

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**INTERPRETACIÓN SISMOESTRATIGRÁFICA Y
ESTRUCTURAL DE LA SECUENCIA SEDIMENTARIA
(CRETÁCICO-TERCIARIO) DEL BLOQUE NORTE DEL ÁREA
BOYACÁ, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Pinto O., Rafael E.
Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico

Caracas, 2007

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

INTERPRETACIÓN SISMOESTRATIGRÁFICA Y ESTRUCTURAL DE LA SECUENCIA SEDIMENTARIA (CRETÁCICO-TERCIARIO) DEL BLOQUE NORTE DEL ÁREA BOYACÁ, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Yaraixa Pérez
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Williams Rodríguez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Pinto O., Rafael E.
Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico

Caracas, 2007

Caracas, Octubre de 2007

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Rafael Pinto, titulado:

“Interpretación sismoestratigráfica y estructural de la secuencia sedimentaria (Cretácico-Terciario) del Bloque Norte del Área Boyacá, Faja Petrolífera del Orinoco”

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

Prof. Inírida Rodríguez
Jurado

Prof. Massimo Di Giulio
Jurado

Prof. Yaraixa Pérez
Tutor Académico

El camino del hombre recto está por todos lados rodeado por las injusticias de los egoístas y la tiranía de los hombres malos. Bendito sea aquel pastor que en nombre de la caridad y de la buena voluntad saque a los débiles del valle de la oscuridad, por que es el auténtico guardián de su hermano y el descubridor de los niños perdidos. Y os aseguro que vendré a castigar con gran venganza y furiosa cólera a aquellos que pretendan envenenar y destruir a mis hermanos, y tú sabrás que mi nombre es Dios cuando caiga mi venganza sobre ti.

Ezequiel 25:17

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los jefes, Humberto Sánchez y Williams Rodríguez por su apoyo incondicional para la realización de este TEG. Que sirvan de ejemplo para los demás jefes de la industria.

A PDVSA por haber financiado los gastos que este trabajo necesitó.

A Elsy Rojas (con su discurso), a Yesika Velazco por su buena atención y a Luvina Torres que estuvo pendiente hasta el final.

Al grupo de trabajo, en particular a Héctor Rondon por enseñarme las mañas de los programas, a Isaias por la ayuda con los sintéticos, a la Sra. Olga Castro por el soporte petrofísico, a Héctor Andrade por su colaboración en el entendimiento de los datos de la Faja, a Asdrubal Ovalles por facilitar las cosas entre L^AT_EX 2_ε y yo, y al profesor José Cavada por sus consejos siempre oportunos.

A los dibujantes Jonas Rodríguez y Octavio Cancino, sin su ayuda los mapas se hubiesen tardado más de lo conveniente.

A las personas sin cuyo apoyo hubiese sido muy difícil cumplir con esta responsabilidad: a Aida Ortiz, fuente suplidora de infinito amor y ternura, a la Sra. Zully por el amor y el cariño que solo puede existir entre una suegra y un yerno, a su hija Patricia, quien siempre estuvo ahí, regalándome la luz con mucho amor y paciencia. A Yaraixa Pérez, quien me llevó de la mano por los caminos de la interpretación. A Juan Suarez, que me brindó su amistad y conocimiento, Dios los crea y ellos se juntan.

A ningún PCP.

Y finalmente a la trifuerza :-)

Pinto O., Rafael E.

INTERPRETACIÓN SISMOESTRATIGRÁFICA Y ESTRUCTURAL DE LA SECUENCIA SEDIMENTARIA (CRETÁCICO-TERCIARIO) DEL BLOQUE NORTE DEL ÁREA BOYACÁ, FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO

Tutor Académico: Prof. Yaraixa Pérez. Tutor Industrial: Ing. Williams Rodríguez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 2007, 109 pp.

Palabras claves: Interpretación sísmica estructural, Sismoestratigrafía, Sísmica 2D, Faja Petrolífera del Orinoco, Cretácico.

Resumen. El propósito fundamental de este trabajo es realizar una interpretación estructural y sismoestratigráfica en el Bloque Norte del Área Boyacá, para estimar la distribución espacial de las superficies erosivas presentes en la secuencia sedimentaria Cretácico-Terciario, las cuales, limitan los ciclos geológicos dentro de los que se encuentran los yacimientos. En primer lugar se armó la base de datos de esta investigación, con el fin de validar y evaluar la veracidad y confiabilidad de los datos de entrada al proceso de interpretación. Luego se interpretaron los horizontes sísmicos en tiempo y las fallas geológicas. Los saltos de fallas calculados en la interpretación varían entre 78 ft y 308 ft, concordando con los saltos de 90 ft reportados sin más detalle por PDVSA en 1983. A cada uno de los 14 pozos se le construyó un sismograma sintético, donde se obtuvo un ajuste en la correlación sísmica-pozo variable entre 30% y 83 %, ocurriendo el mejor ajuste en el pozo BYC-117 ubicado en la línea sísmica bycgz-M-1 y el peor ajuste (30 %) ocurrió en el pozo BYC-817, ubicado en la línea bycgm-23-3. Con datos de velocidad de cada pozo, se construyeron los mapas de velocidad intervállica en el área. Para encontrar las superficies de interés en profundidad, se aplicó la fórmula $z_n = z_{(n-1)} + V_n(t_n - t_{n-1}) * (1/2000)$, donde z_n es el mapa en profundidad de la superficie de interés, V_n es el mapa de velocidad intervállica correspondiente a esa interfase, y t_n es el mapa en tiempo de la n-ésima interfase. Los mapas en profundidad obtenidos son dominados estructuralmente por las fallas interpretadas, ya que ellas dividen la zona estudiada en dos localidades geológicas. Los cuadrantes noroeste, suroeste y sureste poseen un gradiente mucho más suave (22.64 ft/km para el Tope-Intramioceno y 62.57 ft/km para el Tope-Precretácico) que el encontrado en el cuadrante noreste (91.93 ft/km para el Tope-Precretácico). Como método de comprobación del modelo de profundidad obtenido, se consiguió las coordenadas e interpretación secuencial del pozo BYC-23, el cual, no fue utilizado en la realización de los modelos. El error en cada interfase (Intramioceno: 32 ft, Oligoceno: 68 ft, Cretácico: -95 ft, y Precretácico: -78 ft) es menor que su correspondiente resolución vertical (77.22 ft, 107.07 ft, 129.87 ft, 157.94 ft respectivamente), lo cual, es la mejor prueba de que el modelo de profundidades creado funciona.

ÍNDICE

	Página
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN	VI
ÍNDICE	VII
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE FIGURAS	XII
 CAPÍTULO	
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Introducción	1
1.2. Ubicación del área en estudio	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Definición del problema	5
1.5. Justificación	6
II. MARCO GEOLÓGICO	8
2.1. Evolución de la cuenca	8
2.1.1. Etapa Prerift (Paleozoico)	9
2.1.2. Etapa de rift (Jurásico - Cretácico Temprano)	10
2.1.3. Etapa de margen pasivo (Jurásico Tardío - Cretácico Temprano al Eoceno)	10

2.2.	Sistema rumbo-deslizante y compresivo-transpresivo (Eoceno Temprano - Medio al presente)	11
2.3.	Síntesis estructural del Área Boyacá	12
2.3.1.	Graben de Espino	14
2.4.	Síntesis estratigráfica del Área Boyacá	14
2.4.1.	Formación Hato Viejo (Cámbrico Temprano)	15
2.4.2.	Formación Carrizal (Cámbrico Temprano)	15
2.4.3.	Formación Ipire (Jurásico Medio-Tardío)	16
2.4.4.	Grupo Temblador, Formación Canoa (Aptiense- Albiense)	16
2.4.5.	Grupo Temblador, Formación Tigre (Albiense- Santoniense)	17
2.4.6.	Formación La Pascua (Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano)	18
2.4.7.	Formación Roblecito (Eoceno Tardío-Mioceno Temprano)	18
2.4.8.	Formación Chaguaramas (Oligoceno Tardío- Mioceno Medio)	19
III.	MARCO TEÓRICO	21
3.1.	El sismograma sintético	21
3.1.1.	Modelo del subsuelo	23
3.1.2.	Tiempos de viaje	23
3.1.3.	Coefficientes de reflexión	25
3.1.4.	Ondícula	25
3.1.5.	Modelo convolucional	26
3.1.6.	Problemas en los sismogramas sintéticos	27
3.2.	Entonamiento (tuning)	29
3.3.	Resolución	29
3.4.	Estructura	31
3.4.1.	Detección y cartografiado de fallas	32

3.4.2.	Propagación de horizontes	34
3.5.	Conversión tiempo-profundidad	34
3.6.	Estratigrafía sísmica	34
3.6.1.	Procedimiento de interpretación sísmica	35
3.6.2.	Patrones de reflexión	38
3.7.	Parámetros sísmicos	38
IV.	METODOLOGÍA DE TRABAJO	40
4.1.	Base de datos	41
4.2.	Interpretación sísmica	44
4.2.1.	Selección de las mejores líneas	44
4.2.2.	Corrección del desfase entre líneas sísmicas que se cruzan	45
4.2.3.	Propagación de fallas	49
4.2.4.	Propagación de horizontes y construcción de mapas en tiempo	49
4.3.	Edición de registros de pozo	50
4.3.1.	Carga de registros	50
4.3.2.	Edición de picos	52
4.3.3.	Rango de variación de las curvas	52
4.3.4.	Construcción de curvas RHOB faltantes	54
4.4.	Elaboración de los sismogramas sintéticos	56
4.4.1.	Evaluación de curvas tiempo-profundidad (tz)	56
4.4.2.	Cargado de curvas a la interfase de interpretación	57
4.4.3.	Selección de curvas, aplicado de TVS y se- rie de reflectividad	58
4.4.4.	Selección de la ondícula sísmica y convolución	59
4.4.5.	Ajuste del sismograma sintético a la sísmica	60
4.4.6.	Cálculo de la resolución vertical	61
4.5.	Mapas de velocidad	63
4.6.	Mapas en profundidad	66
4.7.	Evaluación de la utilidad de los mapas	70

V.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
	5.1. Sismograma sintético	71
	5.2. Interpretación sísmica	74
	5.3. Mapas en tiempo	78
	5.4. Mapas de velocidad	81
	5.5. Mapas de profundidad	84
	5.6. Comprobación del modelo	85
	5.7. Breve historia geológica de la zona según las sec- ciones sísmicas	88
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS	95
	APÉNDICES	98

LISTA DE TABLAS

TABLA		Página
2.1.	Secuencia litoestratigráfica generalizada de la zona de estudio.	20
3.1.	Significado geológico de las terminaciones sísmicas.	39
4.1.	Parámetros de grabación y versión de las líneas sísmicas.	42
4.2.	Inventario de curvas de interés presentes en los pozos.	43
4.3.	Rango de variación de los registros de pozo.	55
4.4.	Tabla tiempo profundidad (tz) perteneciente al pozo BYC-13.	64
4.5.	Cálculo de la resolución sísmica vertical en la secuencia Intramioceno- Precretácico y en cada capa de interés.	65
5.1.	Coeficientes de correlación entre los sismogramas sintéticos y las trazas sísmicas.	72
5.2.	Características de las fallas interpretadas.	82
5.3.	Errores calculados entre la profundidad del pozo BYC-23 y los mapas en profundidad de cada interfase.	86

