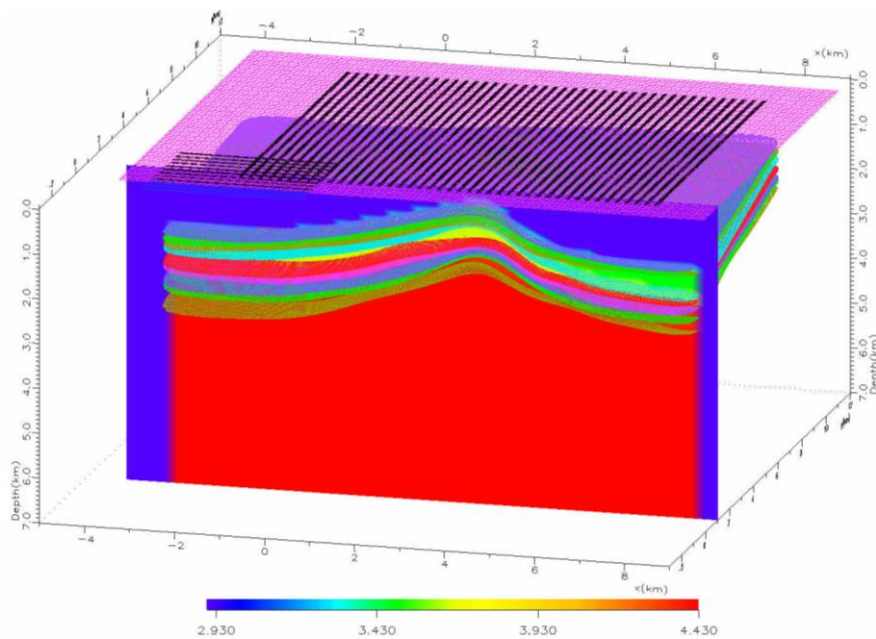
| Horizonte | Profundidad [m] | Vp [km/s] | Vs[km/s] | RHOB[grs/cm3] |
|-------------------------|-----------------|-----------|----------|---------------|
| Fósiles de Mugrosa (B0) | 775.0 | 3.34 | 1.724 | 2.353 |
| Base B0 - Tope B1 | 884.2 | 3.65 | 2.001 | 2.408 |
| Base B1 - Tope B2 | 1008.1 | 3.48 | 1.85 | 2.379 |
| Base B2 - Tope B3 | 1187.1 | 3.643 | 1.95 | 2.406 |
| Base B3 - Tope MZC | 1378.8 | 3.6 | 1.93 | 2.399 |

| | | | | |
|--------------------|--------|-------|-------|-------|
| Base C1 - Topes C2 | 1460.7 | 4.22 | 2.45 | 2.498 |
| Base C2 - Tope C3 | 1572.7 | 4.34 | 2.53 | 2.516 |
| Tope F. Esmeraldas | 1671.0 | 4.343 | 2.529 | 2.516 |
| Base F. Esmeraldas | 1778.4 | 4.43 | 2.59 | 2.525 |

Fuente: Autor

La figura 51 corresponde al modelo geofísico en el que se probaron los 3 diseños propuestos y se evaluó la iluminación obtenida a partir de estos diseños.

Figura 51. Modelo geofísico con V_p , V_s y ρ para cada bloque. La escala de colores indica la velocidad en cada bloque. La superficie color lila representa la topografía y las líneas negras son las fuentes (dirección Y) y receptores (dirección X) del diseño sísmico.



