

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**MODELADO ESTRUCTURAL 3D DEL CAMPO CERRO NEGRO  
(BLOQUE CARABOBO) FAJA PETROLIFERA DEL ORINOCO, ESTADO  
ANZOATEGUI, VENEZUELA**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero Geofísico  
Por la Bra. Elizabeth del Carmen Salazar Castejón

Caracas, Octubre 2014

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **MODELADO ESTRUCTURAL 3D DEL CAMPO CERRO NEGRO (BLOQUE CARABOBO) FAJA PETROLIFERA DEL ORINOCO, ESTADO ANZOATEGUI, VENEZUELA**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Andrés Espeso  
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. (a) Rossemary Castellanos

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero Geofísico  
Por la Bra. Elizabeth del Carmen Salazar Castejón

Caracas, Octubre 2014

Caracas, Octubre 2014

Los abajo firmantes miembros del jurado designado por el Concejo de Escuela de Geología, minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bra. Elizabeth del C Salazar C titulado:

**MODELADO ESTRUCTURAL 3D DEL CAMPO CERRO NEGRO  
(BLOQUE CARABOBO) FAJA PETROLIFERA DEL ORINOCO, ESTADO  
ANZOATEGUI, VENEZUELA**

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

---

Prof. Ronny Mesa  
Jurado

---

Prof. Ignacio Mederos  
Jurado

---

Prof. Andrés Espeso  
Tutor Académico

## INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO .....	iv
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE TABLA .....	xii
DEDICATORIA .....	xiii
AGRADECIMIENTOS .....	xiv
Resumen.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
CAPITULO I.....	16
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
1.1 Planteamiento del Problema.....	16
1.3 Objetivos Específicos.....	17
1.4 Justificación.....	17
1.5 Localización del área de Estudio.....	18
CAPÍTULO II .....	20
MARCO GEOLÓGICO.....	20
2.1 Evolución Geodinámica y Tectónica. ....	21
2.1.1 Fase Pre-Rift .....	22
2.1.2. Fase de Rift. ....	23
2.1.4 Fase de Colisión Oblicua .....	25
2.2 Rasgos Estructurales Regionales.....	28
2.3 Subcuencas .....	29
2.3.1 Subcuenca de Guárico.....	30
2.3.2 Subcuenca de Maturín.....	31

2.4 Geología Local .....	35
2.4.1 Morfología y Composición. ....	35
2.4.2 Estratigrafía Local .....	35
<b>CAPITULO III</b> .....	<b>41</b>
<b>MARCO TEORICO</b> .....	<b>41</b>
3.1 Métodos Sísmicos .....	41
3.1.1 Sísmica de Reflexión.....	42
3.1.2 Impedancia Acústica .....	43
3.1.3 Serie de Reflectividad .....	44
3.1.4 Modelo Convolutacional.....	44
3.1.5 Profundidad y Resolución Sísmica .....	45
3.1.6 Sísmica de Pozo .....	46
3.1.7 Velocidades Sísmicas.....	47
3.1.8 Atributos sísmicos.....	48
3.2 Tectónica.....	49
3.2.1 Esfuerzos .....	49
3.2.2. Estructuras asociadas a Esfuerzos.....	50
3.2.3 Sistema de Fallas Rumbo Deslizante .....	52
3.3 Modelado Estructural .....	53
3.3.1 Definición del Grid .....	55
3.3.2 Modelado De Fallas. ....	56
3.3.3 Modelado de Horizontes. ....	57
<b>CAPITLO IV</b> .....	<b>58</b>
<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>58</b>

4.1 Carga y Validación de Datos .....	59
4.1.1 Datos de Pozos .....	60
4.1.2 Datos Sísmicos .....	61
4.2 interpretación Sísmica Estructural .....	62
4.2.1 Calibración Sísmica .....	62
4.2.2 Cálculo de la Resolución Sísmica .....	68
4.2.3 Interpretación Estructural .....	69
4.2.4 Mapas estructurales en tiempo. ....	74
4.2.5 Atributos Sísmicos Estructurales .....	76
4.3 Conversión Tiempo Profundidad .....	78
4.3.1 Modelo de Velocidades .....	78
4.3.2 Mapas Estructurales en-Profundidad. ....	80
4.4 Modelo Estructural 3D .....	83
4.4.1 Modelado de Fallas .....	84
4.4.2 Mallado Estructural .....	87
4.4.3 Modelado de Horizontes. ....	91
CAPITULO V .....	99
ANALISIS DE RESULTADOS .....	99
5.1 Calibración Sísmica .....	99
5.2 Resolución vertical .....	99
5.3 Interpretación de Fallas .....	100
5.4 Mapas en tiempo. ....	103
5.5 Modelo de velocidades .....	104
5.5.1 Mapas en Profundidad .....	110

5.6 Modelado Estructural.....	111
5.6.1 Modelado de Fallas .....	111
5.6.2 Modelado de Horizontes.....	114
CAPITULO VI.....	120
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	120
BIBLIOGRAFIA .....	123

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Campo Cerro Negro. ....	19
Figura 2. Cuencas petrolíferas de Venezuela (Tomado de Pérez et al (1997)). ....	21
Figura 3. Configuración regional del Paleozoico Tardío. ....	22
Figura 4. Sección norte-sur representativa de la las etapas de Margen Pasivo (a) y (b) la Colisión Oblicua (Pindell, 2001). ....	24
Figura 5. Desplazamiento de la Placa Caribe respecto a la Placa Suramericana (Mapa de Fallas Cuaternarias de Venezuela, por F. Audemard, (2000)). ....	27
Figura 6. Principales estructuras de la Cuenca Oriental de Venezuela. UF: Falla de Urica, GF: Corrimiento de Guárico, EPF: Falla El Pilar y SPF: Falla San Francisco. Tomado de Yoris et al. (2004). ....	28
Figura 7. Rasgos estructurales de la Faja Petrolífera del Orinoco. Nótese como el sistema de fallas de Hato Viejo divide a la zona en dos provincias. ....	29
Figura 8. Corte Geológico conceptual norte-sur desde el cinturón de deformación del Caribe en Curazao hasta el Río Orinoco. El Sector de la Cuenca Oriental que muestra el corte pertenece a la Subcuenca de Guárico (Schlumberger, 1997). ....	30
Figura 9. Corte Geológico noreste-sureste, flanco norte de la Subcuenca de Maturín (Schlumberger, 1997). ....	31
Figura 10. Sección estratigráfica sur-norte de la Subcuenca de Maturín (Roure, 1994). ....	32
Figura 11. Columna Estratigráfica de la Faja Petrolífera del Orinoco incluyendo el área de Carabobo. ....	36
Figura 12. Columna Tipo Bloque Carabobo Pozo NX. ....	40
Figura 13. Diagrama simplificado de los rayos reflejados en un medio estratificado (BeicipFranlap, 2009). ....	42
Figura 14. Comportamiento del Rayo incidente en un medio (BeicipFranlap, 2009). .	43
Figura 15. Modelo Convolutacional (modificado de Sheriff, 2007). ....	45

Figura 16. Representación esquemática de los tiros de verificación (Reguerio, 2007). .....	47
Figura 17. Esfuerzos Compresivos, Extensivos y de Cizalla ( <i>shear</i> ) (Soriano, 2012). .....	49
Figura 18. Estructuras asociadas a combinaciones de fallas normales, graben y horst (Soriano, 2012).....	51
Figura 19. Terminología de zonas de extensión y contracción a lo largo de un sistema de fallas de transcurrentes. ....	53
Figura 20. Grid Estratigráfico. ....	55
Figura 21. Ejemplo de grid estratigráfico .....	56
Figura 22. Diagrama de la metodología empleada.....	59
Figura 23. Visualización de los checkshots del área de estudio .....	60
Figura 24. Distribución de Inline y Crossline del área de estudio. ....	61
Figura 25. Flujo de trabajo en la calibración sísmica.....	63
Figura 26. Gráfica del Sónico integrado y Checkshot (Syntool User, 2003).....	63
Figura 27. Diferencia entre los valores del registro sónico y el checkshot (mistie). ..	64
Figura 28. Representación de la curva integrada del registro sónico, sónico corregido y el mistie. ....	64
Figura 29. Parámetros utilizados para la selección de las curvas DT y RHOB.....	65
Figura 30. Espectro de frecuencia de la sísmica (rojo), filtro Trapezoidal (verde), Ricker (azul).....	66
Figura 31. Sismograma Sintetico .....	67
Figura 32. Espectro de frecuencia Del IL 135 .....	68
Tabla 4.1. Calculo de Resolución Vertical promedio .....	69
Figura 33. Flujo de trabajo en la seccion de interpretación .....	70
Figura 34. Definición de Peak Máximo, Cero Crossing y Mínimo. ....	70
Figura 35. Calibración de la Línea 674 del campo Cerro Negro con los marcadores geológicos .....	71
Figura 36. Traza 455 cotejado con el pozo B.....	72

Figura 37. Ubicación del levantamiento sísmico, a) malla de interpretación 10x10 y fallas interpretadas b) mapa en tiempo del marcador geológico SI10 correspondiente a Morichal Medio.....	73
Figura 38. Mapa en tiempo de Pílon.....	74
Figura 39. Mapa en tiempo de Basamento.....	75
Figura 40. Proceso de elaboración de atributos sísmicos en Petrel. ....	76
b) .....	77
Figura 41. Corte en tiempo Tomado a 810ms a) corte en tiempo b) corte en tiempo con Fallas .....	77
Figura 42. Elaboración del Modelo de Velocidades. ....	79
Figura 43. Modelo de velocidades vista lateral.....	80
Figura 44. Mapas en Profundidad de a) Pílon y b) Jobo.....	81
Figura 45. Mapa en profundidad a) morichal medio y b) basamento .....	82
Figura 46. Metodología empleada en la elaboración del modelo estructural .....	83
Figura 47. Fallas interpretadas convertidas a pilares en el proceso de <i>fault modelling</i> . .....	84
Figura 48. Proceso de delimitación del área a modelar. ....	85
Figura 49. Falla interpretada y falla modelada.....	85
Figura 50. Fallas a modelar cortadas y extendidas. ....	86
Figura 51. Vista de la falla interpretada y la modelada.....	86
Figura 52. Modelado de fallas extendiéndolas hasta los horizontes tope y base del modelo.....	87
Figura 53. Disposición final de las fallas y direcciones asignadas. ....	88
Figura 54. Grid 100x100 con fallas.....	89
Figura 55. Grid final 100x100.....	90
Figura 56. <i>Skeleton</i> del modelo y plano de falla modelada. ....	91
Figura 57. Elaboracion de los Horizontes del Modelo.....	92
Figura 58 Distancia de Influencia de la falla respecto al horizonte .....	92
Figura 59 Distancias modificadas para cada falla.....	93
Figura 60. Modelado manual del plano de falla.....	94

Figura 61. Superficie modelados en profundidad de a) Pilon b) Jobo.....	95
Figura 62. Superficie modelados en profundidad de a) Morichal Medio b) Basamento .....	96
Figura 63. Visualización de las zonas generadas por el modelo.....	97
Figura 64. Visualización de diferentes perfiles del modelo estructural .....	98
Figura 65. Familia de Fallas identificadas. ....	101
Figura 66. Estructura en flor negativa.....	102
Figura 67. Visualización de Falla en la ventana 3D y en la ventana de interpretación .....	103
Figura 68. Relación tiempo-profundidad de Basamento.....	104
Figura 69. Relación tiempo-profundidad del horizonte a) Pilon y b) Morichal Medio. .....	105
Figura 70. Relaciones a) tiempo-profundidad y b) velocidad-profundidad de Pilon	107
Figura 71. Relaciones tiempo profundidad para la zona Pilon-Morichal Medio.....	107
Figura 72. Relación a) Tiempo-Profundidad y b) velocidad-profundidad en la zona definida entre Morichal Medio y Basamento.....	109
Figura 73. Sección transversal del modelo de velocidades interválica.....	110
Figura 74. Modelo de Carabobo a) celda 200x200 b) Modelaje de fallas (PDVSA, 2010). ....	114
Figura 75. Visualización de horizontes Modelados (negro) y originales (colores). .	115
.....	117
Figura 76. Visualización de a) Perfil dirección norte-sur b) perfil Sur-Norte. ....	117
Figura 77. Vista de Perfil y disposición interna de las unidades de producción del modelo.....	118
Figura 78. Vista 3D del modelo y la sísmica en profundidad.....	119

## INDICE DE TABLA

Tabla 4.1. Calculo de Resolución Vertical promedio .....	69
--	----

## DEDICATORIA

A Dios, Mi Familia, especialmente a mi Madre y Amigos por siempre estar a mi lado  
y acompañarme en las buenas y malas.

## AGRADECIMIENTOS

Por que nombrar a todos los que me han ayudado y compartido conmigo seria tener una lista infinita en tan corto espacio, los que me ayudaron a crecer personal y profesionalmente siempre les estaré infinitamente agradecida a todos aquellos que estuvieron a mi lado en los momentos felices, los tristes, las fiestas y resacas Gracias, sin su granito de arena no sería la persona quien soy.

**Elizabeth del Carmen Salazar Castejón**

**MODELADO ESTRUCTURAL 3D DEL CAMPO CERRO NEGRO  
(BLOQUE CARABOBO) FAJA PETROLIFERA DEL ORINOCO, ESTADO.  
ANZOATEGUI, VENEZUELA**

**Tutor Académico: Prof. Andrés Espeso. Tutor Industrial: Ing. (a) Rossemary  
Castellanos**

**Tesis, Caracas, U.C.V Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y  
Geofísica. Departamento de Geofísica. Año 2013.**

**Palabras Claves:** Modelado Estructural, Sísmica 3D, Sísmica (Interpretación), Faja Petrolífera del Orinoco, Bloque Carabobo, Modelado de Fallas, Modelado de Horizontes.

**Resumen** El campo Cerro Negro, está localizada al Sur del Estado Monagas y sudeste del Estado Anzoátegui al oeste del bloque Carabobo en la Faja Petrolífera del Orinoco. El trabajo consistió en la elaboración del modelo estructural del mencionado campo para esto se contó con sísmica 3D, información de 20 pozos de los cuales 12 tenían leyes de velocidades e información de los marcadores geológicos, el trabajo final aportará información relevante y actualizada con sísmica 3D al proyecto de caracterización de los yacimientos pertenecientes a los campos de la Faja Petrolífera del Orinoco, para esto se realizó la interpretación sísmica de los eventos asociados a los marcadores geológicos de los miembros de la Formación Oficina y del Basamento, se realizó el modelo de velocidades para poder llevar a cabo la conversión de los horizontes y fallas interpretados de tiempo a profundidad, se observó que el patrón estructural existente en la zona es un sistema rumbo deslizante con un sistema de fallas normales características de regímenes extensivos. Para realizar el modelo estructural el paso fundamental fue realizar el correcto modelado de fallas analizando la expresión sísmica del reflector con la realidad geológica de la zona, para guiar este paso fue vital el uso de atributos sísmicos estructurales que resaltaron las deformaciones en el área y con base en el sistema de esfuerzos se pudo concretar las orientaciones finales de las mismas y elaborar la malla estratigráfica, para esto se tomó la decisión de realizar el grid del modelo con un tamaño de celda de 100x100 m puesto que este dato daba una mejor visualización de la celda y una buena relación del tiempo de computo, obteniéndose un total de 47443 celdas en 2D.

# CAPITULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del Problema

La exploración geofísica de la Faja Petrolífera del Orinoco se inició en el periodo 1970-76, en el cual el entonces Ministerio de Minas e Hidrocarburos conjuntamente con la Corporación Venezolana del Petróleo emprendieron un vasto reconocimiento sísmico para totalizar 12500 km de grabación sísmica, entre los que destacan Levantamiento Cerro Negro 79, 80 y 81 con un total de 2634 km adquiridos en el área de Carabobo que sirvieron de base para el estudio regional de la zona.

La Faja Petrolífera del Orinoco inicialmente fue dividida en seis (6) sectores, en ese entonces: Machete, Zuata y San Diego, Hamaca y Pao y Cerro Negro cuya responsabilidad de explorarlas y explotarlas fue entregada a las filiales de Petróleos de Venezuela (PDVSA) de ese entonces: Meneven, Maraven, Corpoven y Lagoven, actualmente están divididos en cuatro (4) bloques correspondientes a Carabobo, Junin, Ayacucho y Boyacá.

Las cuatro quintas partes de los hidrocarburos de La Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) saturan las arenas bien desarrolladas que fueron depositadas en los deltas de los caudalosos ríos que drenaban el escudo guayanés, dentro de la estratigrafía local destaca la Formación Oficina que está dividida en cuatro miembros: Morichal, Yabo, Jobo y Pión. El Miembro Morichal ubicado en la sección basal de dicha formación representa el intervalo de roca más prospectivo, de edad Mioceno Temprano a Medio, representando aproximadamente el 77% del petróleo original in situ (P.O.E.S.) total estimado (PDVSA, 2012). En vista de la importancia que representa este intervalo productor se requiere la realización de un modelo estructural del área con el fin de delimitar el yacimiento y ver la disposición espacial de la estructura que lo conforma, para esto se utilizará información sísmica e información de pozos existentes en el

área de estudio. El presente trabajo persigue realizar el modelo estructural 3D del campo Cerro Negro, el cual será la base del modelo de yacimiento, actualmente no se cuenta con un modelo estructural actualizado, es por ello que dentro del marco del proyecto de caracterización de yacimientos del área Carabobo-Ayacucho se estima generarlo.

## 1.2 Objetivo General.

Realizar el modelado estructural 3D del Campo Cerro Negro de la Faja Petrolífera del Orinoco, a fin de visualizar la orientación y la geometría de las estructuras geológicas presentes en el área, como base del desarrollo del modelo estático del campo que realiza la empresa mixta Petromonagas.

## 1.3 Objetivos Específicos

- Realizar la calibración sísmica-pozo por medio de la generación de sismogramas sintéticos.
- Interpretar a partir de datos sísmicos 3D horizontes y fallas en tiempo.
- Crear mapas estructurales en tiempo.
- Generar atributos de volumen y de superficie para determinar rasgos estructurales en el área.
- Crear modelo de velocidades.
- Generar horizontes sísmicos en profundidad.
- Construir modelado estructural 3D del campo Cerro Negro.

## 1.4 Justificación

La realización del presente estudio surge de la necesidad de la actualización constante de los modelos geológicos vigentes a fin de incrementar la capacidad de explotación de yacimientos por parte de la Empresa Mixta PETROMONAGAS como parte de sus

actividades para el mejoramiento de los planes de explotación del Campo Cerro Negro del Bloque Carabobo de la Faja Petrolífera del Orinoco. La investigación permitirá visualizar espacialmente la arquitectura del yacimiento, del mencionado campo. Por ello se realizará el modelado estructural 3D mediante lo cual esta investigación aportaría información relevante y actualizada con sísmica 3D al proyecto de caracterización de los yacimientos pertenecientes a los campos de la Faja Petrolífera del Orinoco que contribuya a la generación del modelo geológico del campo en estudio.

### 1.5 Localización del área de Estudio

El campo Cerro Negro se encuentra ubicado en la Cuenca Oriental de Venezuela y forma parte de la Faja Petrolífera del Orinoco. Geográficamente el campo Cerro Negro está localizada al Sur del Estado Monagas y sureste del Estado Anzoátegui dentro de los paralelos  $8^{\circ}30'$  y  $8^{\circ}50'$  hemisferio norte y los meridianos  $63^{\circ}00'E$  y  $63^{\circ}20'$  al oeste del bloque Carabobo de la Faja Petrolífera del Orinoco localizado en el Distrito Independencia y posee una superficie aproximada de  $332\text{km}^2$  (Figura 1).

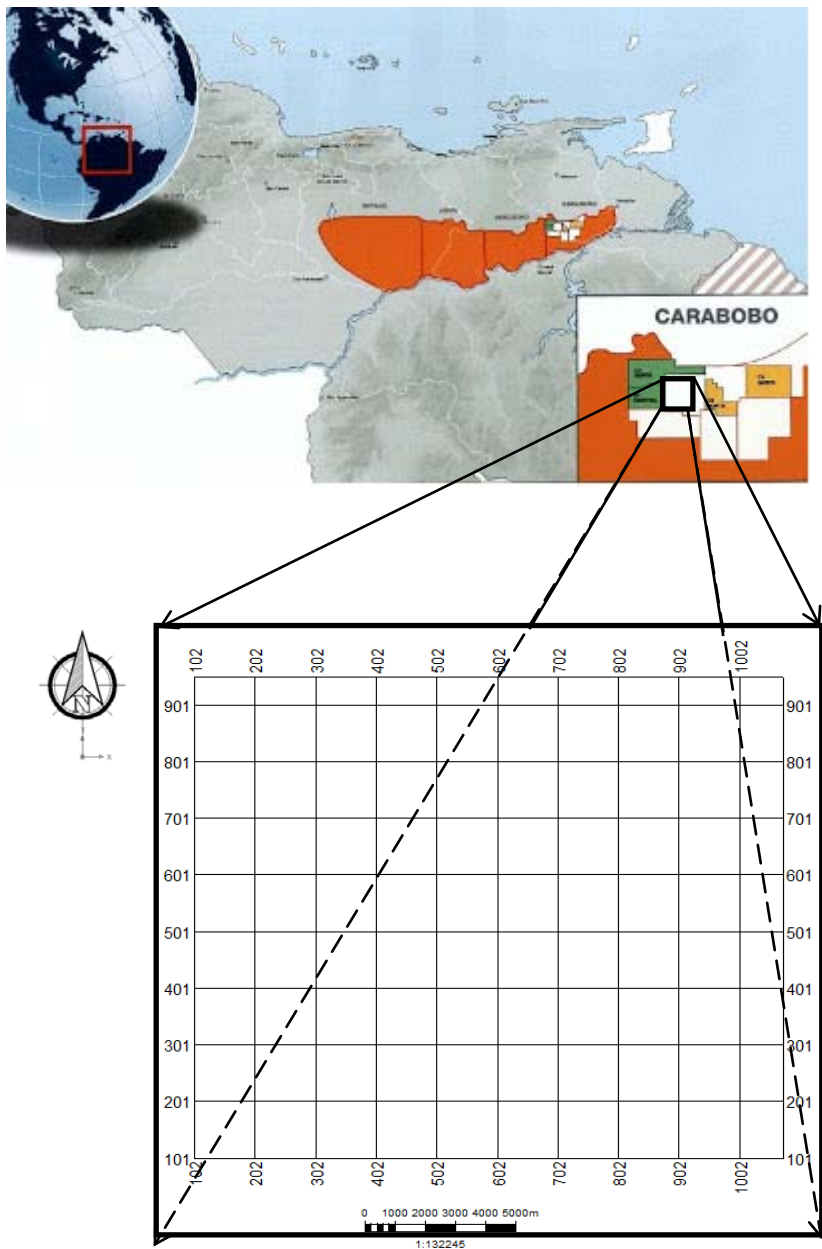


Figura 1. Ubicación del Campo Cerro Negro.

## CAPÍTULO II

### MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca Oriental de Venezuela es una depresión topográfica y estructural ubicada en la región centro-este del país, con una longitud de 800 Km. de extensión aproximadamente en dirección oeste-este y 200 Km. de ancho de norte a sur, a través de los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro, llegando a extenderse hasta la Plataforma Deltana y sur de Trinidad, se encuentra ubicada en la zona noreste del país, entre los 8° y 11° de latitud norte y los 61° y 66° de longitud oeste.

Está limitada al norte por el Cinturón Móvil de la Serranía del Interior Central y Oriental; al sur por el Río Orinoco, desde la desembocadura del Río Arauca hacia el este hasta Boca Grande, siguiendo de modo aproximado el borde septentrional del Cratón de Guayana; al este de la cuenca continúa por debajo del Golfo de Paria, incluyendo la parte situada al sur de la Cordillera Septentrional de la Isla de Trinidad y se hunde en el Atlántico al este de la costa del Delta del Orinoco, y al oeste, limita con el levantamiento de El Baúl y su conexión con el Cratón de Guayana, que sigue aproximadamente el curso de los ríos Portuguesa y Pao (Di Croce, 1999).

La Cuenca Oriental de Venezuela está subdividida en dos subcuencas: la Subcuenca de Guárico al oeste y la Subcuenca de Maturín al este, extendiéndose por los estados Guárico, Anzoátegui, Delta Amacuro, Monagas y el suroeste del Estado Sucre. La interfase que separa las Subcuencas de Guárico y Maturín de los plegamientos de la Serranía del Interior es el sistema de fallas de Urica; mientras que las Subcuencas de Guárico y Maturín están separadas por el sistema de fallas de Anaco y sus estructuras asociadas (Di Croce, 1999) (Figura 2).



Figura 2. Cuenas petrolíferas de Venezuela (Tomado de Pérez et al (1997)).

## 2.1 Evolución Geodinámica y Tectónica.

La teoría que fomenta el origen pacífico plantea que la evolución geodinámica de la cuenca Oriental de Venezuela puede ser dividida en cuatro eventos (Eva et al., 1989):

1. Una fase Pre-rift en el Paleozoico.
2. Una fase de Rifting y Drifting durante el Jurásico y el Cretáceo Temprano.
3. Un periodo de margen pasivo durante el Cretáceo y el Paleoceno.
4. Una fase final durante la colisión oblicua en el Plioceno-Mioceno y el Cuaternario que resultó en la formación de la Serranía del Interior y la transformación de la cuenca de margen pasivo a una cuenca tipo antepaís.

En la Cuenca Oriental de Venezuela sólo pueden ser reconocidos los dos últimos episodios de la evolución geodinámica a partir de los pozos y muestras de los afloramientos. Las primeras dos etapas son interpretadas a partir de data sísmica de la Subcuenca de Trinidad al este y de la Subcuenca de Guárico al oeste. (Morales, Hilla et.al, 2005).

### 2.1.1 Fase Pre-Rift

Esta mega secuencia tuvo lugar en el Paleozoico y fue identificada a partir de perfiles sísmicos. Está asociada con las Formaciones Hato Viejo y Carrizal de la Subcuenca de Guárico, las cuales fueron depositadas en ambientes marinos costeros a neríticos. Las secuencias encontradas por perforaciones están compuestas por areniscas de grano finos, ligeramente calcáreas con intercalaciones con conglomerados y lutitas verdes. Stover (1967) dató la Formación Carrizal como Devónico tardío a Carbonífero temprano, y tiene un espesor entre 3.000 y 5.000 m (Parnaud et al., 1995). Las rocas de esta edad no forman parte del sistema petrolero de la Cuenca Oriental de Venezuela y se asocian al interior del súper continente Pangea (Erlich y Barrett, 1992) (Figura 3).

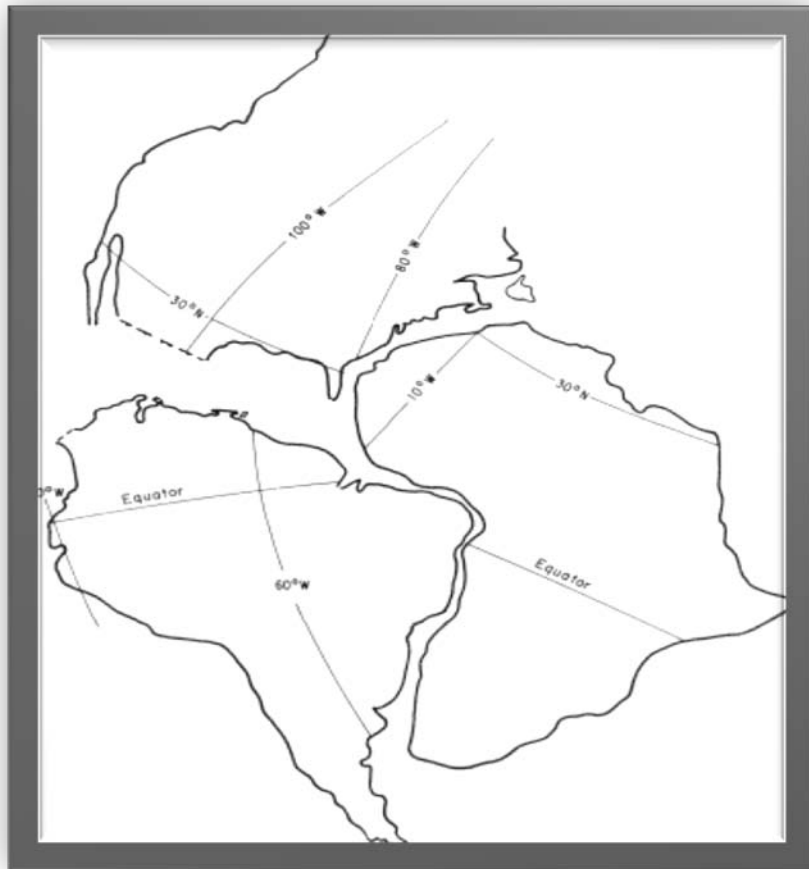


Figura 3. Configuración regional del Paleozoico Tardío.

### 2.1.2. Fase de Rift.

La megasecuencia Rift tuvo origen durante el Jurásico Tardío y el Cretáceo Temprano, durante este periodo la placa de Norte América se separó del súper continente Gondwana, formando el Atlántico Norte y afectando el margen norte de la placa suramericana. La fase de rift está caracterizada por el levantamiento vertical del borde cratónico, actividad volcánica en el Macizo de El Baúl, así como por un largo período de erosión sobre la mayor parte de la Cuenca Oriental. La transgresión está bien representada por la sedimentación de clásticos y calizas marinas de la Formación Barranquín y la depositación hacia el sur del Grupo Temblador con la Formación Canoa de ambiente continental. Las calizas y arenas de estos períodos constituyen legítimos prospectos para el petróleo (González De J. et al., 1980).

En la Cuenca Oriental esta fase está representada por las capas rojas; conjunto de rocas clásticas depositadas en ambiente continental de canales entrelazados, canales anastomosados y abanicos de ruptura de un sistema progradante tipo graben, cuyos sedimentos probablemente provienen de las rocas plutónicas y metamórficas del Escudo de Guayana, y basaltos depositados en el Graben de Espino durante el Jurásico Superior y Cretácico Inferior (González de Juana et al., 1980).

### 2.1.3 Fase de Margen Pasivo

La mega secuencia de Margen Pasivo cubre el Cretáceo–Paleoceno y está caracterizado por tres fases principales transgresivas observadas de norte a sur y que culminan durante el Turoniano, Paleoceno Temprano Eoceno, y Oligoceno respectivamente. Aunque esta megasecuencia se observa claramente en las secciones sísmicas, la base de la misma no ha podido ser reconocida ni por muestras de pozos ni de afloramientos (Parnaud et al., 1995).

Se caracteriza por la subsidencia de margen pasivo de América del Sur desde el Jurásico Superior o Cretácico Inferior hasta el Eoceno, y el depósito de 3 o 4 Km de rocas sedimentarias de origen marino con alto contenido de materia orgánica y espesas unidades carbonáticas.

La fase inicial transgresiva comenzó con la depositación de las arenas basales de la Formación Barranquín (Vander Osten, 1957). El máximo avance transgresivo de esta fase está marcado por la depositación de carbonatos de plataforma que son diacrónicos en dirección norte sur en la cuenca oriental, y claramente observados en las líneas sísmicas (figura 4). Esta trasgresión está definida como una secuencia de edad cretácea medio (Parnaud et al., 1995).

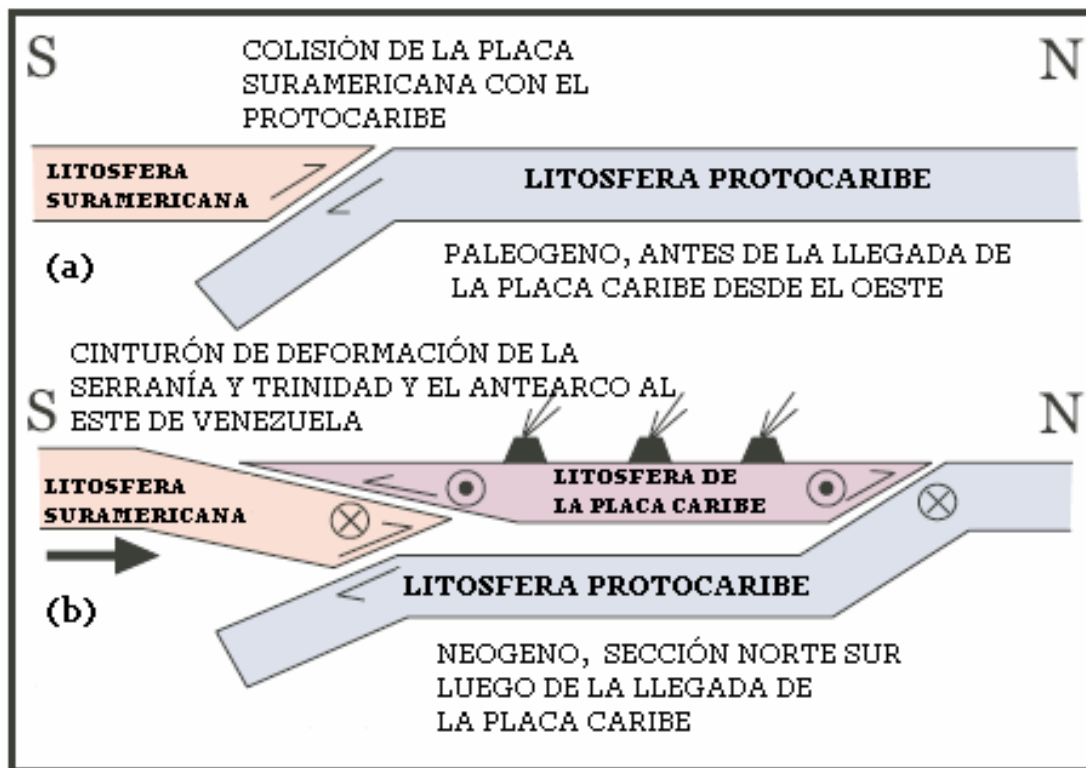


Figura 4. Sección norte-sur representativa de la las etapas de Margen Pasivo (a) y (b) la Colisión Oblicua (Pindell, 2001).

La principal roca madre fue depositada en esta fase transgresiva. Estas rocas son ricas en material orgánico de origen marino depositadas en un ambiente batial entre el Alto de Piritál y la falla de El Pilar. Estas rocas madre corresponden a las Formaciones Querecual y San Antonio de edad Cenomaniense – Campaniense y están cubiertas por carbonatos de plataforma en la región más al sur (Parnaud, 1995).

La siguiente transgresión tuvo lugar durante la edad Paleoceno–Eoceno, seguida por la regresión del Maastrichtiense, y está representada por fenómenos tectonotermales que afectaron las rocas mesozoicas al norte de las actuales costas de Venezuela central y oriental, produciendo metamorfismo regional acompañado de intrusiones ácidas (González de Juana et al., 1980). Durante el Paleoceno – Eoceno, finaliza la retirada de los mares iniciada en el Campaniense por lo que las aguas invaden nuevamente la cuenca a nivel de la parte central de Guárico y posteriormente las zonas meridionales de los estados Anzoátegui, Monagas y Sucre. El levantamiento ocurrido a finales del cretácico determinó una extensa zona donde se sedimentaron las primeras unidades antepaís del Paleoceno Eoceno (González de Juana et al., 1980).

La fase final de la transgresión ocurrida durante el Oligoceno comenzó con la depositación de las arenas basales de la Formación Merecure, las cuales son la principal roca reservorio del área de El Furrial. La Formación Merecure fue depositada bajo un ambiente continental en la parte sur de la cuenca (área de Cerro Negro) y hacia el norte fue depositada bajo un ambiente de arrecife (Serranía del Interior). Está compuesta principalmente de alteraciones de areniscas y lutitas de grano fino, y la fuente de los sedimentos proviene del Escudo de Guayana ubicado al sur de la cuenca (Parnaud, 1995).

#### 2.1.4 Fase de Colisión Oblicua

La mega secuencia del margen pasivo finalizó durante el Oligoceno con el final de la colisión tangencial y diacrónica de la Placa del Caribe contra la Placa Suramericana

en la cual la cuenca cambió a tipo antepaís. Durante esta colisión oblicua la Placa Caribe fue migrando hacia el este durante el Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano. Durante estos eventos se formaron los márgenes actuales de esta cuenca (Parnaud et al., 1995).

El límite máximo de las aguas generó una línea de costa hasta las inmediaciones del Río Orinoco, la activa interacción de la placa Caribe y el borde meridional de Suramérica durante el Neógeno permitieron el desarrollo de un cinturón orogénico por la actual Serranía del Interior, la cual fue intensamente plegada y fallada por movimientos compresivos de norte a sur, indicados por largos pliegues, asimetría, fuertes volcamientos hacia el sur y numerosas fallas de corrimiento (Figura 5). El levantamiento de la Serranía del Interior estuvo caracterizado por una serie de movimientos espasmódicos. El reflejo de esta tectónica compresiva en el flanco norte de la cuenca son grandes corrimientos como el de Pirital.

La cuenca al iniciarse es asimétrica por ende acumuló su mayor volumen de sedimentos hacia el norte donde también se disponía su eje axial. El esquema generalizado de la sedimentación durante el Neógeno se ajusta bien a un modelo con ambientes predominantes continentales a salobres, fluvio deltaicos, con grandes extensiones pantanosas y recurrencia de cortas invasiones marinas que en el flanco sur se encuentran representadas por la secuencia Merecure – Oficina – Freites (González de Juana et al., 1980).

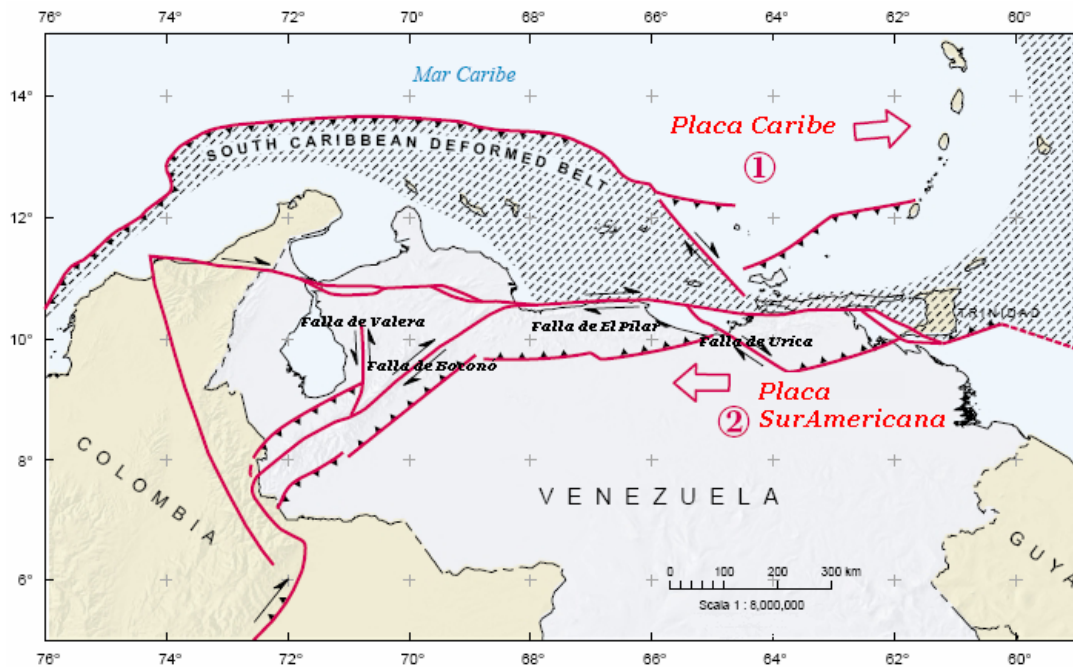


Figura 5. Desplazamiento de la Placa Caribe respecto a la Placa Suramericana (Mapa de Fallas Cuaternarias de Venezuela, por F. Audemard, (2000)).

Esta fase es la más importante para los sistemas petrolíferos de la cuenca Oriental de Venezuela puesto que las fallas inversas de bajo ángulo asociadas al sobre corrimiento causaron carga litosférica y la formación de la cuenca, resultando en el soterramiento de rocas madres de edad Cretácico e incluso más antiguas (Parnaud et al 1995; Summaa et al, 2003).

En el caso específico de la Faja Petrolífera del Orinoco; la roca yacimiento, las vías de migración, la roca sello y la trampa estructural también se desarrollaron durante esta fase. La sedimentación de las unidades Las Piedras y Mesa bajo ambientes marino somero y continental, que actualmente se observan en superficie y en el subsuelo y la actividad tectónica que ellos determinan, cierran la evolución geológica de la Cuenca Oriental de Venezuela (Figura 5), donde se observan los rasgos estructurales mayores y la continuidad de la sedimentación ocurrida durante su historia (PDVSA, 2010).