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Página
1.1.	Localización del Bloque Norte (zona en estudio) del Área Boyacá, perteneciente a la Faja Petrolífera del Orinoco.	3
2.1.	Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el norte de Suramérica, en los cuales hay rocas Paleozoicas.	9
2.2.	Distribución de las rocas jurásicas en Venezuela.	11
2.3.	Distribución de las facies sedimentarias dominantes al norte del Cratón de Guayana durante el Cretácico Temprano.	12
2.4.	Marco geológico regional para la sedimentación en el flanco norte de la Cuenca Oriental de Venezuela durante el Oligoceno.	13
3.1.	Comportamiento de un rayo incidente en una superficie de acuerdo con la Ley de Snell.	22
3.2.	Pasos para la construcción del sismograma sintético.	27
3.3.	Conjunto de ondículas para definir el efecto tuning.	30
3.4.	Conjunto de ondículas para definir la resolución vertical	31
3.5.	Ilustración de los patrones de reflexión.	38
4.1.	Metodología seguida para la construcciones de los mapas de profundidad de las superficies erosivas de interés.	40
4.2.	Esquema que refleja la metodología seguida para realizar la interpretación sísmica.	45
4.3.	Sección sísmica bycgz-13 sin interpretar.	46

4.4.	Secciones sísmicas bycgz-20-A y bycgz-20-B sin interpretar.	47
4.5.	Secciones sísmicas bycgm-I-1, bycgz-I-C, bycgz-I-A, bycgz-I-2 y bycgz-I-1 sin interpretar.	48
4.6.	Metodología de rizados usada en la propagación de horizontes.	51
4.7.	Esquema que refleja la metodología seguida en la edición de los registros de pozo.	52
4.8.	Despliegue de los registros de interés para encontrar valores anómalos.	53
4.9.	Ejemplo de sustitución de un pico en el registro sísmico por el valor promedio de esa zona	54
4.10.	Esquema que refleja la metodología seguida en la construcción de los sismogramas sintéticos.	56
4.11.	Relaciones tiempo-profundidad iniciales.	57
4.12.	Ventana seleccionada para realizar la extracción de la ondícula en el pozo BYC-13.	59
4.13.	Ajuste de frecuencia realizado a la ondícula tipo Ricker con la extraída de la sísmica en el pozo BYC-13.	60
4.14.	Sismograma sintético del pozo BYC-117.	62
4.15.	Mapa de velocidad correspondiente a la superficie Tope-Intramioceno incluyendo el pozo BYC-43.	67
4.16.	Mapa de velocidad correspondiente a la superficie Tope-Oligoceno incluyendo el pozo BYC-117.	68
4.17.	Histograma donde se muestran los valores de velocidad del Intra- mioceno en los pozos.	69

5.1.	Correspondencia entre el registro GR y el sismograma sintético del pozo BYC-117.	73
5.2.	Sección sísmica bycgz-13 interpretada en tiempo.	75
5.3.	Truncaciones que marcan la superficie erosiva Precretácico.	76
5.4.	Donwlaps que marcan la superficie erosiva Cretácico.	77
5.5.	Donwlaps que marcan la superficie erosiva Oligoceno.	78
5.6.	Comportamiento sísmico de la interpretación de la lutita de Roblecito.	79
5.7.	Interpretación secuencial de la sección de pozos que coincide con la líneas sísmicas bycgz-13 y bycgz-13-1, usando las curvas GR.	80
5.8.	Sección geológica donde se muestra la correlación secuencial del pozo de prueba BYC-23 con los pozos BYC-53 y BYC-13.	87

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Introducción

En la actualidad, Petróleos de Venezuela (PDVSA) a través de la Corporación Venezolana del Petróleo (CVP) ha dado inicio al Proyecto Orinoco: Magna Reserva, el cual, pretende cuantificar y certificar las reservas de crudo encontrado en la Faja Petrolífera del Orinoco. En particular el Bloque Norte del Área Boyacá, zona de interés para la realización de este trabajo especial de grado, carece de interpretaciones sismoestratigráficas, y además los yacimientos presentes en el área poseen un hidrocarburo extraíble clasificado en la categoría de pesado y extrapesado. Con los avances tecnológicos es posible modificar la gravedad API de este petróleo para convertirlo en mediano, lo que aumenta su valor para la venta e implícitamente su potencial de explotación. De igual manera, se han desarrollado herramientas que permiten aumentar el factor de recobro de los yacimientos (pozos direccionales, inyección de fluidos, métodos de recuperación secundaria, etc.), favoreciendo la rentabilidad en la explotación de este tipo de crudo y por ende, se requieren estudios orientados no sólo a niveles estructurales, sino también, a niveles estratigráficos.

En este trabajo se expone la serie de acciones tomadas y sus resultados, para crear la interpretación sismoestratigráfica y estructural del Bloque Norte de Boyacá; desde la

recopilación de los datos necesarios para dicho estudio, pasando por la revisión de la geología regional, hasta llegar a la creación de los modelos que mejor se ajustan a la realidad geológica de la zona.

1.2. Ubicación del área en estudio

La zona en estudio está delimitada por el Bloque Norte del Área Boyacá, perteneciente a la Faja Petrolífera del Orinoco, como se muestra en la figura 1.1. Esta zona posee una extensión aproximada de 2690 km², se encuentra dentro de las fronteras del Estado Guárico y está limitada al norte por la latitud 13311546.133, al sur por la latitud 1295731.876, al este por el Parque Nacional Aguaro Guariquito y al oeste por el Área Junín. Cabe destacar que en este trabajo se usará el sistema de coordenadas Lambert.

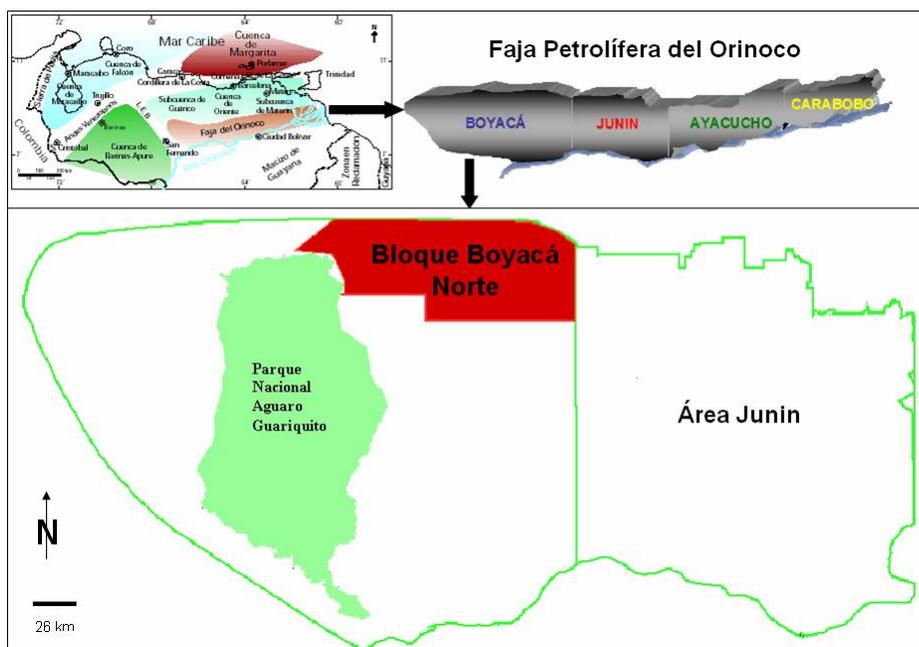


Fig. 1.1. Localización del Bloque Norte (zona en estudio) del Área Boyacá, perteneciente a la Faja Petrolífera del Orinoco (modificado de Schlumberger, 1997).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Generar los mapas estructurales de los topes secuenciales Cretácico-Terciario en la zona de interés.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Realizar el control de calidad de los datos sísmicos de la zona de estudio.
- b) Corregir los desfases en tiempo de las líneas sísmicas que se cruzan.
- c) Calibrar las secciones sísmicas con los datos de pozo.

- d) Interpretar las fallas presentes en las secciones sísmicas.
- e) Interpretar los horizontes sísmicos que corresponden a superficies erosivas (límites secuenciales).
- f) Generar los modelos de velocidad para las diferentes interfases interpretadas.
- g) Elaborar los mapas de profundidad y tiempo de las superficies sísmicas interpretadas.

1.4. Definición del problema

En los bloques del Área Boyacá de la Faja Petrolífera del Orinoco se encuentran yacimientos someros (0 - 1500 m) de hidrocarburos, los cuales han sido probados con pozos perforados entre los años setenta y ochenta. En particular, el Bloque Norte de Boyacá cuenta con doce pozos que han producido o mostrado trazas de petróleo (BYC-63 y BYC-31 entre otros) y nueve que han producido o mostrado trazas de gas (LV-192, LV-23 y BYC-14 entre otros). Sin embargo, la extensión de la zona en estudio (2690 km²) es tal que se crea la necesidad de usar sísmica de reflexión para interpretar las superficies que limitan los intervalos prospectivos. En vista de lo anterior, el propósito fundamental de este trabajo es realizar una interpretación estructural y sismoestratigráfica de la zona de estudio para estimar la distribución espacial de las superficies erosivas presentes en la secuencia sedimentaria Cretácico-Terciario, las cuales limitan los ciclos geológicos dentro de los que se encuentran los yacimientos.

Para realizar este estudio se cuenta con catorce pozos que poseen tiros de verificación sísmica, los cuales coinciden en su localización geográfica con tendidos de líneas sísmicas 2D. También se dispone de información de registros en el pozo BYC-23. Además, en cada pozo se conocen los marcadores geológicos a seguir en esta investigación.

Igualmente se dispone de 116 secciones sísmicas 2D apiladas con tiempo de registro de 4 s, de las cuales 66 poseen un rumbo E-O y 50 un rumbo N-S, lo que genera una malla de 5.5 km x 5.5 km aproximadamente, para un total de 2876 km de líneas sísmi-

cas. La frecuencia dominante de la ondícula en la secuencia Intramioceno-Precretácico observada en la sección bycgz-13 es de 20 Hz y la velocidad correspondiente es 10450 ft/s, con lo que se obtiene una resolución vertical de 130 ft (según el criterio de Rayleigh).

Finalmente, a partir de los datos sísmicos con los que se cuenta, se generaron los mapas en tiempo y profundidad de las superficies de interés, los cuales permitirán a investigaciones futuras identificar los límites regionales de los intervalos prospectivos de la zona.

1.5. Justificación

La creciente demanda mundial de energía ha provocado el incremento desmesurado de los precios del petróleo, lo que motiva nuevas búsquedas de hidrocarburos para garantizar su abastecimiento. Bajo estas condiciones las empresas petroleras se han abocado a estudiar detalladamente la información de la que disponen antes de emprender nuevas campañas exploratorias. Es así, como se han puesto en marcha los programas de interpretación sísmica, los cuales permiten mejorar la planificación de perforaciones y garantizar el éxito de las nuevas localizaciones de hidrocarburos.

En el caso de Venezuela, esta búsqueda adquiere mayor importancia ya que servirá para cuantificar y certificar las reservas de crudo nacional, lo que permitirá que la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) aumente la cuota de producción de nuestro país, y fomentará la inversión extranjera, lo que redundará en mayores

riquezas para el pueblo venezolano.

Con la realización de este estudio se contribuye a disminuir la incertidumbre asociada a la localización de yacimientos en el Bloque Norte del Área Boyacá, aportando una serie de conocimientos sobre el comportamiento acústico del subsuelo, con lo que se refuerzan los modelos geológicos locales propuestos en trabajos anteriores. Además, este trabajo sirve de base para un conjunto de investigaciones futuras, entre las cuales se destaca el cálculo del volumen de petróleo original en sitio (POES), la propuesta de nuevos tendidos de adquisición sísmica 2D y de nuevas localizaciones de pozos exploradores. Todos estos trabajos en conjunto, servirán para cuantificar y certificar las reservas de crudo del Bloque Norte del Área Boyacá.