Fuente: Autor

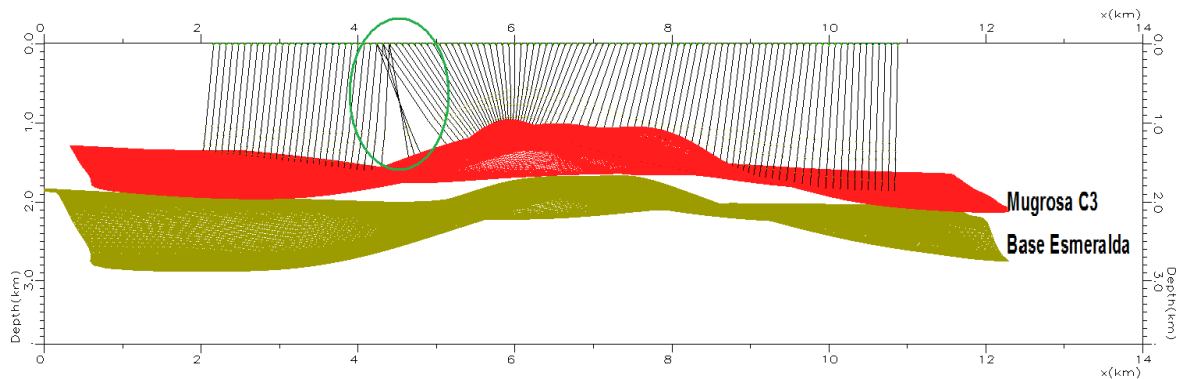
6. RESULTADOS

El modelado por trazado de rayos de los 3 diseños sísmicos propuestos sobre el modelo geofísico del campo, arrojó como resultado una buena iluminación de las superficies. Estos diseños se dispararon sobre la subzona C3 de la Fm. Mugrosa ya que esta constituye el principal reservorio del campo Colorado.

En las figuras 53 a 58 se observa una zona en forma de ovalo que indica valores bajos del *Fold* (colores azul y amarillo) dentro de la zona de mayor *Fold* (color rojo). Inicialmente se pensó que esto se originaba por altos buzamientos de la interface produciendo que las reflexiones de los rayos perpendiculares a esta superficie se salieran del área de adquisición y por esta razón no era posible iluminar esta parte del anticlinal.

Luego de hacer una revisión del área no iluminada utilizando el trazado de rayos “cero offset”, se observó que los reflectores en esta zona no tenían altos buzamientos y que la falta de cobertura es producida porque los rayos perpendiculares a este reflector tienden a llegar a un solo punto en superficie (figura 52) y los receptores que están en el círculo verde solo aceptan una cantidad limitada de rayos. Este fenómeno se produce por una restricción impuesta por el programa de trazado de rayos, pero en la realidad esta situación no se presenta ya que las ondas se propagan a través del subsuelo como frentes de ondas que llegan a los receptores y estos no tienen ese tipo de restricciones.

Figura 52. Cruce de rayos en modelado cero offset. Los receptores en esta zona no captan todas las trayectorias de los rayos.



Fuente: Autor

Los resultados del trazado de rayos se muestran a continuación.