## 2.2 Rasgos Estructurales Regionales.

Parnaud et al. (1995) reconocen para la zona dos provincias tectónicas: una alóctona y otra autóctona. La primera, se extiende desde la falla de El Pilar (la mayor falla de tendencia este-oeste, dextral, que representa la superficie límite entre las placas sudamericana y Caribe) hasta el eje de la cuenca, considerando que el estilo estructural compresivo característico de esta provincia viene dado por:

- Estructuras al estilo cola de pescado detrás del frente de deformación, a lo largo del alto estructural de Pirital.

- Pliegues cilíndricos a nivel regional asociados con el frente de deformación N 60°-70° E, siendo principalmente anticlinales, como en el área de El Furrial. Dicha serie de pliegues principalmente es explicada por una secuencia piggyback.

- Fallas transcurrentes dextrales con dirección N 50°-60° O (fallas Urica, San Francisco y Los Bajos) que separan la Serranía del Interior en áreas de evolución estructural diacrónica (Figura 6).

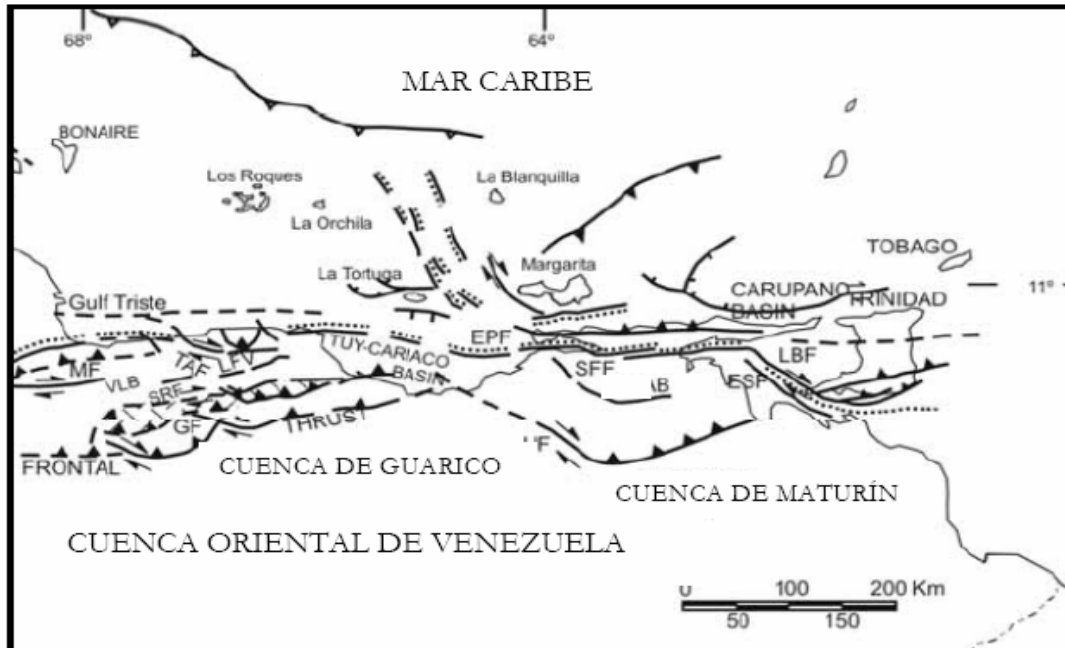


Figura 6. Principales estructuras de la Cuenca Oriental de Venezuela. UF: Falla de Urica, GF: Corrimiento de Guárico, EPF: Falla El Pilar y SPF: Falla San Francisco. Tomado de Yoris et al. (2004).

Dentro de las estructuras más importantes se tienen los Corrimientos Frontales de Anzoátegui y Monagas, Guárico, Anaco y Pirital, las Fallas de Urica y San Francisco, entre otros.

### 2.3 Subcuencas

Por razones operacionales y prácticas, la Cuenca Oriental ha sido subdividida desde el este al oeste en dos Subcuencas: Guárico y Maturín. El límite que separa la Subcuenca de Guárico de la Serranía del Interior hasta la Subcuenca de Maturín es el complejo de fallas de Urica (Di Croce, 1999) (Figura 7).



Figura 7. Rasgos estructurales de la Faja Petrolífera del Orinoco. Nótese como el sistema de fallas de Hato Viejo divide a la zona en dos provincias.

### 2.3.1 Subcuenca de Guárico.

Comprende el Estado Guárico y parte del norte del Estado Anzoátegui (Figura 7). El flanco norte de la Subcuenca posee un marco tectónico complejo a causa que se encuentra asociado al frente de deformación del sistema de fallas de Guárico, con rocas Cretácicas y Terciarias. Por lo contrario, hacia el sur las estructuras son más sencillas, donde las depresiones estructurales conservaron rocas del Paleozoico y Jurásico, con acuíferos de secuencias Cretácicas y Terciarias (Figura 8).

La roca madre se asocia a los Grupos Guayuta y Temblador, en que la principal acumulación de hidrocarburos es gasífera, aunque en descubrimientos recientes se tiene la generación de hidrocarburos parafínicos en las formaciones Roblecito y Oficina. Los sellos lutíticos se encuentran en las Formaciones Roblecito, Chaguaramas y Oficina. Las unidades Cretácicas y Terciarias se acúan gradualmente generando trampas estratigráficas (canales), que se combinan con trampas de tipo estructural (fallas extensionales) (Schlumberger, 1997).

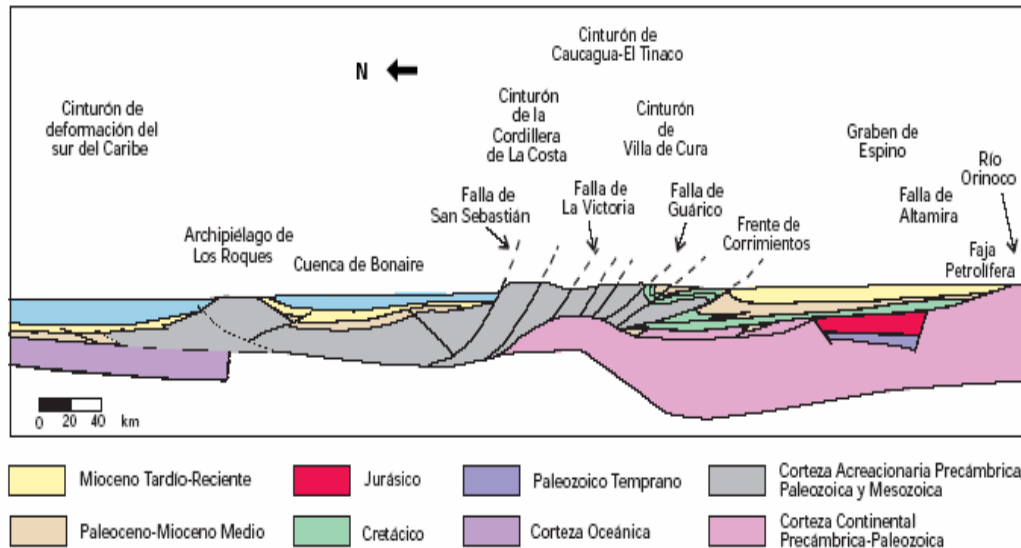


Figura 8. Corte Geológico conceptual norte-sur desde el cinturón de deformación del Caribe en Curazao hasta el Río Orinoco. El Sector de la Cuenca Oriental que muestra el corte pertenece a la Subcuenca de Guárico (Schlumberger, 1997).

### 2.3.2 Subcuenca de Maturín

La Subcuenca de Maturín constituye la principal área petrolífera de la Cuenca Oriental de Venezuela. Esta subcuenca es asimétrica y paralela a la Serranía del Interior, con el flanco sur apoyado en el basamento ígneo-metamórfico del Escudo de Guayana, caracterizado por un régimen extensivo y su flanco norte caracterizado por la presencia de estructuras compresivas asociadas a la colisión de la Placa del Caribe con la Placa Suramericana. En la subcuenca, desde el Eoceno hasta el Pleistoceno se produjo una traslación paralela del eje de máxima depositación de la subcuenca hacia el sur. Los elementos tectónicos, se presentan en efectos deformantes de intensidad decreciente a partir de la zona orogénica principal.

La configuración final de la subcuenca se alcanzó al final del Plioceno superior, cuando ocurrió un episodio de suaves levantamientos y de inclinación regional. Como la subcuenca estuvo en comunicaciones con el mar abierto, la mayor parte del tiempo, sólo a través del extremo este, característicamente los sedimentos son menos marinos hacia el oeste y el noreste. Los hiatus y discordancias, de igual manera, son más pronunciados a la misma dirección. El área ubicada frente al Corrimiento de Pirital constituye una zona estructuralmente compleja, presentando fallas inversas, corrimientos, formando bloques y/o anticlinales que afectan principalmente al Cretácico y al Terciario inferior (Figura 9) (Schlumberger, 1997).

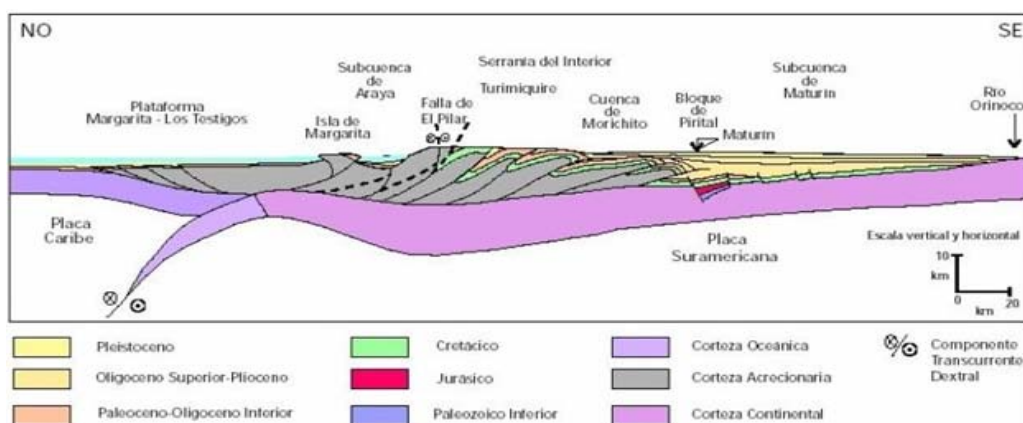


Figura 9. Corte Geológico noreste-sureste, flanco norte de la Subcuenca de Maturín (Schlumberger, 1997).

En la Serranía del Interior la roca madre principal se encuentra representada por el Grupo Guayuta, particularmente la Formación Querecual, la cual llega a tener más del doble de espesor que su equivalente en Venezuela occidental (Formación La Luna), con similares características de roca madre. Debido al espesor considerable de la secuencia Neógena en el flanco norte de la subcuenca, no se puede establecer con claridad cómo se produce el cambio lateral de las unidades cretácicas hacia el Grupo Temblador del sur (Figura 10); sin embargo, se estima que para los equivalentes laterales de Área Mayor de Oficina, el caso pudo haber sido muy semejante, con generación por una roca madre cercana. Para los campos del norte de Monagas, la roca madre por excelencia debe haber sido cretácica (Grupo Guayuta), aunque no se descarta el aporte de secuencias más jóvenes, con materia orgánica de afinidad continental (Schlumberger, 1997).

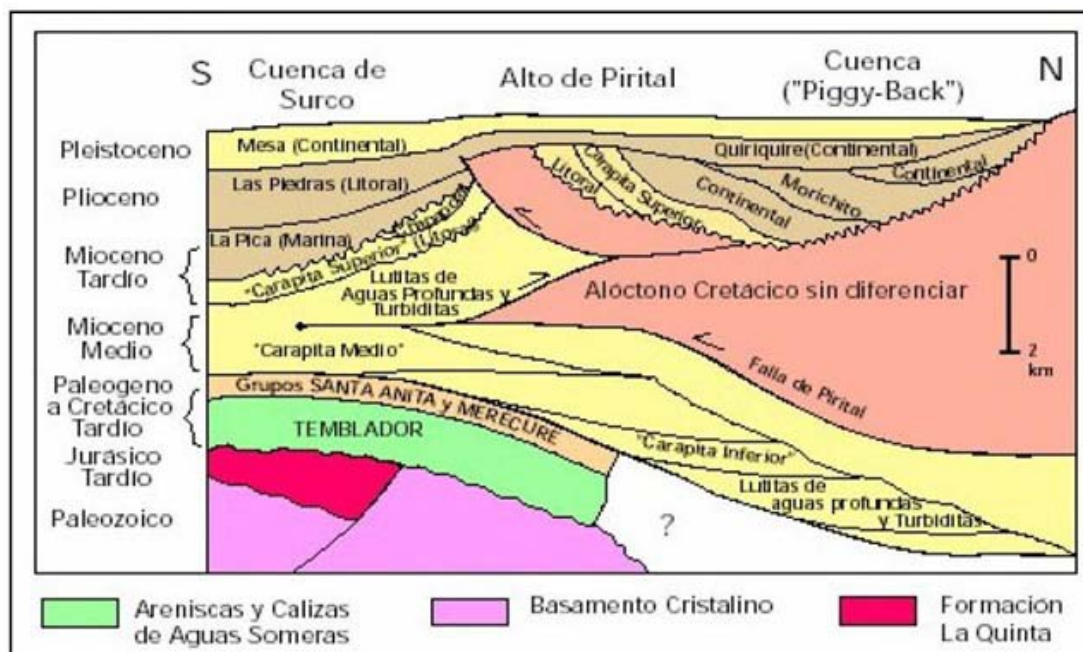


Figura 10. Sección estratigráfica sur-norte de la Subcuenca de Maturín (Roure, 1994).

Las tablas 1 y 2 muestran un resumen comparativo de los diferentes eventos tectónicos y formaciones depositadas en cada una de las megasecuencias con sus respectivas características propuestas por Parnaud y Talwani respectivamente en el

que describen secuencialmente dichos eventos de acuerdo al análisis de núcleos, líneas sísmicas entre otros.

Tabla 1. Resumen de Eventos tectónicos y Formaciones depositadas según Parnaud.

	Edad	Megasecuencia	Formación	Ambiente de Formación	Características
Parnaud	Paleozoico	Etapa de Prerift	Hato viejo y Carrizal	Nerítico- Costero	Las secuencias encontradas por pozos se componen principalmente areniscas de grano fino a grueso que son ligeramente calcáreas e intercaladas con conglomerados y esquistos verdes.
	Jurásico Tardío-Cretácico Temprano	Etapa de Rift	Fm La Quinta	Continental	Basaltos de capas rojas depositadas en el graben de espino
					-
	Cretaceo-Paleoceno	Margen Pasivo	Fm Barranquin (máx. 1º Transgresión) Fm Querecual, San Antonio, el Cantil (Flanco Sur), Tigre, San Juan, Merecure (ultima Transgresión)	Ambientes marinos hacia el norte y continentales hacia el Sur	se caracteriza por tres fases principales transgresoras que se desarrollaron de norte a sur y culminó durante Turroniense (depositada Fm Tigre), Paleoceno-Eoceno temprano, y el Oligoceno, respectivamente
Máxima cobertura marina, ambientes marino-costeros (sur). Fm Querecual y San Antonio: rocas clásticas marinas generadora de Hidrocarburos.					
Oligoceno -Mioceno Temprano	Colisión Oblicua	Fm Carapita, la Pica, las Piedras, Naricual, Morichito Oficina y Freites	Marino batial.	La colisión oblicua emigró progresivamente hacia el este durante el Oligoceno tardío al Mioceno temprano, se dividió la cuenca antepaís en tres zonas (1) un área del sur (de Cerro Negro a Oritupano) que corresponde a la zona de la plataforma, (2) una zona central (de Acema-Casma a Pirital) correspondiente al foredeep, y (3) un área norte (al norte de la falla de Pirital) correspondiente a la zona de cabalgamiento.	

Tabla 2. Resumen de Eventos tectónicos y Formaciones depositadas según Talwani.

	Edad	Megasecuencia	Formacion	Ambiente de Formacion	Características
Mani Talwani		Etapa de Prerift Y Rift	Hato viejo y Carrizal	Costero a marino neritico	Areniscas (Hato viejo), y Lutitas(Carrizal) encontradas en la Cuenca de Guárico
	Triásico Tardío- Jurásico Temprano,	Etapa de Rift	Fm Ipire	Fluvial y Lacustre	Basaltos de capas rojas depositadas en el graben de espino, tiene lugar la mayor actividad tectónica
	Jurásico Tardío-Eoceno	Margen Pasivo	Fm Barranquin, Fm. El Cantil, San Antonio y Querecual. Fm. San Juan Vidono, Tigre (max transgresión),	Ambientes marinos hacia el norte y continentales hacia el Sur	1° fase transgresiva durante el <i>Barremian</i> (Fm Baranquin) 2° en el <i>Mastrichtian</i> -Eoceno Temprano ultima transgresión en el Oligoceno (Fm San Juan)
	Oligoceno-Mioceno Medio (en el Este)	Strike-slip and Compression / Traspresion	Fm Roblecito (máx. transgresión), Chaguaramas, Oficina, Freites, Merecure y Carapita.	Continental al sur inner self enviroment to the north	Caracterizado por una colisión oblicua de la placa caribe con la Suramericana en un ambiente tectónico compresional/transpresional que desarrolla una cuenca antepaís Las formaciones Freites y Oficinas fueron depositadas durante el Oligoceno- Mioceno, la secuencia Carapita fue depositada en el foredeep al norte.

## 2.4 Geología Local

### 2.4.1 Morfología y Composición.

Las cuatro quintas partes de los hidrocarburos de La Faja saturan las arenas bien desarrolladas que fueron depositadas en los deltas de los caudalosos ríos, que drenaban el escudo guayanés hace treinta millones de años. La sección productora es el Miembro Morichal de la Formación Oficina, de edad Mioceno temprano a medio. Las arenas se van montando sobre la penillanura cámbrica, de manera que tienen una alineación general este-oeste, interrumpida en el área principal de producción Machete por el prominente arco de El Baúl, que se desplaza del noroeste hacia el sureste.

En las áreas de producción Bloque Ayacucho y Junin es notable la segregación de petróleo crudo extrapesado y de bitumen natural en la dirección sur, contra el borde del escudo. La proporción de bitumen natural a petróleo crudo es más alta en el área de producción Bloque Carabobo, mientras que por causa de una génesis distinta, en el área de producción Boyaca la viscosidad dinámica aumenta, existen algunos bolsones de gas natural y algunas saturaciones de petróleo crudo de peso específico medio. La relación petróleo crudo/gas natural es muy baja (PDVSA, 2010).

La figura 11 muestra de manera general las formaciones presentes en cada uno de los bloques que conforman la Faja Petrolífera del Orinoco.

### 2.4.2 Estratigrafía Local

La columna estratigráfica comienza, de más viejo a más joven, con un complejo ígneo-metamórfico de edad Precámbrico que constituye el basamento, le sigue en contacto discordante el grupo Temblador de edad Cretácica; luego en contacto discordante la Formación Oficina de edad Mioceno Inferior a Medio con sus cuatro miembros; Morichal, Yabo, Jobo y Pilón; sigue la formación Freites de edad Mioceno Superior y por último las formaciones las Piedras-Mesa, correspondiente al Plioceno-

Pleistoceno dicho sector no se diferencia en la faja (PDVSA, 1983), la estratigrafía de la zona de estudio se describe a continuación:

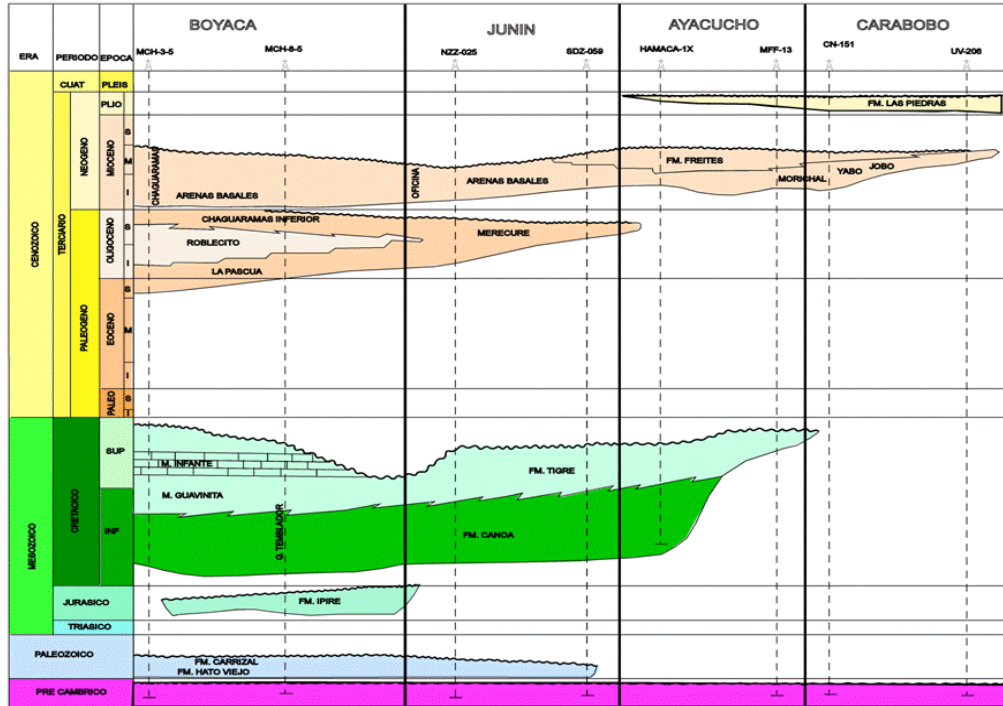


Figura 11. Columna Estratigráfica de la Faja Petrolífera del Orinoco incluyendo el área de Carabobo

-Basamento: formado por granitos, gneises, anfibolitas y esquistos. En la zona de Uverito se ha comprobado un alto en el basamento, el cual marca una diferencia de sedimentación al Este y Oeste del mismo, al este del sector Uverito, la arena de la formación Oficina prácticamente desaparecen y el grupo temblador presenta buenos desarrollos de arena.

-Grupo Temblador: de edad cretácica, está restringida a la parte Noroeste del área, en algunos pozos del Bloque Carabobo, se puede diferenciar el Cretácico en los registros eléctricos, por el cambio brusco de las arenas masivas basales de la formación Oficina en contacto discordante con las arenas arcillosas lenticulares del Grupo Temblador. Las edades calculadas con base a la bioestratigrafía son Aptiense–Coniaciense. En registros de pozo se puede apreciar el incremento relativo de la

radioactividad existente entre las rocas Cretácicas (más radioactivas) y las arenas masivas fluviales ubicadas en la base del Miembro Morichal de la Formación Oficina (PDVSA, 2010).

-Formación Oficina:

a) Miembro Morichal: contiene arenas basales de la Fm. Oficina, son arenas masivas la cual almacenan el mayor potencial petrolífero, generalmente son arenas cuarzosas, de color marrón, de grano medio, escogimientos pobres y depositados en un ambiente fluvio-deltaico donde las facies predominantes se asocian a deltas dominados por procesos de marea. Los desarrollos de arenas varían, en el sector oeste donde se profundiza la cuenca, los desarrollos de arenas son escasos, generalmente lenticulares Hacia el este del área Carabobo, el espesor del miembro Morichal se va reduciendo hasta desaparecer al acuñarse contra el alto de Uverito. El contacto inferior es discordante con el basamento ígneo metamórfico al sur y con el cretácico al norte y concordante en su tope con el Miembro Yabo de la misma Formación. Dentro de este miembro se encuentra las unidades de morichal inferior en contacto discordante con basamento caracterizada por arenas transgresivas de canales distributarios intercaladas con abanicos de rotura, morichal medio caracterizada por arenas de canales controlados por mareas y barras y morichal superior caracterizada por arenas fluvio deltaicas transgresivas.

b) Miembro Yabo: es una sección lutítica que separa los miembros morichal y Jobo, Transgresiva de color gris verdosa, con intercalaciones de areniscas de grano fino, calcáreo y fosilífero. No se puede identificar hacia el Sur y al Este desaparece al acuñarse contra el Alto de Uverito. Pero hacia el sur su correlación es dudosa, pues pierde en parte su carácter lutítico y aumenta su carácter arenoso, donde en ocasiones la arena asociada a dicho Miembro presenta saturación de petróleo. El contacto inferior y superior de este miembro es concordante con las arenas del Miembro

Morichal y con la secuencia de arenas y lutitas carbonosas del Miembro Jobo respectivamente.

c) Miembro Jobo: Está representada por una alternancia de arenas, lutitas y limonitas que se hacen más arenoso hacia el tope mostrando buenas saturaciones de petróleo. Este Miembro es el segundo en importancia petrolífera dentro de la Formación Oficina después del Miembro Morichal. Se debe mencionar que los pozos probados en este intervalo han dado producción que va desde un mínimo de 22 BPPD hasta un máximo de 222 BPPD. Los contactos de este Miembro con sus análogos superior e inferior son transicionales.

d) Miembro Pílon representa la parte superior de la formación Oficina, caracterizado en los campos del Norte por una sección arcillosa transgresiva con escasos lentes arenosos es difícil correlacionarlo hacia el Sur donde cambia a una facie arenácea, que contienen petróleo y hacia el Sur del sector de Mamo se confunden con las arenas basales de la Fm Freites, dicha unidad incrementa su carácter arenoso mostrando en ocasiones espesores de 140' de ANP. Ambos contactos, el superior y el inferior, son transicionales. Consiste de una secuencia principalmente arcillosa con intercalaciones de arenas depositadas en un ambiente distal.

#### -Formación Freites

De contacto concordante entre la Fm Oficina y Freites de edad Mioceno superior se distingue fácilmente en el sector Norte-Central de Carabobo, pero a medida que avanza hacia el sur, las arenas basales de la Formación Freites se confunden con las arenas superiores de la Formación Oficina esto es debido a que el Miembro Pílon, que representa el tope de Oficina, y la Formación Freites, son lutíticos y su contacto es concordante, por tal se hace necesario el apoyo de otros métodos como la bioestratigrafía

### -Formación Las Piedras y Mesa (Plioceno-Pleistoceno)

Por lo difícil de su diferenciación se ha tomado dichas formaciones como una unidad única, la litología es homogénea consistiendo principalmente en gruesos paquetes de arena de grano grueso y gravas con cemento ferruginoso, en menores cantidades limolitas carbonosas y lutitas. No contienen hidrocarburos pero su importancia radica en la presencia de importantes y cuantiosas reservas de agua dulce (acuíferos) almacenados dentro de los intervalos conglomeráticos y arenosos que conforman la roca (PDVSA, 2010).

El intervalo de este estudio corresponde a la Formación Oficina que abarca los límites entre el miembro Pílon y el Basamento, como se observa en la figura 12 el miembro Pílon está caracterizado por dos fases transgresivas predominantemente lutítico, el miembro Jobo esta subdividido en dos unidades productoras cuyas fases regresivas están caracterizadas por la depositación de arenas grano decrecientes hacia el tope, que yacen discordantemente sobre el miembro Yabo predominantemente lutítico cuyas edades corresponden a Mioceno Medio, el miembro Morichal de edad Mioceno Temprano a Medio esta subdivido en tres submiembros, Morichal Superior dividido en 3 unidades productoras y Morichal Medio fueron depositados dentro de una secuencia transgresiva en el que predomina una alternancia de Arenas y Lutitas aumentando la depositación de arenas en el submiembro Morichal Medio que está dividida a su vez en 4 unidades productoras En el límite entre Morichal Medio e Inferior corresponde a una superficie de máxima regresión que marca el cambio de una fase transgresiva a regresiva, dicho submiembro esta subdividida igualmente en 3 unidades productoras en el que predominan arenas grano decreciente hacia el tope.

COLUMNA LITOESTRATIGRÁFICA

NX  
POZO TIPO

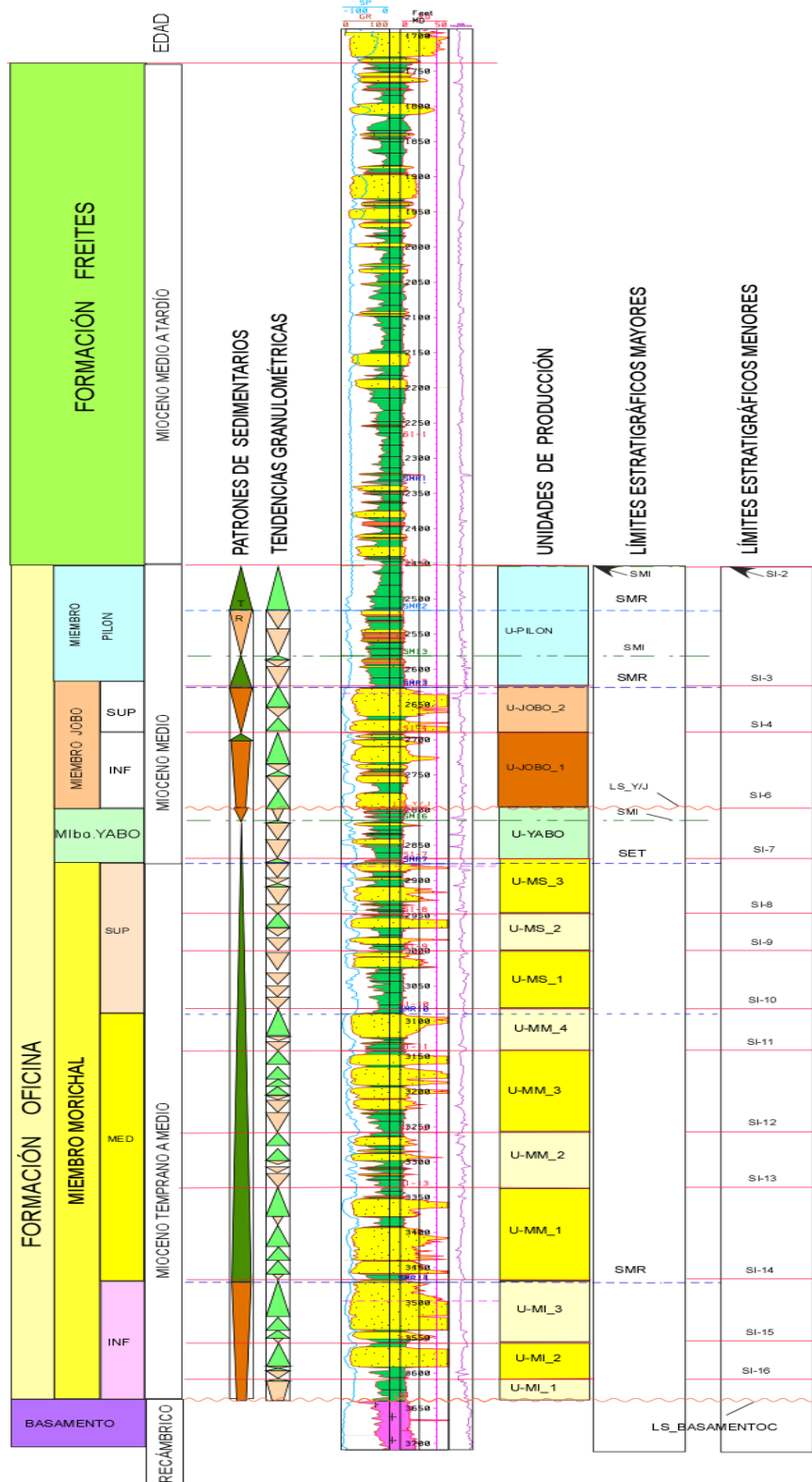


Figura 12. Columna Tipo Bloque Carabobo Pozo NX.

## CAPITULO III

### MARCO TEORICO

#### 3.1 Métodos Sísmicos

El método sísmico se caracteriza por la producción de sismos artificiales mediante el uso de fuentes controladas y de equipos receptores capaces de almacenar y transmitir la información, con el objetivo de generar frentes de ondas elásticas que se transmitirán en el subsuelo, estos receptores deben registrar bien toda la traza, el tiempo de ida y vuelta de la energía sísmica calculado para cubrir los objetivos de interés (Knödel K et al, 2007). Se graban entonces las amplitudes y tiempos de llegada de las ondas reflejadas en las diversas interfaces geológicas del subsuelo presentes en las señales acústicas donde estas dependen de las propiedades físicas de las rocas (litología, porosidad, fluidos, compactación, entre otros) y de su composición en el subsuelo (estructura), por lo que permite obtener una imagen del subsuelo, lo cual puede ser analizado mediante la aplicación de los principios geomorfología y estratigrafía sísmica para obtener predicciones litológicas, con el fin de determinar sus rasgos geomorfológicos (trampas estructurales, estratigráficas, entre otros), que son de interés en la explotación de hidrocarburos (Cheloti L et al, 2009).

La adquisición de sísmica 3D fue un concepto ideado en los Estados Unidos por G. Walton en 1972 y aplicado por E. Tegland y otros desde 1976. Su empleo se hizo rutinario en los países desarrollados desde fines de la década de 1980. En esta adquisición se registra un volumen de información, muestreada en un fino mallado rectangular (mayoría de la veces cuadrado) de pocas decenas de metros de lado, las líneas receptoras son casi siempre perfectamente rectas y se diagraman ortogonalmente a la estructura geológica principal del área, a las líneas receptoras se les denomina *inline* (IL) y a las líneas de tiro *crosslines* (XL). Debido a su alta

resolución los datos sísmicos 3D juegan un papel vital en la exploración de hidrocarburos y en la mitigación de riesgos asociados con la presencia de facies de yacimiento (De Lisa, 2012).

### 3.1.1 Sísmica de Reflexión

Cuando una onda sísmica incide en una discontinuidad que separa dos medios, una fracción de la energía incidente se propaga al segundo medio y el resto se refleja de vuelta al primer medio. La cantidad de energía que se transmite y se refleja depende del contraste de impedancia acústica entre ambos medios y del ángulo de incidencia. Si el ángulo de incidencia es mínimo (incidencia perpendicular a la discontinuidad horizontal) la mayor parte de la energía incidente retorna al primer medio. Este comportamiento es el fundamento de los métodos de sísmica de reflexión (Figura 13) (Knödel K et al, 2007).

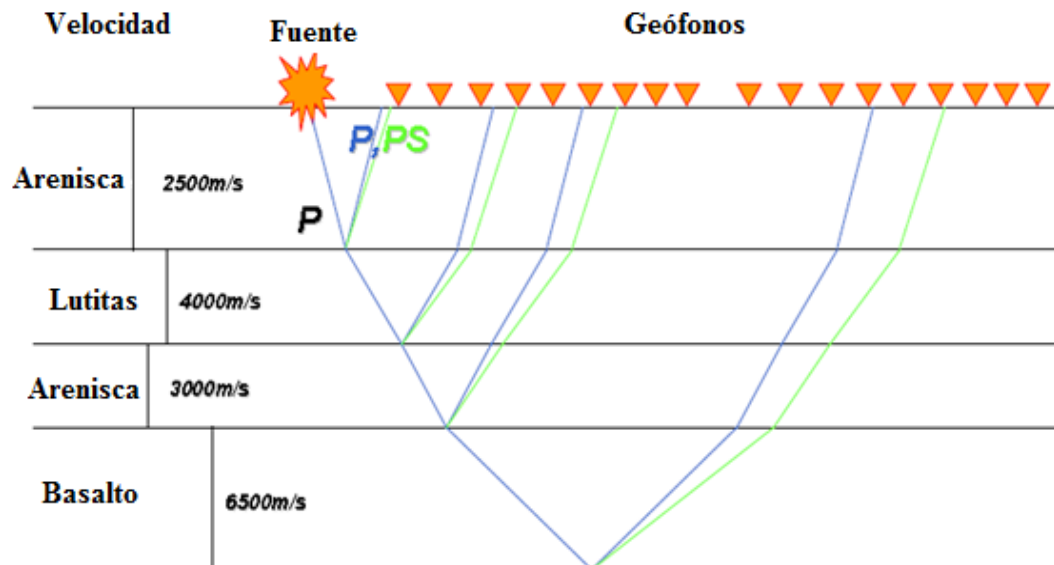


Figura 13. Diagrama simplificado de los rayos reflejados en un medio estratificado (BeicipFranlap, 2009).

La velocidad de las ondas sísmicas es el parámetro fundamental en los métodos sísmicos ésta depende de las propiedades elásticas, así como densidades aparentes de

los medios y varía con el contenido mineral, litología, la porosidad, la saturación de fluidos en los poros y el grado de compactación. Las ondas P tienen principalmente una velocidad más alta que las ondas S, éstas no se propagan en los fluidos porque no soportan el esfuerzo de cizalla. Durante su propagación en el subsuelo las ondas sísmicas se reflejan, refractan o difractan cuando se producen contrastes elásticos en los límites entre las capas y masas de roca de diferentes propiedades de las rocas o en obstáculos artificiales (Figura 14) (Knödel, 2007).

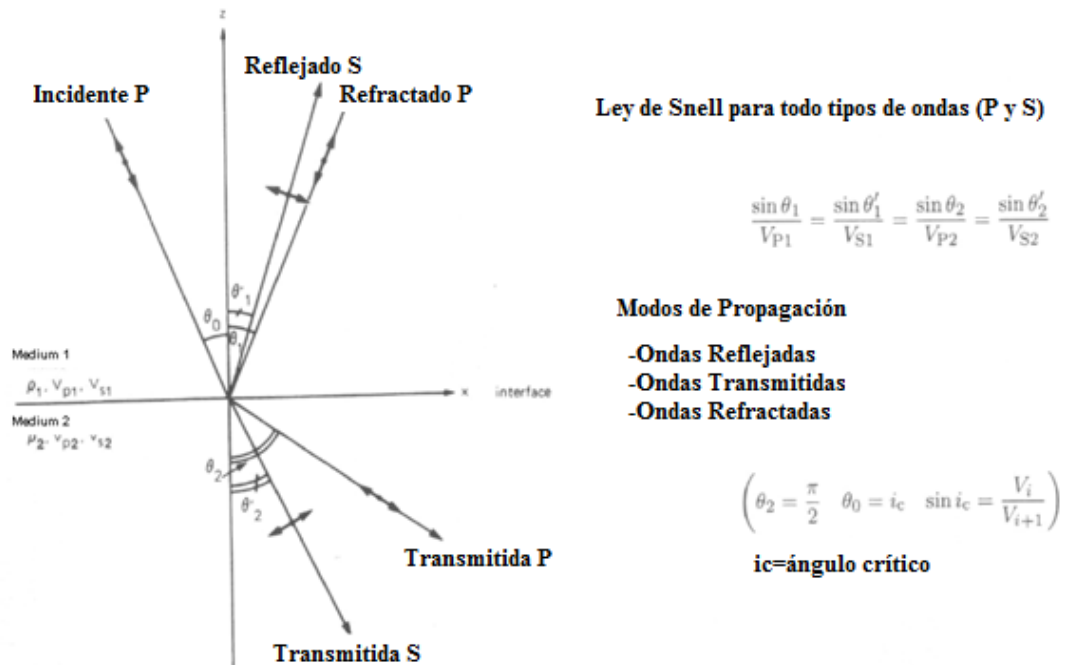


Figura 14. Comportamiento del Rayo incidente en un medio (BeiciFranlap, 2009).

### 3.1.2 Impedancia Acústica

La impedancia acústica de una capa se define por su velocidad sísmica multiplicada por la densidad aparente. Basado en el contraste de impedancias acústicas en un límite sísmico, coeficientes de reflexión y transmisión pueden ser calculadas. Estos valores definen la parte de energía que es reflejada o transmitida. Un coeficiente de reflexión de valor 1 (teóricamente) significa que toda la energía sísmica incidente es reflejada (Sheriff, 2007).

### 3.1.3 Serie de Reflectividad

Es una secuencia de coeficientes de reflexión ( $R_i$ ) ordenados en profundidad, dichos términos dependen de la densidad y la velocidad compresional ( $V_{pi}$ ) para cada interface a una determinada profundidad, se asume que la incidencia es normal y que los dos estratos son horizontes planos de una composición homogénea e isotrópica. A incidencia no normal, el coeficiente de reflexión depende de otros parámetros, como las velocidades de onda S y es función del ángulo de incidencia en las ecuaciones de Zoeppritz. En este caso el coeficiente de reflexión en el límite entre dos capas t y t+1, considerando que la capa t suprayace a la capa t+1 (ecuación 3.1) (Hardage, 1983).

$$R = \frac{\rho_{t+1}V_{t+1} - \rho_t V_t}{\rho_{t+1}V_{t+1} + \rho_t V_t} = \frac{Z_{t+1} - Z_t}{Z_{t+1} + Z_t}$$

Ecuación 3.1

Dónde:

R=coeficiente de Reflectividad

$\rho$ = densidad

V=Velocidad de onda p

Z=Impedancia acústica

### 3.1.4 Modelo Convolutional

Modelo unidimensional en el que una traza sísmica  $f(t)$  puede ser representado por la convolución de una ondícula equivalente  $w(t)$  con una función de Reflectividad  $r(t)$  más el ruido aleatorio  $n(t)$  (ecuación 3.2).

$$f(t) = w(t) * r(t) + n(t)$$

Ecuación 3.2

Este modelo es una consecuencia de la idea de que cada onda reflejada causa su propio efecto en cada geófono o hidrófono independientemente de que otras ondas están afectando al geófono y que la respuesta de éste es simplemente la suma lineal de los efectos de todas las ondas. El modelo puede ser modificado para considerar

efectos de propagación como la absorción (Figura 15). El modelo convolucional está implícito en el procesamiento sísmico e interpretación (Sheriff, 2007).