CAPÍTULO II

MARCO GEOLÓGICO

2.1. Evolución de la cuenca

El Bloque Norte del Área Boyacá se encuentra enmarcado en la historia geológica de la Faja Petrolífera del Orinoco, por lo tanto para entender la realidad geológica del subsuelo de la zona de estudio, es necesario conocer la evolución histórica de la Faja, la cual está estrechamente ligada con la evolución de la Cuenca Oriental de Venezuela.

Varios autores, entre ellos Parnaud et al. (1995), y Erlich y Barrett (1992), coinciden al indicar que básicamente la evolución geodinámica y tectónica de la Cuenca Oriental de Venezuela comprende las siguientes etapas:

1. Prerift (Paleozoico).
2. Rift y drift durante el Jurásico y Cretácico Temprano.
3. Margen pasivo desde el Jurásico Tardío - Cretácico Temprano hasta el Eoceno.
4. Sistema rumbo-deslizante y compresivo-transpresivo que se ha ido extendiendo desde el Eoceno Medio (oeste) hasta el Oligoceno medio (este).

2.1.1. Etapa Prerift (Paleozoico)

Según Parnaud et al. (1995), las secuencias paleozoicas han sido identificadas en registros sísmicos, en específico, en el flanco sur de la Subcuenca de Guárico (figura 2.1) se evidencian depresiones estructurales donde se preservaron rocas de edad Paleozoica (Formaciones Hato Viejo y Carrizal). De acuerdo con Schlumberger (1997), éstas son principalmente “Capas Rojas” que marcan la apertura de Gondwana (Suramérica y África actuales unidas) y Laurentia (Norteamérica y Groenlandia actuales unidas). La secuencia paleozoica (Carrizal - Hato Viejo) alcanza espesores de 1.5 a 2 s (tiempo doble de viaje), lo que representa alrededor de 3 km a 5 km . Además, en la actualidad no existen datos que indiquen que éstas sirvan de roca madre o reservorio en la Cuenca Oriental de Venezuela.

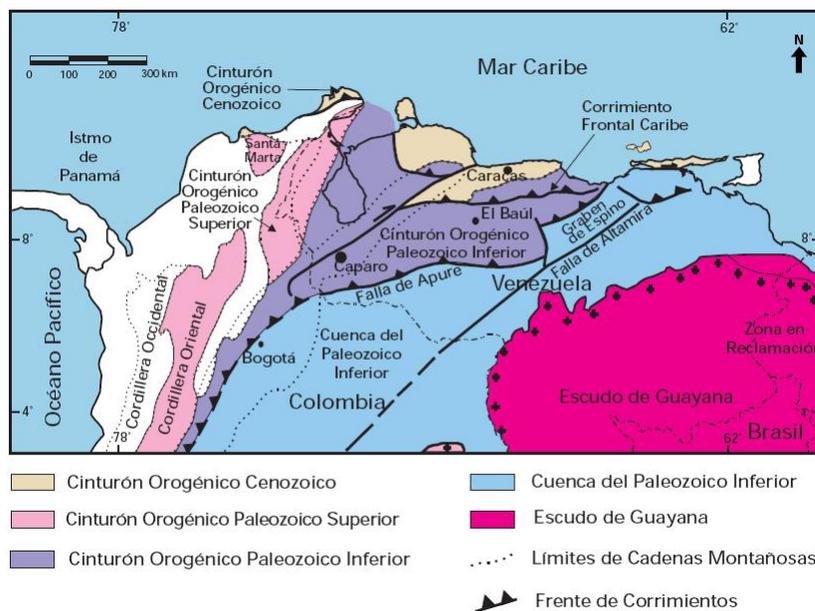


Fig. 2.1. Mapa de distribución de terrenos aloctonos en el norte de Suramérica, en los cuales hay rocas paleozoicas (tomado de Schlumberger, 1997).

2.1.2. Etapa de rift (Jurásico - Cretácico Temprano)

Al separarse Norteamérica de Gondwana, se crea un sistema extensional en el margen norte de Suramérica. Este sistema ocurre en el Triásico Tardío-Jurásico Temprano, y separa Yucatán de la Placa Suramericana (Parnaud et al., 1995). La evidencia de este proceso se encuentra en la base de la Cuenca Oriental (figura 2.2) y está representada por los basaltos y capas rojas de edad Jurásico Medio-Temprano (Formación Ipire), depositadas en el Graben de Espino.

Las investigaciones realizadas por Parnaud et al. (1995) y Erlich y Barrett (1992), sugieren que este rift no está asociado a grandes adelgazamientos de la corteza o a grandes subsidencias, más bien la tendencia es a aceptar un sistema de fallas rumbo deslizantes o transformantes como actividad tectónica durante la separación. Hasta los actuales momentos, las evidencias señalan que los sedimentos sinsedimentarios depositados en este período son de poca relevancia para la generación y acumulación de hidrocarburos.

2.1.3. Etapa de margen pasivo (Jurásico Tardío - Cretácico Temprano al Eoceno)

Esta se caracteriza por la subsidencia del margen norte de Suramérica, desde el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano al Eoceno. En esta etapa se depositan de 3 a 4 km de rocas clásticas marinas, entre las que destacan la Formación Querecual y la Formación San Antonio, las cuales son generadoras de petróleo pesado (Parnaud et al., 1995). Particularmente, en el Área Boyacá este periodo se caracteriza por la depositación del

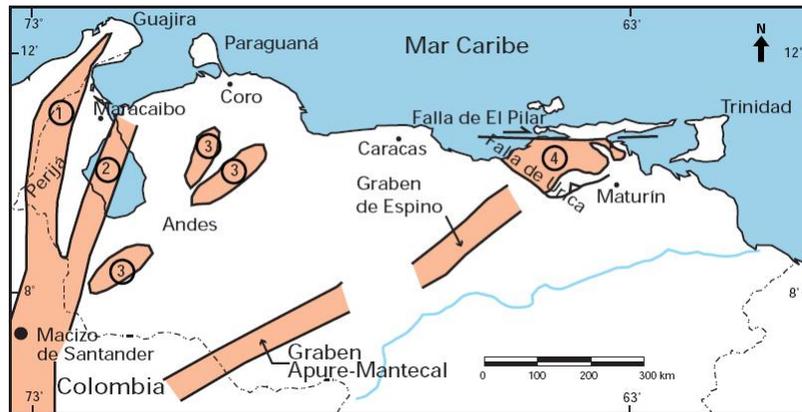


Fig. 2.2. Distribución de las rocas jurásicas en Venezuela. Obsérvese la presencia de estas rocas en el Graben de Espino, principal estructura en el área de estudio (tomado de Schlumberger, 1997).

Grupo Temblador (Cretácico) como se observa en la figura 2.3.

2.2. Sistema rumbo-deslizante y compresivo-transpresivo (Eoceno Temprano - Medio al presente)

Como consecuencia de la colisión oblicua que generó un sistema rumbo-deslizante y compresivo-transpresivo entre la Placa Caribe y la Placa Suramericana (figura 2.4), se creó una cuenca antepaís (foreland). En ella los depósitos característicos de esta cuenca suprayacen a los de la etapa de margen pasivo y se crean las trampas asociadas a fallas. Como consecuencia de la carga litoestática generada por las napas producidas por la colisión (al norte), ocurre una flexión isoestática de la litosfera, que provocó el levantamiento de la zona sur de la cuenca, exponiéndola a la erosión (Schlumberger, 1997).

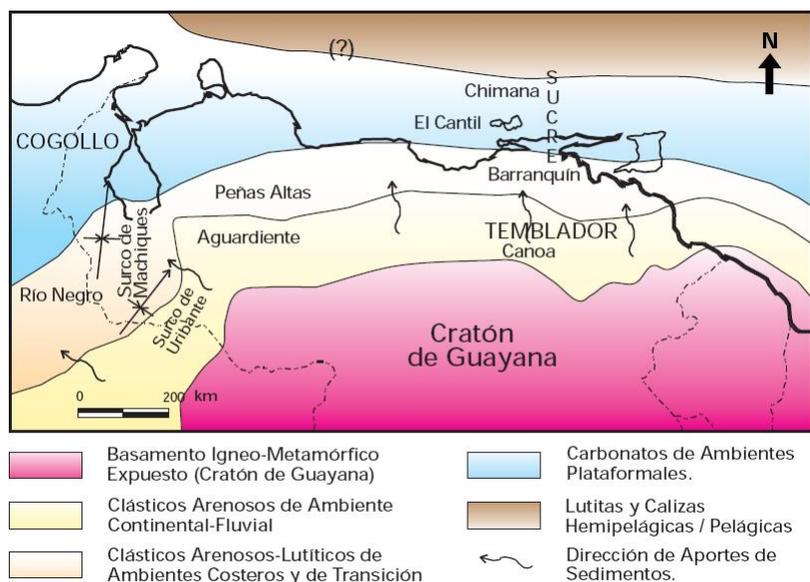


Fig. 2.3. Distribución de las facies sedimentarias dominantes al norte del Cratón de Guayana durante el Cretácico Temprano (tomado de Schlumberger, 1997).

2.3. Síntesis estructural del Área Boyacá

Sucesivos movimientos tectónicos de intensidad variable han afectado la subcuenca de Guárico desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. En las rocas paleozoicas, grandes movimientos tectónicos dieron origen a plegamientos, fallamientos e intrusiones ígneas con bajo metamorfismo asociado. Debido a estos esfuerzos se formaron dos sistemas de fallas normales: uno principal y uno secundario.

Según PDVSA (1983), las fallas del sistema principal poseen una orientación N67E con desplazamientos y extensión de gran magnitud, de los cuales destacan los sistemas de Altamira, Machete y Sabán Ruiz. El sistema secundario posee una orientación N67O y se asocia con los sistemas primarios donde las fallas de Sabán y Altamira constituyen los límites del Graben de Espino.

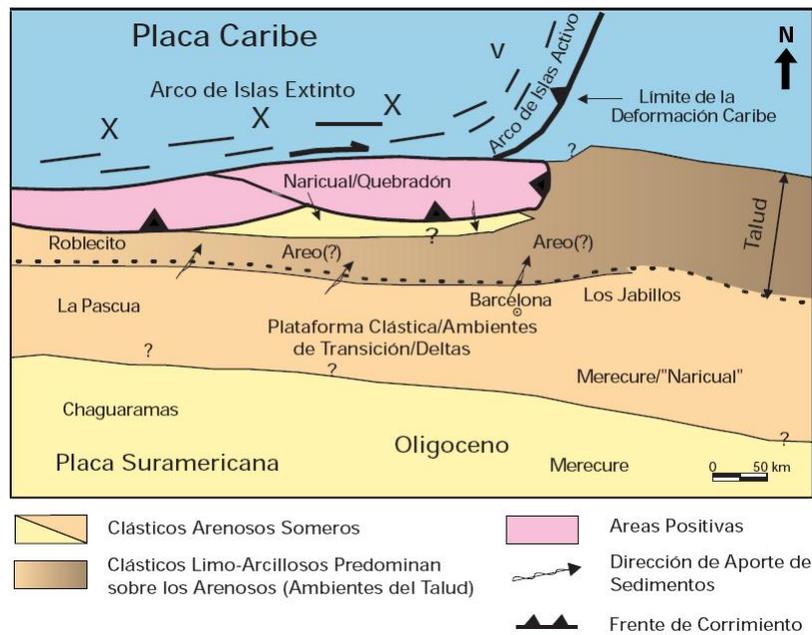


Fig. 2.4. Marco geológico regional para la sedimentación en el flanco norte de la Cuenca Oriental de Venezuela durante el Oligoceno (tomado de Schlumberger, 1997).