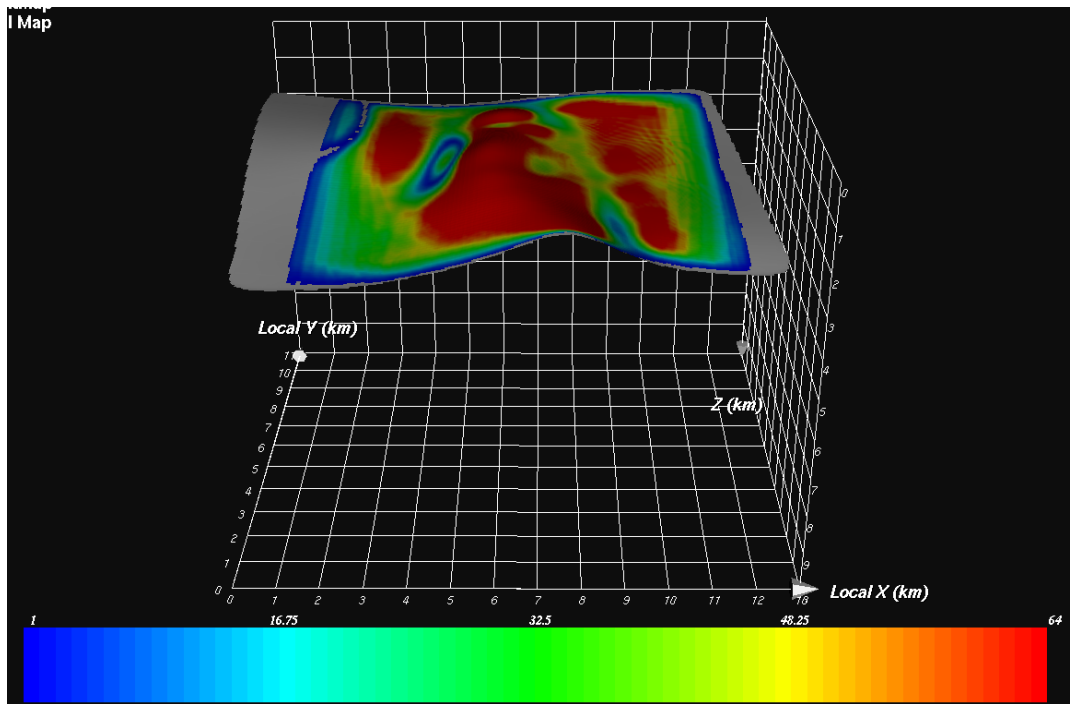
Diseño #1

Parámetros del diseño

| Diseño | | Datos de entrada | | Bin | Fold | Xmax | Xmax | Xmax | Dip |
|--------|-----|------------------|-----|-----|------|------------|-------------|-------------|------------|
| | | | | 15 | 64 | Xline (Xs) | Inline (Xr) | | |
| 1 | | | | | | 1560 | 1680 | 2292.60 | 60 |
| SLI | NS | NC | NRL | RLI | Xmin | #Ch/Line | SLI/RLI | Fold Inline | Fold Xline |
| 210 | 159 | 1792 | 16 | 210 | 297 | 112 | 1.000 | 8 | 8 |

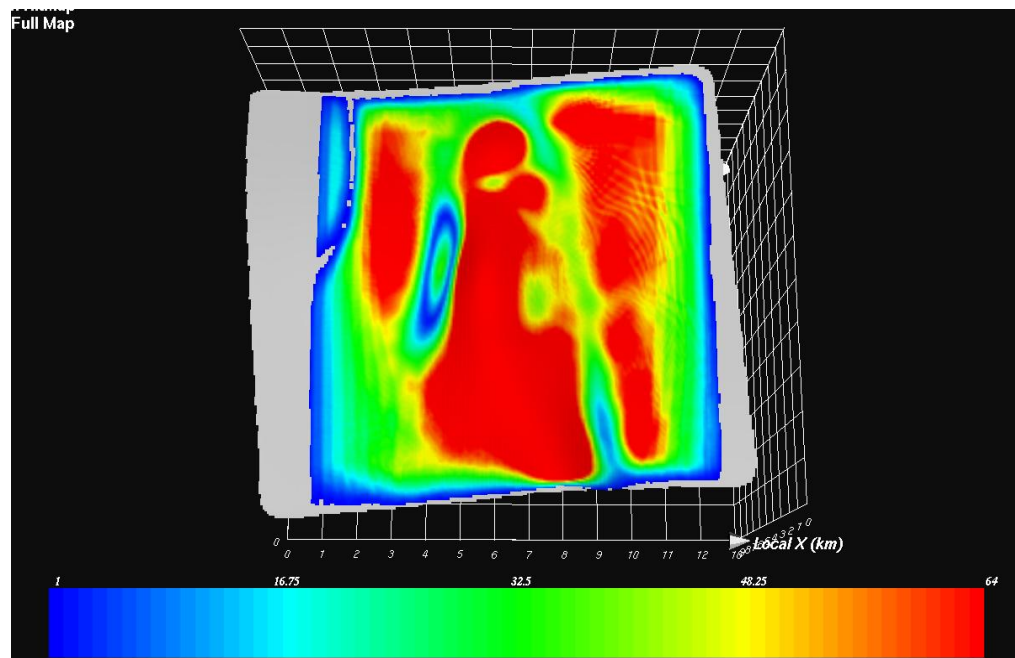
En las figuras 53 y 54 se observa que el diseño propuesto iluminar correctamente todo el anticlinal (centro de la interface) con valores de *Fold* Mayores a 50. En este caso el *Fold* del diseño es de 64 y solo se observan algunas zonas de color amarillo en la parte de la cresta y el flanco derecho del anticlinal. Para este diseño se utilizó un *Patch* de 16 líneas receptoras con 112 canales por línea.