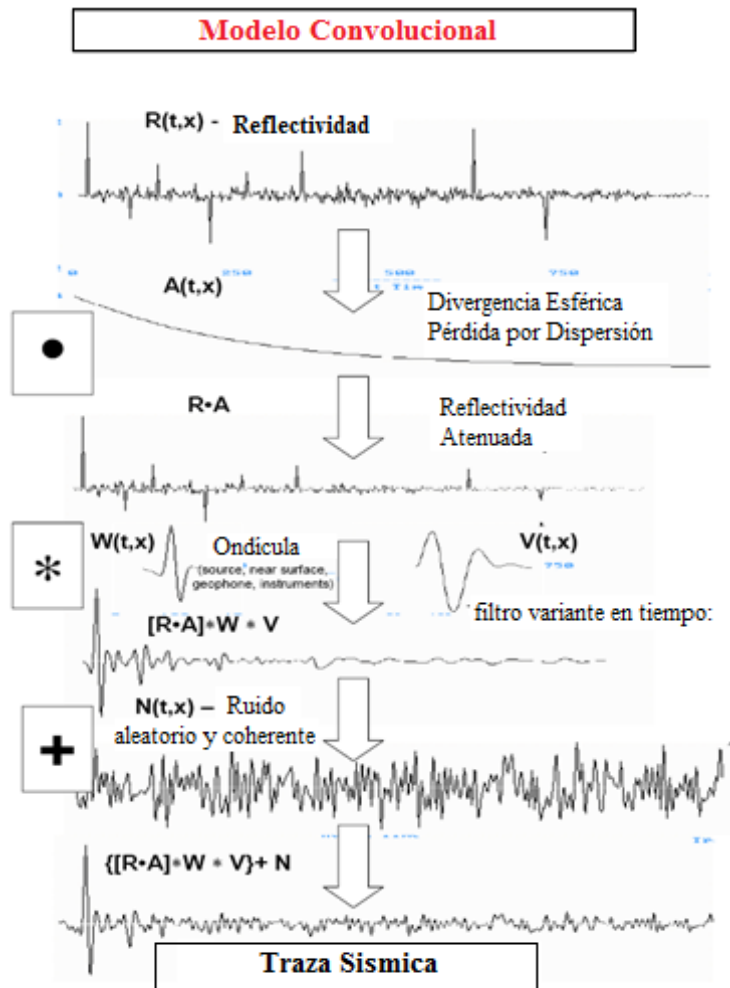


Figura 15. Modelo Convolucional (modificado de Sheriff, 2007).

### 3.1.5 Profundidad y Resolución Sísmica

Es la mínima separación vertical que puede ser resuelto en un estudio sísmico, expresado ya sea en términos de tiempo o de distancia, es decir el menor espesor para el cual el tiempo de tránsito de la onda ( $\Delta t$ ) proporciona información acerca de los espesores de los estratos del subsuelo. La resolución se determina por la longitud de onda  $\lambda$  de la señal sísmica y la velocidad interválica (Sherif, 2007).

Longitudes de onda cortas (frecuencias altas) proporcionan una mejor resolución que las largas. La longitud de onda es directamente proporcional a la velocidad de la onda  $V$  en el material correspondiente e inversamente proporcional a la frecuencia dominante ( $f$ ) de la señal sísmica  $\lambda = v / f$ . De acuerdo al criterio de Rayleigh la resolución vertical de una sísmica adquirida es aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de la longitud de la ondulación sísmica (sheriff, 2007). Como la sísmica es grabada a tiempo doble, lo que se observa de una capa en los datos sísmicos es el doble de su espesor en tiempo real (Espeso, 2008).

### 3.1.6 Sísmica de Pozo

Los métodos sísmicos de pozos utilizan ondas elásticas generadas y registradas a distintas profundidades en un pozo por medio de fuentes o detectores sujetadas a la pared del pozo. Se llevan a cabo tanto únicamente para investigar el subsuelo en las proximidades de un pozo como método complementario a los estudios de reflexión sísmica. Para determinar las velocidades de capa, los tiempos de tránsito de ondas P y/o S se registran entre dos puntos en relación con las mediciones de la densidad. Esto permite, por ejemplo, la determinación de los módulos elásticos. La instalación de puntos de disparo y detectores cerca de las unidades geológicas de interés permite la investigación de estructuras complicadas con significativamente mayor resolución y puede proporcionar mayor detalle estructural/litológica. Además, la observación de las ondas elásticas a profundidades determinadas, en un pozo de sondeo permite la determinación de velocidades sísmicas (Galperin, 1985; Hunter Et Al., 1998; Wong, 2000).

#### -Tiros de Verificación (Checkshots).

Es la medición directa del tiempo de tránsito entre la superficie y una profundidad. Por lo general, las fuentes en la superficie se registran por un geófono para determinar las relaciones de tiempo-profundidad en la localización del pozo (Sheriff,

2009). Y así realizar la calibración sísmica pertinente para su posterior interpretación (Figura 16).

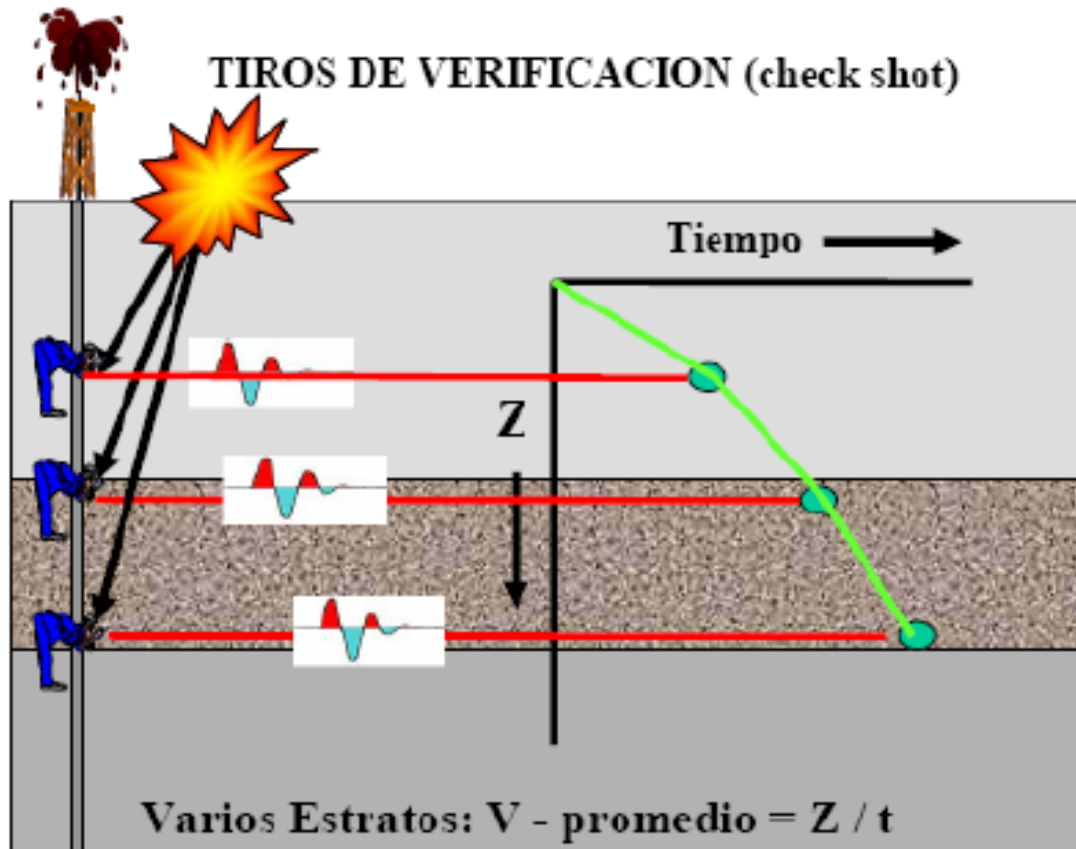


Figura 16. Representación esquemática de los tiros de verificación (Reguerio, 2007).

### 3.1.7 Velocidades Sísmicas

Es una propiedad del medio, se refiere a la tasa de propagación de una onda sísmica en cualquier dirección la velocidad es calculada dividiendo las distancias de separación entre la diferencia del tiempo de tránsito del pulso acústico grabado por cada reflector (Sheriff 2007). Hay diferentes tipos de velocidades de acuerdo a cómo se mida dicha propiedad, dentro de esta tenemos:

-Velocidad Instantánea: la rapidez dada en cualquier punto de un frente de onda en la dirección de propagación (perpendicular al frente de onda) este término es usado para la velocidad determinada de los registros acústicos.

-Velocidad Promedio: es el promedio de velocidades intervállica medidas desde la superficie hasta un punto particular, tiene sentido solo con una dirección, una trayectoria vertical siempre está implícita. Si la sección se compone de capas horizontales paralelas de velocidad  $V_i$  y espesor  $Z_i$  con tiempos de tránsitos para cada capa  $t_i=Z_i/V_i$  (ecuación 3.3) (Sheriff, 2007)

$$V = \frac{\sum_i Z_i}{\sum_i \frac{Z_i}{V_i}} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

### 3.1.8 Atributos sísmicos

Es cualquier medida de datos sísmicos que puede ayudar a mejorar, cuantificar visualmente caracteres o formas de interés interpretativo. Un buen atributo sísmico es sensible a características geológicas y propiedades del yacimiento de interés, o puede permitir definir el ambiente depositacional o estructural y así poder inferir sobre algunas propiedades o estructuras de interés, permite interpretar fallas, canales, reconocer ambientes de depositación y la historia de deformación de las estructuras de forma rápida. Es cualquier combinación lineal que se pueda realizar con los datos sísmicos. La metodología es válida para datos prestack y poststack. El atributo fundamental es la amplitud (desplegada en función del tiempo de ida y vuelta), que es lo que muestra una visualización sísmica convencional (2D ó 3D).

Los atributos derivados del tiempo ayudan a discernir talles estructurales, los atributos de amplitud están entre los más útiles, los atributos de frecuencia podrían revelar detalles en la estratificación. Los atributos de amplitud muestran las variaciones de intensidad sobre un mismo nivel guía (horizonte), que reflejan detalladamente la variación de los contrastes de impedancia acústica a lo ancho del área prospectada y proporcionan información estratigráfica y estructural. La interpretación en términos geológicos permite definir el patrón de fallas, la litología, los fluidos (Chopra y Marfurt, 2007).

## 3.2 Tectónica

Estudia las deformaciones de los materiales terrestres y estructuras geológicas producidas por deformación de la corteza terrestre, que las rocas adquieren después de haberse formado, así como los procesos que las originan, a todas las escalas de observación, desde la escala cortical (tectónica de placas) a escala microscópica (microtectónica).

### 3.2.1 Esfuerzos

La acción y reacción mutua interna que experimenta los cuerpos sometidos a la acción de una o varias fuerzas, es decir, es la cantidad de fuerza que actúa sobre una unidad de roca para causar deformación. El esfuerzo puede actuar de manera uniforme en la unidad de roca, es decir, en todas las direcciones. Este tipo de esfuerzo es debido a la presión litostática. Por otra parte, se tienen los esfuerzos que se aplican de manera no uniforme, es decir, en direcciones diferentes, generando los esfuerzos diferenciales. Estos pueden ser esfuerzos compresivos, tensionales y de cizalla (figura 17) (Soriano, 2012).

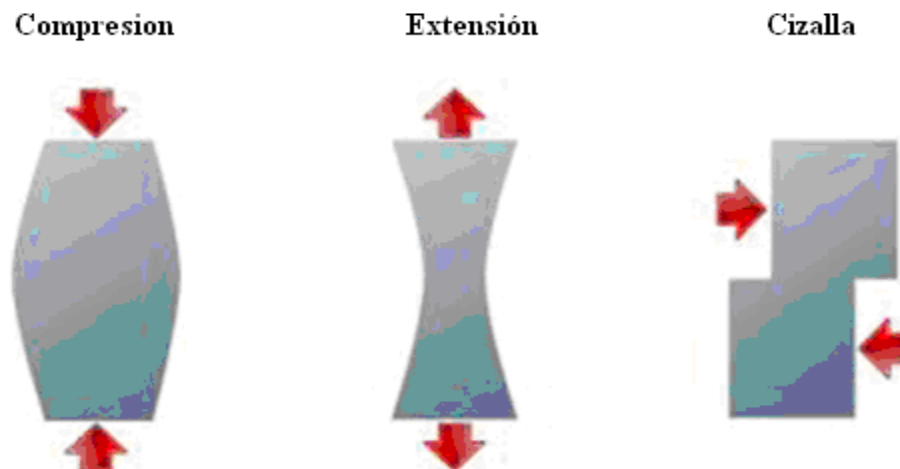


Figura 17. Esfuerzos Compresivos, Extensivos y de Cizalla (*shear*) (Soriano, 2012).

### 3.2.2. Estructuras asociadas a Esfuerzos.

De acuerdo a la magnitud y dirección de la tensión interna que pueda experimentar los cuerpos se pueden generar diversos estilos estructurales y combinaciones de acuerdo al comportamiento dúctil de la materia y de cómo dichos esfuerzos puedan interactuar con el medio, los esfuerzos pueden ser de extensión, compresión, cizalla y combinaciones de estos como ocurre en la Faja Petrolífera del Orinoco cuyo ambiente de esfuerzo es transformante (*strike slip*) y fallas normales formando estructuras tipo *echelon*.

#### -Fallas

Representan la rotura de una roca o de un material geológico en general, según una superficie más o menos plana, a lo largo de la cual hay evidencias de que se ha producido un desplazamiento relativo entre las masas rocosas que la flanquean.

#### -Falla Normal

Son aquellas en que el plano de falla buza hacia el labio hundido, corresponden a una situación de extensión, en que el esfuerzo máximo está en la vertical, y el mínimo en la horizontal, según la dirección de extensión. Se denominan también fallas de gravedad. El caso particular de fallas normales con plano curvo se conoce como fallas lítricas, en las que el buzamiento del plano de falla es mayor próximo a su afloramiento en superficie, y se atenúa en profundidad. Si dentro de un bloque elevado está limitado por dos fallas normales de buzamiento contrario hay presencia de un horst o meseta tectónica. Un bloque hundido limitado por dos fallas normales buzando la una hacia la otra es un graben (Figura 18) (Soriano, 2012).

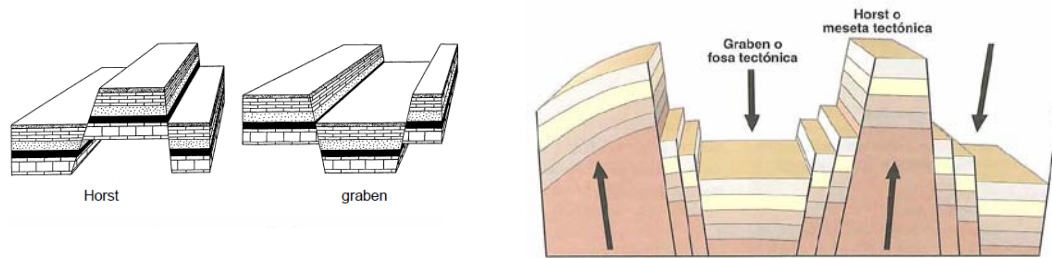


Figura 18. Estructuras asociadas a combinaciones de fallas normales, graben y horst (Soriano, 2012).

#### -Falla Inversa

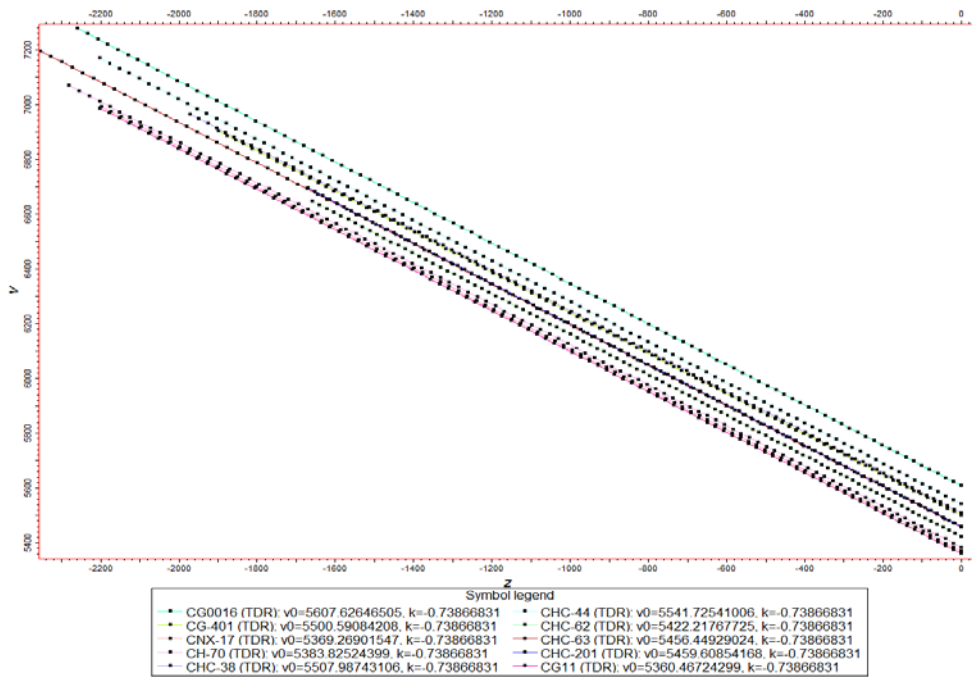
Aquellas en las que el plano de falla buza hacia el labio levantado, Corresponden a una situación de compresión, en que el esfuerzo máximo está en la horizontal según la dirección de compresión, y el mínimo en la vertical, correspondiendo ésta a la dirección de extensión. Un caso especial son los cabalgamientos (trust fault), en que el plano de falla está horizontalizado, con dislocaciones y desplazamientos de gran extensión (Soriano, 2012).

#### -Falla Transcurrentes

Las fallas rumbo deslizantes o transformantes es un modo común de deformación tanto en la corteza continental como en la oceánica, y se produce en un amplio rango de escalas. Son zonas de desgarre relativamente estrechas y subverticales largo de la cual dos bloques adyacentes se mueven de lado, en posición horizontal, paralelo al rumbo de la zona de falla, el desplazamiento horizontal puede ser dextral (sentido horario), o sinistral (sentido antihorario). Clásicamente se acepta que el fallamiento de deslizamiento se produce en un campo de esfuerzos triaxial en la que la tensiones principales máxima y mínima  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  yaían en el plano horizontal y el intermedio  $\sigma_2$  esfuerzo principal es vertical (Woodcock et al 1986).

### 3.2.3 Sistema de Fallas Rumbo Deslizante

Se originan en límites de placas continentales, oceánicas e intracontinentales como respuesta a una colisión entre placas y se pueden originar zonas de transferencias de fallas normales conectadas en sistemas de rift y fallas normales en zonas de plegamientos. Son comunes en ambientes de subducción oblicua convergentes donde la deformación interplacas está dividida en intraarco, antearco y retroarco. (Cunningham D *et al*, 2007) Estas fallas generalmente están segmentadas, pueden formar estructuras tipo *echelon*, cuencas *pull apart* entre otros, en el que hay presencia de fracturas de cizalla con el fin de acomodar el desplazamiento de los bloques. Esta deformación local puede llevar a la formación de segmentos de fallas cortas que conectan segmentos adyacentes de falla *en echelon* y dan lugar a una zona de falla de transición. La geometría de estos saltos de fallas y la conexión de estas a su vez, controlan la deformación extensional o contraccional de acuerdo con el sentido de deslizamiento y la dirección del movimiento (Woodcock et al 1986).



De

acuerdo al sentido de movimiento se tendrán zonas de extensión formando fallas

normales, oblicuas o inversas de acuerdo al sistema de esfuerzo actuante en la zona, dichos saltos pueden generar zonas en apertura o en cierre. Las zonas en apertura y en cierre pueden dar lugar respectivamente a depresiones (*pull-aparts*) susceptibles de ser rellenadas por materiales sedimentarios o a alzamientos por compresión (*pop-ups*, *push-ups*). La geometría de estas fallas dependerá de la composición de la roca, esta puede ser recta o curvarse, dicha curvatura se origina por la anisotropía de los materiales geológicos. Las inhomogeneidades causadas por el paso de un ambiente geológico a otro (litología, estructuras previas) a escala local o regional induce variaciones direccionales en el vector de propagación de una falla, en otras palabras, una falla o zona de falla no puede mantener una continuidad en el rumbo debido a los cambios físicos que se encuentra en la zona (Figura 19).

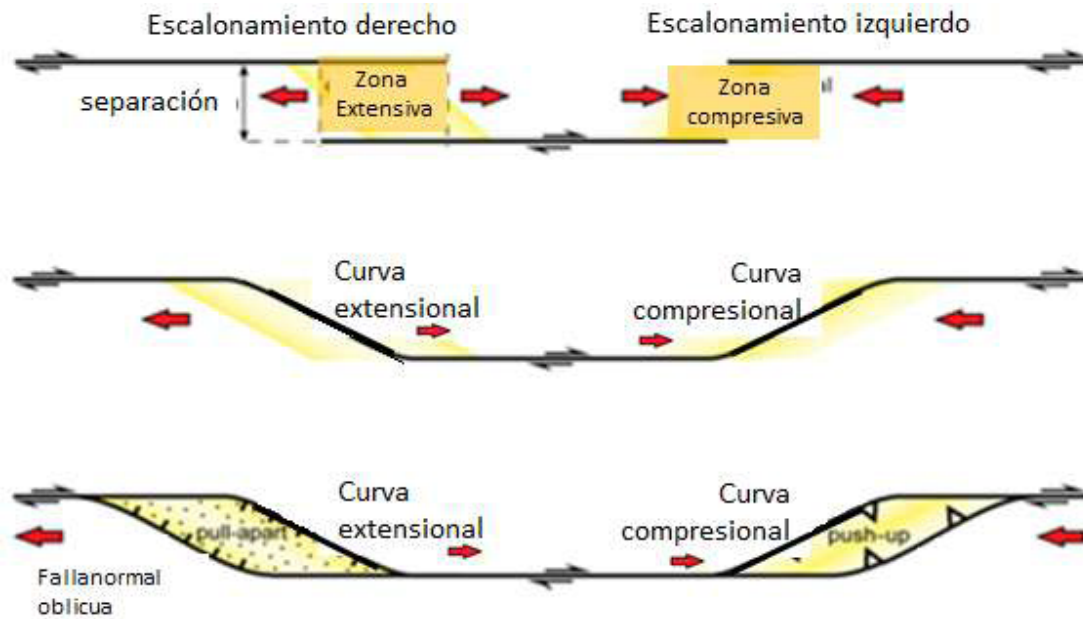


Figura 19. Terminología de zonas de extensión y contracción a lo largo de un sistema de fallas de transcurrentes.

### 3.3 Modelado Estructural

La comprensión de la organización espacial de las estructuras del subsuelo es esencial para la modelización cuantitativa de los procesos geológicos. El Modelado 3D del subsuelo en general, no es un fin, sino un medio para mejorar la interpretación de los datos a través de la visualización y la comparación de datos entre sí con el modelo que se está creando, así como una manera de generar apoyo para las simulaciones numéricas de fenómenos complejos en los que las estructuras desempeñan un papel importante. La construcción de modelos 3D requiere un complejo sistema de retroalimentación entre la interpretación de los datos y el modelo todo esto con el fin de desarrollar un plan para maximizar la producción de hidrocarburos.

Un paso crítico en el modelado estructural es representar con precisión su geometría, para ello el volumen del yacimiento se discretiza por un conjunto de bloques o cuadrícula que se usa como soporte en la integración de los datos y valerse de algoritmos en el modelado de propiedades, para finalmente aplicar técnicas de ampliación en la escala (resolución) y construir una red de simulación de flujo. En la discretización del yacimiento pueden ser utilizados diferentes algoritmos; cuadrícula cartesiana, rejilla estructural o rejilla estratigráfica siendo este tipo de rejilla o grid el comúnmente empleado (Caumon, 2006).

La geometría del modelo se compone de superficies (horizontes) y sus discontinuidades, las fallas son superficies estructurales que yuxtaponen rocas de diferentes propiedades. Los métodos de construcción del modelo se pueden dividir en dos categorías: los métodos basados en la interfaz (Behzad, 2012) y métodos basado en cuadrícula o grid (Mallet, 2002). El tipo de modelo puede influir considerablemente en la calidad de la realización sísmica del mismo. El tamaño del grid depende de los objetivos de modelado, tamaño de la interfaz de destino y la profundidad son algunos de los principales factores que controlan el tamaño. Puede ser muy grande para estudiar los ajustes estructurales regionales (Behzad, 2012) o de pequeña escala para investigar las simulaciones numéricas de las propiedades petrofísicas de las rocas (Saenger et al., 2007).

### 3.3.1 Definición del Grid

Es un paso crítico en el modelado estructural, este debe representar adecuadamente la geometría del reservorio, el volumen es discretizado por una serie de bloques, que servirá de soporte en la integración de datos, ejecutar los algoritmos del modelado de propiedades y, finalmente, aplicar técnicas de ampliación en la escala (resolución) para construir una red de simulación de flujo.

El grid estratigráfico es una red estructural irregular, no estructurada localmente cuando es fallada y exclusivamente compuesta de celdas que pueden ser más o menos distorsionadas dependiendo de la complejidad estructural y el número de fallas, este representa la geometría del reservorio respetando la continuidad estratigráfica de la formación, al momento de definir el tamaño de la celda (grid) es necesario determinar las orientaciones de los ejes respecto al cual se definirá la geometría del grid (Figura 20).

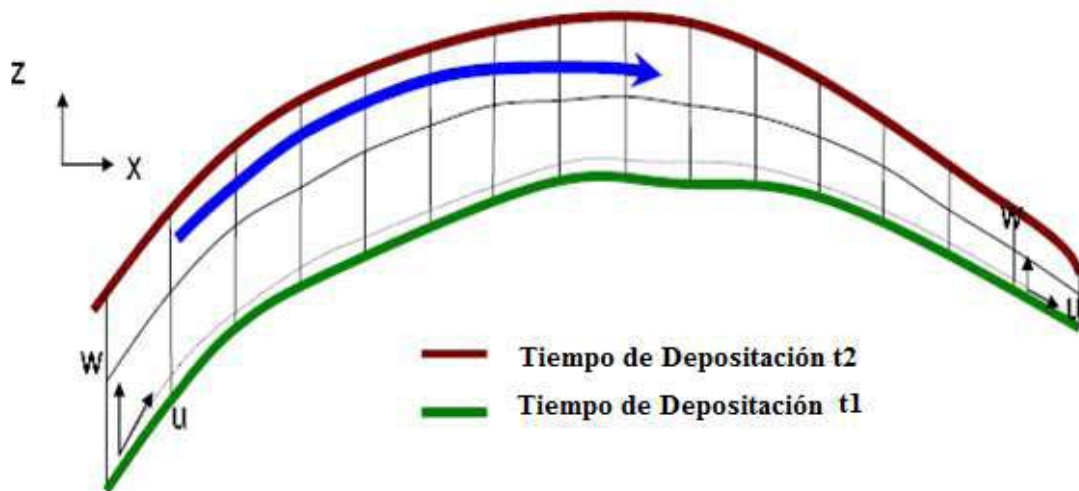


Figura 20. Grid Estratigráfico.

El grid estratigráfico modela la geometría del reservorio incorporando fallas y respetando la arquitectura estratigráfica (figura 19), una vez que esté definida toda la data debe ser incorporada para realizar la simulación estocástica, los datos de pozos

son usados para inferir los histogramas y variogramas estadísticos que se usaran como data de entrada en el proceso de modelado. El grillado define entonces las heterogeneidades estratigráficas del yacimiento y simplifica la simulación de propiedades petrofísicas, rapidez de flujo entre otros de acuerdo a la anisotropía del yacimiento y su correlación entre los pozos (Caumon (2006)).

La mayor parte del esfuerzo de modelado estructural en 3D equivale a encontrar la manera en como fallas y horizontes interactúan entre sí, de hecho las superficies estratigráficas terminan necesariamente en fallas, discordancias o límites modelo (figura 21).

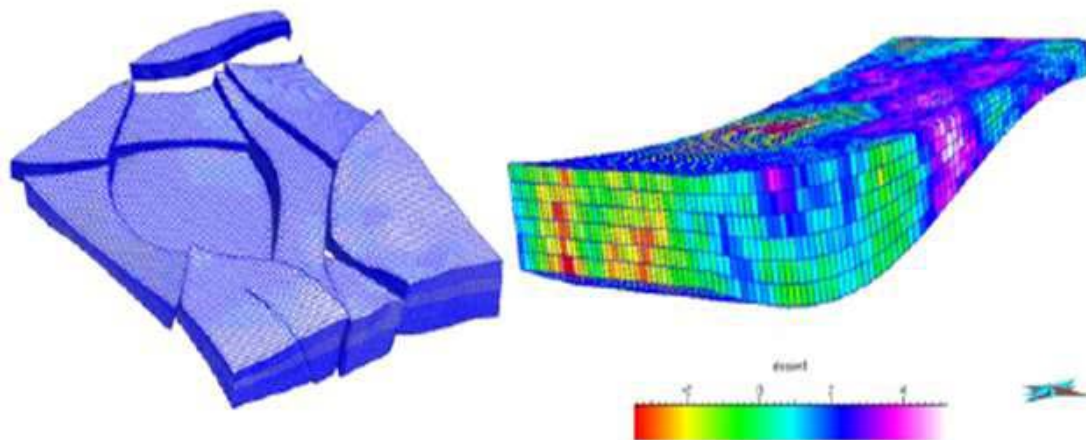


Figura 21. Ejemplo de grid estratigráfico

### 3.3.2 Modelado De Fallas.

Las fallas son muy importantes en el modelado estructural, porque compartimentalizan el yacimiento en regiones donde las superficies estratigráficas son continuas. Por lo tanto es importante para el modelado estructural determinar que fallas se van a modelar, basados en los objetivos del modelo de yacimientos, cuales pueden truncarse y/o unirse con base en el régimen de esfuerzos existentes en la zona. La definición de la conectividad entre estas superficies de falla es probablemente el

paso más importante y trascendente en el modelado estructural. Esto puede ser hecho considerando la geometría y salto de falla alrededor del horizonte, por lo que en el modelado se debe considerar el radio de influencia de cada falla para que esta reproduzca fielmente la interpretación (Caumon et al, 2009).

### 3.3.3 Modelado de Horizontes.

La construcción de horizontes puede lograrse a partir de la construcción de las regiones delimitadas por cada bloque de falla a partir del propio horizonte, utilizando métodos de construcción, ya sea directa o indirectamente y usando la superficie originalmente interpretada. Este enfoque en bloque está adaptado para los modelos simples con pocas fallas. Cada paso del proceso se controla manualmente, y se puede ajustar específicamente al objetivo. Las condiciones de contorno necesarias para la validez del modelo se pueden determinar de forma automática según el algoritmo matemático que soporte esta acción. La desventaja de esta automatización es doble. En primer lugar, es muy sensible a la calidad de la representación de las fallas originando que los pequeños espacios entre las superficies de falla pueden conducir a la creación de rampas artificiales que conectan dos bloques de fallas y en segundo lugar, el corte superficial tiende a un exceso de refinar la malla de la superficie de corte a lo largo de la línea de intersección. Dado lo expuesto anteriormente es necesario un control estricto en el momento de la construcción de la malla antes de continuar con otros pasos de modelado estructural.

Durante la interpolación, puntos de datos ubicados cerca de las fallas pueden atraer a la superficie correspondiente al otro lado de la falla, para esto es necesario disminuir la distancia de influencia de cada falla (Caumon et al, 2009).

## **CAPITULO IV**

### **METODOLOGIA**

El flujo de trabajo aplicado en este trabajo constó básicamente en la ejecución sistemática de 4 fases principales: la carga y validación de datos, la interpretación sísmica estructural de horizontes y fallas en tiempo, la generación de un modelo de velocidades, la conversión de los horizontes y fallas interpretadas en tiempo a profundidad y la generación del modelo estructural 3D. La figura 22 muestra el flujo de trabajo aplicado en el desarrollo de este proyecto.



Figura 22. Diagrama de la metodología empleada.

#### 4.1 Carga y Validación de Datos.

La fase de calibración e interpretación del proyecto fueron trabajados en la plataforma de interpretación integrada OpenWorks® propiedad de Landmark Graphics mediante el uso de los módulos Syntool® y Seisworks® respectivamente. La generación del modelo de velocidades, la conversión tiempo-profundidad y el modelo estructural 3D de los horizontes y fallas se realizó mediante el uso de la plataforma Petrel® propiedad de Schlumberger. Para el desarrollo de éste trabajo se contó con la siguiente información:

#### 4.1.1 Datos de Pozos

Veinte pozos con interpretación de topes de los 16 marcadores geológicos correspondientes a los límites estratigráficos menores de la Formación Oficina que se emplearon en la elaboración del modelo estructural trabajando principalmente con los miembros Pílon, Jobo, Morichal: superior, medio e inferior correspondientes a la Formación Oficina y Basamento (Figura 12), así mismo se contó con 12 Pozos con curvas tiempo-profundidad empleadas en la calibración, de los cuales 8 fueron usados en la elaboración del modelo de velocidades. Durante la revisión de las curvas tiempo-profundidad se verificó que no haya picos anómalos que pudiesen estar asociados a valores mal medidos o mal cargados (Figura 23). Dichos pozos fueron exportados de Landmark® y cargados en Petrel®, para esto se cargaron primeros los cabezales de los pozos que contenían la información de las coordenadas X e Y, la elevación de la mesa rotaria (KB) y los marcadores geológicos correspondientes al intervalo de estudio, una vez realizado este paso se procedió a cargar los *checkshots* correspondiente a cada pozo, todo esto con el fin de realizar la calibración sísmica

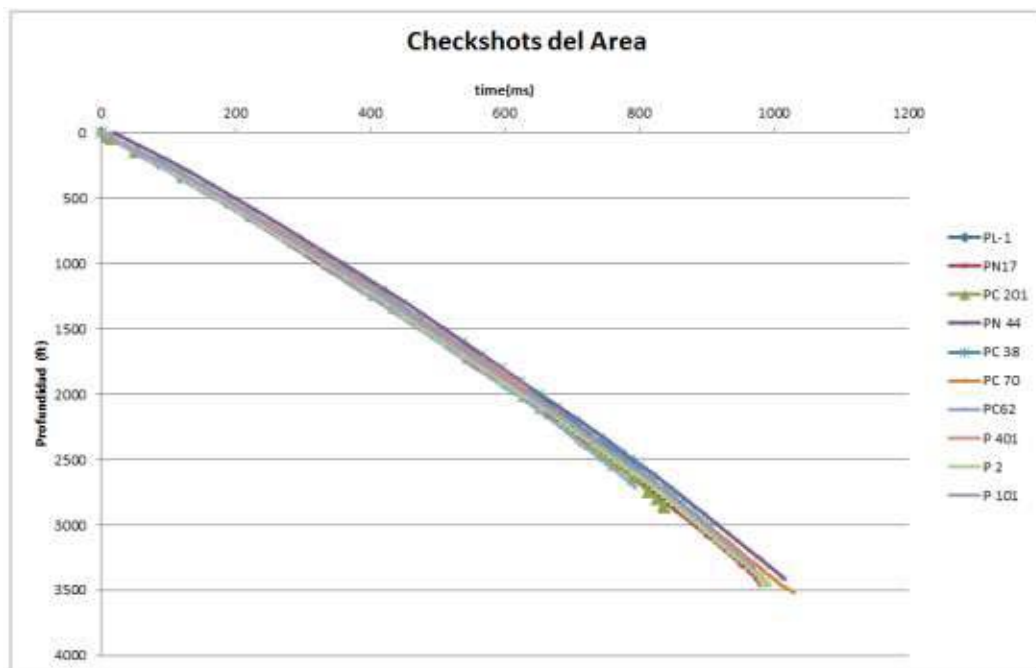


Figura 23. Visualización de los checkshots del área de estudio

#### 4.1.2 Datos Sísmicos.

La compañía Western Atlas de Venezuela realizó el levantamiento sísmico Cerro Negro 3D cuya área es de 332km<sup>2</sup>, el volumen consta de 973 *inlines* (dirección de los receptores) cuyo rango va de 102-1074 de dirección norte-sur, 849 *crosslines* o trazas (dirección de los disparos) con un rango de 101-949 de dirección este-oeste con un intervalo separación de 20m para ambas direcciones (Figura 24).

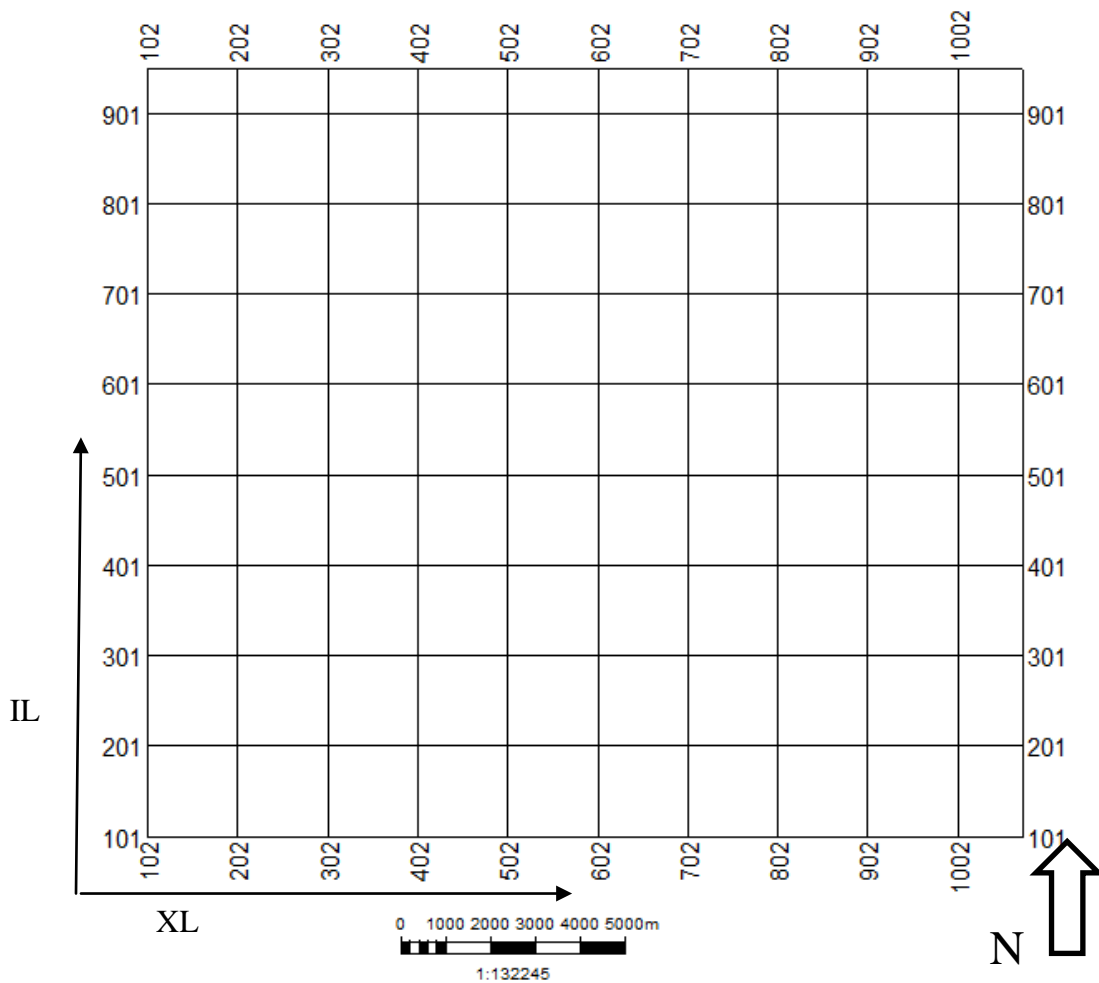


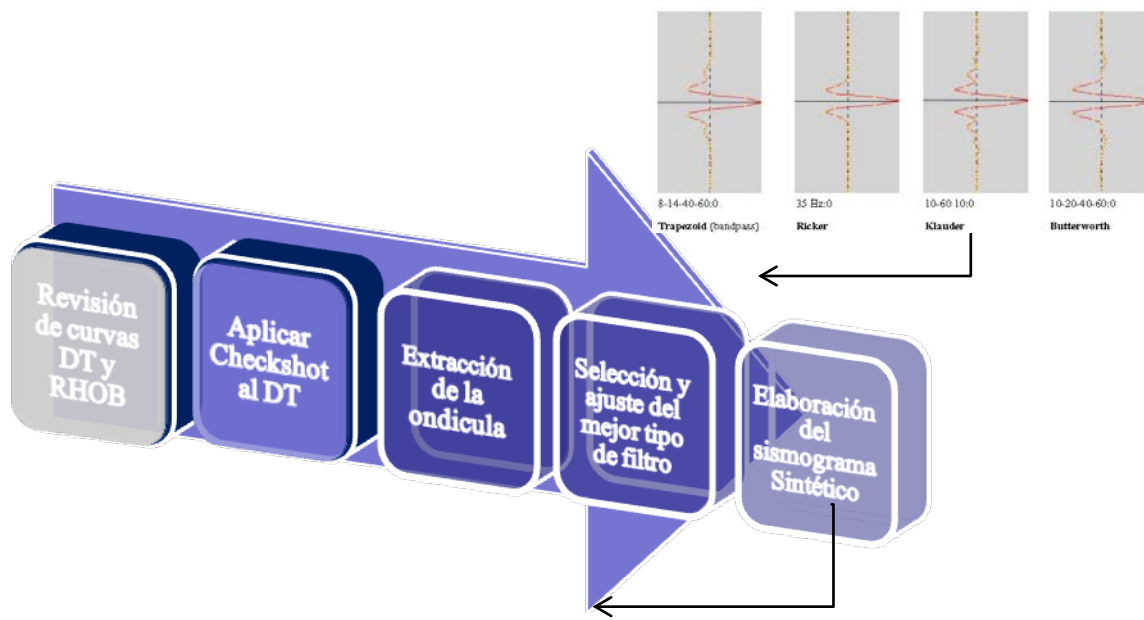
Figura 24. Distribución de Inline y Crossline del área de estudio.