La secuencia cretácica alcanza su máximo espesor en el norte de la cuenca, debido a que al iniciarse la sedimentación en el Cretácico la cuenca se inclinó hacia el norte. Por el levantamiento se reactivaron algunas de las fallas paleozoicas principales (Machete y Sabán-Ruiz) y otras menores del sistema secundario, a la vez que se formaban nuevas fallas normales siguiendo la misma orientación (PDVSA, 1983). A este levantamiento le siguió un periodo de fuerte erosión.

La cuenca cambió de posición antes de iniciarse la sedimentación de las formaciones terciarias, al inclinarse hacia el N25O, donde el Terciario alcanza su mayor espesor. Como resultado de la Orogenesis Andina la cuenca basculó hacia el este, reactivando las fallas paleozóicas, algunas de Cretácico, y formando en este proceso las fallas terciarias. Luego de este periodo ocurre una intensa erosión que expone a las formaciones

Roblecito en el noreste y Chaguaramas en el resto del Área Boyacá (PDVSA, 1983).

2.3.1. Graben de Espino

Según PDVSA (1983), esta estructura geológica es la expresión del sistema extensional dominante en la zona de interés, la cual posee una orientación N67E, y espesores determinados por sísmica de más de 8000 pies en el Paleozoico, con un relleno de clásticos de la Formación Ipire (Jurásico) con un espesor máximo de 6000 pies. El Graben de Espino se interpreta como un sistema antiguo de valles de rift, el cual puede estar asociado con los movimientos tensionales de las placas tectónicas en el Mesozoico Inferior, post o contemporáneo con la sedimentación del Jurásico.

El límite sur de esta estructura lo define la falla de Altamira, y su límite norte las fallas Sabán-Ruiz y Machete. El límite noreste es desconocido pero los estudios aeromagnéticos de la zona sugieren la probable extensión bajo el Área Junín hacia Anaco y Barcelona en Anzoátegui (PDVSA, 1983).

2.4. Síntesis estratigráfica del Área Boyacá

Conocer las características que presentan las formaciones encontradas en la zona de estudio es de trascendental importancia para realizar la interpretación sísmoestratigráfica de la zona, por lo tanto se presenta a continuación una síntesis estratigráfica organizada por formaciones, donde se destacan aspectos como la descripción litológica, espesor, contactos, edad y ambiente asociado a cada formación.

2.4.1. Formación Hato Viejo (Cámbrico Temprano)

El LEV III (1997) expone que por estudios de pozos se conoce que esta formación se compone de areniscas de grano fino a grueso, ligeramente calcáreas, intercaladas con conglomerados; posee un espesor máximo de 91 m, se encuentra en contacto discordante con el Escudo de Guayana (infrayacente) y en contacto concordante con la Formación Carrizal. El ambiente asociado a la Formación Hato Viejo es continental, y representa el relleno de cuenca de una fase erosiva, contemporánea o subsiguiente a alta actividad tectónica.

2.4.2. Formación Carrizal (Cámbrico Temprano)

La Formación Carrizal se compone de arcilitas verdosas a gris oscuro, duras, masivas y densas, generalmente se observan arenas hacia la base (LEV III, 1997). Se cree que fue depositada en un ambiente marino nerítico, en aguas someras y condiciones de corriente típicas de llanuras de marea. Se supone que el espesor de esta formación es mayor a 1827 m, presentando un contacto concordante en la base con la Formación Hato Viejo y un contacto erosional en el tope con los sedimentos Pre-Cretácicos (Grupo Temblador), sin embargo en la zona en estudio el contacto en el tope es erosional con la Formación Ipire.

2.4.3. Formación Ipire (Jurásico Medio-Tardío)

Esta formación posee un espesor de 1540 m en el pozo NZZ-88X, y según Moticska (1985), está compuesta por una colada de lava basáltica de 113 m de espesor cercana al tope de la formación, contenida en una secuencias alternantes de areniscas, arcosas, limolitas, lutitas y ocasionales intercalaciones conglomeráticas, de persistente color marrón rojizo en diferentes tonalidades. En esta investigación este hecho resulta de mucha utilidad, ya que servirá para localizar las profundidades del basamento en los pozos, a través del estudio de la descripción litológica en el reporte de perforación de cada pozo.

Además se sabe que la Formación Ipire posee un espesor cercano a 1540 m; desarrollado en un ambiente depositacional fluvial lacustre, que entra en contacto erosional en la base con la Formación Carrizal y en el tope en contacto erosional con el Grupo Temblador (LEV III, 1997).

2.4.4. Grupo Temblador, Formación Canoa (Aptiense-Albiense)

Kiser (1987) describe la Formación Canoa en el Área Machete (actual Área Boyacá) como arenas fluviales masivas no consolidadas, con un espesor promedio de 90 m, que adelgaza hacia el sur, en contacto inferior discordante y superior transicional, acuñándose de forma erosional y estratigráfica contra el Escudo de Guayana. Aparentemente esta secuencia también se acuña estratigráficamente contra el Arco del Baúl. La presencia de conglomerados y restos de plantas sugieren la depositación de esta

secuencia en ambientes continentales (Hedberg y Funkhouser, 1947).

2.4.5. Grupo Temblador, Formación Tigre (Albiense-Santoniense)

La Formación Tigre es de edad variable entre el Albiense y el Santoniense con un hiatus en el Cenomaniense (Van Erve, 1985). Esta formación está compuesta por los miembros La Cruz, Infante y Guavinita, descritos a continuación:

1. Miembro La Cruz: en su parte inferior se compone de areniscas lenticulares, caoliníticas, de grano grueso, con intercalaciones de lutitas negras; en su parte superior se inicia con una lutita negra fosilífera y continua con areniscas de grano fino, calcáreas y glauconíticas que presenten intercalaciones delgadas de lutitas muy fosilíferas (Patterson y Wilson, 1953).
2. Miembro Infante: Patterson y Wilson (1953) lo describen como una caliza densa, compacta y fosilífera. Hacia el sur se va haciendo más arenoso hasta convertirse en arenisca que no se puede diferenciar de los miembros La Cruz y Guavinita. Este último es el caso del área en estudio, donde lamentablemente no se cuenta con este importante reflector sísmico, debido a la cercanía de la zona a la fuente de sedimentos.
3. Miembro Guavinita: según Patterson y Wilson (1953), está constituido por un intervalo basal lutítico de 15 m de espesor, seguido de intercalaciones de areniscas, lutitas, margas, calizas delgadas y fanitas negras, con restos de peces y/o nódulos fosfáticos, con un espesor de unos 30 m.

El contacto inferior de la Formación Tigre es diacrónico y transicional sobre los sedimentos continentales de la Formación Canoa. El contacto superior con la Formación La Pascua es discordante, de tipo erosional, correspondiente a un hiatus de duración considerable (González de Juana et al., 1980).

El ambiente sedimentario de esta formación es generalmente profundo y de tipo talud, con el desarrollo de ambientes de plataforma hacia el sur de la región de Guárico. En el Área Boyacá el espesor promedio es de 170 m (Escalona, 1977).

2.4.6. Formación La Pascua (Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano)

En Mencher et al. (1953) se describe la Formación La Pascua como areniscas y lutitas oscuras, con algunos lignitos, además Isea (1987) afirma que son areniscas regionales transgresivas en la forma de barras litorales, depósitos de marea o de playa, con algunas lutitas de laguna o estuarios, con orientación preferencial este-oeste; observándose un espesor máximo de 137 m en el Área Machete. El contacto superior de esta formación es transicional hacia la Formación Roblecito, y su contacto inferior es una discordancia angular sobre las formaciones cretácicas.

2.4.7. Formación Roblecito (Eoceno Tardío-Mioceno Temprano)

Patterson y Wilson (1953) definen la Formación Roblecito en el subsuelo como una lutita gris a gris oscuro y se destaca en el LEV III (1997) que ésta posee un espesor variable entre 460-580 m en el área mayor de Las Mercedes (al norte del Área Boyacá),

se encuentra en contacto transicional con la Formación La Pascua (infrayacente) y con la Formación Chaguaramas (suprayacente). El ambiente asociado a esta formación es de plataforma media a externa, con períodos de talud en el Oligoceno.

2.4.8. Formación Chaguaramas (Oligoceno Tardío-Mioceno Medio)

La descripción litológica que dan Patterson y Wilson (1953) a esta formación corresponde a una secuencia de areniscas, lutitas y lignitos. En el Área Boyacá, Kiser (1987) menciona un engrosamiento de las areniscas hacia la base de la formación, lo que podría estar asociado a la cresta del Arco del Baúl. Este es un hecho muy importante ya que estas arenas pueden representar grandes yacimientos de petróleo y gas en la zona en estudio.

Isea (1987) considera que esta formación representa la parte superior del ciclo de sedimentación Oligoceno, y corresponde al período regresivo después del tiempo de la Formación Roblecito, correspondiendo sedimentológicamente con barras de desemboadura, ligeramente retrabajadas, interestratificadas con depósitos de pantano, relleno de bahías interdistributarias. Este mismo autor indica que el espesor de esta formación en el Área Boyacá varía entre 183 m y 244 m, adelgazándose hacia el este y hacia el sur. El contacto basal de la Formación Chaguaramas es concordante y transicional con la Formación Roblecito, en cambio su parte superior ha sido erosionada.

Toda la información geológica descrita hasta ahora para cada formación se resume en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Secuencia litoestratigráfica generalizada de la zona de estudio (modificado de Schlumberger, 1997).

Formación	Miembro	Litología	Epoca \ Edad	Ambiente
Chaguaramas		Alternacias de areniscas, lutitas y lignitos	Oligoceno Tardío a Mioceno Medio	Marginal Continental
Roblecito		Lutitas gris a gris oscuro	Eoceno Tardío a Mioceno Temprano	Plataforma media a externa
La Pascua		Areniscas, lutitas oscuras y algunos lignitos	Eoceno Tardío a Oligoceno Temprano	Marino marginal
Tigre	Guavinita	Areniscas, lutitas, margas, calizas delgadas y ftanitas negras	Albiense-Santoniense	Plataforma exterior a talud
	Infante	Caliza densa compacta		
	La Cruz	Areniscas lenticulares y lutitas negras fosilíferas		
Canoa		Areniscas fluviales	Aptiense-Albiense	Continental (fluvial)
Ipire		Areniscas, arcosas color marrón a rojizo	Jurásico Medio a Tardío	Continental (fluvial lacustre)
Carrizal		Arcilitas	Cámbrico Temprano	Marino nerítico

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. El sismograma sintético

Según Liner (2004), el propósito de la simulación 1D es crear una traza sísmica de offset cero, que teóricamente haya sido grabada en la posición del pozo, basada en los registros grabados en el mismo. Dicha traza es el sismograma sintético. Las asunciones que implica un sismograma sintético son:

1. La fuente y el receptor coinciden con la localización del pozo.
2. El buzamiento geológico es cero.
3. El hoyo del pozo es vertical.
4. Las lecturas de velocidad, densidad y profundidad en los registros son precisas.
5. El campo de velocidad solo varía con la profundidad.