Figura 53. *Fold* calculado a partir del modelado por trazado de rayos sobre Mugrosa C3 con el diseño # 1.



Fuente: Autor

Figura 54. Vista de planta del *Fold* calculado en la subzona C3 con el diseño #1.



Fuente: Autor

Diseño # 2

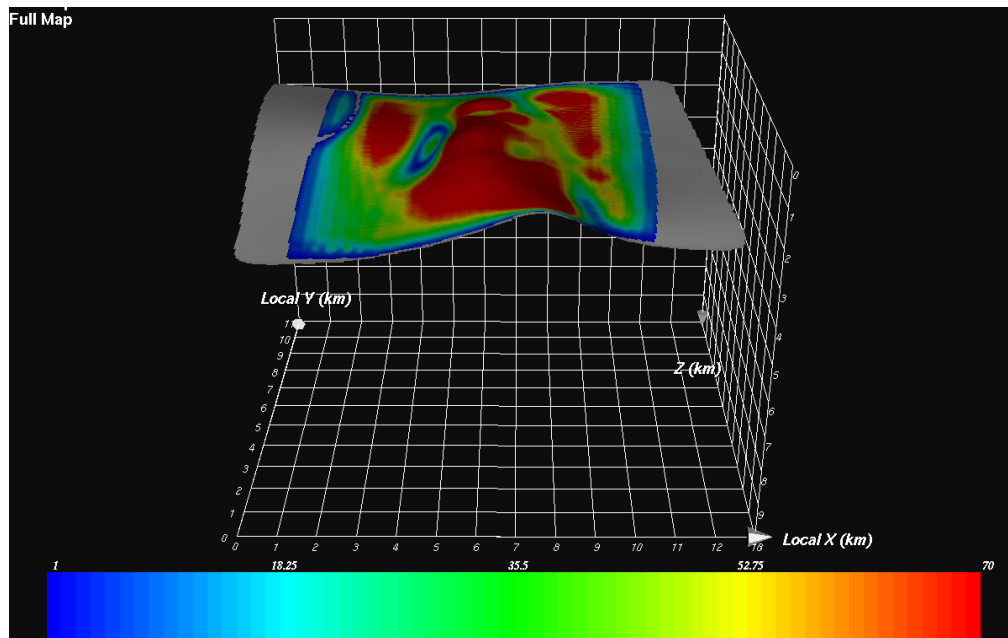
Parámetros de diseño.

| Diseño | | Datos de entrada | | Bin | Fold | Xmax Xline (Xs) | Xmax Inline (Xr) | Xmax | Dip |
|--------|-----|------------------|-----|-----|------|--------------------|---------------------|-------------|------------|
| | | | | 15 | 70 | 1710 | 1680 | 2397.19 | 60 |
| SLI | NS | NC | NRL | RLI | Xmin | #Ch/Line | SLI/RLI | Fold Inline | Fold Xline |
| 240 | 139 | 2240 | 20 | 180 | 301 | 112 | 1.321 | 7 | 10 |

Con el diseño 2 se obtiene un *Fold* de 70. Con este diseño se pierde un poco de iluminación en las zonas cercanas al anticlinal pero se incrementa el valor de *Fold* de 64 a 70 dentro de la estructura que es el objetivo principal (Figura 55 y 56).