## 4.2 interpretación Sísmica Estructural

Durante este proceso se combinan los datos sísmicos y geológicos con el fin de establecer un modelo de la geometría del subsuelo, en primera instancia se realizó una visualización de los datos sísmicos para así determinar la mejor dirección de interpretación de las estructuras e identificar los reflectores sísmicos y por medio de la calibración establecer una correspondencia de la sección sísmica con los marcadores geológicos a trabajar, una vez culminado este proceso se realiza la interpretación de horizontes y fallas con el fin de generar los mapas en tiempo.

### 4.2.1 Calibración Sísmica

Durante esta etapa como muestra la figura 25 se procedió a hacer la revisión de curvas DT y RHOB eliminando los picos anómalos (*spikes*) producto de fallas en la herramienta en el momento de la adquisición, una vez terminado el proceso de edición de curvas se procede a la elaboración del sismograma sintético en el cual es generado una curva de coeficiente de reflexión obtenida directamente del registro sísmico y densidad, para seguir en la elaboración del sismograma se corrige el registro sísmico con el checkshot. Se logró realizar la calibración mediante la elaboración de 10 sismogramas sintéticos con lo cual se obtuvo la calibración sísmica-pozo, permitiendo asociar los horizontes sísmicos con los marcadores geológicos del área de interés. Para los pozos restantes se le asignó la tabla tiempo profundidad más cercana y se procedió a elaborar el sismograma respectivo,



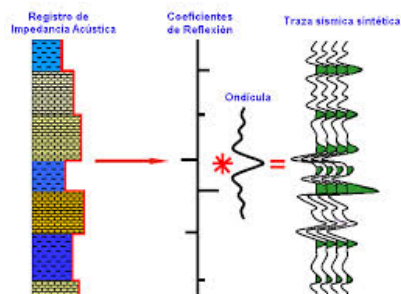


Figura 25. Flujo de trabajo en la calibración sísmica

La mayoría de los checkshot se diseñan, registran y procesan para registrar los tiempos de desplazamiento verticales, por esta razón la profundidad del sónico siempre debe estar en TVD (*true vertical depth*) antes de corregir aplicando el checkshot al sónico, éste se integra para reproducir una relación de tiempo total y profundidad y que dichos puntos tengan una correspondencia exacta (tiempo, profundidad) con el checkshot (Figura 26).

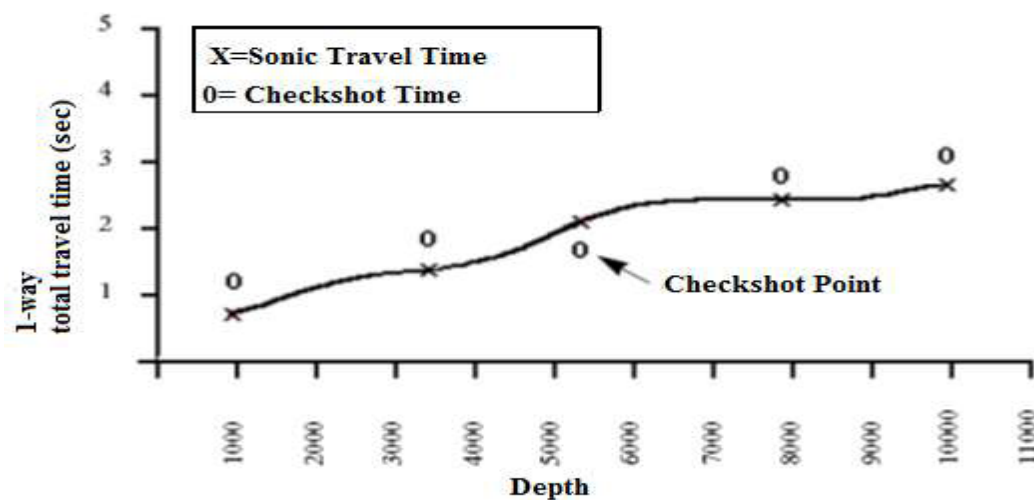


Figura 26. Gráfica del Sónico integrado y Checkshot (Syntool User, 2003).

La diferencia computada entre el tiempo del checkshot y el sónico integrado es lo que se denomina como curva de deriva (Figura 27), dichos valores indicaran la calidad del registro y que tanto fue modificado el sónico corregido del original (Figura 28).

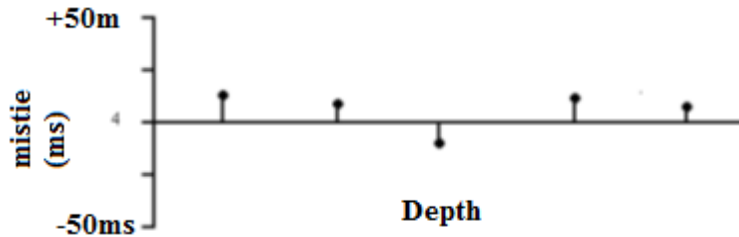


Figura 27. Diferencia entre los valores del registro sónico y el checkshot (mistie).

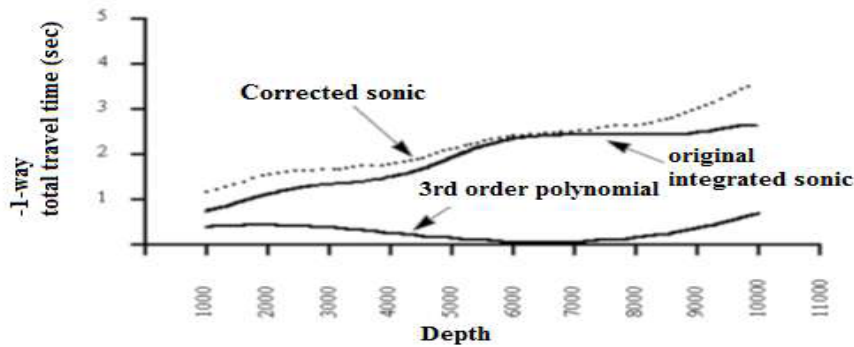


Figura 28. Representación de la curva integrada del registro sónico, sónico corregido y el mistie.

Una vez que se tiene el registro sónico corregido y la curva de deriva esté dentro del rango prudente para que dicho pozo sea utilizable se procede a elegir la ondulada para convolucionarla con la serie de Reflectividad obtenida de los registros, comparando el espectro de frecuencias de la sísmica para poder elaborar de acuerdo al filtro elegido (trapezoidal, klaunder, butterworth, ricker) o extraído de la sísmica una ondulada que represente lo más fiel posible el rango de frecuencias contenidas en esa área para elaborar el sismograma sintético como muestra la figura 29.

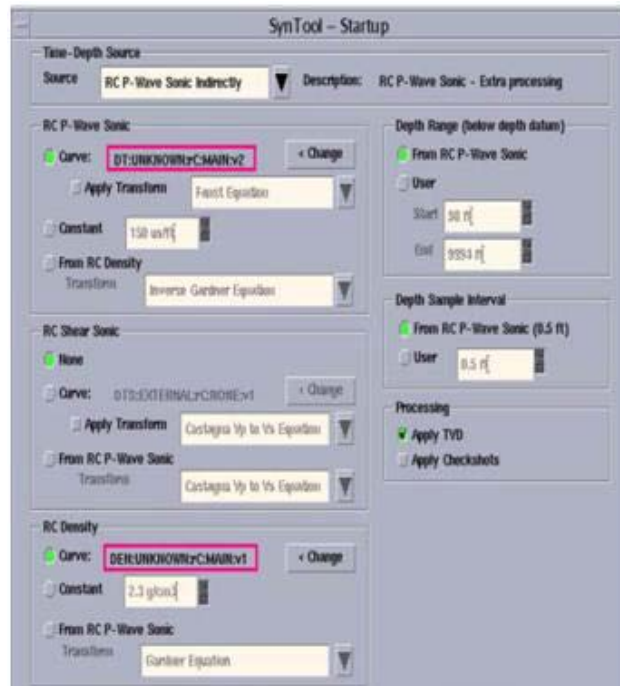


Figura 29. Parámetros utilizados para la selección de las curvas DT y RHOB.

SynTool le permite generar ondícula de forma analítica o estadística, el método analítico genera un modelo de ondículas basados en filtros de emisión estándar utilizados en el procesamiento sísmico. Idealmente, una ondícula modelo debe ser construida a partir de todos los parámetros sísmicos conocidos de adquisición y procesamiento (firma fuente, imágenes fantasma, de reverberación, filtrado, etc), sin embargo en SynTool sólo se aplica el filtrado (trapezoidal, klauder, butterworth, ricker) para su elaboración.

En OpenWorks los métodos de extracción son:

- Método de Wiener-Levinson: filtrar el ruido que ha corrompido una señal, se basa en estadística, asume que la señal es constante y que el ruido es aditivo.

- Autocorrelación: se define como la correlación cruzada de la señal consigo misma, resulta de gran utilidad para encontrar patrones repetitivos dentro de una señal. (Syntool User, 2003).

$$R_f(\tau) = f^*(-\tau) \circ f(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t + \tau) f^*(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) f^*(t - \tau) dt$$

Ecuación 4.1

Cada Filtro, posee un espectro de frecuencia característico, éste es una medida de la distribución de amplitudes de cada frecuencia (figura 31), todo este proceso se realiza con el fin de elaborar el sismograma sintético y realizar la calibración sísmica pozo (Figura 30 y 31).

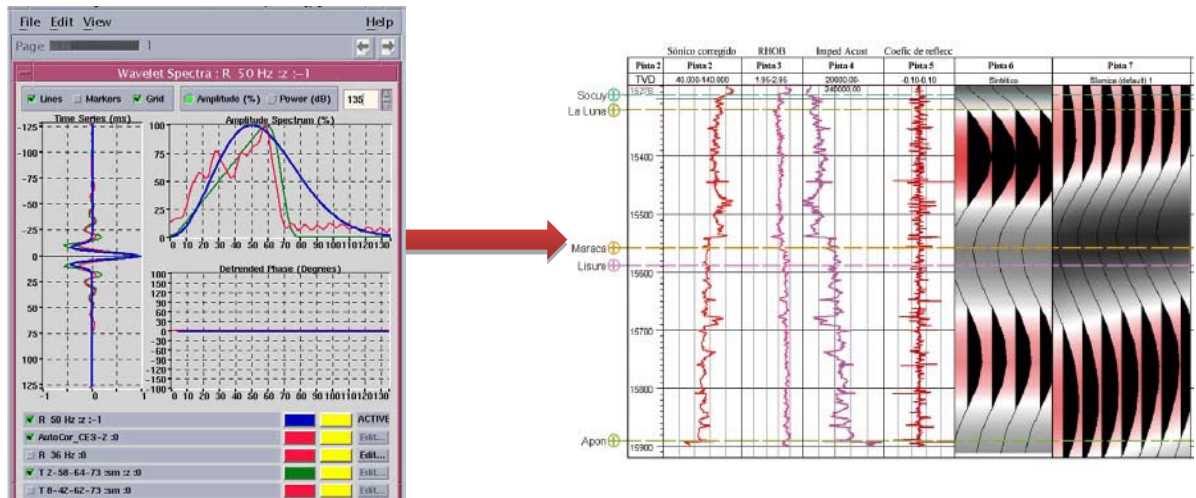


Figura 30. Espectro de frecuencia de la sísmica (rojo), filtro Trapezoidal (verde), Ricker (azul).

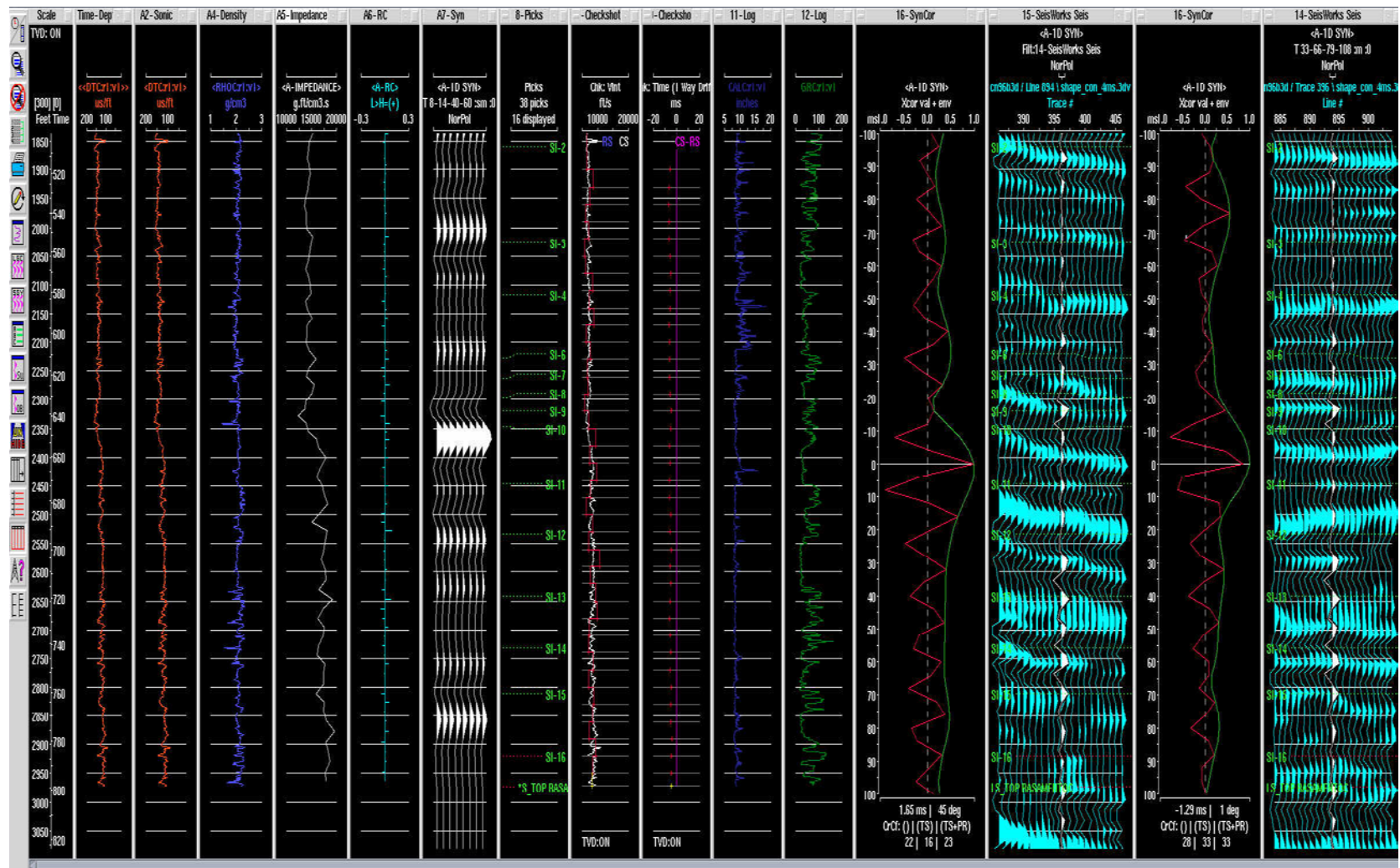


Figura 31. Sismograma Sintetico

#### 4.2.2 Cálculo de la Resolución Sísmica

De acuerdo al Criterio de Rayleigh para que dos reflexiones consecutivas puedan ser distinguidas, la distancia entre ellas debe ser al menos  $\frac{1}{4}$  de la longitud de onda. El software hace un análisis espectral de frecuencias en el cual hace un barrido por líneas o trazas dependiendo del usuario, en este caso se realizaron varias pruebas y en promedio el comportamiento es uniforme en todo el campo, la figura 32 muestra la frecuencia dominante la cual es utilizada para el cálculo de la resolución vertical. Con base en los checkshot utilizados se obtienen las velocidades interválica de la zona, y se calcula la resolución vertical para cada zona de interés obteniéndose los valores de la tabla 4.1 y 4.2, donde se aprecia los valores para diversos rangos de frecuencias a ciertas profundidades.

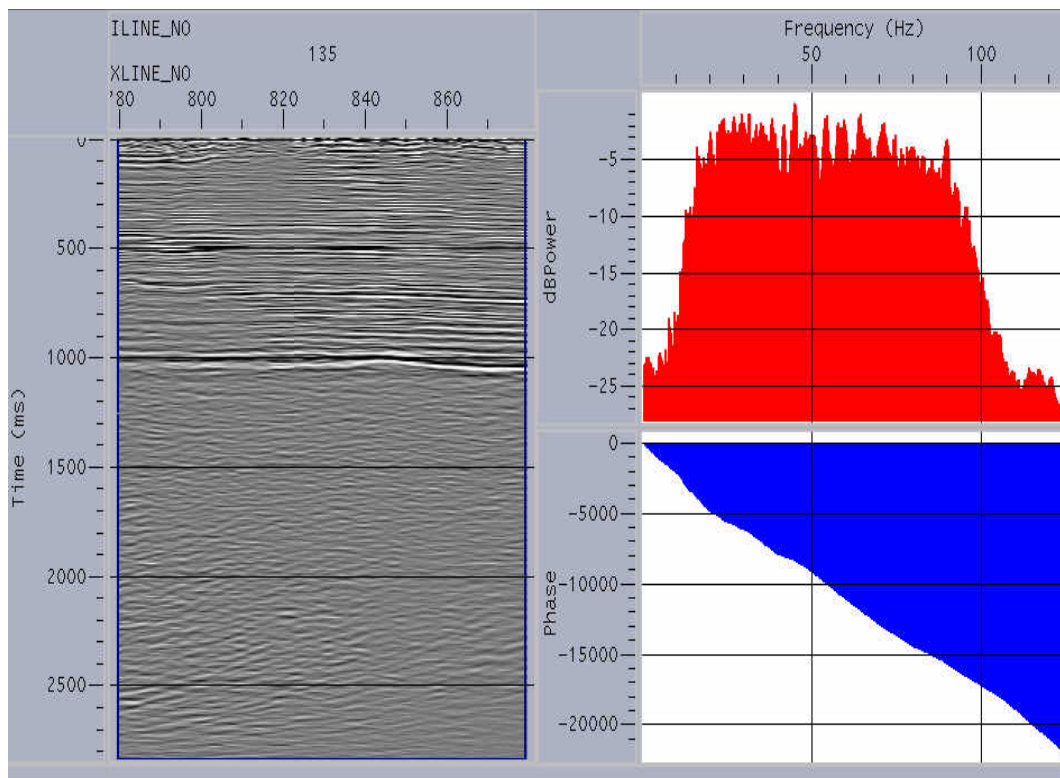


Figura 32. Espectro de frecuencia Del IL 135

Tabla 4.1. Calculo de Resolución Vertical promedio

Pozo	Tope	Profundidad (Z)	Espesor (m)	Velocidad (m/s)	Calculo de Resolución Sísmica(m) Frecuencias		
					20	50	90
CHC-38	SI-1	2050.752	46.405	1904.707	23.809	9.524	5.291
CHC-38	SI-2	2203.000	47.986	1928.957	24.112	9.645	5.358
CHC-38	SI-3	2360.436	24.314	1941.778	24.272	9.709	5.394
CHC-38	SI-4	2440.207	38.647	1953.143	24.414	9.766	5.425
CHC-38	SI-6	2567.000	18.593	1968.160	24.602	9.841	5.467
CHC-38	SI-7	2628.000	55.059	1986.026	24.825	9.930	5.517
CHC-38	SI-10	2808.639	94.293	2021.772	25.272	10.109	5.616
CHC-38	SI-14	3118.000		2024.314	25.304	10.122	5.623

Pozo	Topes	Profundidad (Z)	Espesor (m)	Velocidad (m/s)	Calculo de Resolución Sísmica(m) Frecuencias		
					20	50	90
CHC-44	SI-1	2336.091	46.612	1914.288	23.929	9.571	5.317
CHC-44	SI-2	2489.017	47.757	1931.301	24.141	9.657	5.365
CHC-44	SI-3	2645.699	60.723	1958.841	24.486	9.794	5.441
CHC-44	SI-6	2844.920	24.763	1976.558	24.707	9.883	5.490
CHC-44	SI-7	2926.163	58.037	1998.696	24.984	9.993	5.552
CHC-44	SI-10	3116.574	114.779	2031.558	25.394	10.158	5.643
CHC-44	SI-14	3493.144		2049.610	25.620	10.248	5.693

#### 4.2.3 Interpretación Estructural

El éxito de la ejecución de este punto depende de la calibración sísmica, puesto que permite la asociación del reflector sísmico con un determinado marcador geológico, cuyas características litológicas determinaran el comportamiento de la impedancia acústica y ésta debe corresponder con el reflector al que fue asociado en el proceso de calibración.

Como muestra la figura 33 una vez que se haya validado y definido los topes finales del proyecto se procedió a evaluar el tipo de formación supra e infrayacente de

acuerdo a sus características litológicas para realizar la interpretación de los marcadores geológicos de interés y el mapa correspondiente.



Figura 33. Flujo de trabajo en la sección de interpretación

Una vez determinado los marcadores geológicos finales se procedió a evaluar cómo sería el comportamiento sísmico de esos marcadores (máximo, mínimo o cero crossing) para relacionarlos con los reflectores sísmicos y así definir el horizonte como muestra la figura 34.

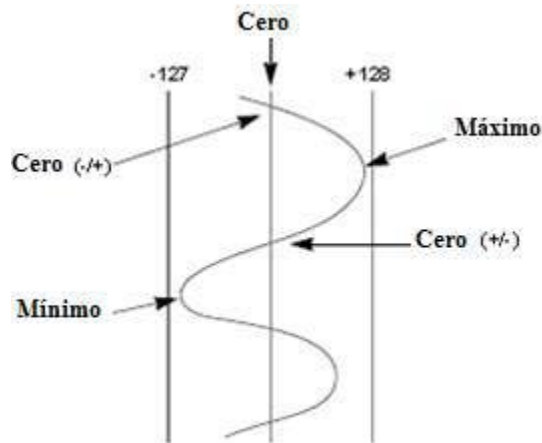


Figura 34. Definición de Peak Máximo, Cero Crossing y Mínimo.

Una vez determinado el comportamiento sísmicos de dichos marcadores se procedió a realizar la interpretación de los horizontes como muestra la figura 35.

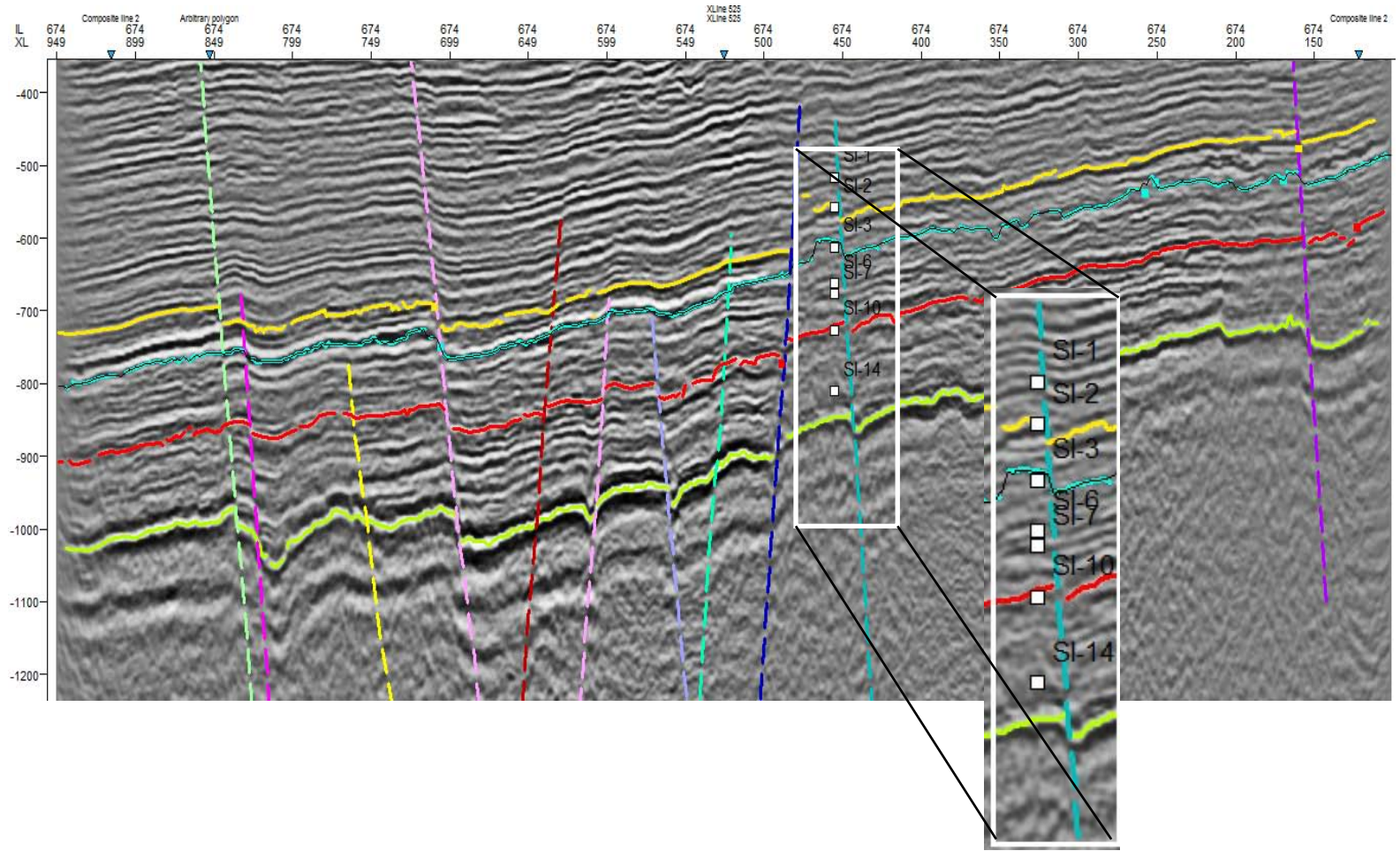


Figura 35. Calibración de la Línea 674 del campo Cerro Negro con los marcadores geológicos

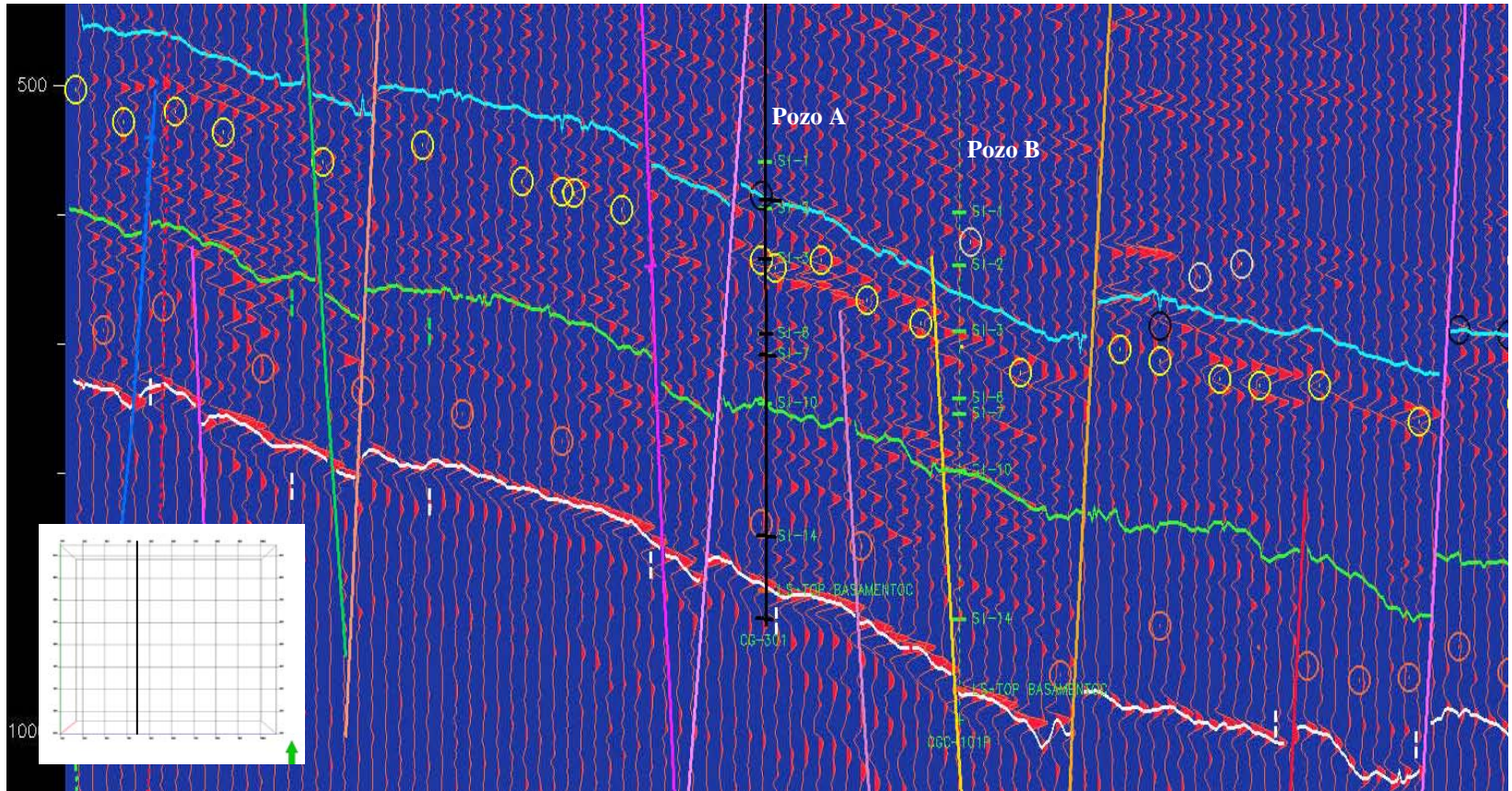


Figura 36. Traza 455 cotejado con el pozo B

Las figura 35 y 36 muestran diferentes líneas y trazas con los pozos calibrados y la interpretación de los horizontes, ésta fue realizada para los marcadores geológicos correspondientes a las formaciones de Pílon, Jobo, Morichal y basamento realizando un mallado regular inicial de 50x50, luego de verificar que la malla este correcta se realizó un mallado 10x10 con el que se hizo la interpolación de cada uno de los horizontes, en la figura 37 se tiene el ejemplo del horizonte morichal medio.

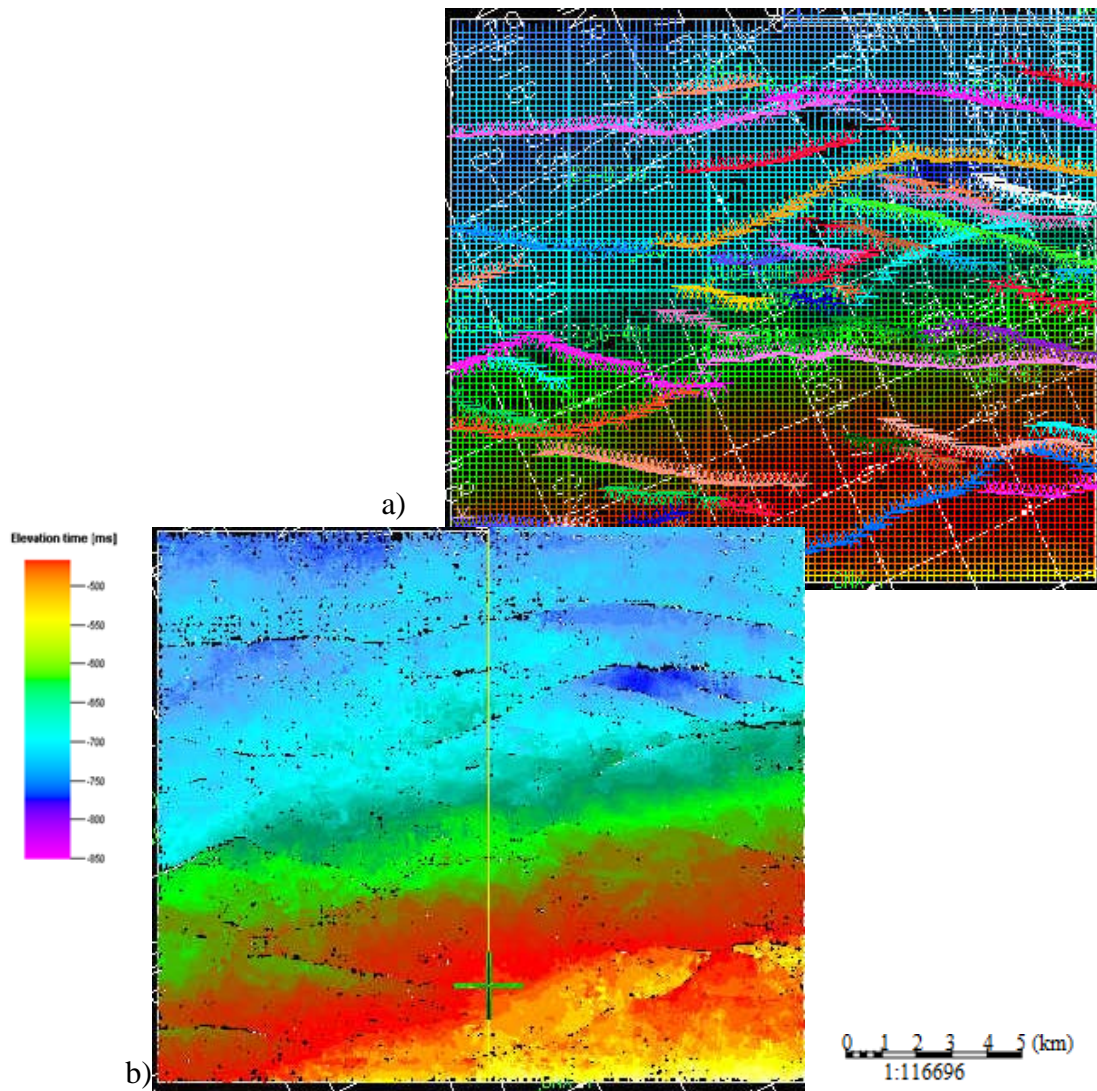


Figura 37. Ubicación del levantamiento sísmico, a) malla de interpretación 10x10 y fallas interpretadas  
b) mapa en tiempo del marcador geológico SI10 correspondiente a Morichal Medio.

#### 4.2.4 Mapas estructurales en tiempo.

Para realizar el mapa en tiempo se tienen las opciones de interpolación en el que el software toma un valor promedio lineal entre las líneas o trazas del horizonte esta es una manera rápida de realizar el mapa, para objeto de este trabajo se realizó la interpolación tomando en cuenta la magnitud de la amplitud del reflector sísmico, en la figura 38 y 39 se puede visualizar la interpretación de los marcadores geológicos correspondiente a Pílon, Jobo, Morichal Medio y Basamento.

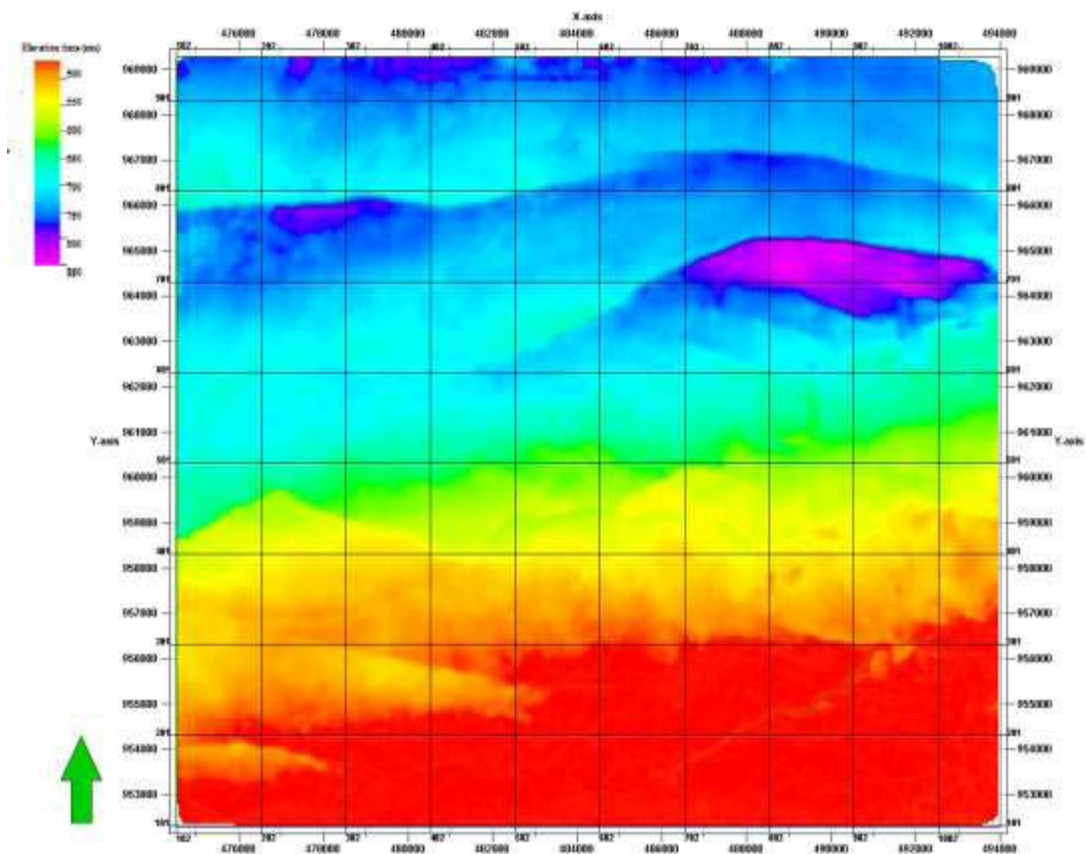
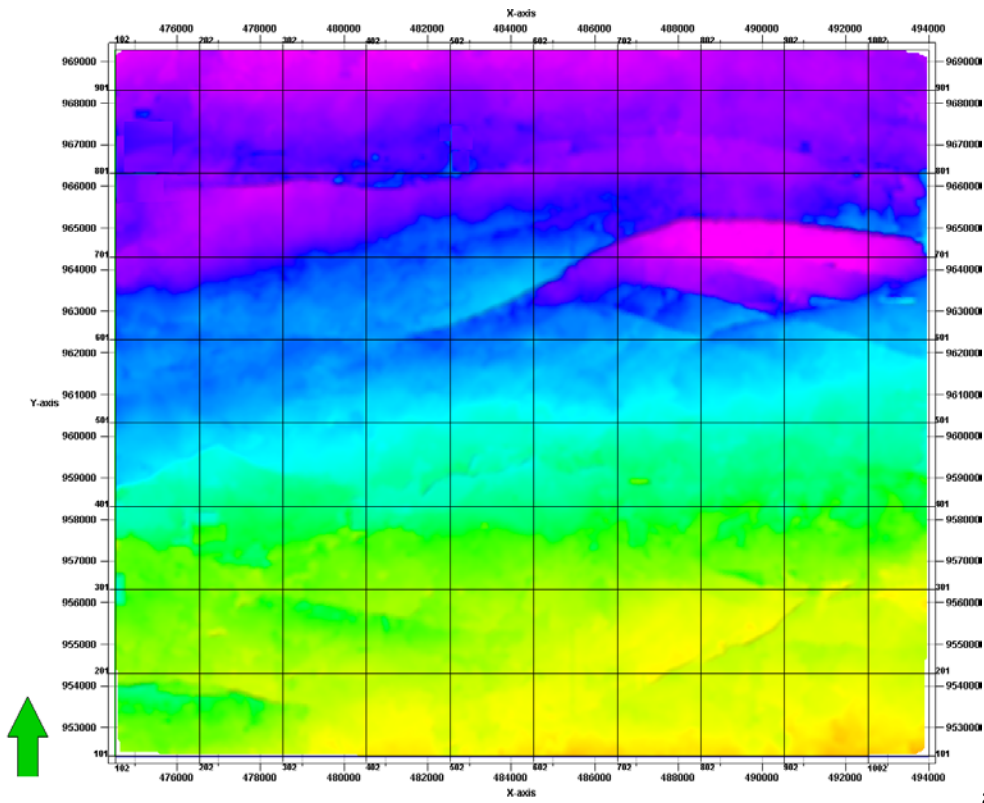
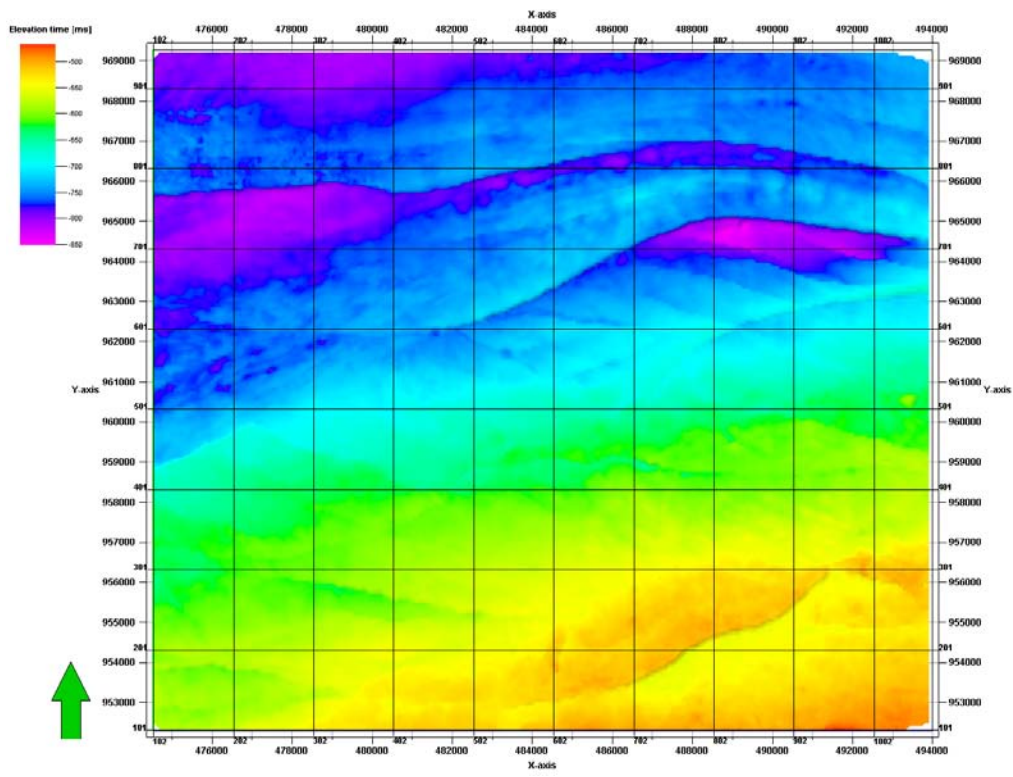


Figura 38. Mapa en tiempo de Pílon



a)



b)

Figura 39. Mapa en tiempo de Basamento.