De las asunciones anteriores la más difícil de concebir en muchas circunstancias es la del buzamiento geológico igual a cero, debido a que la estructura en el subsuelo normalmente no es despreciable. Sin embargo, se aplica la metodología convencional que será descrita más adelante para calcular la traza sintética, pasando por alto la Ley

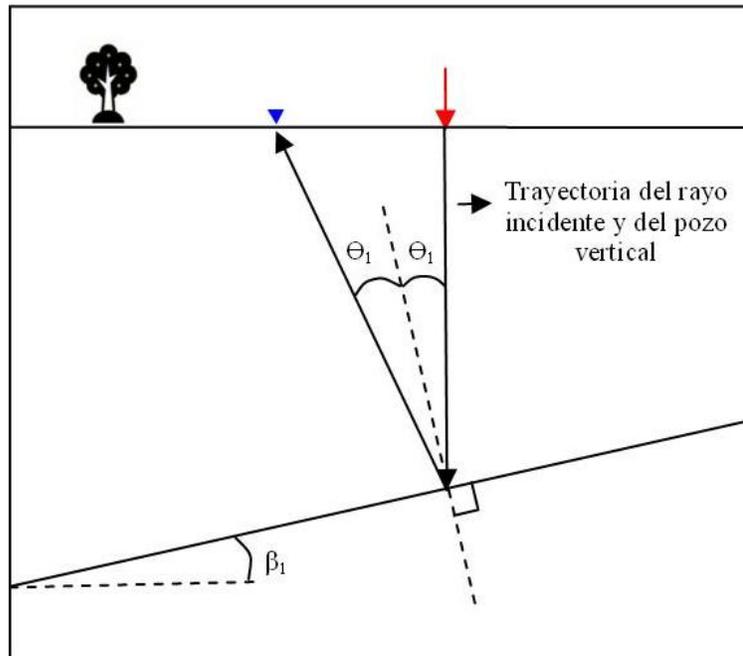


Fig. 3.1. Comportamiento de un rayo incidente en una superficie de acuerdo con la Ley de Snell: obsérvese que la reflexión ocurre con ángulo igual al de incidencia (θ_1), por lo que si la interfase buza (β_1) el rayo se alejará de la vertical.

de Snell, la cual, explica que los rayos que viajan hacia el subsuelo se reflejaran con el ángulo de incidencia respecto a la normal de la superficie, por lo que si la interfase buza, el rayo se alejará de la vertical del pozo como se muestra en la figura 3.1. Esto significa que los tiempos de viaje vertical del sintético no son tiempos de tránsito físicos, sin embargo, si los datos de campo correspondientes a la localización del pozo han sido adecuadamente migrados, representaran tiempos de viaje verticales que pueden ser amarrados al sintético (Liner, 2004).

3.1.1. Modelo del subsuelo

Para crear un sintético o convertir la información del pozo de profundidad a tiempo sísmico, es necesario conocer el modelo de velocidad en función de la profundidad. Este modelo puede provenir de diversas fuentes (VSP, Registros sísmicos, TVS y velocidades del procesamiento), en el caso particular de este estudio se creó un modelo de velocidad a partir de los TVS y registros sísmicos encontrados en conjunto.

En la creación del sismograma sintético también es necesario tener información de densidades del subsuelo en el pozo, y aunque ésta se pueda calcular a partir de los datos del registro sísmico, es recomendable usar información independiente, como por ejemplo de los registros RHOB (densidad).

Al definir el modelo del subsuelo se asume que la Tierra está compuesta por capas horizontales, cada una con velocidades, densidades y espesores estimados a partir de los registros usados para la creación del sismograma sintético. Por lo tanto, si se toma un modelo de capas basado en las variaciones del registro sísmico, dicho modelo puede contener varios cientos de capas, debido a que en estos registros por lo general se toman 5 muestras cada metro (Liner, 2004).

3.1.2. Tiempos de viaje

La elaboración del sismograma sintético requiere del menor tiempo de viaje de las ondas sísmicas desde la fuente hasta el receptor (en este caso ubicados en el mismo punto), el cual se calcula con la ecuación

$$tiempo = \frac{distancia}{velocidad} \Rightarrow \frac{d_1}{v_1} + \frac{d_2}{v_2} + \frac{d_3}{v_3} + \dots \quad (3.1)$$

En primer lugar se calcula el tiempo doble de viaje en la primera capa (TWT_1) sustituyendo en la fórmula anterior, resultando en la siguiente

$$TWT_1 = \frac{2h_1}{v_1}$$

donde h_1 es el espesor de la capa 1 y v_1 la velocidad en la capa 1. Para calcular el tiempo doble de viaje para la segunda interfase (TWT_2), se usa

$$TWT_2 = \frac{2h_1}{v_1} + \frac{2h_2}{v_2} = TWT_1 + \frac{2h_2}{v_2}$$

Generalizando para la n-sima interfase

$$TWT_n = TWT_{n-1} + \frac{2h_n}{v_n} \quad (3.2)$$

Al usar esta ecuación generalizada para todas las interfases, se definen los tiempos de reflexión asociados con cada una de éstas, lo cual ubica los puntos en el eje del tiempo donde se realizarán los cálculos de coeficiente de reflexión, para continuar con la construcción de la traza sintética.

3.1.3. Coeficientes de reflexión

Este describe la amplitud de la onda reflejada respecto a la onda incidente, y viene dado por la expresión

$$R_0 = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \quad (3.3)$$

donde $I = \rho v$ es la impedancia acústica. Al calcular R_0 para cada interfase (definidas en el modelo de capas basado en las variaciones del registro sísmico) y asignarlo a su respectivo tiempo de viaje se obtiene la serie de reflectividad.

3.1.4. Ondícula

De acuerdo con Sheriff (2002), una ondícula se define como un pulso sísmico que consiste usualmente de algunos pocos ciclos. Matemáticamente se puede definir una ondícula como la suma de varias curvas coseno. En la construcción del sismograma sintético, la selección de la ondícula adecuada representa un punto importante, ya que ésta afectará directamente la calidad del ajuste de las secciones sísmicas con los datos del pozo. En consecuencia, los softwares usados tradicionalmente requieren que el usuario especifique una ondícula (teórica o extraída de la sísmica), lo que hace fácil equivocarse. Algunos softwares avanzados escanean los datos e intentan extraer la ondícula, sin embargo esta estimación en datos sísmicos reales es complicada debido a la variación lateral y vertical en la ondícula. Por otro lado, Liner (2004) indica que para la interpretación sísmica se recomienda el uso de ondículas fase cero, por las siguientes

razones:

1. Son bastante agudas (semejante a un pulso) debido a que los lóbulos laterales han sido minimizados.
2. Son simétricas por lo que se obtiene una resolución vertical óptima.
3. Su amplitud pico se localiza en el centro de la ondícula.

3.1.5. Modelo convolucional

Segun Liner (2004), la conexión fundamental entre la serie de reflectividad, traza sísmica y ondícula que la constituye es el modelo convolucional que se expresa con la siguiente ecuación

$$p(t) = w(t) * r(t) + n(t) \quad (3.4)$$

donde $p(t)$ representa la traza sísmica, $w(t)$ es la ondícula, $r(t)$ es la serie de coeficientes de reflexión, $n(t)$ es ruido y el asterisco (*) denota convolución. Esta ecuación es base fundamental de todos los estudios de interpretación sísmica, ya que con ella se define completamente la traza sísmica, y a la vez se obtiene la relación proporcional entre la amplitud de la traza y el coeficiente de reflexión. Sin embargo, Yilmaz (2001) indica que la serie de reflectividad está compuesta sólo de reflexiones primarias, por lo tanto propone sustituir $r(t)$ en la fórmula del modelo convolucional por $e(t)$, la cual es la respuesta impulso del subsuelo que considera las reflexiones múltiples de todos los

tipos. Esta formulación resulta en una traza sintética más aproximada al modelo real, sin embargo el modelo convolucional descrito por Liner (2004) es más simple de elaborar y suficiente en la mayoría de los casos, razones que permitieron elegir este último para ser usado en este estudio.

Los pasos estudiados hasta ahora se resumen en la figura 3.2.

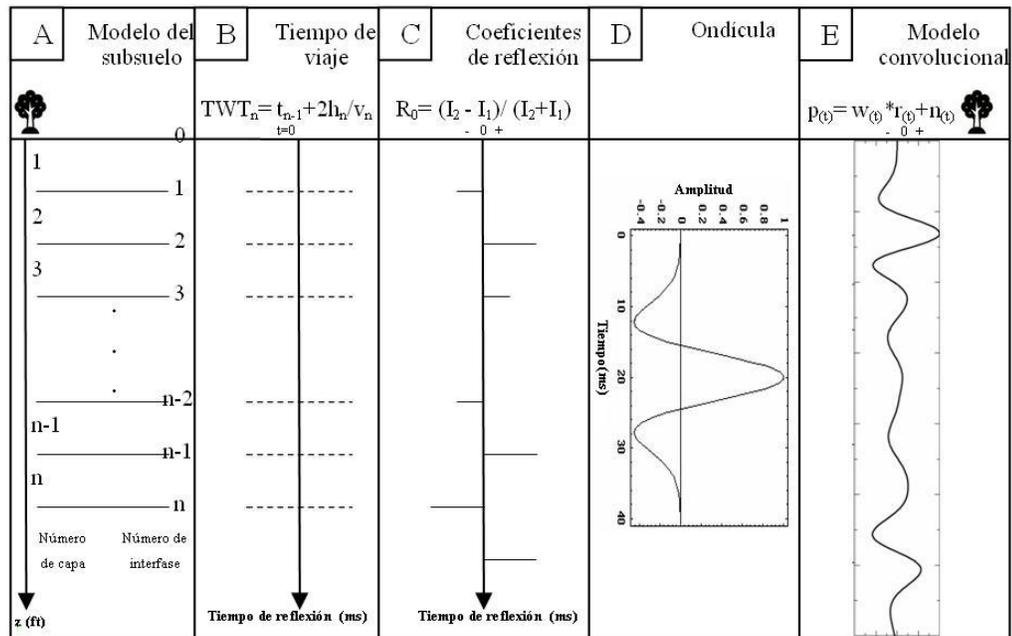


Fig. 3.2. Pasos para la construcción del sismograma sintético: (a) determinación del modelo del subsuelo a través del registro sísmico, (b) cálculo de los tiempos de reflexión para cada interfase, (c) cálculo de los coeficientes de reflexión para cada interfase, (d) selección de la óndícula apropiada, (e) aplicación del modelo convolucional a los datos anteriores.

3.1.6. Problemas en los sismogramas sintéticos

Los sismogramas sintéticos rara vez concinciden perfectamente con los datos de campo. Algunas de las razones de este hecho, descritas por Henry (2000) y sintetizadas

en Liner (2004), se listan a continuación:

- Frecuencia: el rango de frecuencia de los registros sónicos opera en kilohertz (alta frecuencia y pequeña longitud de onda) en cambio el de la sísmica típicamente está entre 10 Hz y 19 Hz (baja frecuencia, gran longitud de onda). Esto implica que las lecturas los registros sónicos están influenciadas por pequeños volúmenes de rocas, en contraste con los recorridos de pozo completo de las ondas sísmicas. Además los efectos de atenuación y capa delgada hacen que las velocidades de los registros sónicos difieran de las medidas en la superficie.
- Anisotropía: los registros sónicos miden las velocidades en dirección vertical, mientras que las ondas sísmicas viajan en una variedad amplia de ángulos medidos desde la vertical. Si hay anisotropía en el medio, la velocidad dependerá de la dirección de viaje de la onda, lo que resulta en velocidades diferentes entre la sísmica y el sónico.
- Problemas del hoyo: los registros sónicos pueden estar influenciados por la zona lavada u otros problemas del hoyo, mientras las ondas de gran longitud de la sísmica no. De acuerdo con esto los datos del TVS también pueden estar contaminados. Box y Lowrey (2003) explican que para poder darles uso se requiere purificar los registros, rechazando los TVS que no se puedan utilizar y aplicando las correcciones ambientales y de dispersión a los registros sónicos.
- Ondícula: como se mencionó anteriormente, la ondícula debe ser definida en los programas por el usuario, ya sea teórica o extraída de la sísmica, sin embargo esta

varía mientras viaja por el subsuelo. Este tipo de problemas deben ser resueltos conjuntamente con la elaboración del sismograma sintético.