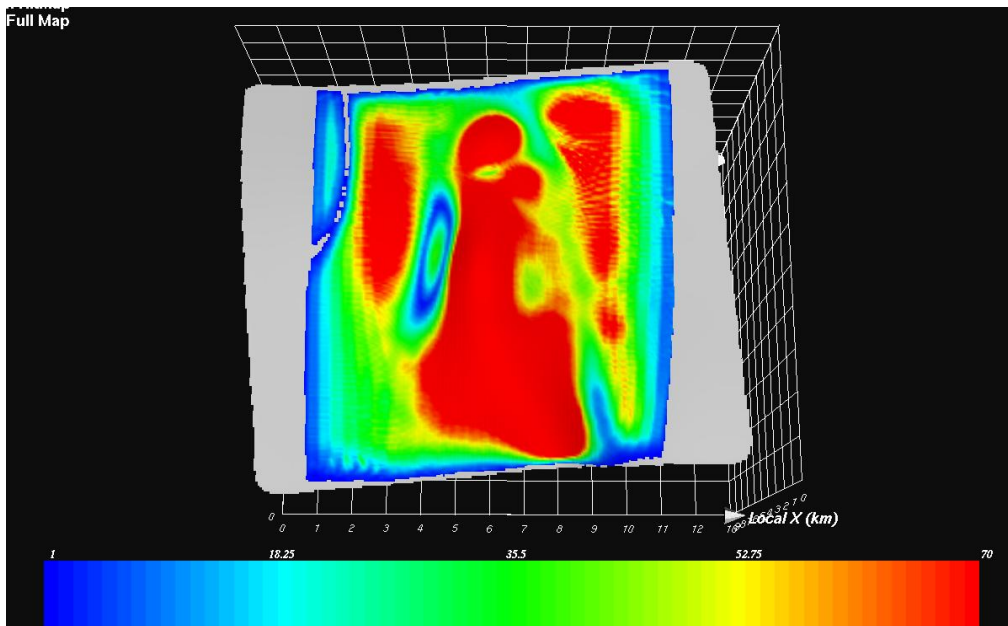
En el diseño #2 el tamaño del *Patch* fue de 20 líneas de receptores por 112 receptores

Figura 55. Fold calculado a partir del modelado por trazado de rayos sobre Mugrosa C3 con el diseño # 2.



Fuente: Autor.

Figura 56. Vista de planta del Fold calculado en la subzona C3 con el diseño # 2.



Diseño # 3.

Parámetros de diseño

| Diseño | | Datos de entrada | | Bin | Fold | Xmax Xline (Xs) | Xmax Inline (Xr) | Xmax | Dip |
|--------|-----|------------------|-----|-----|------|--------------------|---------------------|-------------|------------|
| | | | | 15 | 70 | 1710 | 1890 | 2548.76 | 60 |
| SLI | NS | NC | NRL | RLI | Xmin | #Ch/Line | SLI/RLI | Fold Inline | Fold Xline |
| 270 | 123 | 2520 | 20 | 180 | 325 | 126 | 1.488 | 7 | 10 |

El *Fold* en el diseño # 3 es de 70, se observa una iluminación similar a la obtenida con el diseño # 2 pero tiene mayor cobertura en los bordes de la interface (Figuras 58 y 59). Se observa que el *Fold* alrededor del flanco derecho de la estructura se mejora considerablemente pero dentro del anticlinal se mantiene muy parecido al obtenido con el diseño # 2.

Este diseño utiliza menos disparos por km² (NS) que los otros 2 diseños. El *Patch* de este diseño es de 20 líneas de receptores con 126 receptores por línea.

Figura 57. Fold calculado a partir del modelado por trazado de rayos sobre Mugrosa C3 con el diseño # 3.