Los patrones de fallas otorgados por PDVSA, fueron refinadas, reinterpretadas y ajustadas de acuerdo al caso según el patrón de esfuerzos presentes en el área de estudio.

#### 4.2.5 Atributos Sísmicos Estructurales

Para elaborar los atributos se utilizó la plataforma Petrel® en el cual se realizó un cubo de atributos como muestra la figura 40 y por medio del proceso *volumen attribute* se realizaron los atributos estructurales necesarios para guiar el proceso del modelado de fallas y visualizar posibles estructuras en la zona.

El mapa de atributos ayudará a determinar y comprobar los rasgos estructurales que quizás fueron omitidos al momento de la interpretación de las fallas, la figura 41 a y b muestra el atributo dip azimuth en el cual resalta las características estructurales del área, observando en primera instancia dos familias de fallas, una principal y otra secundaria con direcciones aproximadas N70E y N50W respectivamente.

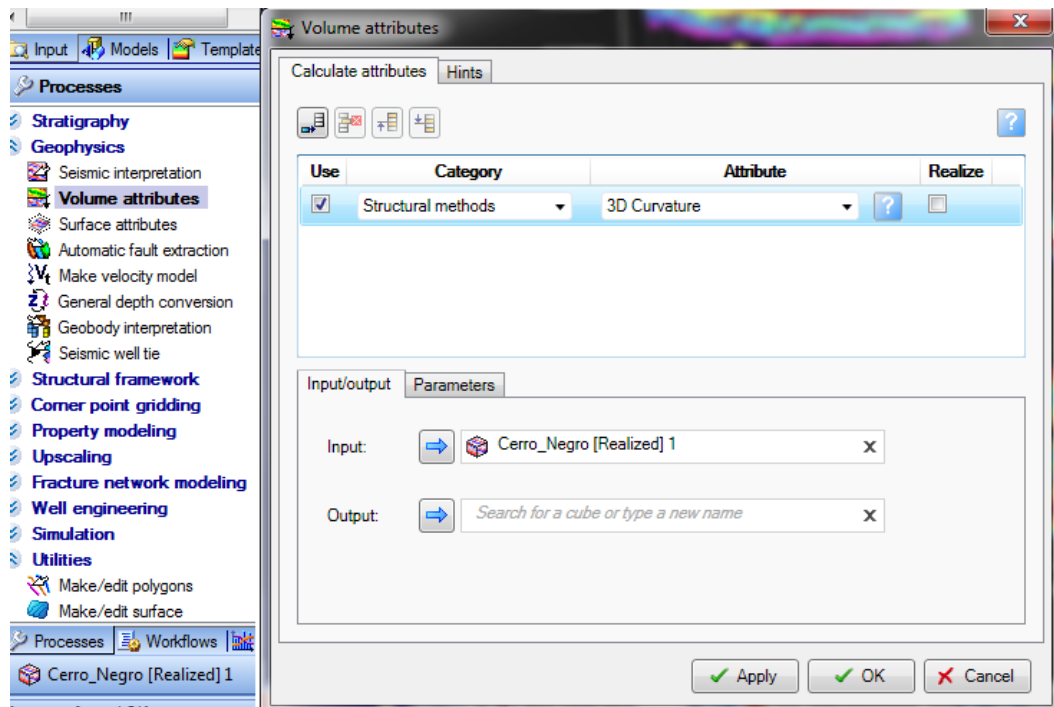


Figura 40. Proceso de elaboración de atributos sísmicos en Petrel.

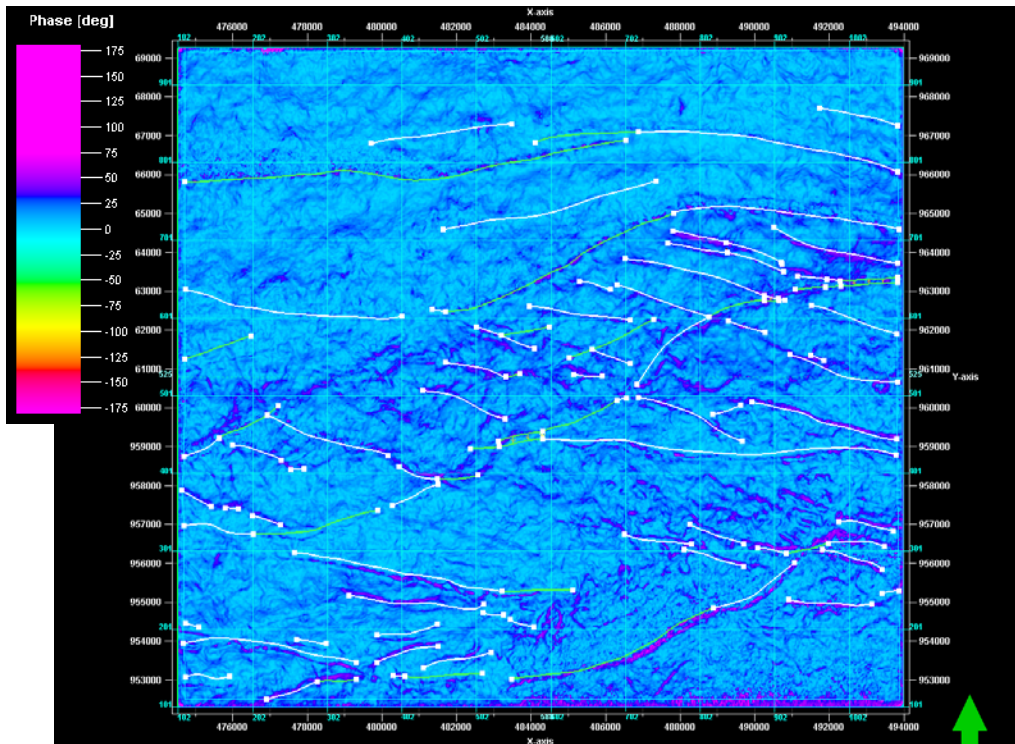
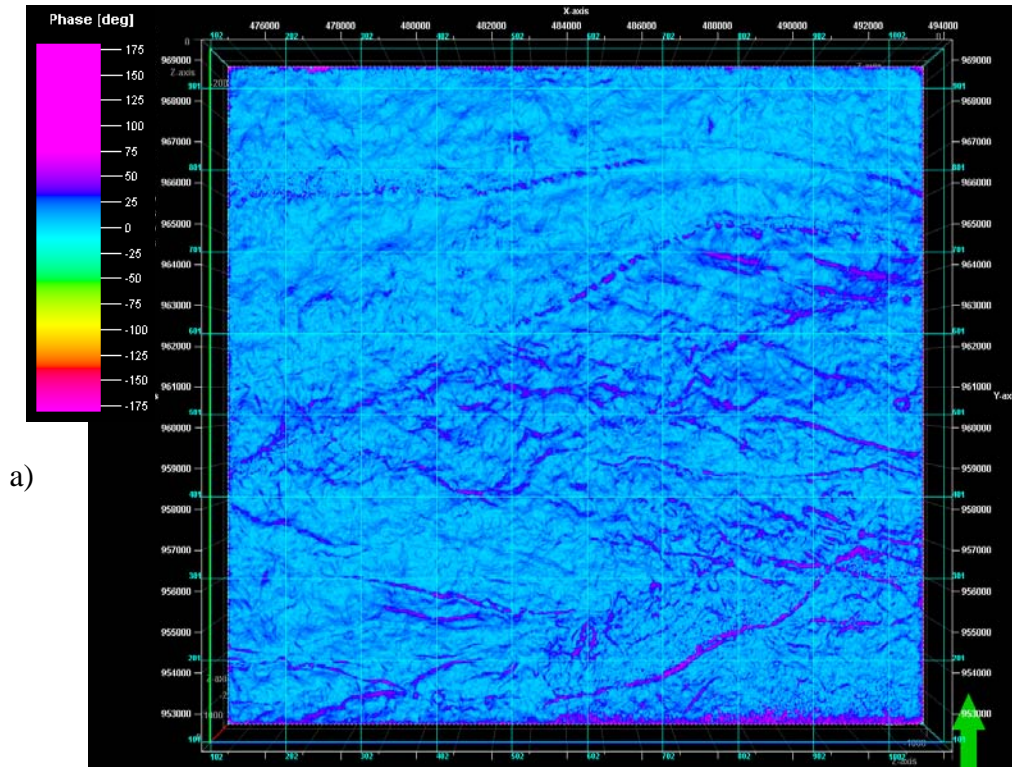


Figura 41. Corte en tiempo Tomado a 810ms a) corte en tiempo b) corte en tiempo con Fallas

### 4.3 Conversión Tiempo Profundidad

Al momento de realizar la adquisición del dato sísmico se graban los tiempo de viaje de la onda, en vista de que el manejo del dato es en tiempo y que los datos de pozos y las estructuras necesitan ser ubicadas espacialmente en profundidad es necesario realizar la conversión por medio de un modelo de velocidades que permitirá establecer la relación metro por segundos y así ubicar espacialmente en profundidad las estructuras de interés.

#### 4.3.1 Modelo de Velocidades

Para la elaboración del modelo de velocidades es necesario tener los horizontes en tiempo, los marcadores geológicos y las tablas tiempo-profundidad (*checkshots*) para esto se requiere tener los horizontes interpretados en la plataforma OpenWorks® cargados en Petrel® y convertirlas en superficies, corrigiendo cada una de ellas por los topes geológicos con los cuales fueron interpretados, de esta forma el software tiene una referencia espacial de la relación existente entre la distribución de la superficie en tiempo y la profundidad asociada con el marcador geológico interpretado, el parámetro de conversión que se empleo fue la relación  $V=V_0+KZ$ , en el cual para cada coordenada X e Y la velocidad cambia en la vertical por un factor k donde  $V_0$  representa la velocidad a  $Z=0$ , marcando la opción de optimizar para la estimación de K, este factor calculará coeficientes de velocidad ( $V_0$ ) y K que minimizan el error en la velocidad y mantiene la relación de incremento con la profundidad, este valor se obtiene de manera iterativa en los pozos usados en el modelo, si no se selecciona la estimación no se sigue necesariamente la tendencia de los datos de entrada, la opción *well TDR surface* calcula la velocidad de acuerdo a los valores estimados en la relación tiempo profundidad (TDR) de cada pozo a través de la zona entre el primer valor de la tabla hasta la superficie.

Al elaborar el modelo se generaron mapas de los horizontes de entrada en profundidad con sus respectivas relaciones tiempo-profundidad, profundidad-velocidad para cada zona entre horizontes, por ende se debe elegir un valor de tolerancia que comparará este valor con la profundidad y tiempo del nuevo horizonte para verificar que el modelo este correcto, estos valores de tolerancia fueron menores a la resolución sísmica colocando para la profundidad una tolerancia de 10 ft y para el tiempo 4 ms (Figura 42).

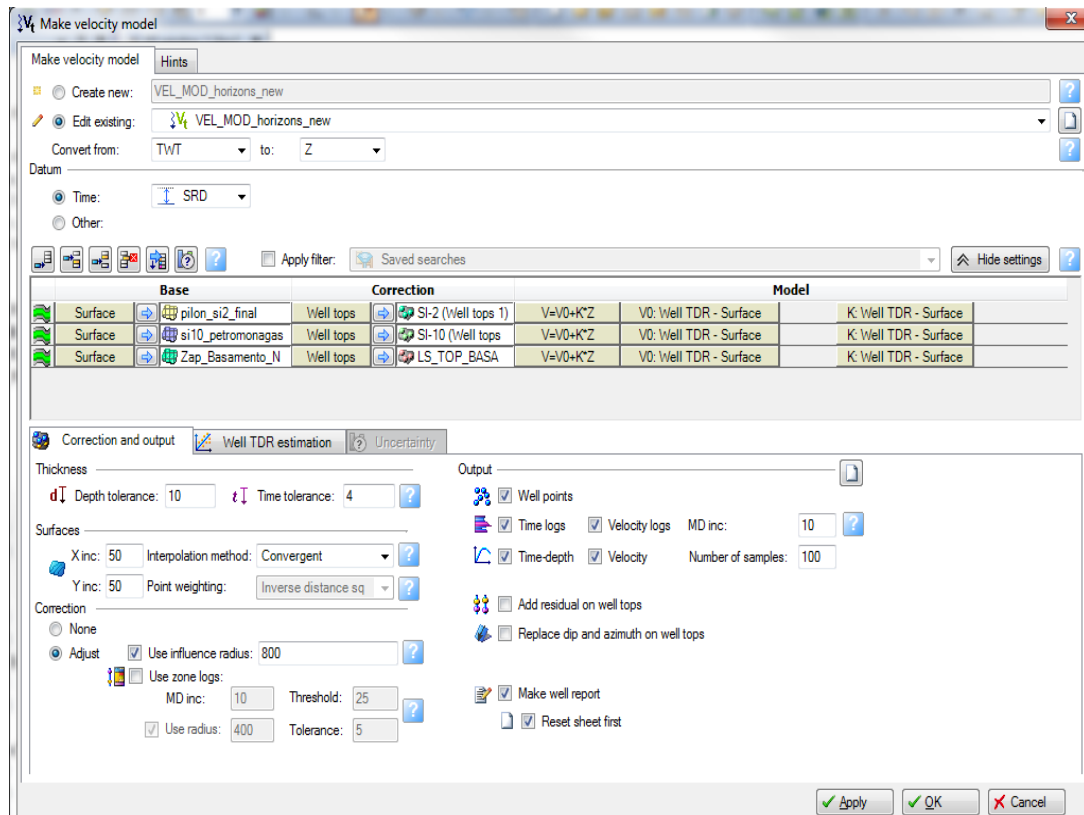


Figura 42. Elaboración del Modelo de Velocidades.

Se realizaron numerosas pruebas para determinar cuál era el mejor modelo, una vez que dichos parámetros hayan ajustado lo mejor posible dentro de los parámetros de tolerancia y que los pozos usados en el modelo no hayan dado errores, las gráficas tiempo-profundidad y relación de velocidades fueron revisados, una vez que fueron constatado que hayan sido las más óptimas de acuerdo a las características geológicas

de la zona se procedió a elaborar el volumen de velocidades (Figura 43), este debe garantizar que no hayan variaciones abruptas en horizontal y que la variación de la velocidad con respecto a la profundidad sea progresivo, en la zona de estudio el rango de velocidades varía entre los 7000-11000 ft/seg

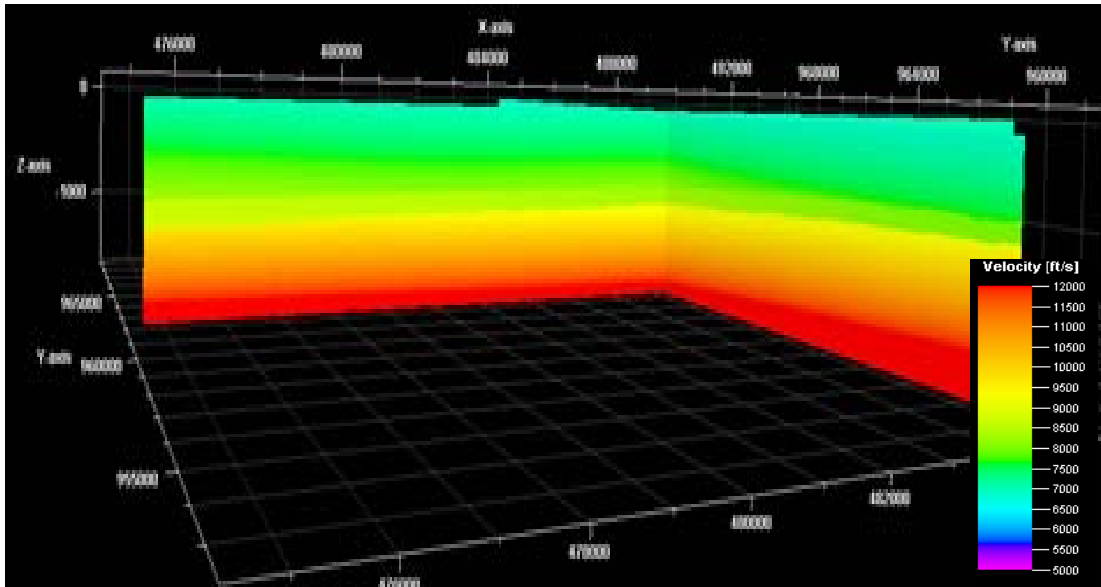
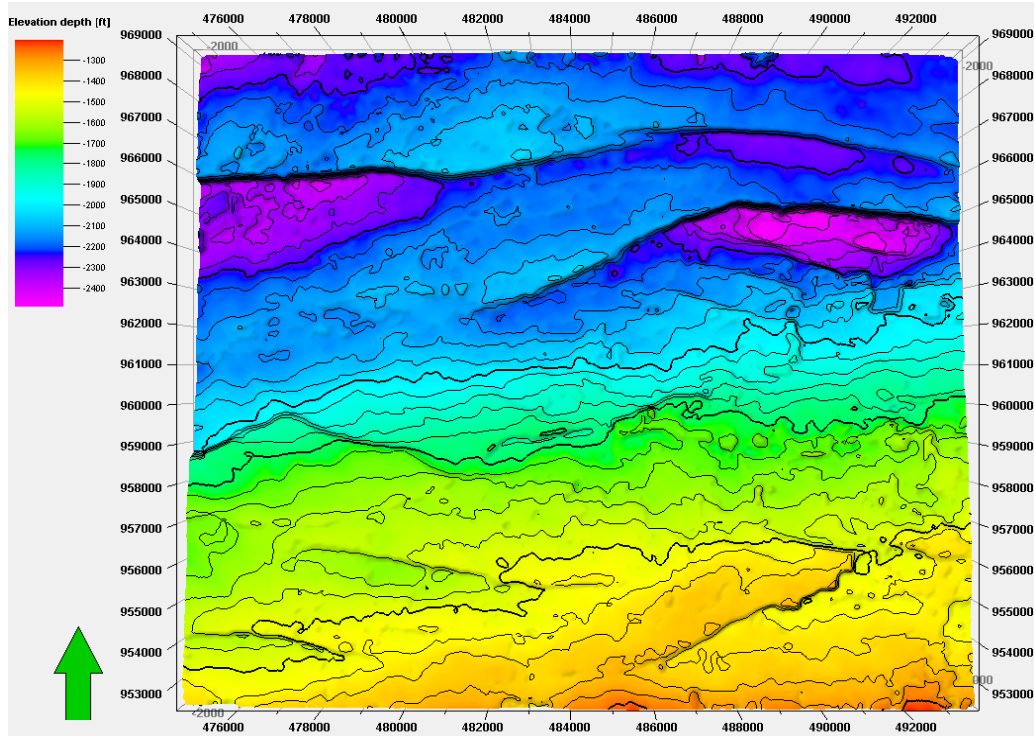


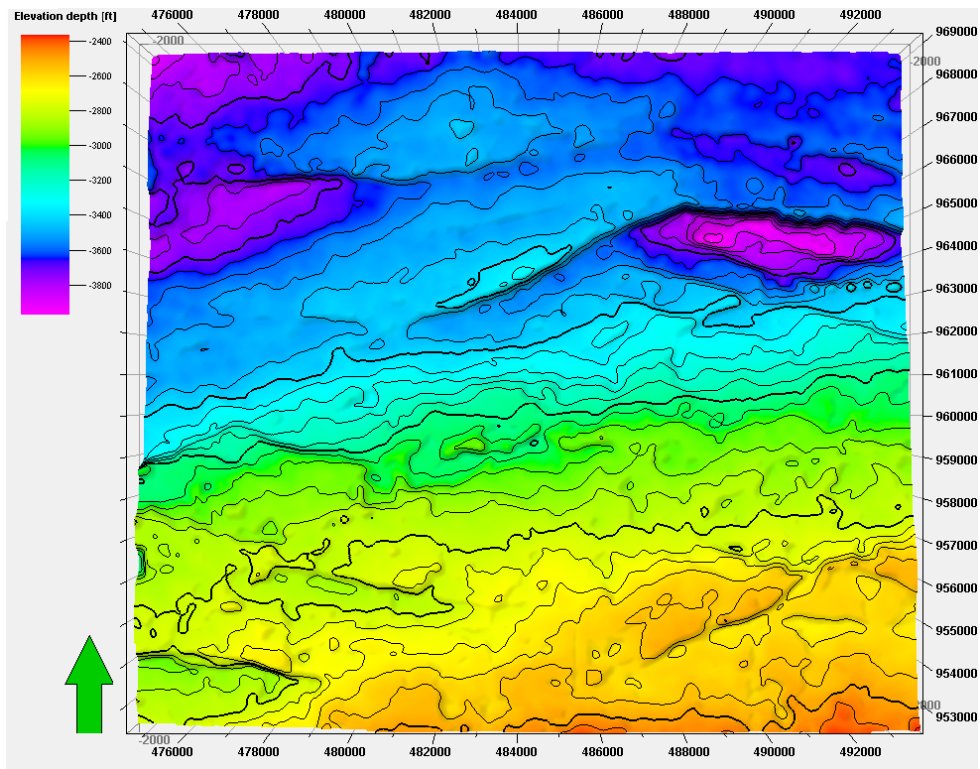
Figura 43. Modelo de velocidades vista lateral

#### 4.3.2 Mapas Estructurales en-Profundidad.

Una vez elaborado el modelo de velocidades correcto, verificando que el aumento de la velocidad respecto a la profundidad sea progresivo respetando los valores del checkshot de cada pozo, se procedió a activar el modelo final y realizar la conversión de cada una de las fallas a profundidad, obteniendo así las superficies que sirvieron de insumo en la elaboración del modelo estructural, los horizontes que fueron usados para la elaboración del modelo son convertidos a profundidad durante la ejecución del proceso mostrados a continuación en las figuras 44 y 45.

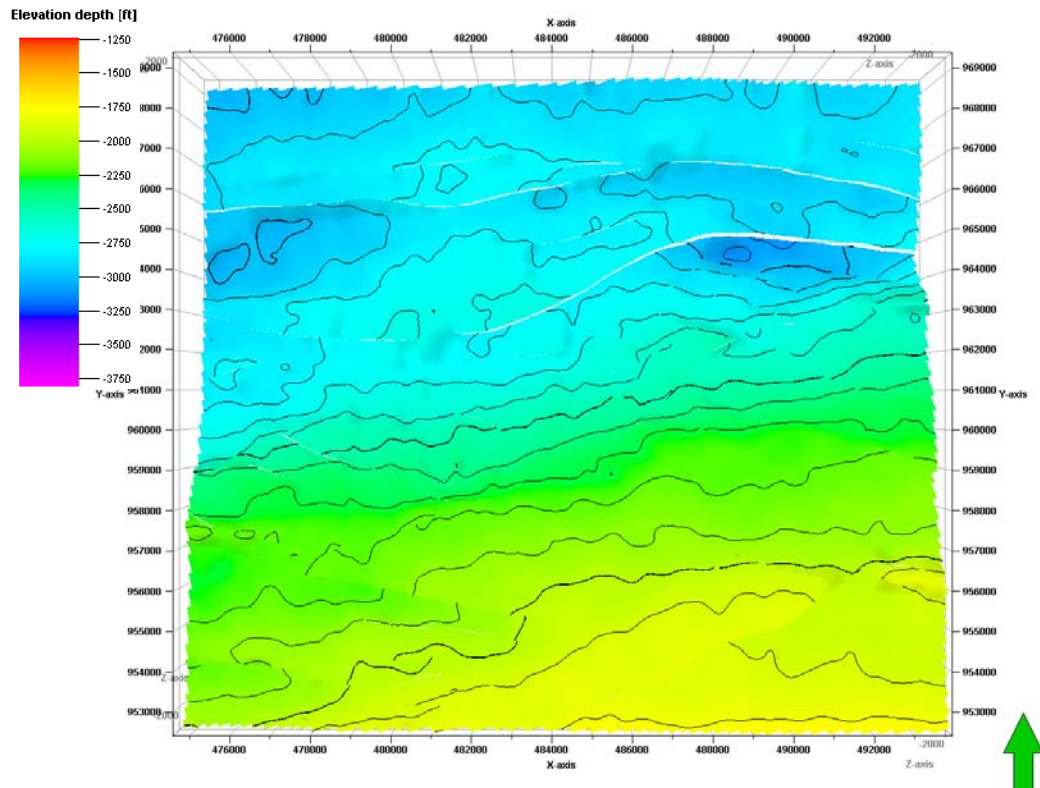


a)

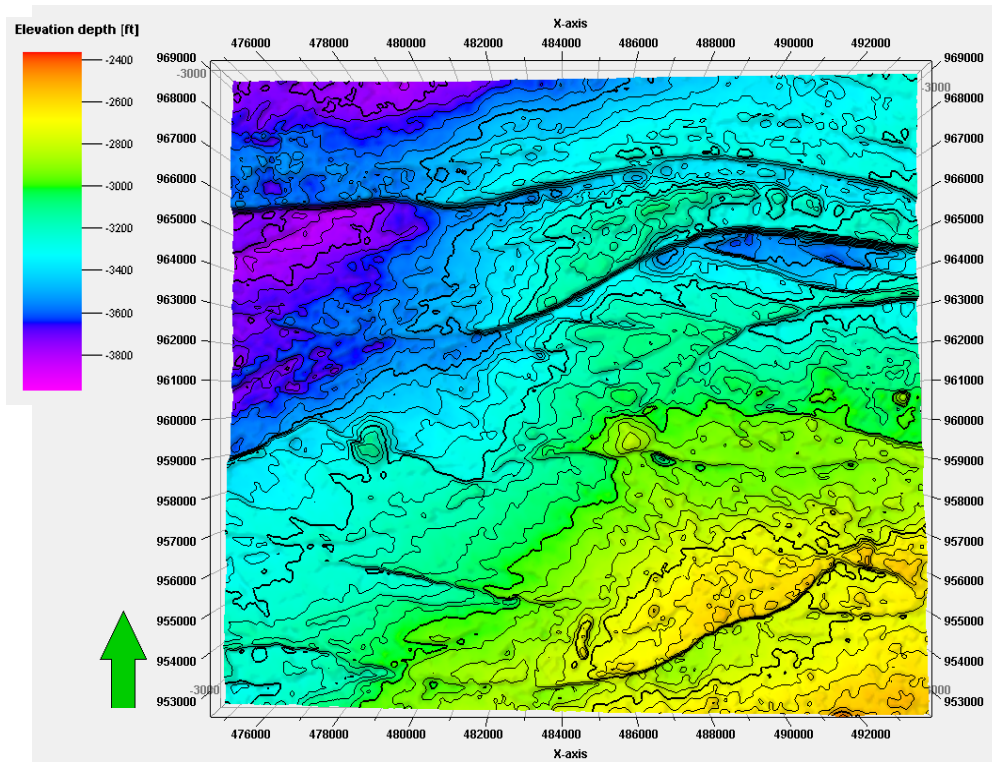


b)

Figura 44. Mapas en Profundidad de a) Pilón y b) Jobo



a)



b)

Figura 45. Mapa en profundidad a) morichal medio y b) basamento

#### 4.4 Modelo Estructural 3D

La elaboración del modelo estructural tridimensional en primer lugar requiere realizar el modelado de cada una de las fallas interpretadas en el área, en este paso se define la forma y la geometría de cada una de las fallas a ser modelada, posteriormente se realiza la construcción de la estructura principal del modelo definiendo el tamaño y la orientación de la malla estructural y finalmente se lleva a cabo el modelado de horizontes honrando la malla establecida en el paso anterior a este. Todas estas actividades se ejecutan utilizando la aplicación Petrel®. La figura 46 muestra el flujo de trabajo seguido para la construcción del modelo estructural 3D.

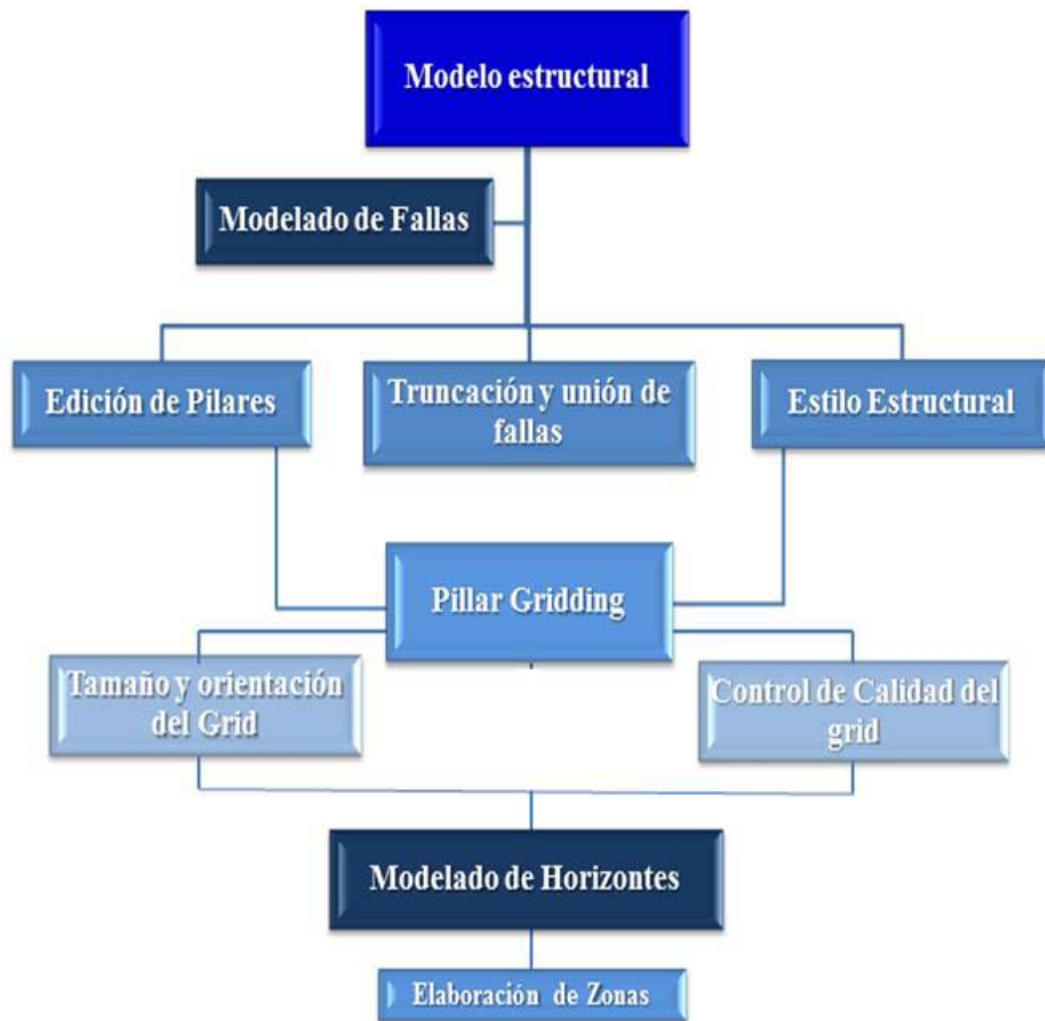


Figura 46. Metodología empleada en la elaboración del modelo estructural

#### 4.4.1 Modelado de Fallas

En esta sección según el estilo estructural y la historia tectónica del área se realiza la edición, truncación, intersección o unión de las fallas interpretadas. Cada uno de los segmentos de fallas interpretadas se convierten en segmentos llamados pilares en el proceso denominado *Fault Modeling* por la aplicación Petrel® (Figura 47).

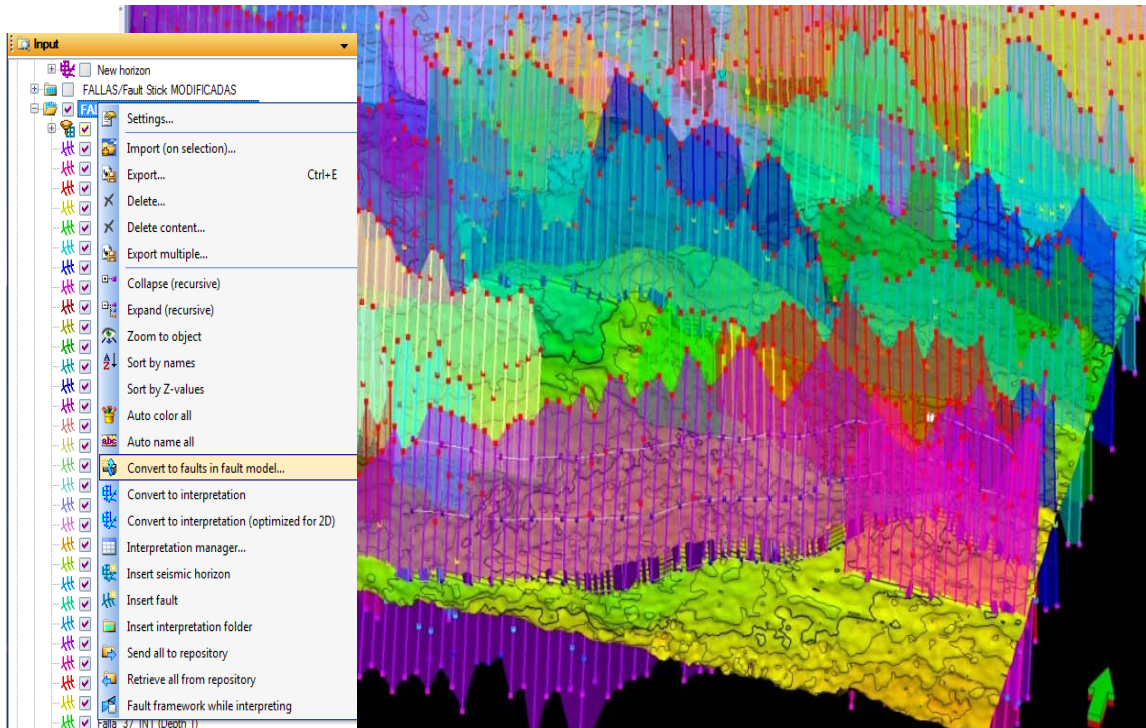


Figura 47. Fallas interpretadas convertidas a pilares en el proceso de *fault modelling*.

Una vez que hayan sido convertidas las fallas en el proceso de *fault modelling* se procede a realizar la edición de cortado y extendido de cada una de las fallas entre los horizontes tope y base correspondientes a la zona de estudio, para el caso que nos ocupa se realizó entre el miembro Pílon de la Formación Oficina al Basamento respectivamente, al momento de la interpretación de cada una de las fallas cada pilar tenía un tamaño diferente como muestra la figura 48. En el desarrollo de esta fase se estima que todos los pilares queden uniformes y parejos puesto que con estos se elaborará el plano de cada una de las fallas a ser modeladas dentro de la zona de estudio (figura 49).

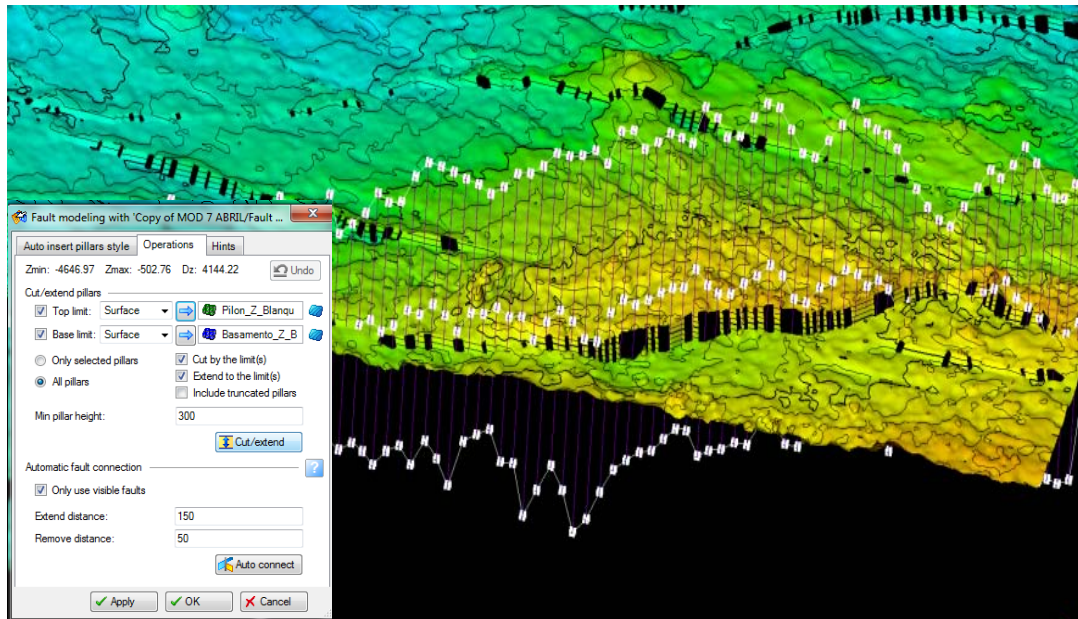


Figura 48. Proceso de delimitación del área a modelar.