3.2. Entonamiento (tuning)

Sheriff (2002) define el efecto de entonamiento como la interferencia constructiva o destructiva resultado de dos o más reflectores espaciados una distancia menor a un cuarto de la longitud de onda dominante. La ondícula compuesta resultante posee una amplitud y fase que dependen de los tiempos de retraso en las llegadas entre las sucesivas reflexiones, la magnitud y polaridad de sus coeficientes de reflexión asociados, y también dependen de la forma de la envolvente de la ondícula. Por otro lado Liner (2004) indica que el efecto de entonamiento es una anomalía de alta amplitud relacionada con el espesor de una capa, que ocurre cuando éste es un cuarto de la longitud de onda ($\lambda/4$), como se observa en la figura 3.3.

Si la interpretación sísmica se realiza con fines de cartografiar eventos de espesor igual o menor al espesor de entonamiento, se vuelve muy importante el estudio de la fase de la ondícula, ya que la anomalía producida por el caso c de la figura 3.3 sería indistinguible de una refelexión simple convolucionada con una ondícula con fase 90° .

3.3. Resolución

Es la habilidad de separar dos eventos que se encuentran cerca (Sheriff, 2002). Liner (2004) hace énfasis en separar entre la resolución vertical y horizontal, definiendo

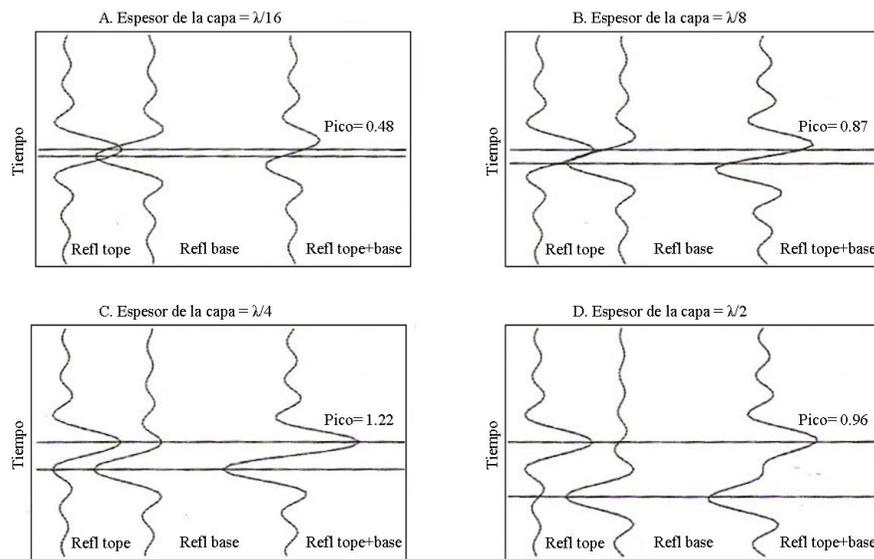


Fig. 3.3. Conjunto de ondículas para definir el efecto tuning: en cada parte de la gráfica las dos trazas de la izquierda son las reflexiones tope y la base, la traza de la derecha es la traza resultante que se observaría en la sección sísmica migrada. Los coeficientes de reflexión son iguales a 1, pero con polaridad opuesta para la segunda interfase. Obsérvese que cuando el espesor es un cuarto de la longitud de onda, la amplitud resultante llega a su máximo (modificado de Liner, 2004).

la primera como la habilidad de identificar picos individuales en una traza sísmica con el tope y la base de una unidad geológica, en cambio la última es la habilidad de ver eventos de pequeña escala (como canales) en mapas o secciones. Estos conceptos están estrechamente relacionados con el límite resoluble, que para reflectores discretos, Sheriff (2002) lo define como la separación mínima que permite comprobar que más de una interfase está involucrada, como se muestra en la figura 3.4. Este valor depende del criterio de comprobación, siendo el límite resoluble de Rayleigh igual a un cuarto de la longitud de onda ($\lambda/4$) y el límite definido por Widde igual a un octavo de la longitud de onda ($\lambda/8$).

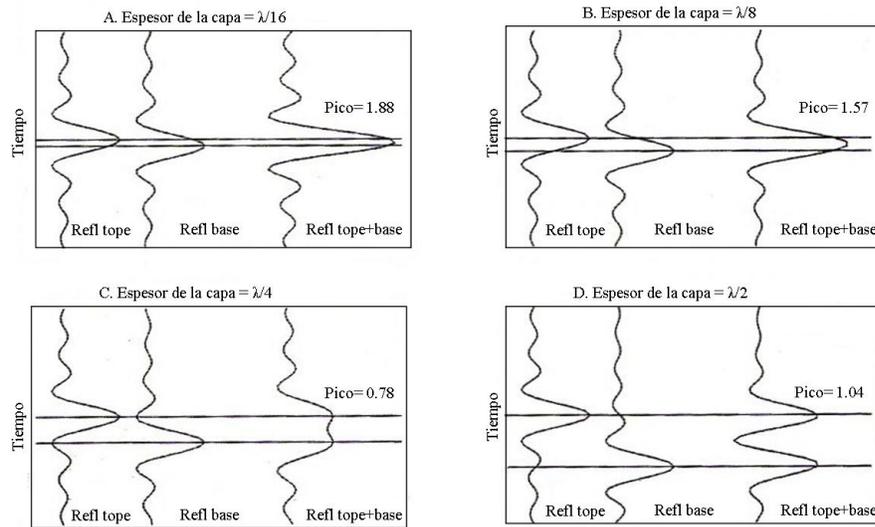


Fig. 3.4. Conjunto de ondículas para definir la resolución vertical: en cada parte de la gráfica las dos trazas de la izquierda son las reflexiones tope y la base, la traza de la derecha es la traza resultante que se observaría en la sección sísmica migrada. Los coeficientes de reflexión son iguales a 1, ambos con polaridad positiva. Obsérvese que cuando el espesor es un cuarto de la longitud de onda, la traza resultante muestra dos picos en vez del pico único que se obtiene para espesores menores, por lo tanto $\lambda/4$ es el límite de resolución vertical para los datos sísmicos, al igual que el espesor de entonamiento (modificado de Liner, 2004).

3.4. Estructura

El objetivo básico de la interpretación sísmica es identificar regiones que propicien probables acumulaciones de hidrocarburos, sintonizando las estructuras y la historia geológica con los períodos de migración y expulsión, para reducir el riesgo en la perforación. Esto comienza con el cartografiado estructural basado en la sísmica y el control de pozo, lo que permite armar un marco estructural y uno o más mapas de horizontes en profundidad presentes en la zona de interés. Luego de que los eventos sísmicos han sido asociados con los horizontes geológicos usando VSP o sintéticos, la interpretación estructural procede con los siguientes tres pasos: (1) detección y cartografiado de fallas,

(2) propagación de horizontes y (3) conversión tiempo-profundidad.

3.4.1. Detección y cartografiado de fallas

La identificación y cartografiado de las fallas es un punto importante de la interpretación sísmica debido a que éstas pueden actuar como trampas de petróleo y barreras de permeabilidad o vías de migración y comunicación de yacimientos. El desplazamiento de las fallas puede ser vertical, horizontal o una combinación de ambos, visualizándose mejor los primeros en secciones verticales y los segundos (fallas rumbo-deslizantes) en secciones horizontales.

Con frecuencia las fallas presentes producen un efecto de degrados en la calidad de la imagen sísmica, como resultado del incremento en la complejidad estructural, difracción en pequeños bloques fallados o conversión de ondas en las zonas de falla (Liner, 2004); sin embargo algunas fallas simplemente no pueden ser vistas en datos sísmicos.

En secciones verticales se pueden identificar las fallas por:

1. Terminación de las capas.
2. Cambios abruptos en el buzamiento de las capas.
3. Amplitudes pequeñas alineadas, también llamadas dim-out o sombra de falla.
 - Sugieren la existencia de fallas rumbo-deslizantes puras, fallas de pequeño salto o fracturas.

- Las migraciones de gas a lo largo de la falla o fractura pueden causar sombras.
- Son comunes en las líneas de rumbo donde las fallas son casi paralelas a la línea.
- Poseen mejor visibilidad en imágenes a color, donde se grafica la amplitud absoluta.

4. Reflexión en el plano de falla

- Se ven mejor en datos preapilamiento o secciones apiladas DMO.
- Es relativamente raro a nivel mundial, pero es común encontrarlo en el Golfo de México.
- Coinciden con la terminación de las capas en las secciones sísmicas migradas.

En la interpretación cualitativa de las fallas solo se demuestra la presencia de éstas, sin embargo en el análisis cuantitativo hace falta identificar su tipo (normal o inversa), orientación, azimut y ubicación precisa a la profundidad del objetivo. Si la falla es vista en una sección ortogonal al rumbo de la falla, se puede calcular la componente vertical del desplazamiento como $\Delta z = \Delta t v / 2$, donde Δt es el salto en tiempo y v es la velocidad intervállica promediada de los bloques levantado y deprimido (Liner, 2004).

3.4.2. Propagación de horizontes

Es necesario cartografiar los patrones de falla antes de propagar los horizontes, debido a que las fallas segmentan en bloques la zona donde se encuentran los datos. Dentro de cada bloque se puede usar la técnica de autopicking para propagar los eventos de interés, para luego armar el mapa compuesto por todos los bloques. El objetivo es crear un mapa estructural en tiempo que represente la geometría de la superficie de reflexión (Liner, 2004).

3.5. Conversión tiempo-profundidad

La conversión tiempo profundidad es el proceso de combinar la estructura en tiempo sísmico, control de pozo y velocidades para crear un mapa o volumen estructural en profundidad. De acuerdo con Liner (2004), existen bastantes técnicas de conversión, cada una involucrada intimamente con la migración. El mejor método para convertir a profundidad depende del tipo de migración aplicada antes de la interpretación, la fuerza en las variaciones laterales de velocidad en el subsuelo y la cantidad de pozos en el área.

3.6. Estratigrafía sísmica

Las técnicas de interpretación sismoestratigráfica aplicadas al análisis de cuencas sedimentarias resultan en nuevas formas de subdividir, correlacionar y cartografiar las rocas sedimentarias. En este proceso, la estratigrafía secuencial aplicada a los datos

sísmicos agrupa las reflexiones en paquetes que corresponden con intervalos depositacionales ligados genética y cronoestratigráficamente, conocidos como secuencias depositacionales y sistemas encadenados. Bally (1987) indica que las secuencias depositacionales y sistemas encadenados poseen patrones de estratificación y litofacies predecibles, por lo que proveen nuevas formas de establecer un marco de correlación cronoestratigráfica basado en criterios físicos.

Los ambientes sedimentarios y litofacies están asociados con los sistemas encadenados, por lo tanto al identificar los sistemas encadenados en las secciones sísmicas se provee un marco de predicciones más acertado que mejora la certidumbre en la localización de yacimientos, rocas madre y sello, así como de los caminos de migración de hidrocarburos (Bally, 1997). Además, los sistemas encadenados representan objetivos sísmicos de mayor espesor que los yacimientos, por lo que identificar los primeros resulta mucho más conveniente, y dado que ambos están relacionados genéticamente, al identificarlos sistemas encadenados se podrán hallar con mayor facilidad los yacimientos.