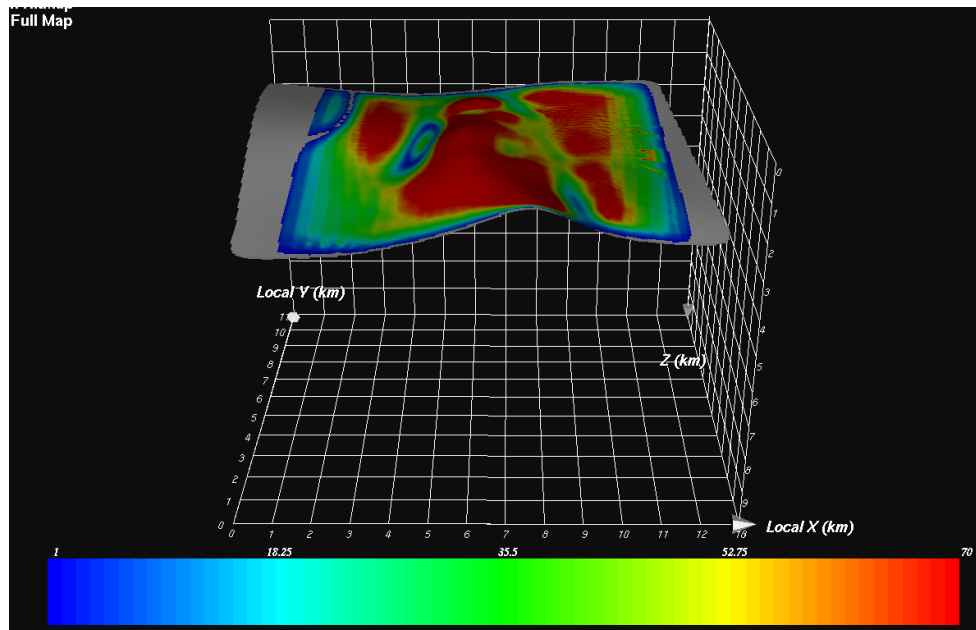
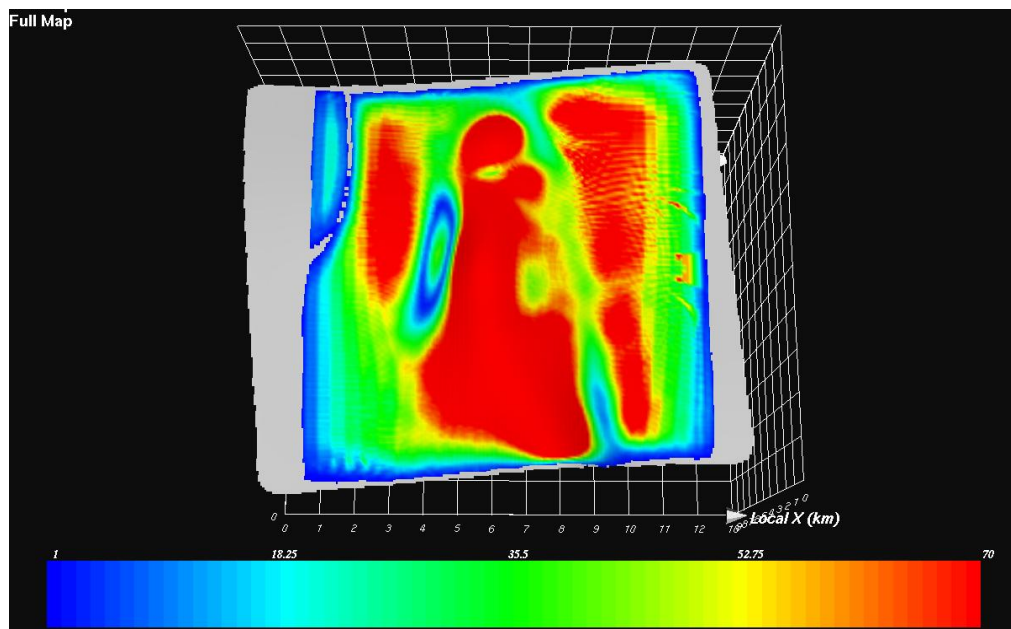


Figura 58. Vista de planta del *Fold* calculado en la subzona C3 con el diseño # 3.