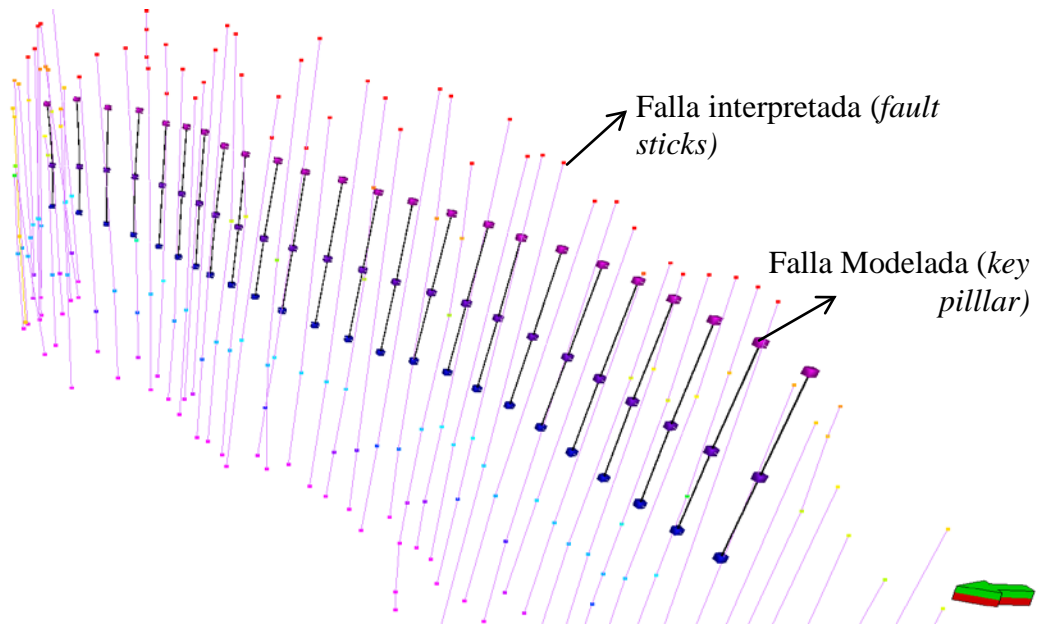


Figura 49. Falla interpretada y falla modelada

Una vez que todas las fallas son cortadas y extendidas se procede a visualizar y editar cada una de ellas, según el sistema de esfuerzos presentes en el área y la información visualizada en los datos sísmicos, durante esta etapa se hace una revisión de la

distribución espacial de las fallas, es decir, cuales se truncan, cuales se conectan y cuál es la disposición real, cortando y editando la expresión y longitud de las fallas de ser necesario (Figura 50 y 51), manteniendo que éste sea lo más fiel posible a la interpretación original.

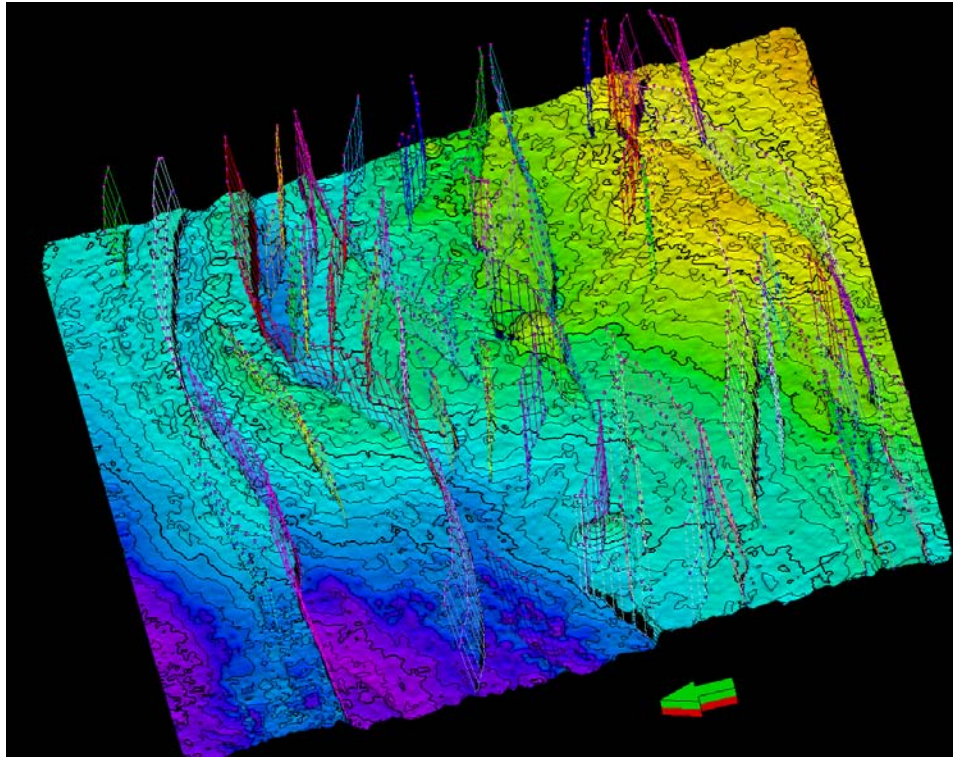


Figura 50. Fallas a modelar cortadas y extendidas.

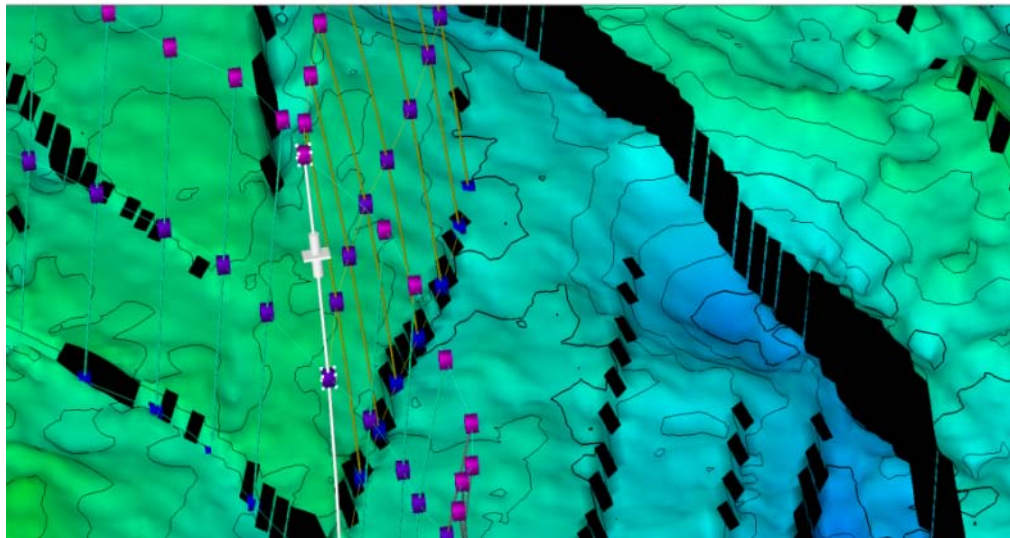


Figura 51. Vista de la falla interpretada y la modelada.

La figura 52 muestra la edición de cada uno de los pilares correspondiente al intervalo de interés, en este caso miembro Pílon y del Basamento.

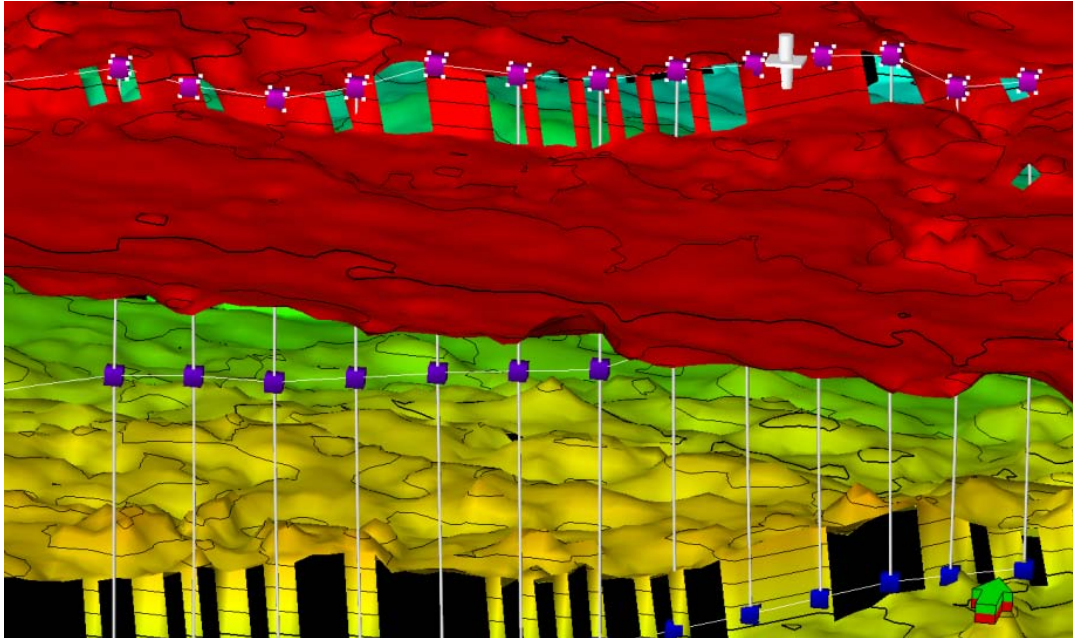


Figura 52. Modelado de fallas extendiéndolas hasta los horizontes tope y base del modelo.

#### 4.4.2 Mallado Estructural

Una vez modeladas cada una de las fallas se procedió a la elaboración de la estructura principal del modelo estadístico, la cual está formada por los planos de fallas y la configuración geométrica de las celdas determinadas para el mallado estructural. Esta armazón estructurada por cada uno de los pilares que conforman cada falla recibe el nombre de *skeleton* en la aplicación Petrel® y es el resultado del proceso denominado *pillar gridding* de la misma aplicación, para optimizar la forma y disposición de las celdas se aplica lo que el programa denomina direcciones I, J el cual tiene como objetivo guiar el proceso de control de orientación de las celdas haciendo que éstas sean paralelas a las fallas y así reducir o eliminar si es posible la deformación de las mismas.

La configuración geométrica y el tamaño de las celdas que constituyen el *skeleton* se fija tomando en cuenta la mínima distancia entre pozos el espaciamiento con que se realizó la interpretación y el tamaño del bin, así mismo se determinó y fijo un tren de dirección en orden de preservar la regularidad de las celdas del grid tomando como dirección principal las fallas con orientación aproximada de N70°E, la figura 53 muestra la disposición final de las fallas y la dirección asignada.

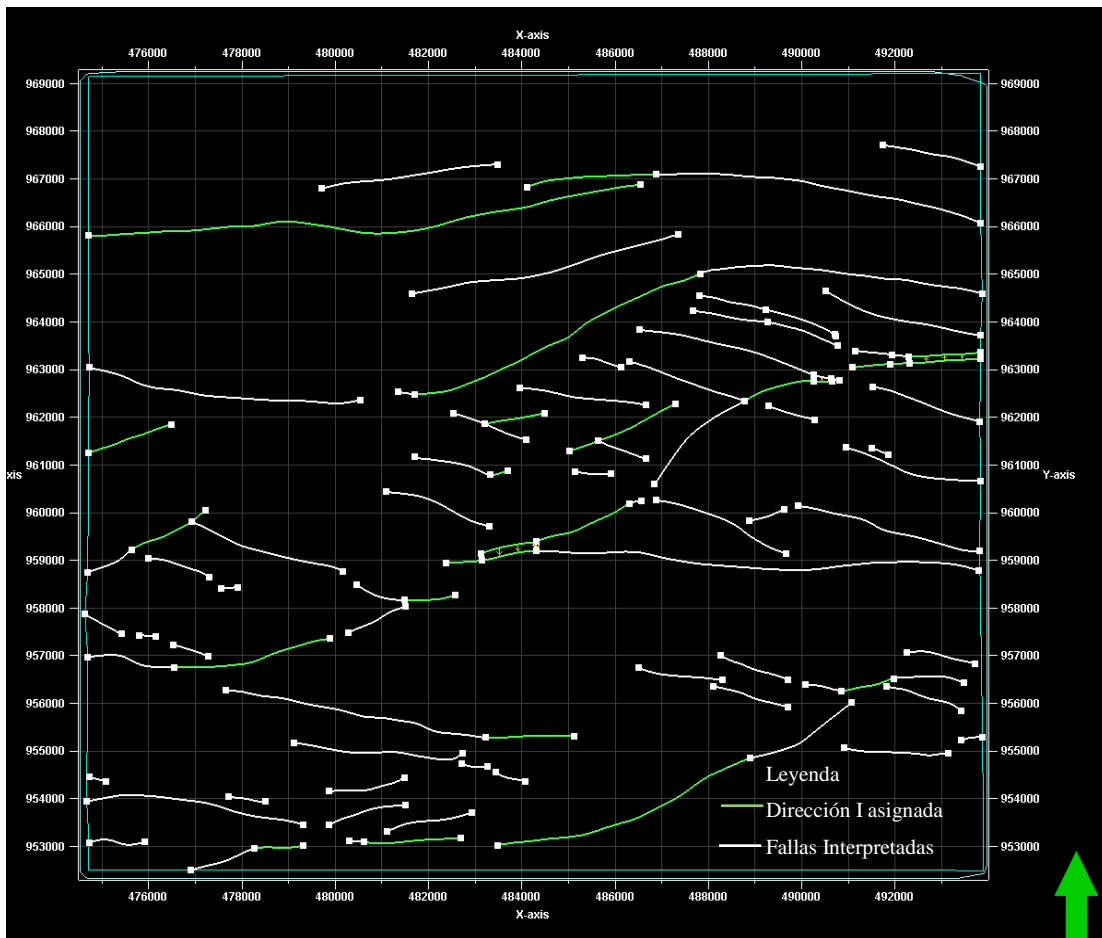


Figura 53. Disposición final de las fallas y direcciones asignadas.

Una vez que se haya determinado las orientaciones finales se procede a elaborar la malla (*grid*) para ello es necesario determinar el espaciamiento entre celdas, en vista de que cada celda tendrá un valor de propiedad en el momento de realizar el modelo estadístico esta debe garantizar que no haya perdida de información, por lo tanto no

deben haber dos pozos en una misma celda siendo de vital importancia que el tamaño elegido honre esta información, se determinó que la mínima distancia entre pozos ubicados dentro del área es de 300 m, con base en el análisis anterior y considerando que la interpretación fue hecha cada 10 IL y 10 XL, el tamaño del *bin* es de 20 m se tendrá data fiable cada 200 m, por lo tanto se realizó una primera prueba del modelo con un tamaño de celda de 200x200 obteniendo un mallado en horizontal de 8550 celdas sin considerar espesores, pero dicho modelo no ajustaba bien de acuerdo al espaciamiento entre fallas por lo que se realizó una segunda prueba 100x100 obteniendo una cantidad de celdas de 34200 con un ángulo de inclinación de 15° con respecto a la horizontal (Figura 54) obteniendo así una mejor disposición minimizando la deformación de las celdas del modelo.

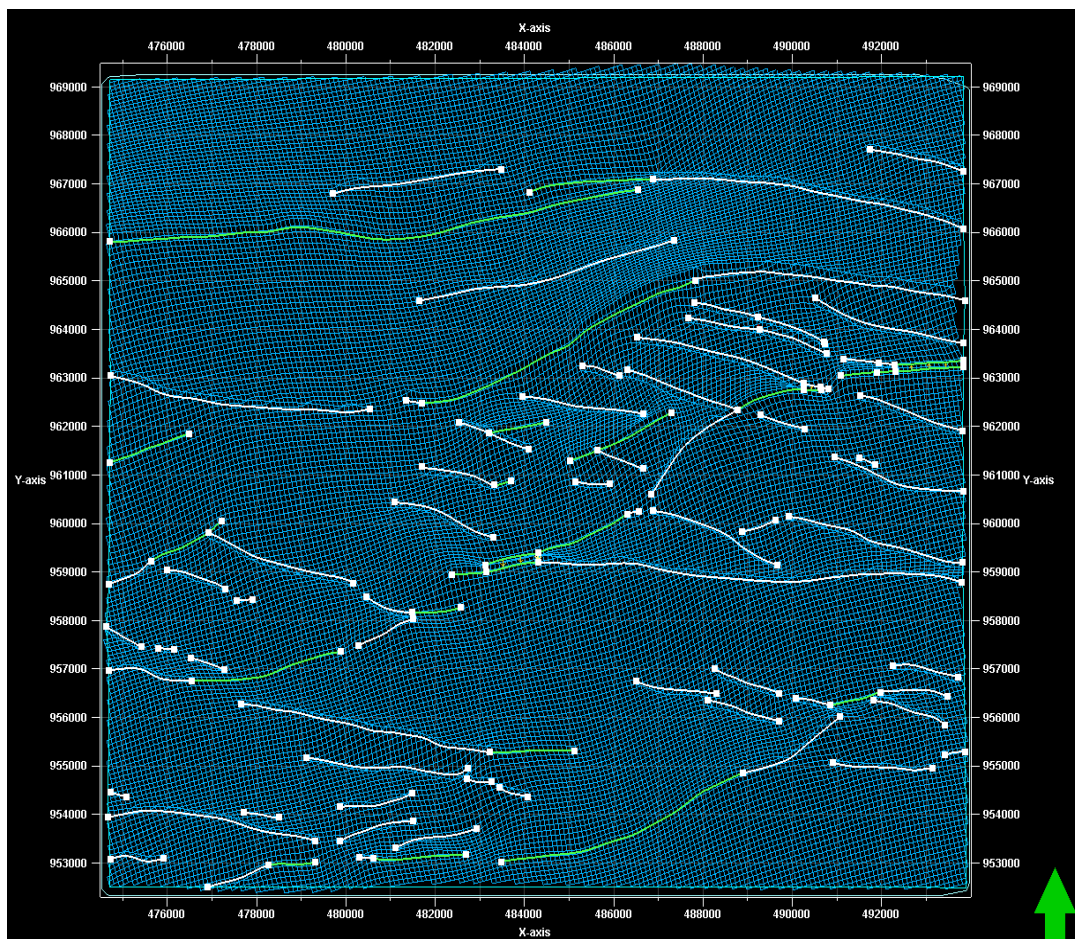


Figura 54. Grid 100x100 con fallas.

En la figura 55 se observa la disposición 3D de la malla, el programa realiza 3 mallas estructurales, en el cual considera el tope, la base y un punto medio sobre el cual se realizará el modelado de horizontes, este proceso se repite tantas veces sea necesario para que la malla elaborada no tenga picos anómalos o deformaciones que puedan dañar el horizonte modelado y reproducir el plano de falla lo mejor posible (figura 56).

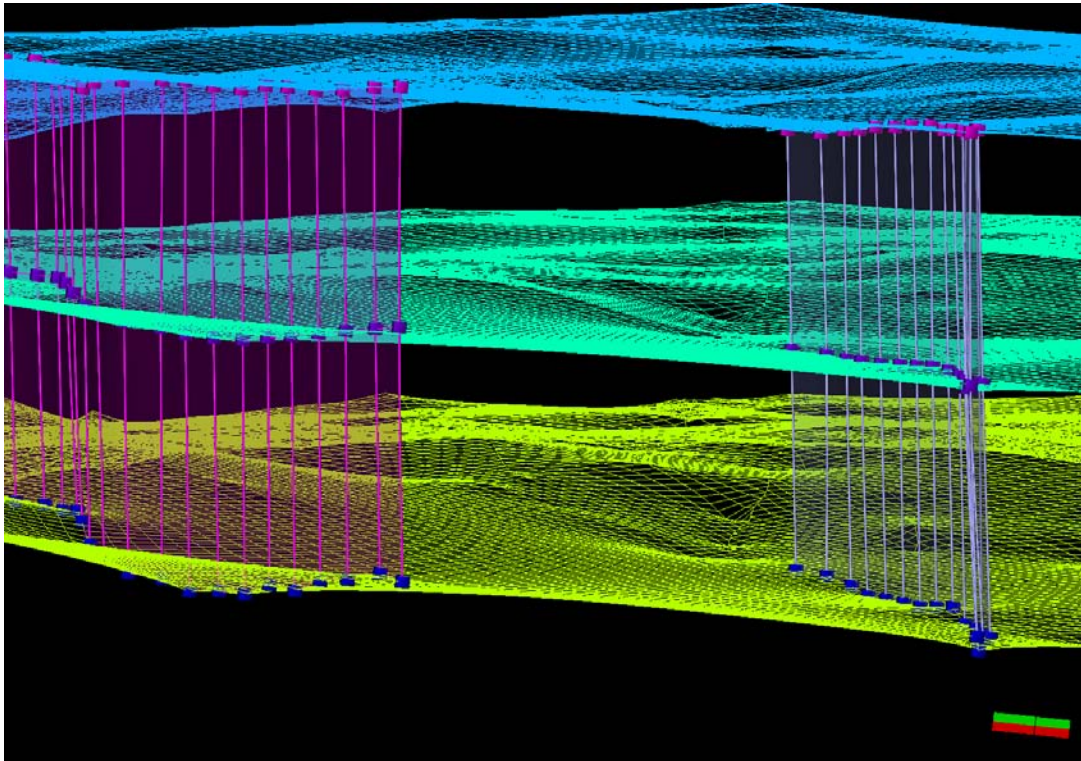


Figura 55. Grid final 100x100

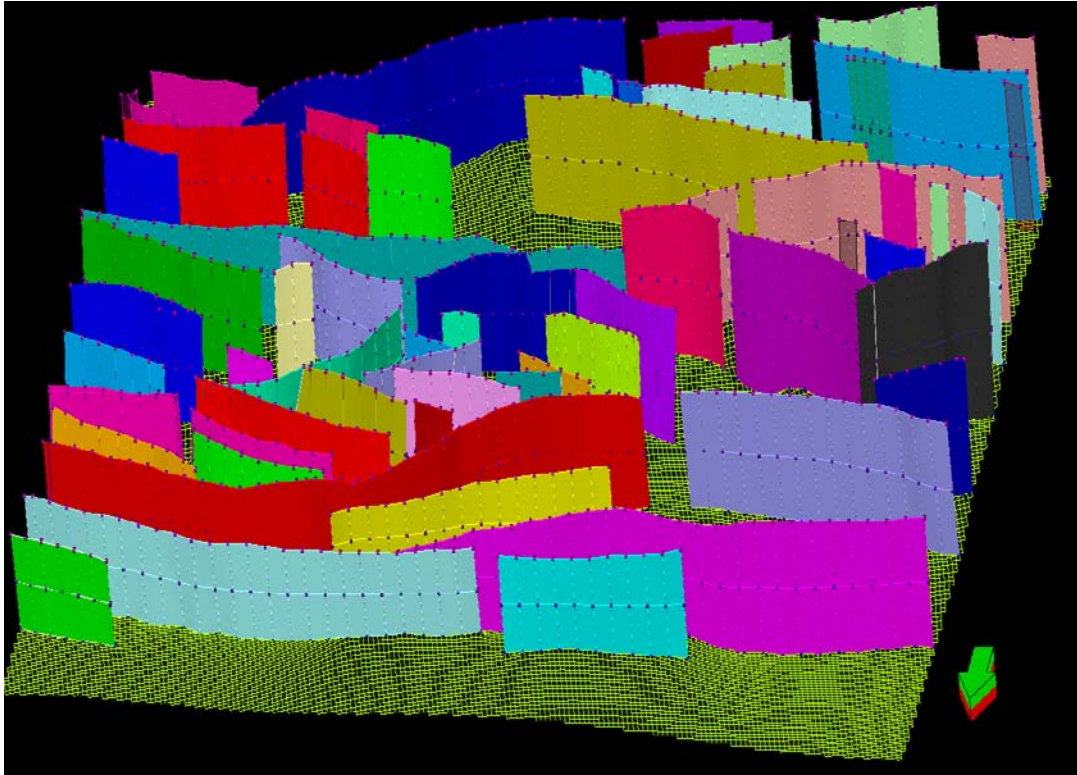


Figura 56. *Skeleton* del modelo y plano de falla modelada.

#### 4.4.3 Modelado de Horizontes.

Para realizar el modelado de horizontes se utilizó la opción de Petrel® denominada *Make Horizons* en el cual se utilizaron las superficies interpretadas ya convertidas a profundidad de los miembros Pilón, Jobo, Morichal Medio de la Formación Oficina y el correspondiente al Basamento, también se consideraron los marcadores geológicos que el programa requiere para que honre en esa extensión la relación entre el horizonte original en profundidad y el modelado.

Este proceso depende de la calidad del modelado de fallas, una vez que estén modeladas se procede a ejecutar el proceso de *make horizon* como muestra la figura 57 introduciendo como datos de entrada los horizontes en profundidad y los topes correspondientes de cada una de estas superficies, durante este proceso se varían las distancias de influencia de las fallas de forma general y si se producen cambios en la

disposición del bloque, se procede a variar las distancias por cada horizonte individualmente a fin de que honre el salto de falla de cada una de las fallas modeladas (Figura 58 y 59).

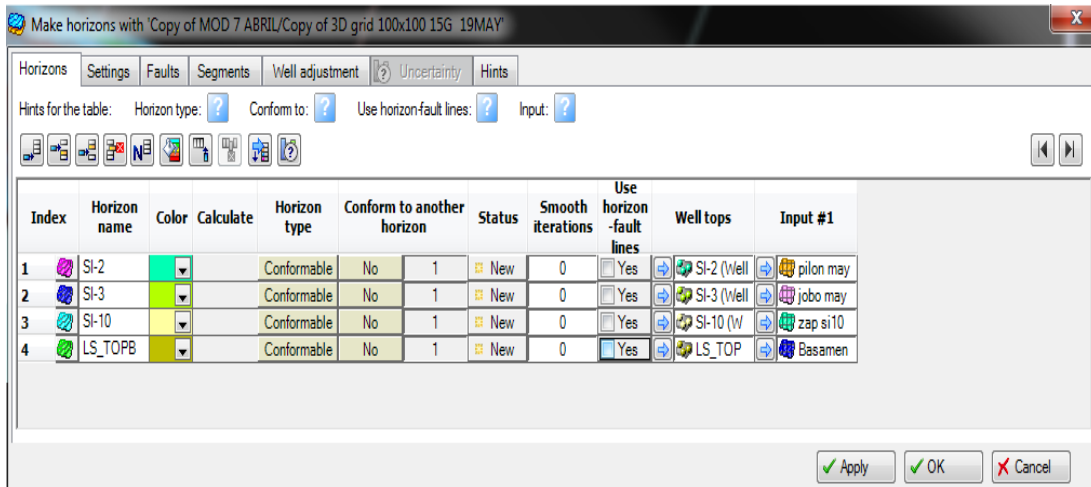


Figura 57. Elaboracion de los Horizontes del Modelo



Figura 58 Distancia de Influencia de la falla respecto al horizonte

La figura 59 muestra la lista de las distancias modificadas para cada falla que fue aplicado de manera general, así mismo para cada horizonte de acuerdo a la interacción de éstos con las fallas se procedió a modificarlas individualmente y de esta manera obtener un resultado más óptimo.

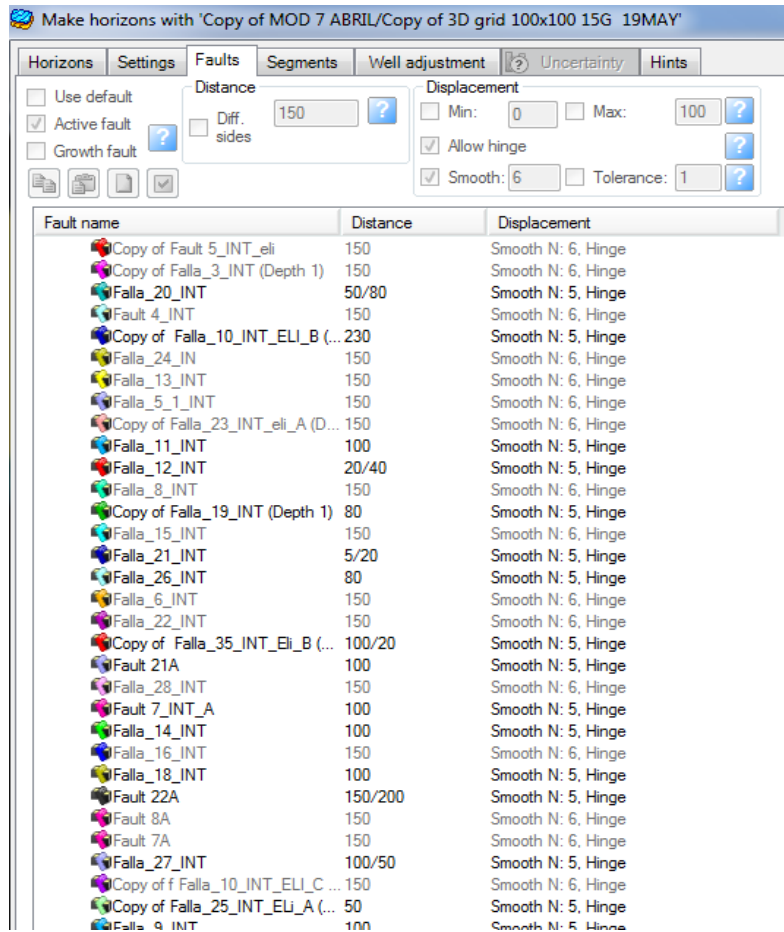


Figura 59 Distancias modificadas para cada falla.

Una vez que se completó el proceso anterior, se observó que aún persistían los problemas entre los bloques levantados y deprimidos se realizó el proceso de edición manual de cada falla puesto que de este dependerá la distancia del salto de falla para cada horizonte. En la ejecución del trabajo en el 80% de las fallas bastó con la variación de la distancia de influencia de cada falla, una vez finalizado este proceso se tienen los horizontes modelados finales, una vez ejecutado este proceso se visualizaron todos los planos de falla y se observó un caso anómalo, producto del proceso de truncación, al generar el plano hubo un desfase cortándose los planos entre sí, por ello se procedió a editar manualmente con ayuda del proceso *3D grid* los pilares del plano (Figura 60).

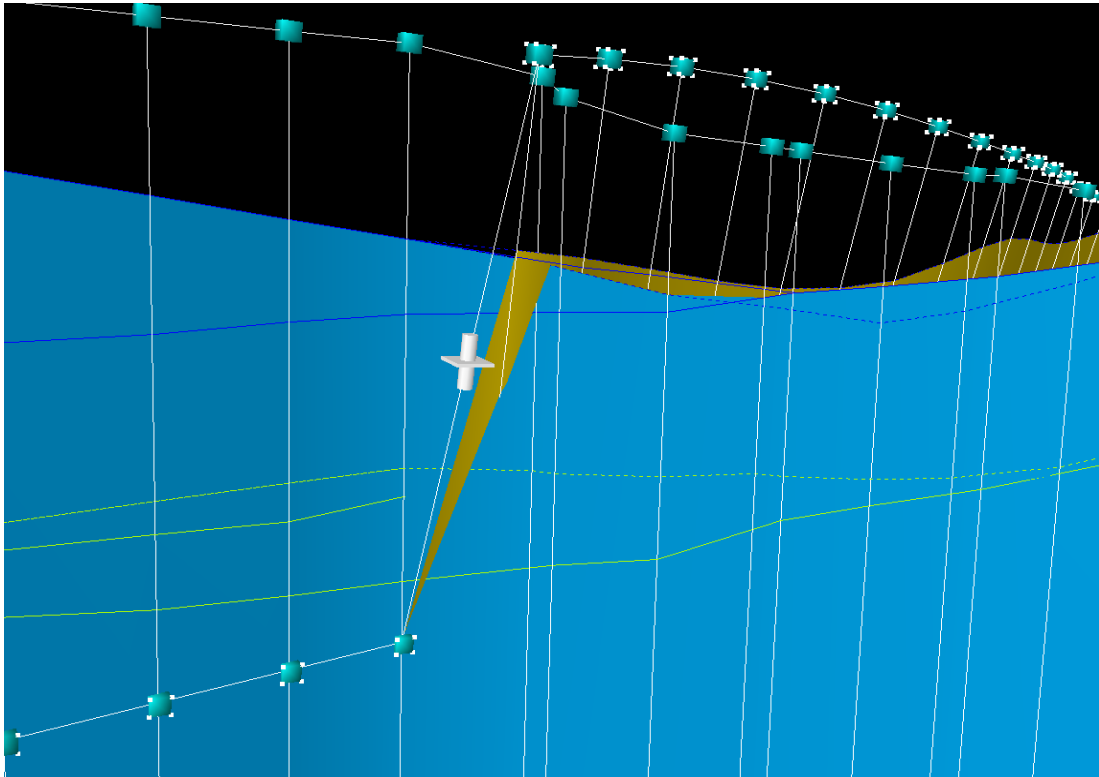


Figura 60. Modelado manual del plano de falla.

Posteriormente una vez verificado que todos los planos de fallas esten correctos se procedió a modificar las distancias de las fallas para obtener el modelado final del horizonte, ajustando el salto de falla de cada uno de los planos respecto a los horizontes del modelo, se procede a visualizar los bordes para verificar que el bloque levantado y deprimido de cada horizonte sean iguales, es decir, los cuatro horizontes modelados deben tener para todos el mismo bloque levantado y deprimido verificando que no se produzca un cruce entre éstos.

Una vez culminado el proceso anterior se generan los horizontes modelados como se observa en la figura 61 y 62,

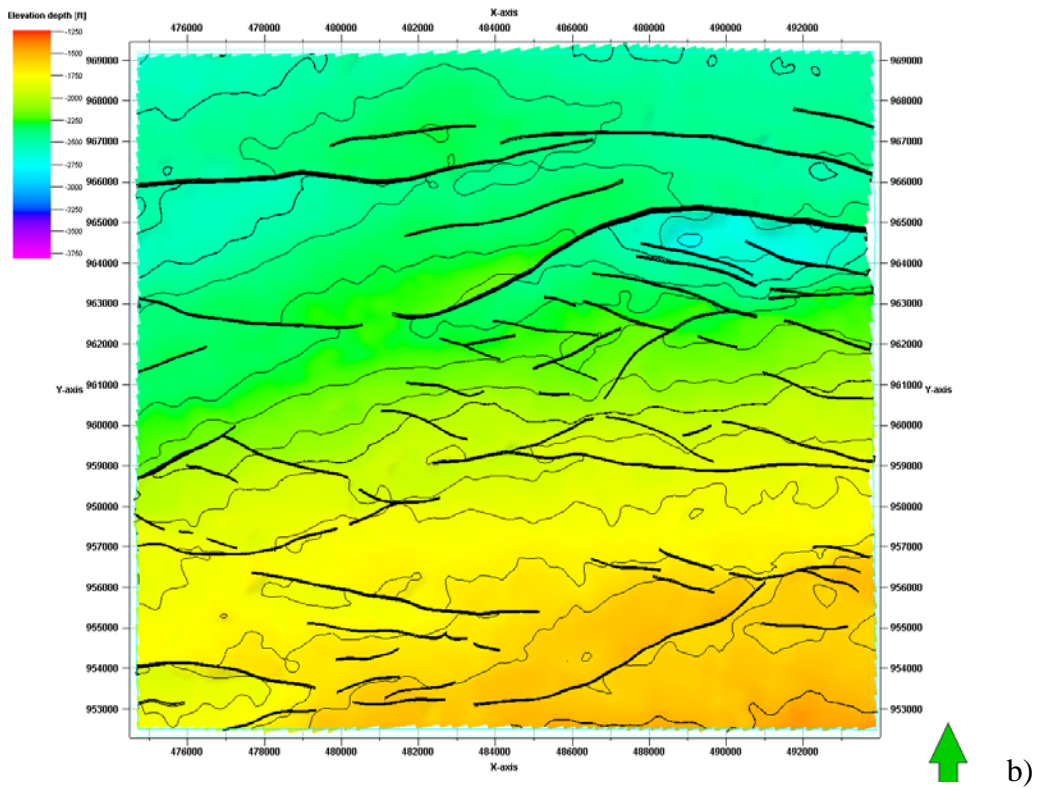
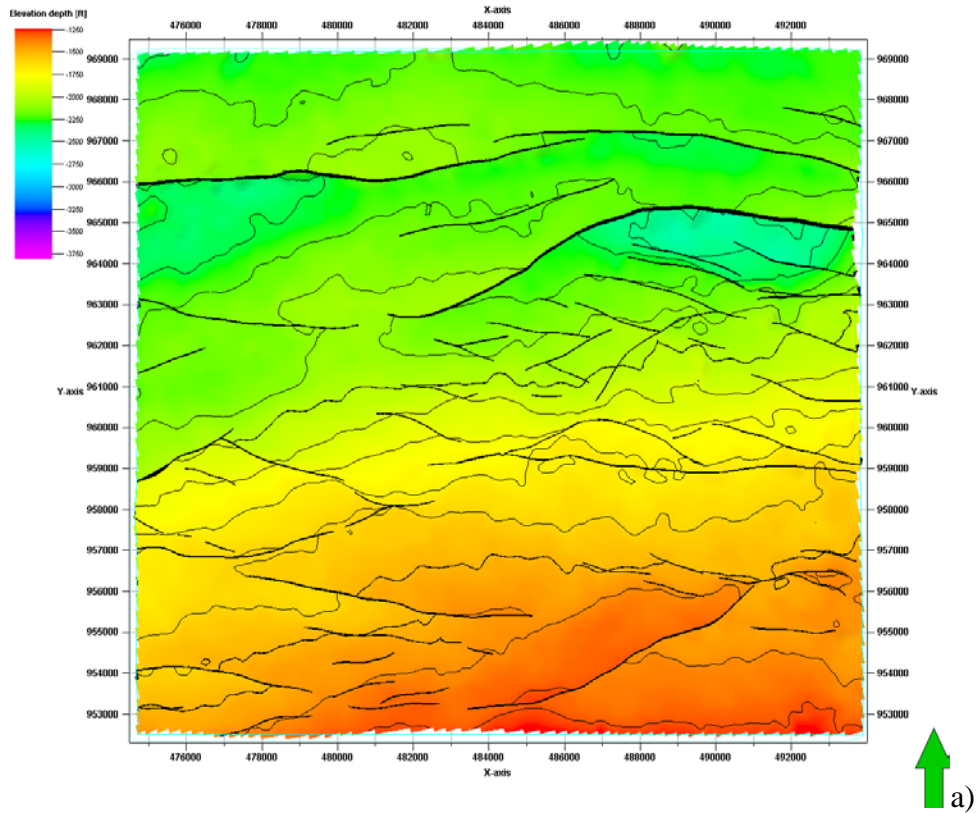


Figura 61. Superficie modelados en profundidad de a) Pilon b) Jobo

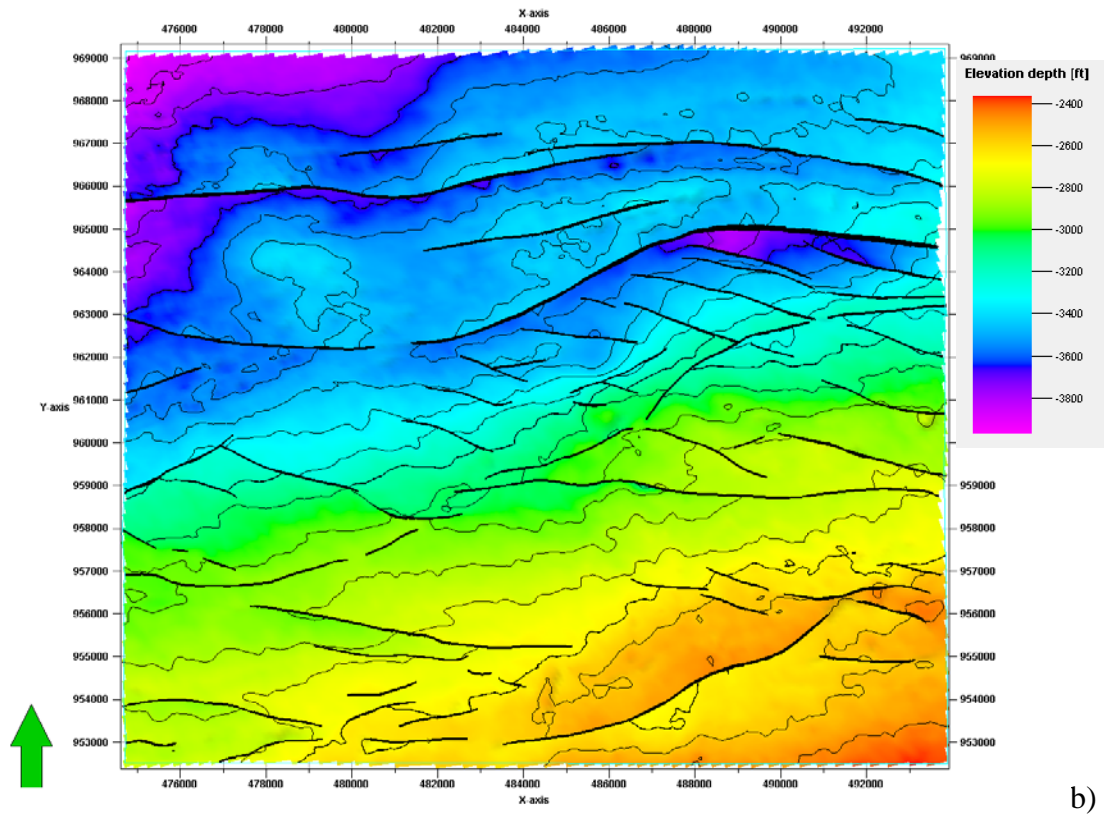
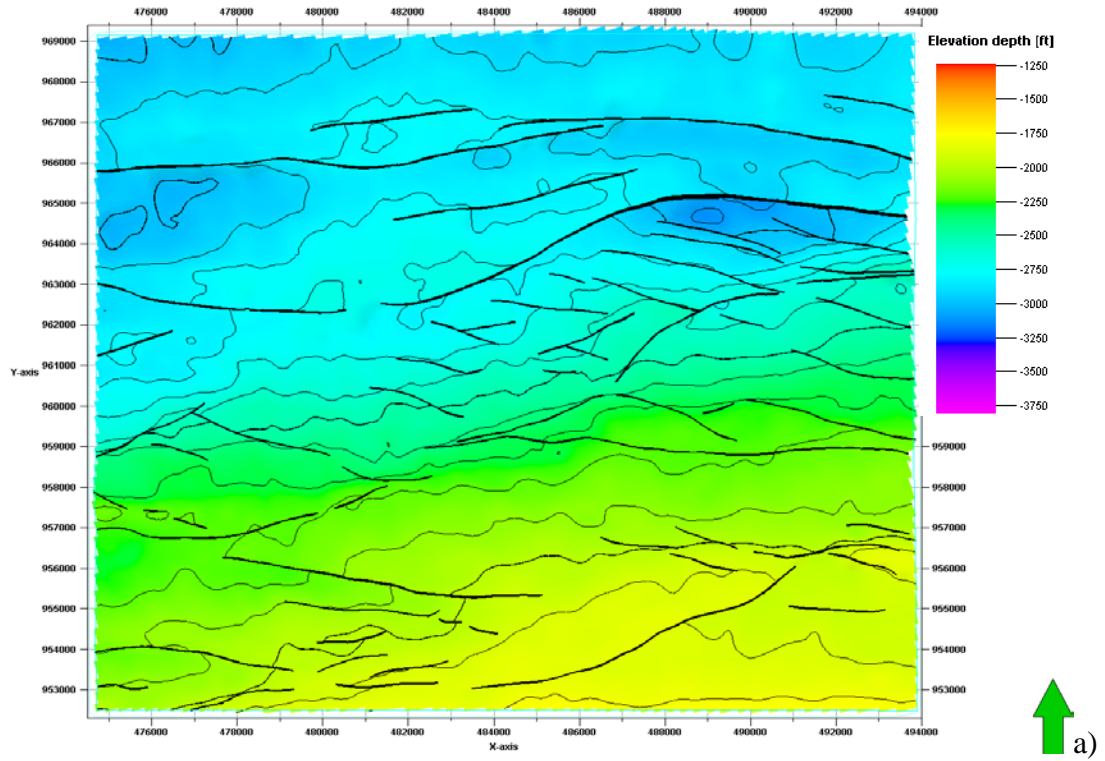


Figura 62. Superficie modelados en profundidad de a) Morichal Medio b) Basamento

Al momento de generar los horizontes modelados finales el algoritmo de la aplicación Petrel® genera zonas por defecto, que consiste en las áreas existente entre los horizontes empleados en el proceso por ello la figura 63 muestra 3 zonas correspondientes al intervalo entre las superficies modeladas de Pilón-Jobo, Jobo-Morichal Medio y Morichal Medio- Basamento.