3.6.1. Procedimiento de interpretación sísmica

Varios autores han propuesto procedimientos de interpretación sísmica similares; sin embargo, Bally (1987) realizó una propuesta que engloba los aspectos más importantes de cualquier procedimiento de interpretación, la cual se presenta a continuación:

1. Análisis sísmico secuencial.

2. Análisis de registros de pozo.
3. Sintético: amarre de la sísmica al pozo.
4. Análisis de facies sísmica.
5. Interpretación de ambientes depositacionales y litofacies.
6. Modelaje sísmico directo.
7. Interpretación final.

Los últimos tres puntos corresponden a trabajos cuyos objetivos contemplan recopilar todos los datos cuantitativos conocidos en la cuenca en estudio para realizar un análisis integrado de la misma (en la interpretación final). Estos objetivos escapan a lo que se espera de un Trabajo Especial de Grado, por lo que únicamente serán descritos los cuatro primeros puntos.

1. Análisis sísmico secuencial: éste define los paquetes de reflexión asociados a las secuencias sísmicas y a los sistemas encadenados, al identificar las discontinuidades en base a los patrones de reflexión (onlap, downlap, toplap y truncación erosional) en las terminaciones de los horizontes sísmicos.
2. Análisis de registros de pozo: se realizan los estimados preliminares de secuencias y sistemas encadenados al interpretar las litofacies depositacionales a partir de los registros de pozo calibrados con núcleos y secciones finas. Lo anterior se

hace para determinar los cambios en el acomodamiento de los patrones de api-lamiento en las parasecuencias. Los estimados preliminares son verificados de dos formas: primero con la correlación entre pozos (bioestratigráfica y cronoestratigráfica), entre los marcadores de tope en los registros de pozo, y con la Carta de Ciclos Globales (Global Cycle Chart); y segundo con los perfiles sísmicos.

3. Sintético: amarre de la sísmica al pozo: como se mencionó anteriormente, el objetivo de este paso es amarrar la información de pozo en profundidad al tiempo sísmico (sección sísmica), además de conocer los factores que causan la reflexión sísmica al entender los patrones de interferencia constructiva y destructiva de ondículas individuales que se originan en contrastes de impedancia. Bally (1987) recomienda que los pasos 1 y 2 de esta secuencia de interpretación empiecen independientemente, para que las discontinuidades sean identificadas lo más objetivamente posible, tanto en los datos sísmicos como en los de pozo antes de ser amarrados con el sintético.
4. Análisis de facies sísmica: en este paso se pretende determinar lo más objetivamente posible todas las variaciones de los parámetros sísmicos dentro de secuencias sísmicas individuales y sistemas encadenados con el fin de determinar cambios laterales de litofacies y tipo de fluidos. Las secciones (bien procesadas) generadas a partir del atributo sísmico de velocidad instantánea son ideales para el análisis de facies sísmicas. Es importante que las secuencias sísmicas y los límites de sistemas encadenados interpretados en los perfiles sísmicos sean

usados para identificar discontinuidades físicas.

3.6.2. Patrones de reflexión

Los patrones de reflexión (figura 3.5) pueden ser divididos en dos grupos: los que se observan por encima de una discontinuidad (onlap y downlap) y aquellos que se encuentran por debajo de ésta (truncación erosional y toplap). Bot y Perdomo (1986) asocian los patrones de reflexión sísmica con los eventos geológicos como se muestra en el cuadro 3.1.

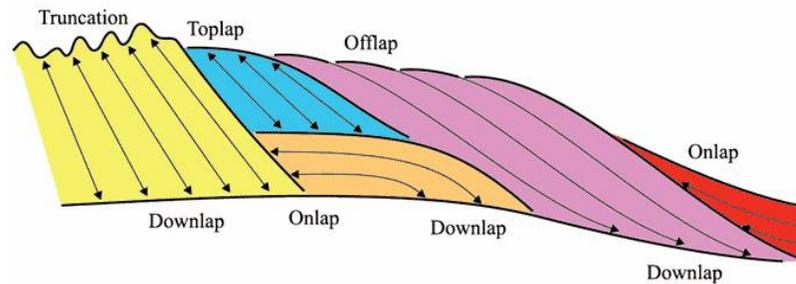


Fig. 3.5. Ilustración de los patrones de reflexión (modificado de Mitchum, 1977).

3.7. Parámetros sísmicos

Los parámetros sísmicos son descritos en Bally (1987) como una serie de factores que dependen de las características de la onda, los cuales varían a través del medio sedimentario. Los más usados son:

1. Geometría del reflector dentro de la secuencia o sistema encadenado.

Tabla 3.1. Significado geológico de las terminaciones sísmicas.

Terminación	Significado geológico
Onlap	<ul style="list-style-type: none"> • Agradación • Transgresión
Downlap	<ul style="list-style-type: none"> • Progradación
Truncación erosional	<ul style="list-style-type: none"> • Hiatus sedimentario • Progradaciones deltaicas
Toplap	<ul style="list-style-type: none"> • Erosión • Tectonismo

2. Amplitud de la onda.
3. Continuidad.
4. Disposición de las secuencias.
5. Velocidad intervállica.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología usada en el presente trabajo sigue los lineamientos recomendados por Bally (1987) y Liner (2004), descritos en el marco teórico, sin embargo es necesario enfatizar cada uno de los pasos que resultaron en los mapas en profundidad de las superficies erosivas estudiadas. Para esto se elaboró la figura 4.1, con el fin de canalizar la suceción de eventos llevados acabo en esta investigación, la cual además servirá de guía para enlazar dichos eventos.

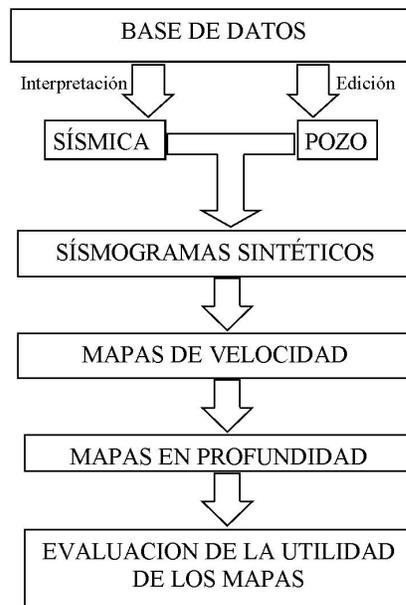


Fig. 4.1. Metodología seguida para la construcciones de los mapas de profundidad de las superficies erosivas de interés.

4.1. Base de datos

En primer lugar se armó la base de datos de esta investigación, con el fin de validar y evaluar la veracidad y confiabilidad de los datos de entrada al proceso de interpretación. Este punto quizás sea el de mayor importancia en toda la metodología de interpretación, ya que de él depende la certeza y calidad de los resultados finales. Para construir esta base de datos fue necesario el inventario de información de la zona (proporcionado por PDVSA), de donde se seleccionaron los datos sísmicos útiles para el proceso de interpretación (líneas sísmicas y datos de pozos).

Las líneas sísmicas fueron seleccionadas y agrupadas según su tipo de procesamiento (apilada o migrada) y sus parámetros de adquisición (tiempo de grabación, tasa de muestreo e intervalo de grupo), ambos reflejados en las secciones sísmicas impresas existentes, los cuales se plasman en la tabla 4.1.

Por otro lado a los pozos que poseen TVS en el área se les determinó si poseen curvas Caliper, GR, densidad y DT (tabla 4.2), a partir de la información reflejada en las carpetas de registros proporcionada por PDVSA. Cabe destacar que todos los pozos usados en este estudio poseen interpretación geológica secuencial a los niveles de interés, lo que resulta de gran importancia para la calibración de las secciones sísmicas.

Tabla 4.1. Parámetros de grabación y versión de las líneas sísmicas.

Proyecto \ Año	Intervalo de grupo (m)	Tasa de muestreo (ms)	Tiempo de registro (s)	Versión
bycgz 1975-1976	75	2	5	Apilada
bycgm 1978-1979	50	2	4	Apilada
bycsd 1980	75	2	4	Apilada
bycmch 1981-1982	50	2	4	Apilada (1981) Migrada (1982)
bycgt 1993-1994	50	2	4	Migrada

Tabla 4.2. Inventario de curvas de interés presentes en los pozos.

Pozo	Caliper	GR	SP	DT	RHOB	DPHI
BYC-88	✓	✓	✓	✓	✓	
BYC-13	✓	✓	✓	✓		✓
BYC-43	✓	✓	✓	✓	✓	
BYC-53	✓	✓	✓	✓		✓
BYC-63	✓	✓	✓	✓		✓
BYC-14	✓	✓	✓	✓	✓	
BYC-17	✓	✓	✓	✓		✓
BYC-117	✓	✓		✓	✓	
BYC-217	✓	✓	✓	✓		✓
BYC-517	✓	✓	✓	✓	✓	
BYC-817	✓	✓	✓	✓	✓	
BYC-28	✓	✓		✓		✓
BYC-48	✓	✓	✓	✓		✓
BYC-58	✓	✓	✓	✓	✓	

Al finalizar la recopilación de los datos sísmicos seleccionados, se procedió a cargarlos en los software de interpretación sísmica (Openworks) y edición de registros (IP), lo que permitió continuar con los siguientes pasos en el proceso de interpretación.

4.2. Interpretación sísmica

De este paso se espera obtener los horizontes sísmicos interpretados en tiempo y los mapas que con ellos se crean, por lo cual se siguió el procedimiento esquematizado en la figura 4.2.

4.2.1. Selección de las mejores líneas

Inicialmente se seleccionaron las mejores líneas para realizar la interpretación, de acuerdo con su ubicación relativa a los pozos, así como la representatividad de éstas en la zona y la calidad de las reflexiones presentes en las mismas. La elegibilidad de la línea aumenta mientras más pozos se ubiquen sobre ella y mayor sea su longitud dentro de la zona de estudio. De este proceso de selección se obtuvo, casi de inmediato, que las mejores líneas para realizar la interpretación son las bycgz-13, bycgz-20-A y bycgz-20-B, todas con dirección norte-sur aproximadamente; y las líneas bycgm-I-1, bycgz-I-C, bycgz-I-A, bycgz-I-2 y bycgz-I-1 con dirección este-oeste aproximado. Estas secciones se muestran en las figuras 4.3, 4.4 y 4.5.

Las secciones seleccionadas se imprimieron con dimensión horizontal de 22 traza por cada centímetro, y vertical de 5 pulgadas en el papel correspondientes a 500 ms en

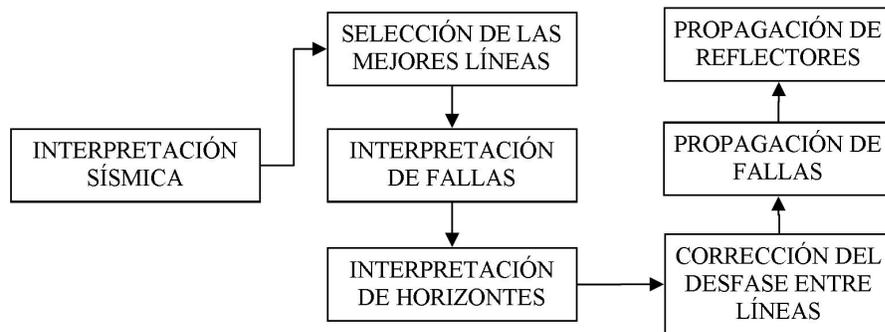


Fig. 4.2. Esquema que refleja la metodología seguida para realizar la interpretación sísmica.

la sísmica. Estas proporciones resultaron las más adecuadas para visualizar las terminaciones sísmicas de manera impresa, por lo que fueron usadas para identificar las fallas (interrupción abrupta de reflectores) y patrones de reflexión sísmica (onlap, downlap y truncaciones) presentes en las secciones seleccionadas. Esta interpretación se llevó a la plataforma de interpretación para ser usada como punto de partida en la propagación de fallas y horizontes, sin embargo fue necesario realizar primero la corrección por desfase entre líneas sísmicas que se cruzan con las seleccionadas.