Fuente: Autor.

6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO.

El costo total de una adquisición sísmica 3D depende de las características del diseño y del área total de adquisición. Un estimado del costo total de la sísmica se puede calcular a partir del número total de disparos o fuentes y conociendo el valor unitario de estos disparos. De una adquisición sísmica 3D cercana al área de estudio se calcula que un punto de disparo o fuente cuesta alrededor de 2.5 millones de pesos.

Con los datos que se muestran en la tabla 18 es posible calcular un costo aproximado realizar esta adquisición.

Tabla 18. Costo total de la adquisición 3D.

| | Diseño 1 | Diseño 2 | Diseño 3 |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Densidad de disparos por Km2 | 159 | 139 | 123 |
| Área de adquisición [Km2] | 82.62 | 82.62 | 82.62 |
| Total de disparos | 13136.58 | 11484.18 | 10162.26 |
| Costo por disparo | 2500000 | 2500000 | 2500000 |
| Valor TOTAL (pesos) | 32841450000 | 28710450000 | 25405650000 |
| Valor aproximado (Pesos) | 32mil millones | 28mil millones | 25mil millones |

Fuente: Autor

Analizando la cobertura obtenida de los tres diseños se puede observar que el *Fold* de los 3 diseños sobre el anticlinal es bueno, siendo aún mayor en los 2 últimos (70 *Fold*). También es posible notar que el diseño # 3 es el más económico de los 3 diseños propuestos, por lo tanto, el diseño que mejor presenta una relación costo-beneficio sería el diseño # 3 debido a que tiene un *Fold* mayor al *Fold* calculado y tiene el menor costo.

7. CONCLUSIONES

- Se realizaron tres diseños sísmicos 3D para el campo Colorado que cumplen con los mínimos requisitos de *Fold*, tamaño del *Bin* y con una buena iluminación de los reflectores a través de todo el anticlinal de Colorado.
- A partir de información sísmica 2D, datos de pozo y tesis grado existentes del campo Colorado, se determinó que el mayor *Fold* 2D de las líneas sísmicas de estudio es de 150, la frecuencia dominante varía entre 27 y 58 Hz, las velocidades RMS están en el rango de 2519 y 3566 m/s. Los buzamientos obtenidos de los datos *Dipmeter* están entre 8° y 60°, el objetivo más somero (Tope Fm. Mugrosa) se encuentra a una profundidad de 310m y el más profundo (Base Fm. Esmeralda) se encuentra a 2120m aproximadamente.
- Con la información existente del campo (sísmica 2D, datos de pozo y tesis de grado) se determinó que un tamaño del Bin adecuado para el diseño debe ser de 15*15m, la Frecuencia máxima debe estar en un rango de 44 a 62 Hz, los intervalos entre fuentes y receptores deben ser de 30m y el *Fold* 3D de 60.73.
- Se calcularon los parámetros de 8 diseños sísmicos de los cuales se escogieron los 3 que cumplieron con la restricción propuesta por Cooper (2004) donde se recomienda que la relación SLI/RLI debe estar entre 0.5 y 2 para optimizar el diseño (ver Tabla 10).
- Se calculó el *Fold* para los 3 diseños propuestos sobre el tope de la subzona C3 de la Fm. Mugrosa. Los resultados obtenidos fueron valores de

Fold mayores a 50 en todo el anticlinal y un *Fold* máximo de 70 en los diseños 2 y 3.