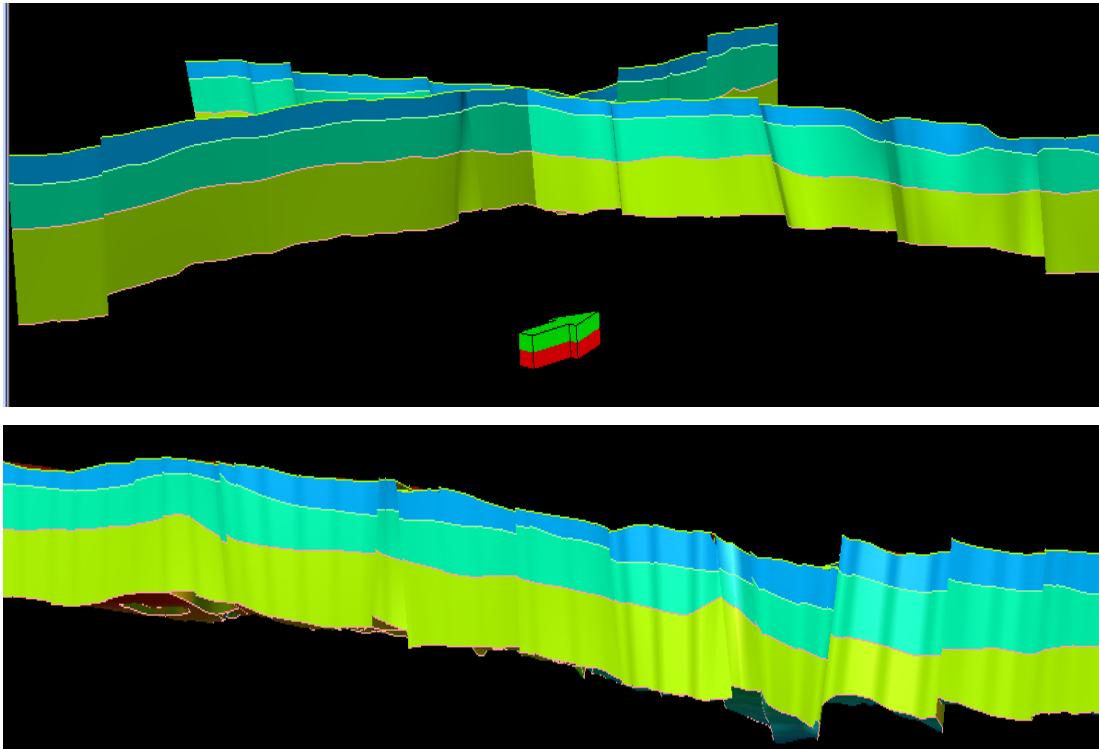


Figura 63. Visualización de las zonas generadas por el modelo.

El intervalo de trabajo corresponde a la Formación Oficina dentro de esta se tienen 4 miembros principales mencionados con anterioridad correspondientes a Pilón, Jobo-Yabo, Morichal y Basamento, estos a su vez fueron divididos en 15 unidades de producción como muestra la figura 12, como fueron interpretados y modelados 4 horizontes se procedió a elaborar las zonas correspondientes de cada una de estas unidades de producción siguiendo los marcadores geológicos correspondientes y la tendencia de depositación existente en la zona, puesto que dentro de este intervalo no se observó anomalías geológicas en su depositación (Figura 64).

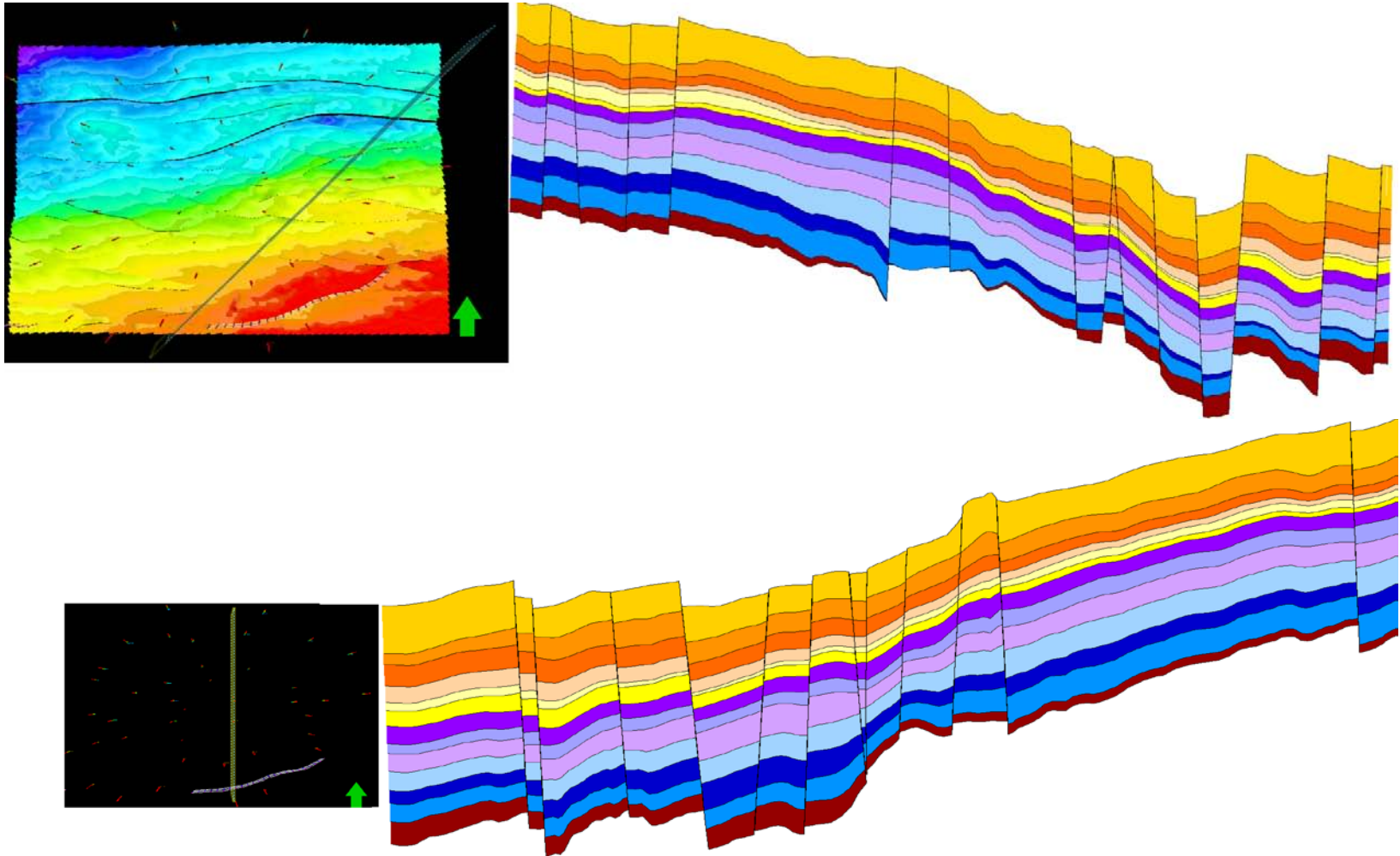


Figura 64. Visualización de diferentes perfiles del modelo estructural

## CAPITULO V

### ANALISIS DE RESULTADOS

#### 5.1 Calibración Sísmica

La calibración sísmica es un paso importante en el proceso de interpretación, de esta etapa dependen los trabajos sucesivos que se deban realizar con los datos sísmicos si se requiere realizar la interpretación de marcadores geológicos de interés y su posterior conversión a profundidad, en la elaboración de este proyecto fueron generados 15 sismogramas sintéticos para este proceso la ondícula que mejor calibró fue de tipo trapezoidal y la extraída de la sísmica mostrando correlaciones entre 30 y 55% con un desfase inferior a un milisegundo, para estas ondículas usadas se obtuvieron valores de coeficientes de correlación altos.

La figura 36 muestra la calibración del pozo P-A cuyo coeficiente de correlación es de 40% mostrando un desfase de 2 grados, para dicha correlación se utilizó un filtro trapezoidal, si se utiliza la ondícula extraída de la sísmica en la ventana de interés que va de los 500 ms hasta los 1200-1400 ms dependiendo de la ubicación del pozo la correlación es cercana al 70% este método fue aplicado para la elaboración de varios sismogramas (Figura 32).

#### 5.2 Resolución vertical.

En la figura 32 se puede observar que el espectro de frecuencia tiene un comportamiento trapezoidal, el rango de frecuencias dominante oscila entre los 20 y 80Hz de acuerdo a varios espectros que fueron extraídos en la zona norte, sur, este y oeste del campo se observó que en promedio el comportamiento del espectro de frecuencia del campo es similar. Las frecuencias oscilan entre los 20-30hz hasta 70-80hz, como valor medio se tomó una frecuencia promedio de 50 Hz, siendo esta la

frecuencia dominante dentro de la ventana de estudio, se obtuvieron los valores de la tabla 4.1, tomando en consideración las profundidades de los topes y posibles espesores que presentan las diversas unidades estratigráfica se procedió a calcular el rango estimado de resolución vertical tomando como ejemplo 2 pozos del área.

La tabla 4.1 sintetiza la información de los topes con sus respectivas profundidades, espesores y las velocidades obtenidas del *checkshot* del pozo para cada profundidad del marcador geológico en estudio y se procedió a elaborar el cálculo de la resolución sísmica para las frecuencias de 20, 50 y 80 hz dadas en metros, por lo tanto se verifica que cada uno de los topes estratigráficos fueron muestreados dentro de la adquisición del volumen sísmico, puesto que el rango de espesores va entre 60,7 ft y 309,3 ft y el rango de frecuencia promedio (50 hz) indica que el mínimo espesor para ser muestreado es de 60,7 ft.

### 5.3 Interpretación de Fallas.

Para la elaboración del modelo estructural fueron consideradas las fallas interpretadas en el marco del proyecto Carabobo-Ayacucho, dichas fallas sirvieron de base para la validación o reinterpretación de las mismas según fuese el caso, para ello se siguió el patrón de fallas descrito por la figura 65 característico de un sistema rumbo deslizante donde se observaron 2 familias de fallas. La dirección principal corresponde a fallas transcurrentes con componente normal de dirección E-O con un ángulo de inclinación de 20-30° aproximadamente característica del sistema de esfuerzo al que está sometida la región, la segunda familia de fallas corresponde a fallas secundarias o de reacomodo originando estructuras tipo *echelon* como se ve en la figura 65 y 66 que describen el sistema de fallas en base al régimen de esfuerzos existente en la zona y lo mostrado por el mapa de atributos estructurales mencionado anteriormente.

De acuerdo a la orientación y densidad de las fallas se dividió el campo en 4 zonas, la zona A esta ubicada al norte del campo caracterizada por una baja densidad de

fracturas asociándolo probablemente a litologías más resistentes donde se observan solo fallas principales, inferior a esta se ubica la zona B enmarcada entre dos fallas principales dentro de ésta presenta una gran densidad de fallamiento caracterizado principalmente por fallas secundarias o de reacomodo, las fallas de las zonas C y D presentan la misma dirección de las fallas principales cuya densidad de fallamiento disminuye hacia el sur.

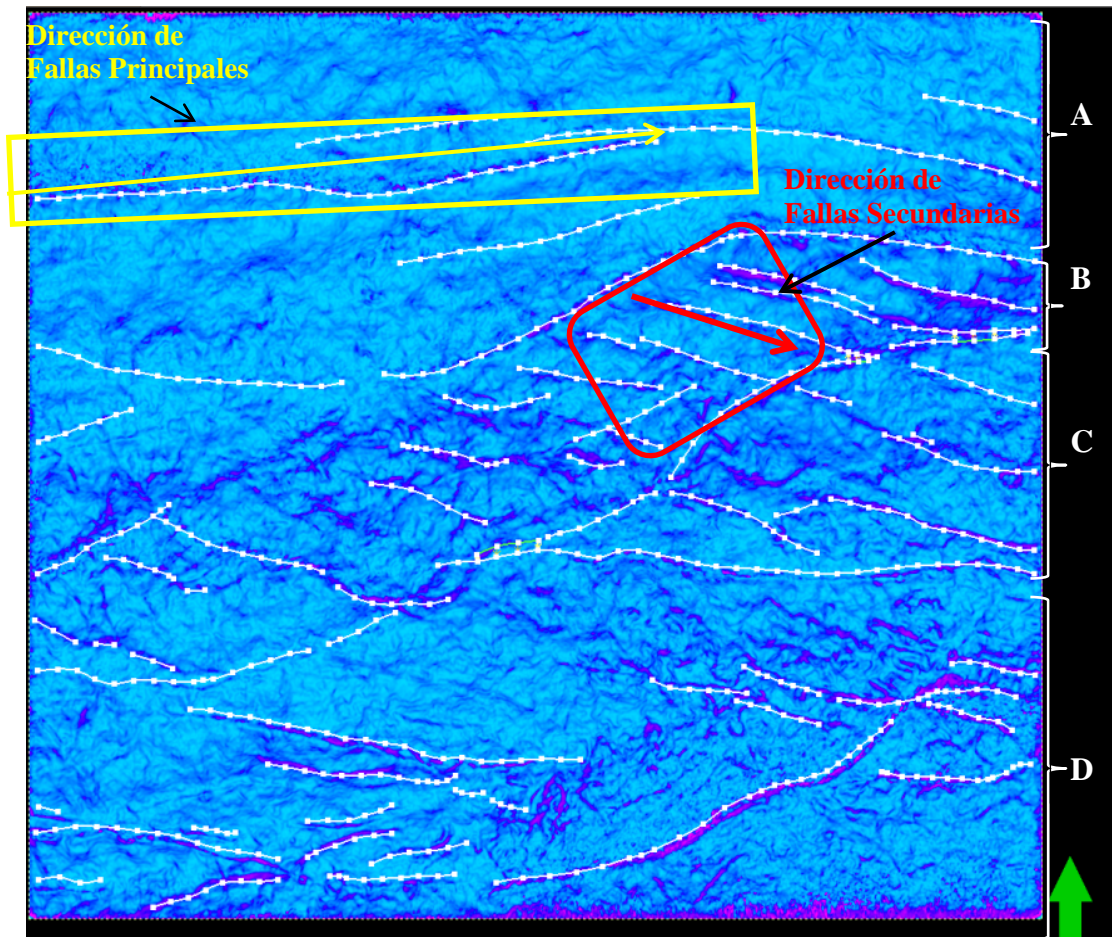


Figura 65. Familia de Fallas identificadas.

Con base en lo antes expuesto, y haciendo énfasis en la literatura del régimen de esfuerzos de la Faja Petrolífera del Orinoco específicamente el campo Cerro Negro ubicado en el flanco sur de la subcuenca de Maturín, está caracterizado por un régimen extensivo con fallas rumbo deslizante observándose estructuras como las

mencionadas anteriormente, donde las fallas cortan los bloques que caen en escalón (*en echelon*) formando estructuras en flor negativas con un ligero ángulo de rotación; estas son estructuras asociadas con fallas de rumbo con desplazamiento normal, las rocas descienden para formar una estructura en flor negativa pudiendo formar trampas de hidrocarburos (Figura 66).

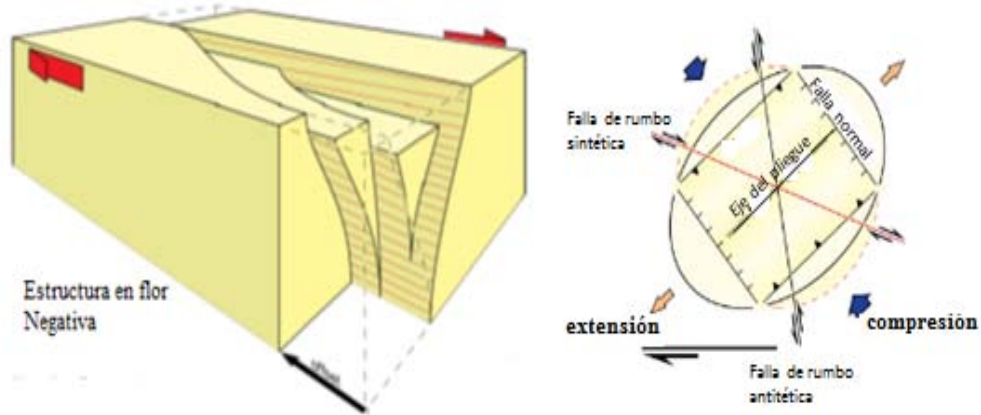


Figura 66. Estructura en flor negativa.

En la figura 67 se observa la visualización 3D y la ventana de interpretación que se utilizó para hacer el análisis de la disposición de las fallas para que, de acuerdo a lo descrito en las figuras 65 y 66 la reinterpretación de las fallas fuese acorde tanto con la sísmica como con la interpretación original. Dependiendo de la expresión y característica de la falla fue unida, truncada y/o simplemente modelada siguiendo las características del patrón estructural de la zona.

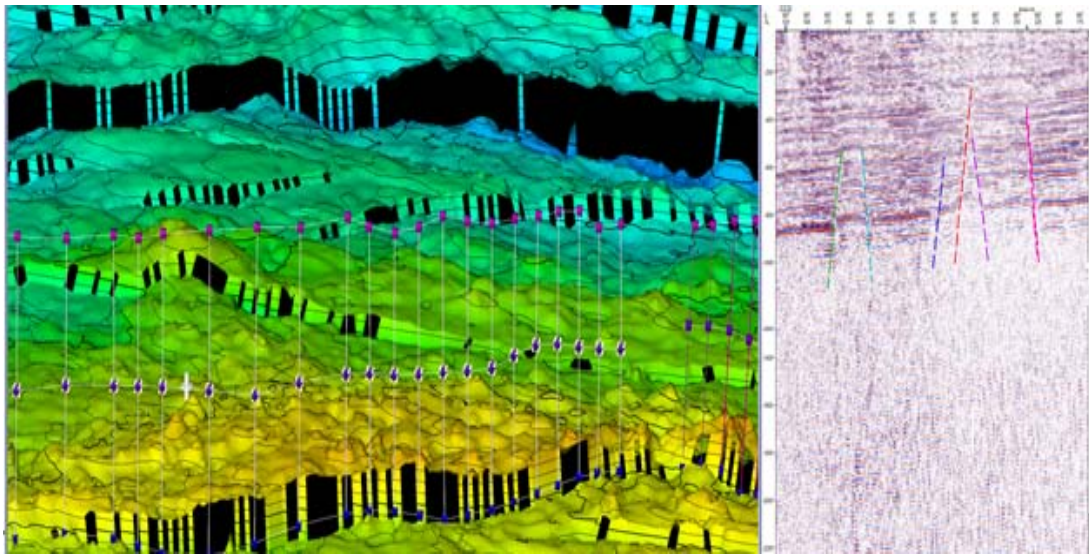


Figura 67. Visualización de Falla en la ventana 3D y en la ventana de interpretación

#### 5.4 Mapas en tiempo.

Se pudo observar que el miembro Pílon tiene un valor mínimo de -796 ms y un máximo a -411.75 ms con una variación 384.25 ms, la zona más somera corresponde al lado sur mientras que la más profunda a la zona norte, el mapa en tiempo correspondiente a basamento tiene un mínimo de -1127.59 ms hacia el norte y un máximo de -673.1 ms al sur con una variación de 454.49 ms siendo proporcional a pílon, dicha variación representa el ángulo de inclinación que posee la superficie, en este caso el basamento, sobre el cual fueron depositados las secuencias sedimentarias, dentro de esta área no se observó cambios bruscos en el espesor de las unidades estratigráficas existentes dentro del modelo, verificando la condición tectónica de que profundiza hacia el norte, siendo la parte sur del campo la más cercana al cratón de Guayana y por ende la zona donde se ubican los máximos en tiempo, vista lateralmente los horizontes interpretados profundizan hacia el norte donde se ubican los mínimos en tiempo, dichas variaciones son progresivas solo en las zonas cercanas a las fallas se observan los cambios bruscos en tiempo (figura 38 y 39).

## 5.5 Modelo de velocidades

Desplegando el registro de velocidades se pudo verificar que en comparación con las velocidades provenientes del checkshot fueron similares en cada intervalo, las tendencias de las tablas tiempo-profundidad generadas presentaron variaciones sistemáticas y no correspondiente a ruido, en las figuras 68 y 69 se observan las tendencias de tiempo-profundidad para cada horizonte, en basamento se observa que a  $-680\text{ms}$  se tiene una profundidad aproximada de  $-2200\text{ft}$  y a  $-1120\text{ms}$  la profundidad es cercana a los  $-3800\text{ft}$ , para el caso de Pílon a  $-420\text{ms}$  tiene una profundidad de  $-1200\text{ft}$  y a  $-800\text{ms}$   $-2400\text{ft}$  aproximadamente, así mismo morichal medio a  $-540\text{ms}$  tiene un profundidad de  $-1600\text{ft}$  y a  $-960\text{ms}$   $-3000\text{ft}$  cabe destacar, que los mínimos y máximos de cada horizonte están ubicados en la misma área, es decir, no hay eventos que modifiquen o alteren la secuencia de depositación.

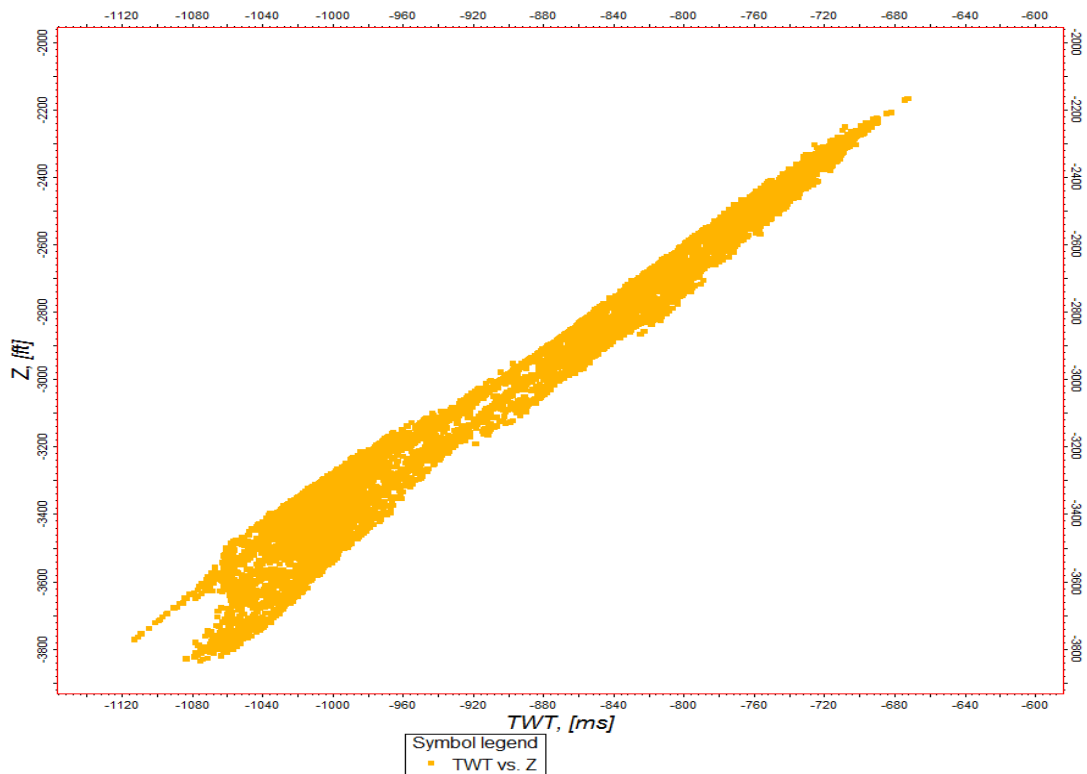
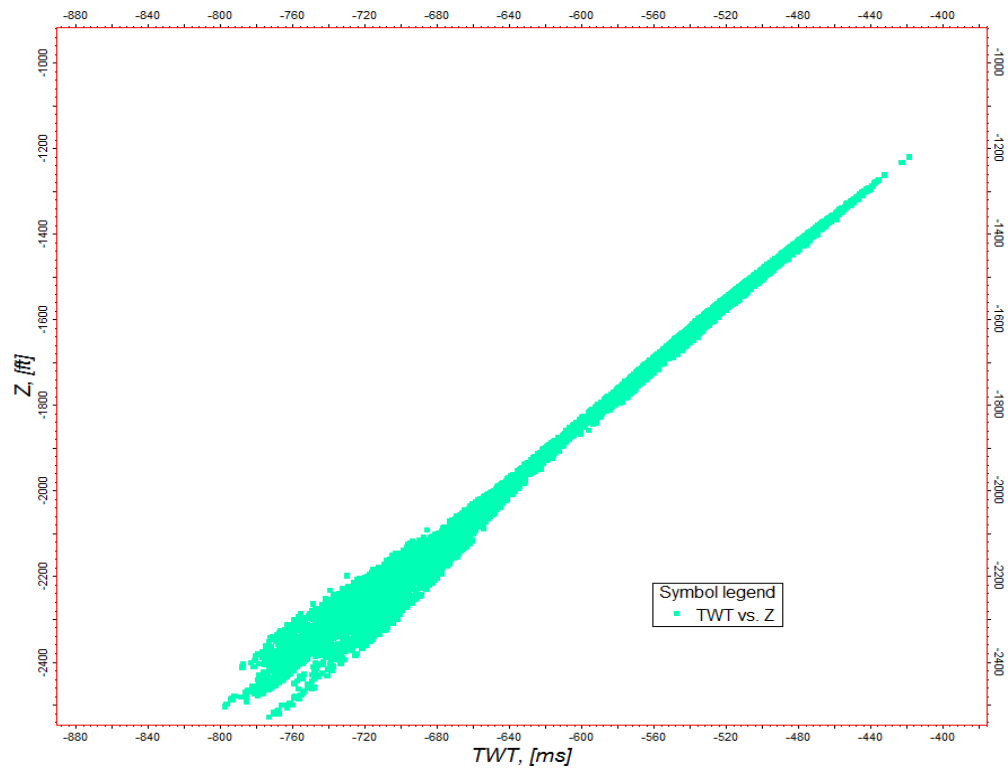
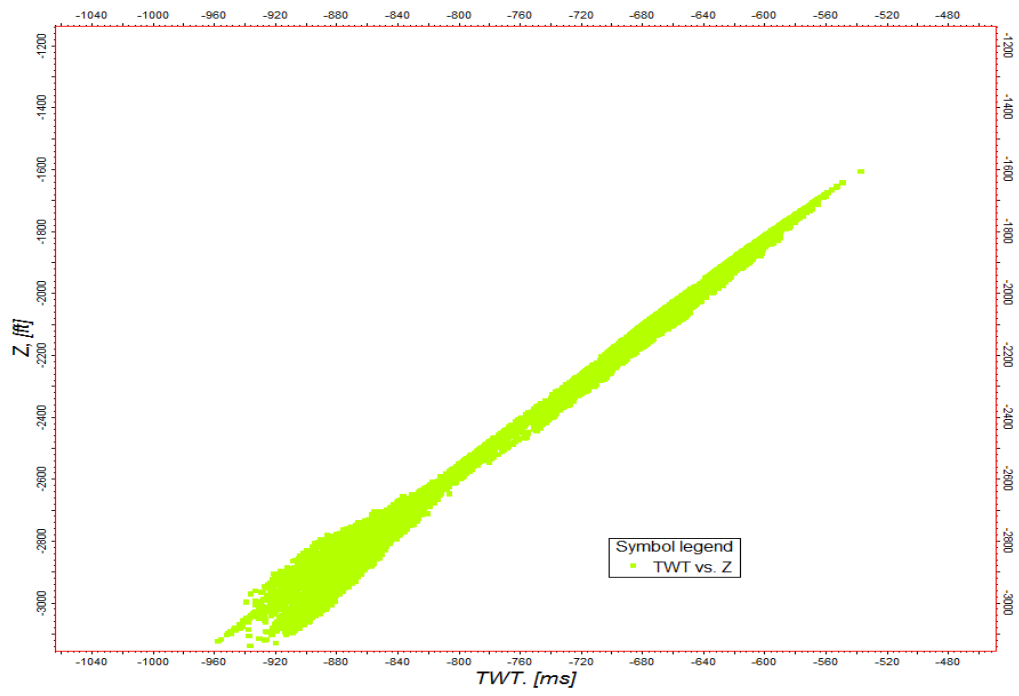


Figura 68. Relación tiempo-profundidad de Basamento



a)



b)

Figura 69. Relación tiempo-profundidad del horizonte a) Pilón y b) Morichal Medio.

La figura 70 muestra la relación tiempo profundidad para las zonas existentes entre horizontes, indicando valores de velocidad inicial y k para cada uno de los pozos que se usaron, dicho valor de k permitió ajustar la tendencia de los valores de velocidad, lo que se observa es un aumento de la profundidad a medida de que aumenta el tiempo, no hubo inversiones en la velocidad ni pendientes anómalas, todos siguen la misma tendencia con diferentes rangos de profundidad, los valores de k para cada pozo son positivos con un valor de 0.7386 lo que varía en cada caso son los valores de velocidad ( $V_0$ ) que el programa calculó de acuerdo al checkshot de cada pozo, aunque se aprecia una tendencia uniforme con ciertas variaciones de acuerdo a las condiciones geológicas presentes alrededor del pozo.

La figura 70a muestra las relaciones tiempo profundidad mostrando la misma tendencia del checkshot donde a 0 ms se tiene 0 ft aumentando uniformemente hasta alcanzar un valor de -2360 ft a 740 ms, en la figura 70b se tiene la relación profundidad-velocidad en el que a 0ft se tiene una velocidad de  $-(5400-5600 \text{ ft})$  siendo este un rango de  $-(1600-1680 \text{ m/seg.})$  el valor máximo de profundidad es de -2360 ft arroja un valor de velocidades entre los 7000-7200 ft/seg. Cabe destacar que pilón está ubicado entre los -1900 ft y -2480 ft aproximadamente, en este caso el programa ejecuta el cálculo de las funciones desde un datum, el nivel del mar, hasta el horizonte a estudiar en este caso el Miembro Pilón.

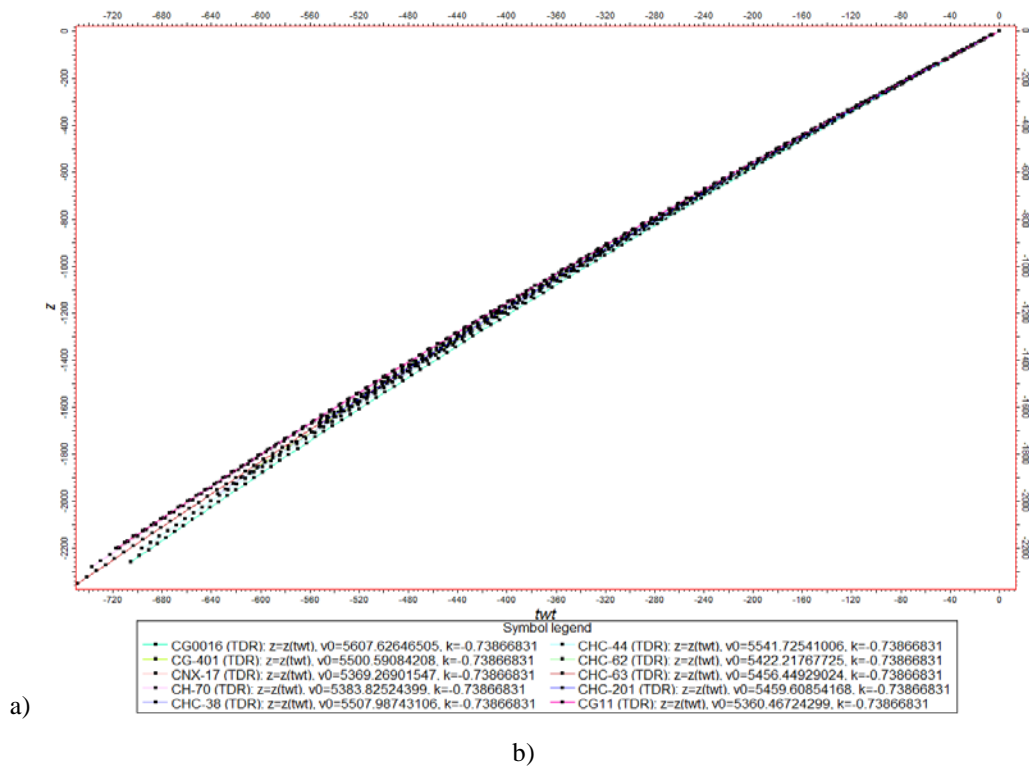


Figura 70. Relaciones a) tiempo-profundidad y b) velocidad-profundidad de Pílon

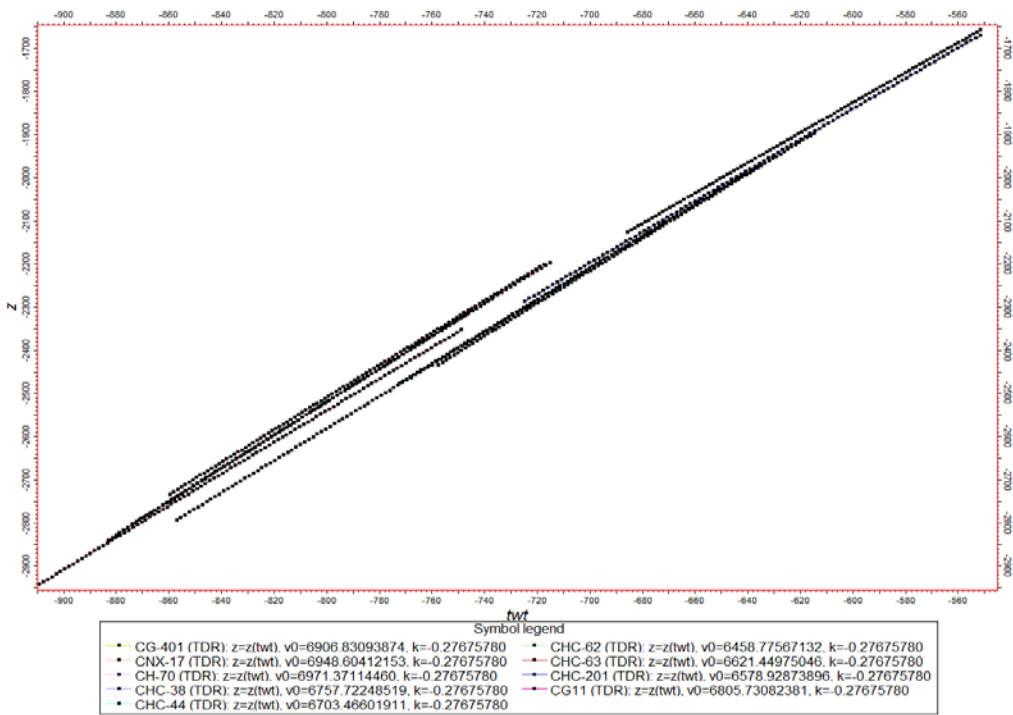


Figura 71. Relaciones tiempo profundidad para la zona Pílon-Morichal Medio.

La figura 71 muestra la función tiempo-profundidad de los pozos utilizados en la zona correspondiente entre Pílon y Morichal Medio en el cual se observa que a -560 ms se tiene una profundidad de -1700 ft aumentando con una pendiente de 0.2767 y a -900 ms se tiene una profundidad aproximadamente de -3000ft correspondiendo estos valores de profundidad al rango estimado entre la superficie de pilón y morichal medio.

La figura 72 muestra la tendencia explicada anteriormente para la zona definida entre Morichal Medio y Basamento en este caso el valor de k es de 1.149 teniendo un aumento significativo con respecto a la zona de pilón-morichal medio esto se puede asociar al cambio litológico que va de arenas características del miembro Morichal de la Formación Oficina y el Basamento cristalino el rango de tiempo para esta zona va desde los -860 ms a -1030 ms con una profundidad de -2980 ft hasta -3440 ft respectivamente, solo unos pocos pozos perforan hasta basamento se tiene entonces que a -2740 ft se tienen velocidades de 8000 ft/seg. mientras que a -3320 ft la velocidades llegan hasta los 8800 ft/seg.