- Analizando la mejor relación costo-beneficio de los 3 diseños, se determinó que el diseño # 3 sería la opción más viable para el Campo Escuela Colorado porque presenta un *Fold* mayor al calculado para iluminar los objetivos geológicos del campo y además es el diseño que tiene el menor costo económico.
- El trazado de rayos es una herramienta muy buena de simulación pero es importantes conocer sus limitaciones y analizar en detalle los resultados ya que se puede llegar a conclusiones erróneas si los resultados no se revisan con detenimiento.

8. RECOMENDACIONES

Definir las necesidades específicas que se quieren alcanzar en el campo al desarrollar una adquisición sísmica 3D para tener claro que parámetros necesitan de un mayor análisis para obtener mayor precisión en los resultados esperados.

Reprocesar otras líneas sísmicas del campo para tener un mayor control de las frecuencias dominantes de estas líneas en datos sin procesar.

9. BIBLIOGRAFIA

Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). En: [Sitio Web]
<http://www.rondacolombia2010.com/region.php?id=4&lang=>

ALVAREZ, Gabriel. Diseño de parámetros óptimos de adquisición tridimensional. V 1 y 2. (Bogotá 1999). 56 p.

BARUCH, Elizabeth. Adquisición sísmica 3D Proyecto Roblote 05G 3D. Sartenejas, 2006, 156p. Informe pasantía: Universidad Simón Bolívar.

COOPER, Norm. A world of reality-Designing land 3D programs for signal, noise, and prestack migration. En: The Leading Edge, (Octubre 2004); p. 1007-1014.

CORDSEN, Andreas, GALBRAITH, M and PEIRCE, J. Planning Land 3D Seismic Surveys. En: Society of Exploration Geophysicists (2000), 201p.

CORDSEN, Andreas y GALBRAITH, Mike. Narrow-versus wide-azimuth land 3D seismic surveys. En: The Leading Edge, (Agosto 2002); p. 764-770.

DUQUE, Carlos. Informe geológico final Campo Colorado, ECOPETROL. Barrancabermeja. 2003, 79 p

CORTINA, Darío., PARRA, Víctor., CESPEDES, Sandra., y VILLALBA, Charles. Reporte final de procesamiento Proyecto San Luis 1995. Informe Interno de GAPS para ECOPETROL (1996) 120p.

GEDCO. Diseño sísmica usando OMNI 3D, versión 8.008. 17p.

GUEVARA, Saúl. Introducción a los métodos geofísicos aplicados a la exploración, Versión I (2006). 18 p

GALBRAITH, Mike. 3D Design for Target Fold. En: SEG 2000 Expanded Abstracts. 4p.

PARDO, Jessica. Adquisición sísmica 3D proyecto Florida-Amarilis. Venezuela, 2005, 78p. Tesis de grado: Universidad Simón Bolívar.

Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial. En [Sitio Web] www.scribd.com/.../Metodos-Sismicos-Refraccion-y-Reflexion. p. 7-18.

SHERIFF, R. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics, 1985. En: Society of Exploration Geophysicists, USA. 458 p

Schlumberger Oilfield Glossary. En [Sitio Web] <http://www.glossary.oilfield.slb.com/Display.cfm?Term=coherent%20noise>

UDEN, R.C., TANER, M.T, CARR, M.B y SMITH, M. Seismic Data Mining. En: EAGE 65th Conference & Exhibition-Stavanger, Norway (Junio 2003); 4p.

VALENCIA, Leydy. Calibración de atributos sísmicos para la identificación litológica de carbonatos en el Caribe colombiano, Bucaramanga 2010, 107p. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.

ZAFRA, Cristian. Estimado Geoestadístico de la Porosidad de un subvolumen de La Formación Mugrosa en El Campo Colorado. Bucaramanga 2009, 150p. Tesis de pregrado: Universidad Industrial de Santander.

YILMAZ, Öz. Seismic Data processing. Segunda edición en digital. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicist; 2008, p. 25-1000.