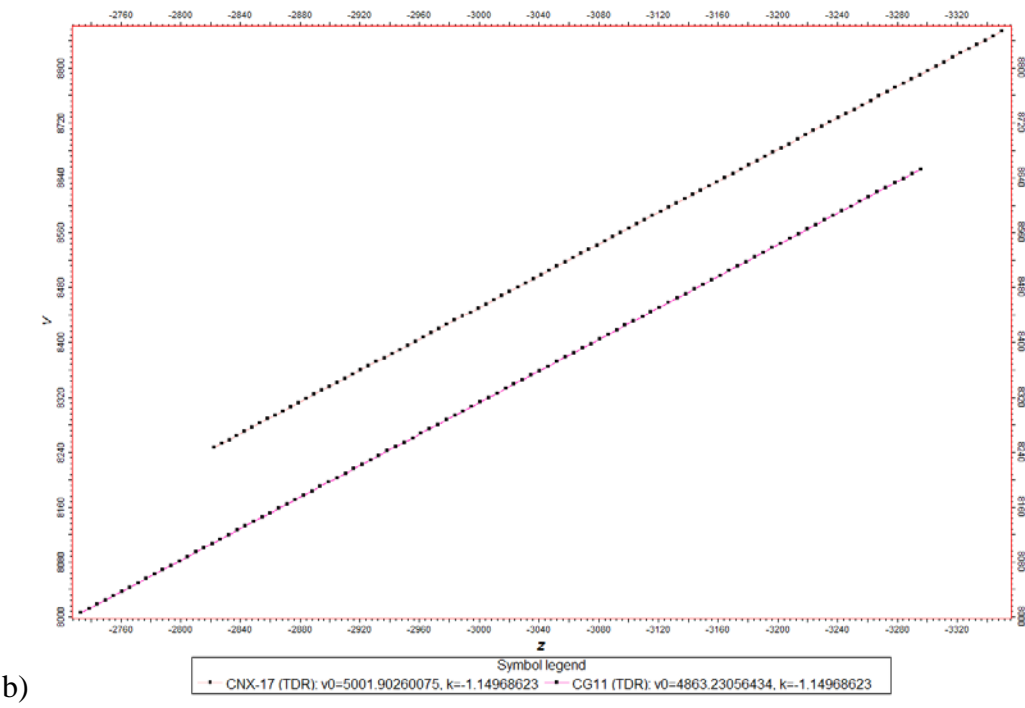
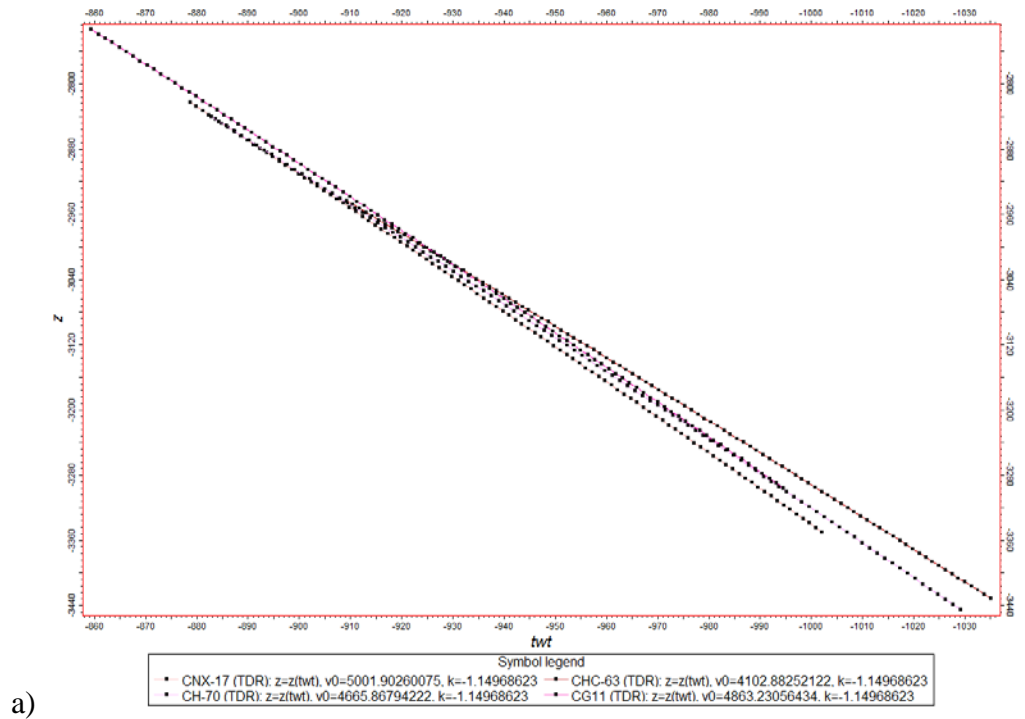


Figura 72. Relación a) Tiempo-Profundidad y b) velocidad-profundidad en la zona definida entre Morichal Medio y Basamento

### 5.5.1 Mapas en Profundidad.

La figura 73 muestra una sección del modelo de velocidades en el cual no se observa ninguna anomalía o cambio brusco en las velocidades lateral ni verticalmente, se observa un cambio de velocidades progresivo en la vertical y uniforme en la horizontal, la zona de estudio comprende desde los 400 ms hasta los 1200 ms aproximadamente, por lo que los valores superior a este rango no se tomó en consideración en la validación del modelo debido a que en esta zona no se tiene información que valide o mantenga la relación tiempo profundidad coherente puesto que pocos pozos llegaban a basamento, las velocidades dentro del intervalo de interés oscilan entre los 6400 ft/seg. y los 9500 ft/seg.

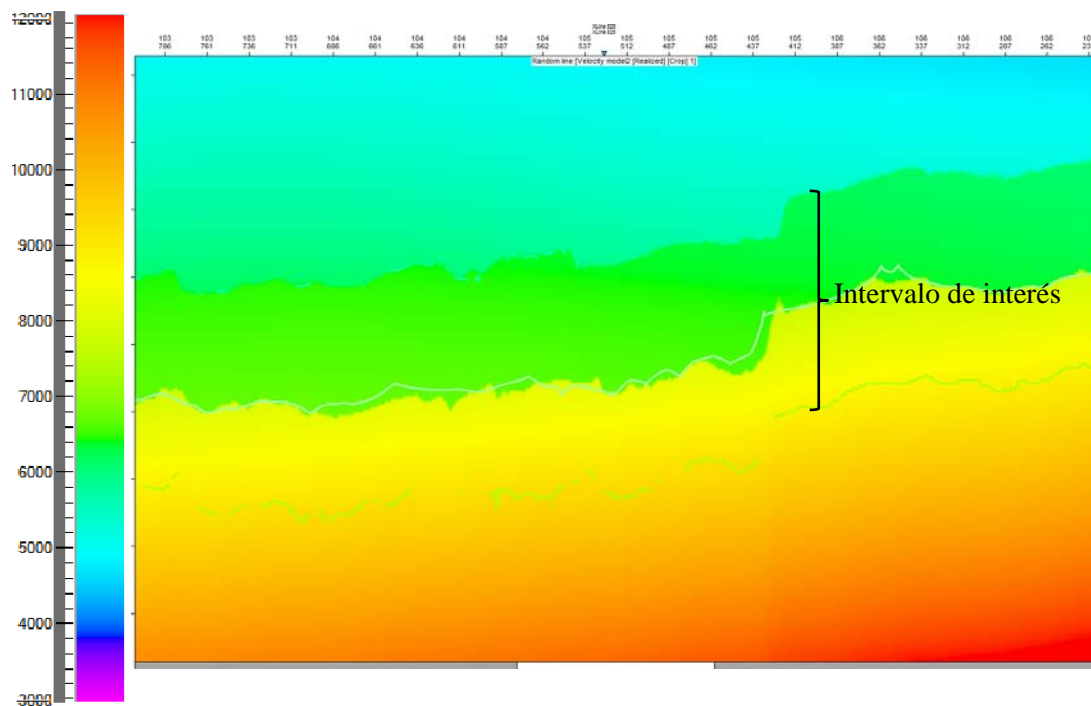


Figura 73. Sección transversal del modelo de velocidades interválica.

Las figuras 44 y 45 muestran los mapas de los horizontes correspondientes a los miembros Pilón, Jobo, Morichal Medio de la Formación Oficina y Basamento los cuales presentan una tendencia general de buzamiento en dirección norte, Miembro

Pilón posee un mínimo de -2483 ft de profundidad hacia la zona norte y un máximo de -1243 ft hacia la zona sur del campo con un delta de -1239 ft, el mínimo y máximo en Jobo están ubicados en las mismas zonas que Pilón, con -2707 ft y -1423,65 ft respectivamente con un delta de 1283 ft el mismo comportamiento presenta morichal medio con un mínimo de -3104.8 ft en la zona norte del campo y un máximo de -1698 ft en la zona sur con un delta de 1406 ft, asimismo, el Basamento posee profundidades que llegan hasta -3800ft en el extremo noroeste, en la zona sureste se encuentra ubicada a una profundidad de 2400 ft. El rango de espesores de las mencionadas Formaciones varían entre 140 y 190 ft manteniendo esta relación de espesores en la mayor parte del campo.

## 5.6 Modelado Estructural.

El objetivo principal en el modelado estructural es determinar la arquitectura del yacimiento en los estratos de interés, para poder realizar dicho proceso los horizontes y fallas que son los factores delimitantes en la elaboración del mismo deben estar en profundidad para poder realizar el modelado de cada una de estas estructuras, este proceso empezó en primera instancia con lo descrito a continuación:

### 5.6.1 Modelado de Fallas

Este proceso es uno de los pasos más importantes en el modelado estructural ya que de acuerdo al resultado de esta etapa dependerá la calidad del horizonte modelado, para poder realizar un modelado coherente con el régimen de esfuerzo se tomó como guía el análisis del atributo sísmico que mostró la orientación y disposición de las estructuras en el área y de la mano con el sistema de esfuerzos presentes en la zona se procedió a cortar, unir y/o truncar ciertas fallas según su orientación.

Considerando de que en el proceso de interpretación no se tomó en cuenta que hubiese homogeneidad en cuanto a la orientación y tamaño de los *fault sticks*, se tuvo que realizar una edición manual de cada una de las fallas para que estas tuviesen coherencia, este proceso es vital puesto que en base al tamaño, distancia y disposición de cada uno de los *fault sticks* dependerá la calidad del plano de falla modelada.

Originalmente fueron otorgadas 48 fallas para realizar el modelo, en vista de que habían inconsistencias entre la interpretación y el patrón de esfuerzos en el que está sometida la región, se realizó la reinterpretación de diez fallas debido que al compararlas con la sísmica éstas no presentaban la misma orientación y longitud, fueron unidas cuatro fallas, truncadas tres y se dividieron diez fallas, al final se obtuvo un total de 61 fallas modeladas con el tamaño y orientación acorde.

Para elaborar la malla es necesario que las fallas tengan la orientación final y que estas no posean una curvatura en el plano, en base al proceso de cortar y extender dependerá que el *grid* tenga o no picos anómalos, ya que de acuerdo a la altura de esos puntos se realizarán las mallas superior, media e inferior del *skeleton* que servirá de insumo en la elaboración del horizonte modelado y que éste sea cortado o no por las fallas, así mismo, el salto de falla dependerá de la distancia de influencia de las fallas por ende este proceso es la base fundamental del modelado de acuerdo a la metodología empleada en este trabajo.

De acuerdo al tamaño de la celda y su orientación dependerá la calidad de la malla es por ello que según la distancia entre los pozos más cercanos, 300 m, el mallado de la interpretación realizado cada 10 IL y XL y el tamaño del bin se tomó la decisión de realizar el *grid* del modelo con un tamaño de celda de 100x100 m puesto que este dato daba una mejor visualización de la celda y una buena relación entre el tiempo de computo por lo tanto al elaborar el *skeleton* con base en el tamaño del campo se tuvo un total de 47443 celdas en 2D para cada horizonte (Figura 54), sin tomar en consideración espesores puesto que el objetivo del trabajo es generar el modelo

estructural del campo que servirá de insumo para futuras simulaciones de propiedades de fluidos.

Para determinar el aporte y avance del modelo estructural actual se hizo una comparación del modelo regional del bloque Carabobo que se observa en la figura 74 con el actual, para ese trabajo fue generada una malla la cual sirvió de esqueleto para el modelo, la construcción de la misma está ajustada a la cantidad y calidad de la data disponible, así como también a parámetros relacionados con el modelaje dinámico, la resolución horizontal de la malla realizada fue seleccionada tomando en cuenta la cantidad y espaciamiento de los pozos, seleccionándose un tamaño de celda de 200x200 metros la orientación de la malla fue en dirección norte-sur.

Al momento de realizar el modelado de fallas se forzó que estas tuvieran forma de zig-zag para garantizar la ortogonalidad de las celdas sin tomar en consideración la orientación de las fallas principales ni el patrón de esfuerzos de la zona, las fallas modeladas eran continuas y geológicamente no es posible la extensión tan prolongada de una falla puesto que una familia de fallas que tengan una misma orientación no necesariamente debe ser una falla única, es por ello que al hacer la comparación del modelo previo con el actual este trabajo tomó en cuenta que la expresiones y continuidades de las fallas estuvieran acordes a la realidad geológica de la zona para que al momento de realizar el modelado dinámico y futuras simulaciones de propiedades los resultados a obtener fuesen acordes con la historia de producción del área.

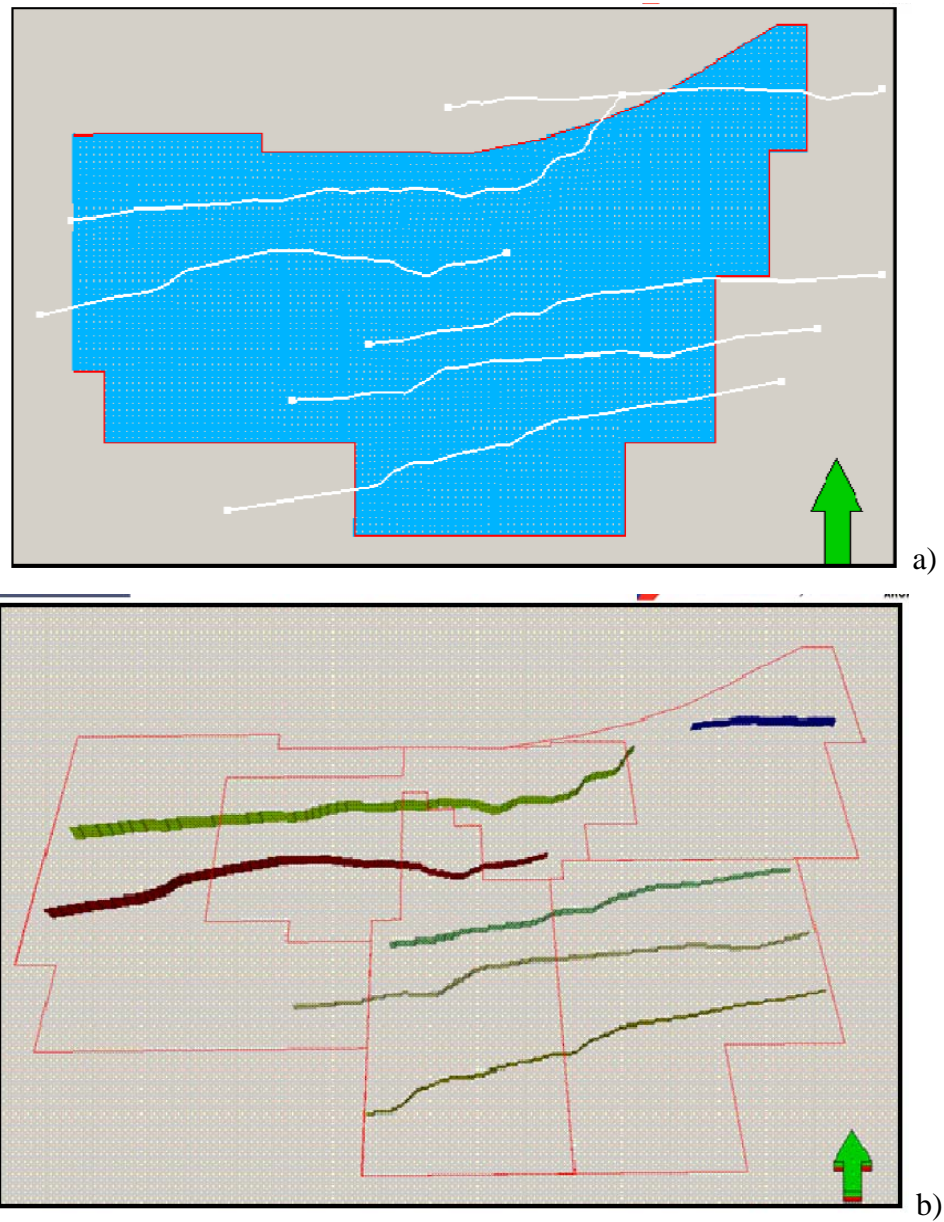


Figura 74. Modelo de Carabobo a) celda 200x200 b) Modelaje de fallas (PDVSA, 2010).

### 5.6.2 Modelado de Horizontes.

Con los planos de fallas finales se visualizó como era la variación del horizonte modelado y el original en profundidad, durante esta etapa se incorporaron nuevos pozos solo con la interpretación de los marcadores geológicos, al analizar el reporte de las diferencias en profundidad entre el horizonte original y el modelado de cada

uno de los límites estratigráficos menores se verificó que esta diferencia no excediera el límite de resolución vertical, siendo la diferencia mínima en promedio menor a 20 ft, se observaron valores entre 30-40 ft pero la frecuencia de ocurrencia no sobrepasó el 15% de los datos, por ello en la figura 75 se observa una diferencia entre el horizontes modelado (línea negra) y el mapa original en profundidad (línea de color), dichos horizontes mantienen la tendencia del original solo que este presenta una variación en la vertical de acuerdo al ajuste del pozo. Las mayores variaciones se observan para los horizontes correspondientes a los marcadores SI-2 y SI-10 debido a que en el momento de la interpretación dichos marcadores fueron difíciles de seguir porque arealmente presentaban mucha anisotropía y el reflector no era continuo esa posible diferencia en tiempo en la interpretación es lo que originó dichas variaciones.

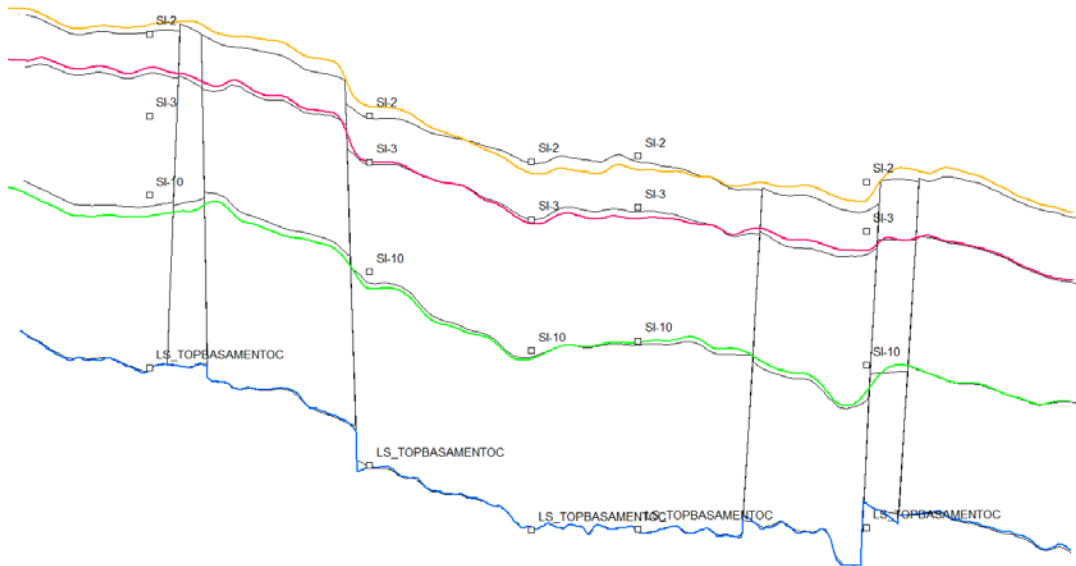


Figura 75. Visualización de horizontes Modelados (negro) y originales (colores).

Como se observa en la figura 76 se tienen dos perfiles norte-sur y sur-norte respectivamente tomados en los extremos del área de estudio, se puede observar que la zona este presenta mayor fallamiento que la zona oeste del campo, hacia esta zona en la figura 77 se observan las fallas tipo *echeleon* que se describieron previamente

esta corresponde a la zona B en la que fue dividida el campo como muestra la figura 65 en esta zona la densidad de fallas es mayor que en el resto, debido al comportamiento frágil del basamento este presenta mayor cantidad de fallas que el horizonte de pilón, la estructura es un monoclinal que presenta buzamiento norte como ha descrito la literatura estudiada en la elaboración de este trabajo.

La figura 77 muestra una visión de la disposición interna de las unidades y un perfil en el que se visualiza las fallas y los horizontes con sus respectivos saltos de falla, resultando finalmente la disposición del modelo estructural realizado para el campo cerro negro como muestra la figura 78 con la vista 3D del modelo elaborado y la sísmica, como se observa en la figura la estructura buza hacia el norte donde se localizan los mayores espesores de las unidades estratigráficas,

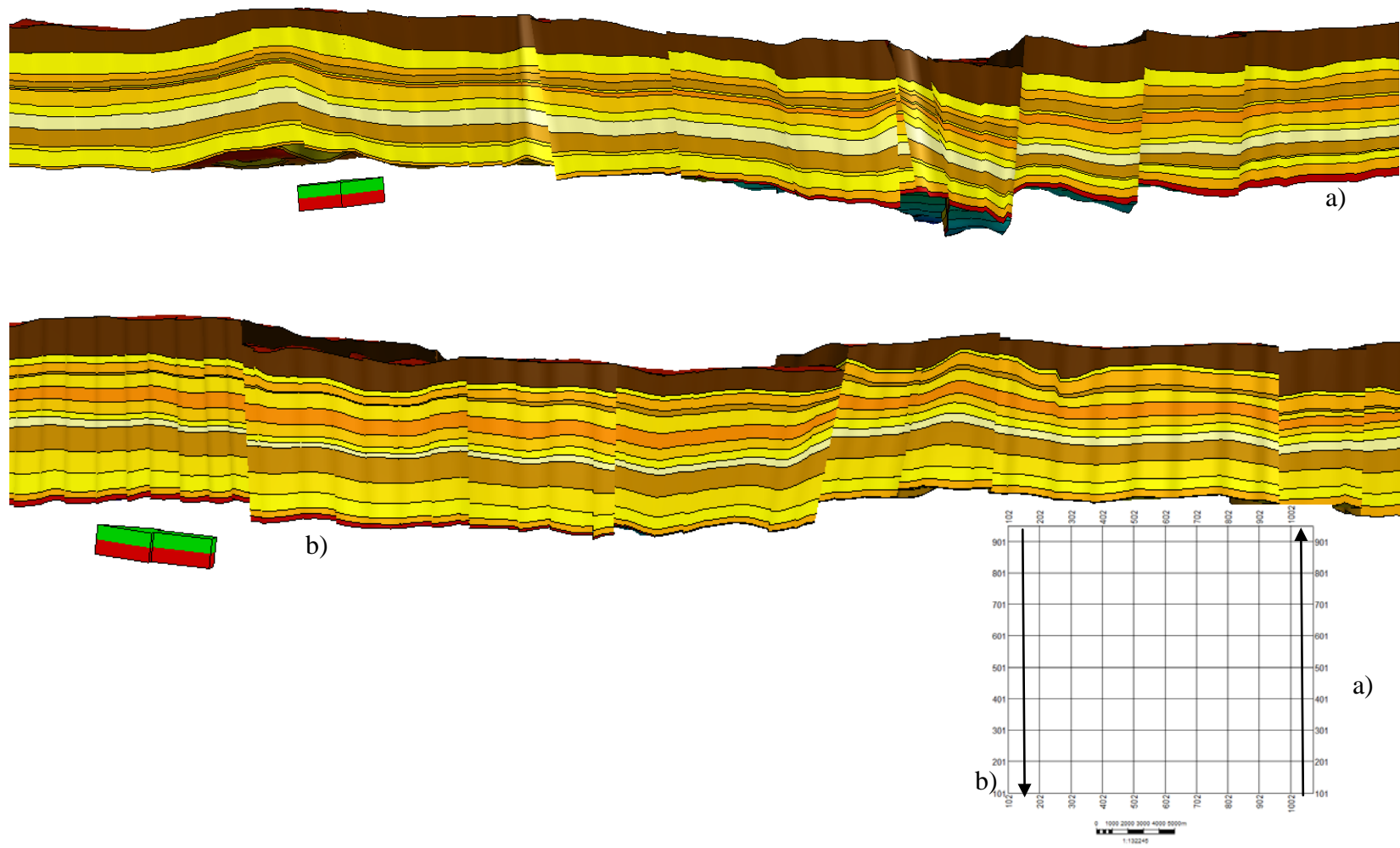


Figura 76. Visualización de a) Perfil dirección norte-sur b) perfil Sur-Norte.

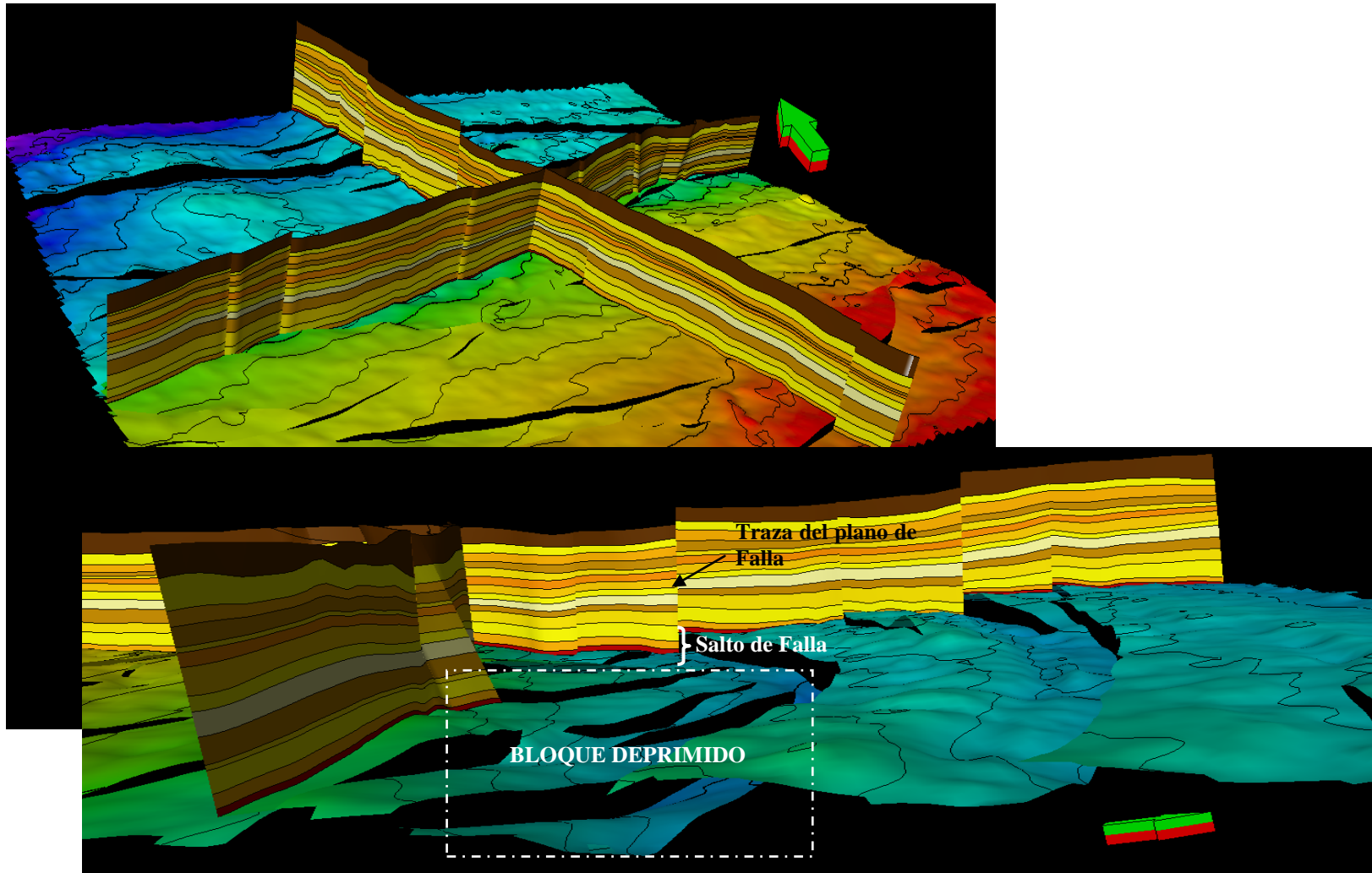


Figura 77. Vista de Perfil y disposición interna de las unidades de producción del modelo

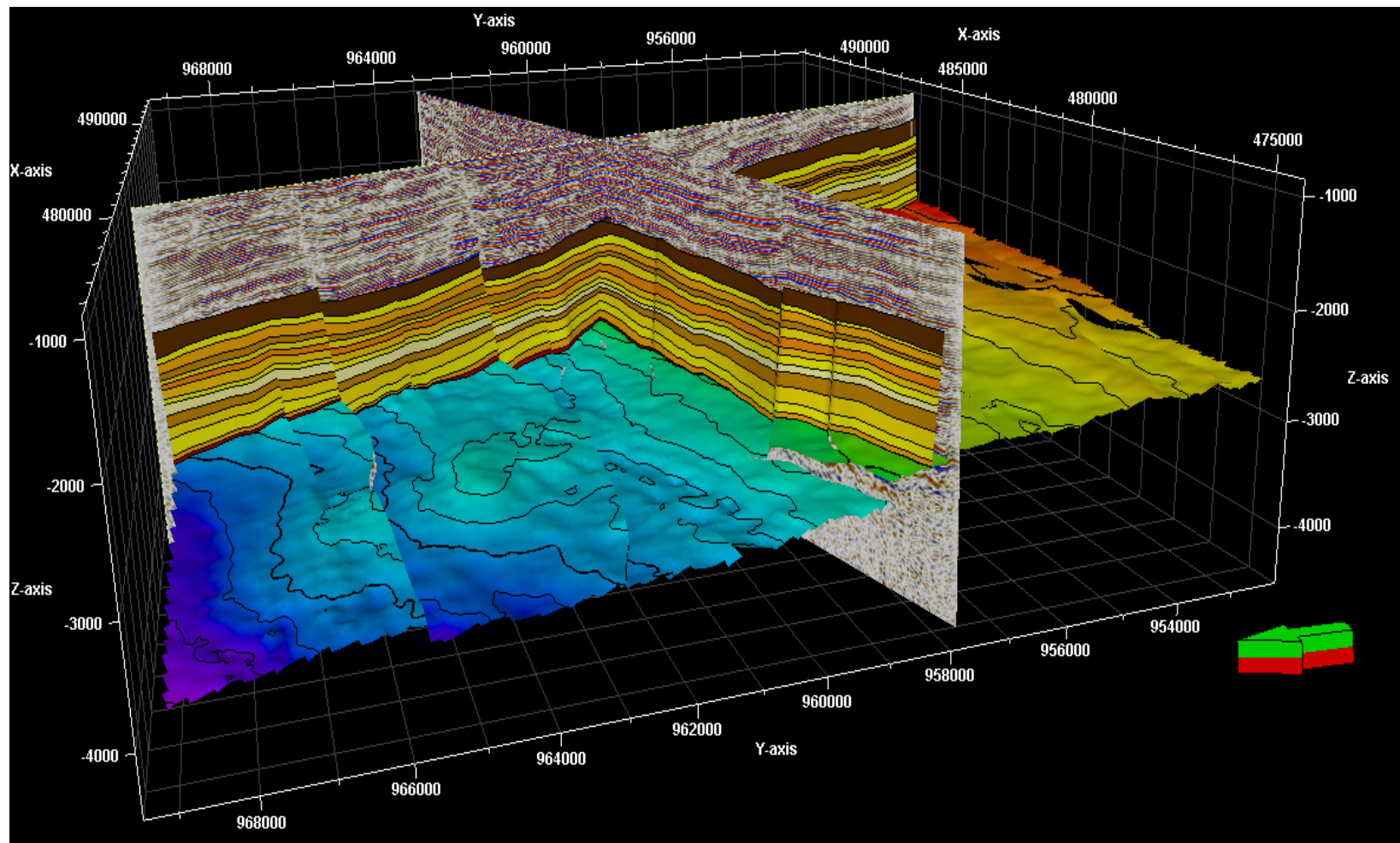


Figura 78. Vista 3D del modelo y la sísmica en profundidad.

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El patrón estructural existente en la zona es un sistema rumbo deslizante con un sistema de fallas normales, se observaron dos direcciones predominantes en la zona correspondientes a una familia de fallas principales de dirección N70E y una segunda familia de orientación N40W aproximadamente, siendo estas últimas fallas secundarias o de reacomodo donde los saltos de fallas de mayor magnitud corresponden a las fallas principales, la estructura presenta buzamiento norte.

El patrón estructural de la zona el campo está compuesto por fallas normales características de regímenes extensivos las cuales tienen una rotación de 10-15° que se observan en los mencionados trenes de fallas. El campo fue dividido en 4 zonas, una zona A delimitada por un sistema de fallas normales de mayor expresión a lo largo de todo el campo, una zona B caracterizada por la presencia de fallas secundarias delimitada por dos fallas principales donde se observó una alta densidad de fallas en escalón (echelon) formando un mini graben, las zonas C y D están ubicados al sur del campo con una baja densidad de fallas.

La variación areal de la de velocidades mantuvo una homogeneidad horizontal y un aumento progresivo en la vertical, no se observó cambios anómalos en las velocidades usadas en la conversión a profundidad de los datos, obteniéndose valores promedios entre 5000-11000 ft/seg. dentro de la zona de estudio

Las diferencias de los horizontes convertidos a profundidad con la de los marcadores geológicos del campo eran menores 25 ft y la resolución vertical de la sísmica fue 35 ft, validando que el modelo usado en la conversión a profundidad fue correcto, y que

el error estuviese dentro del rango esperado, en este caso menor a 35 ft siendo este el valor de la resolución de la sísmica.

Para realizar el modelo estructural el paso fundamental fue realizar el correcto modelado de fallas analizando la expresión sísmica del reflector con la realidad geológica de la zona, para guiar este paso fue vital el uso de atributos sísmicos estructurales que resaltaron las deformaciones en el área y con base en el sistema de esfuerzos se pudo concretar las orientaciones finales de las mismas.

La interpretación sísmica original constó de 48 fallas, inicialmente se consideraban las fallas principales de forma continua irrespetando la realidad geológica de la zona debido a que las fallas no se prolongan en grandes extensiones sino que forman familias de fallas, por ende el proceso de modelado tuvo como objetivo realizar el ajuste de la representación geométrica del yacimiento de acuerdo a los rasgos estructurales de la zona con lo cual se obtuvo como producto final un total de 68 fallas modeladas.

En la fase de modelado de fallas, se tuvo que realizar la re-interpretación de las mismas dándole sentido y orientación coherente según el sistema de esfuerzos de acuerdo a la disposición de los *fault stick* dependerá la elaboración de la malla o *skeleton* con lo cual se construyeron los horizontes

Con base en la orientación y tamaño de las celdas que conforman la malla estratigráfica, el proceso de elección de la dirección de las tendencias y el tamaño de la celda se debe optimizar lo más posible para garantizar la calidad del *skeleton* para que las celdas no presenten ninguna deformación, a futuro esta malla estructural servirá de base para el desarrollo del modelo estático.

Las fallas del modelo estructural representan segmentos de fallas con similar orientación y buzamiento que conforman familias de fallas originadas bajo un mismo

patrón de esfuerzos. De esta manera se honra la realidad geológica del área a diferencia de la conceptualización existente en la que se consideran fallas únicas y de gran extensión lateral, lo que puede ocasionar errores de estimación de volúmenes de hidrocarburos atrapados. Adicionalmente, al no ser fallas continuas se estaría en presencia de vías de comunicación para la entrada de agua proveniente de otros bloques o migración del hidrocarburo.

## BIBLIOGRAFIA

ALFONSI, P. (1999). Sedimentología De Clásticos y Electrofacies Cied Centro Internacional De Educación Y Desarrollo. PDVSA Exploración Y Producción. Maracaibo Venezuela, Pp115.

AUDEMARD, F.E., And Serrano, I.C. (2001). Future Petroliferous Provinces Of Venezuela, In M.W. D Owey, J.C. Theert, And W.A. Morgan, Eds., Petroleum Provinces Of The Twenty-First Century: Aapg Memory 74, P. 353-372.

BARTON, P. J. (1986). The Relationship Between Seismic Velocity And Density In The Crust A Useful Constrains? Geophys. J. R- Astron. Soc. 87, P. 195-208.

BEICIPFRANLAP, Cursos EFAI Yacimientos (2009) - Seismic March 2009 Waves & Signals,

BEHZAD Alaei (2012). Seismic Modeling of Complex Geological Structures, Seismic Waves - Research and Analysis, Dr. Masaki Kanao (Ed.), ISBN: 978-953-307-944-8, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/seismic-waves-research-and-analysis/seismic-modeling-of-complexgeological-structures>.

CAUMON G; Antoine Bertoncello<sup>1</sup>, Jef Caers<sup>1</sup>, Pierre Biver<sup>2</sup>, (2006).Geostatistics On Stratigraphic Grid

CAUMON G., P. Collon-Drouaillet ·C, Le Carlier De Veslud S, Viseur J, (2009). International Association For Mathematical Geosciences Surface Based 3d Modeling Of Geological Structures.

CHELOTTI, L., Acosta, N., Foster, M., (2009). Cátedra De Geofísica Aplicada, U.N.P.S.J.B., Chubut, Argentina. Tema 18 Métodos Sísmicos Especiales

CHOPRA S., MARFURT K (2007). *Seismic Attribute for prospect identification and reservoir characterization SEG Geophysical development series N°11*, Tulsa, OK, U.S.A.

DE ROJAS J., (1987). Geological Evaluation Of San Diego Norte Pilot Project, Zuata Arena, Orinoco Oil Belt Venezuela. *Aapg Vol.71 (10): 1294-1303*.

DI CROCE, J. (1999). *Estratigrafía Secuencial Y Evolución Estructural De La Cuenca Oriental De Venezuela. Trabajo Especial De Grado. Inédito, Universidad Central De Venezuela. Caracas- Venezuela*.

DR. ALI H. DOGRU, Giga-Cell Simulation (2011). *Saudi Aramco Journal Of Technology*

ESPESO A, (2008). *Interpretación Sísmica Y Geofísica De Yacimientos, PDVSA Intevep*

ERLICH, RN Y BARRET SF (1992). *Petroleum Geology od the Easter Venezuela foreland basin in Maccqueen R.W. and Leckie, D.A., Foreland Basins and Gilded Belts; AAPG Memoir 55, pp 345-362*.

EVA, A.; K. Burke; P. Mann Y G. Wadge (1989). *Four-phase Tectonostratigraphic Development of the Southern Caribbean*.

GALPERIN, E. I. (1985). *Vertical Seismic Profiling and Its Exploration Potential*.

Geological Society Special Publication No. 290, *Tectonics Of Strike-Slip Restraining And Releasing Bends Edited By W. D. Cunningham University Of Leicester, Uk And P. Mann University Of Texas At Austin, Usa 2007 Published By The Geological Society Londonbends*

GONZÁLEZ De Juana, C., Iturralde, J. Y Picard, X. (1980). Geología De Venezuela Y Sus Cuencas Petrolíferas (Tomo I Y II). Ediciones Foninves, Caracas, Primera Edición, 1031p.

HUNTER, J. A., Pullan, S. E., Burns, R. A., Good, R. L., Harris, J. B. Pugin, A. Skvortsov, A. & Goriainov (1998): Downhole Seismic Logging For High-Resolution Reflection Surveying In Unconsolidated Overburden. *Geophysics*, 63, 1371-1384.

PDVSA 1983. Informe Técnico, Evaluación Exploratoria De La Faja Petrolífera Del Orinoco, Área Cerro Negro, Coordinación de la Faja Petrolífera del Orinoco,

PDVSA, Diciembre 2010. Informe Técnico De Revisión De Reservas Área Carabobo, Tomo I, Pdvsa Cvp, Referencia: RES-CVP-OR-PMR-1011

KNÖDEL Klaus *et. al.* (2007). *Environmental Geology, Handbook Of Field Methods And Case Studies*, Editorial Springer Berlin 2007.

LANDMARK (2003). Guía de uso de OpenWorks.

MALLET, J. (2002). *Geomodeling*. Oxford University Press, NY, NY.

MORALES H, WERNER R. (2005) Interpretación estructural de las arenas gasíferas F8, I3, J3ML, N2, ROUM Y R4L, en el área mayor de Socororo, EDO. Anzoátegui

PARNAUD, F.*et. al.*. *Petroleum Geology Of The Central Part Of The Eastern Venezuelan Basin*. American Association Of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir 62: 741-756 P.

REGUEIRO, J (2007). Sísmica para ingenieros y Geólogos. El métodos sísmicos de reflexión, p24-55

SAENGER, E. H., Ciz, R., Krüger, O. S., Schmalholz, S. M., Gurevich, B., & Shapiro, S. A (2007). Finite-difference modeling of wave propagation on microscale: A snapshot of the work in progress. *Geophysics*, vol, 72, no. 5, pp.SM293-SM300

SCHLUMBERGER, WEC (1997). Evaluación de pozos, *Geología de Venezuela*. Caracas, Venezuela.

ROURE, F *et. al.* (1994). *Geometry and kinematics of the North Monagas trust belt Venezuela*. *Marine and Petroleum Geology* 11, 347-362.

SHERIFF, E.; L. Geldart Y W. Telford (1990). *Applied Geophysics*. New York. 772 P.

SHERIFF, R. (2002). *Encyclopedic Dictionary Of Exploration Geophysics*. 4th Edition, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.

SORIANO, Gemma Curso 2012-2013. Unidad 4: Geodinámica, Universidad De A Coruña. La Curuña, España.

TALWANI, M. (2002). *The Orinoco Heavy Oil Belt in Venezuela* The James A. Baker III Institute for Public Policy of RICE University. 34p

VAN DER OSTEN, E. (1957). *Coger Cretaceous Barranquin Formation of northwestern Venezuela*. AAPG, Bull. 5(41): 679-708.

DE LISA, Vicenso (2012). *Compendio De Clases De Procesamiento Sísmico*

WONG, J. (2000). Crosshole Seismic Imaging For Sulphide Orebody Delineation Near Sudbury, Ontario, Canada. *Geophysics*, 65, 1900-1907

WOODCOCK, N.H., y Fischer, M. (1986), Strike-slip duplexes: *J. Structural Geology*, v. 25, p. 725-735.