4.2.2. Corrección del desfase entre líneas sísmicas que se cruzan

Las líneas seleccionadas sirvieron como guía para la identificación de todos los reflectores importantes en la zona. En este punto fue necesario propagar el horizonte más profundo y fácil de encontrar en todas las secciones (posteriormente definido como Tope-Precretácico). Este horizonte se caracteriza por presentar truncaciones bien marcadas, distinguibles en la parte sur de la zona en estudio. Una vez identificado en todas

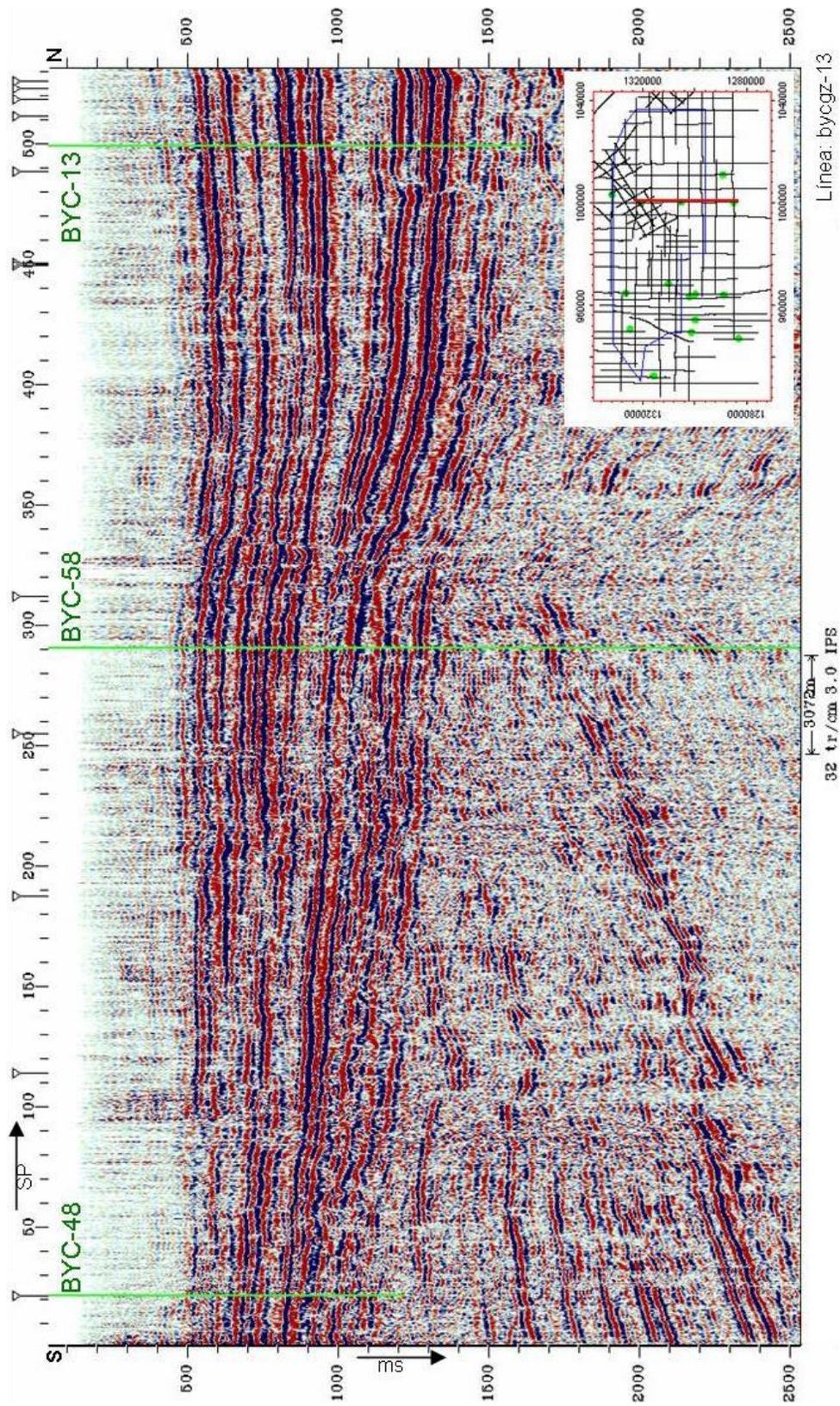


Fig. 4.3. Sección sísmica bycgz-13 sin interpretar. En verde se resalta el nombre y ubicación de los pozos.

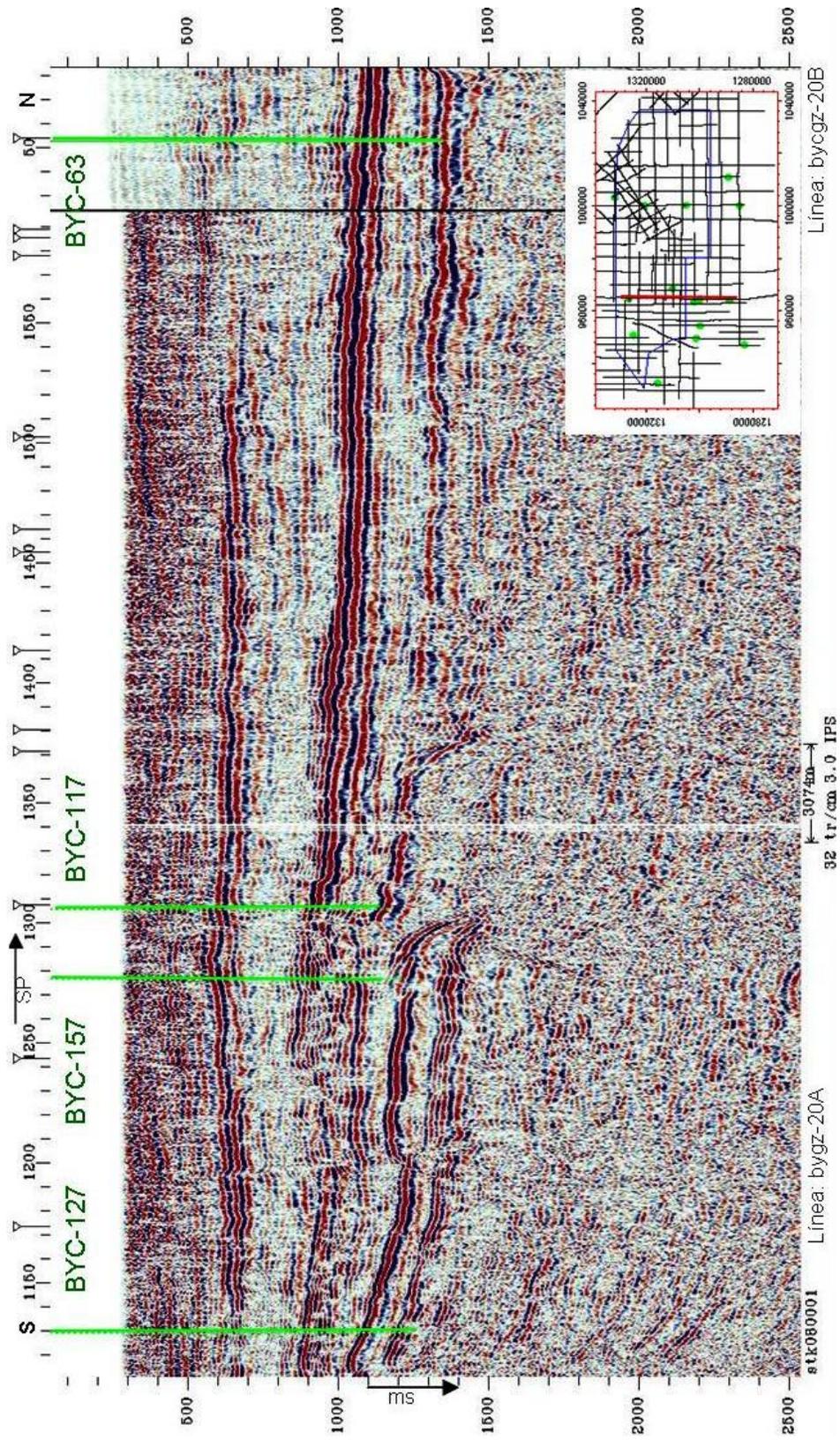


Fig. 4.4. Secciones sísmicas bygz-20-A y bygz-20-B sin interpretar. En verde se resalta el nombre y ubicación de los pozos.

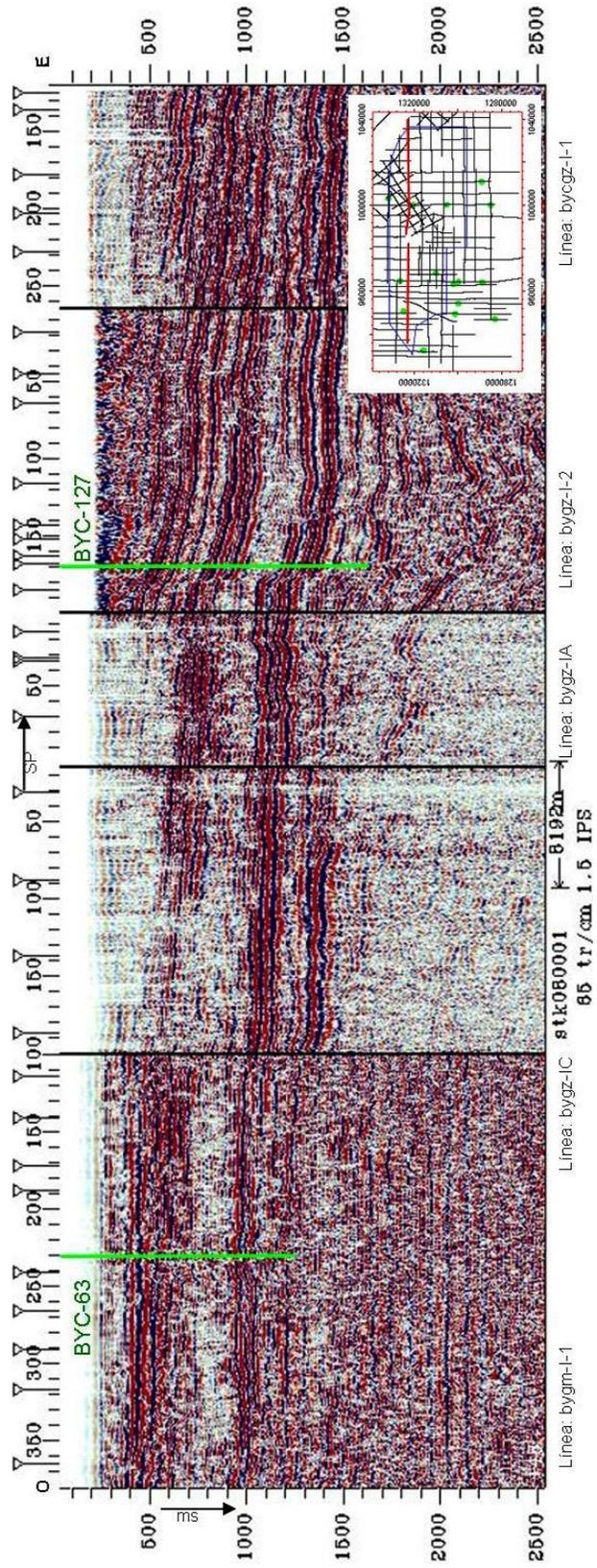


Fig. 4.5. Secciones sísmicas bycgm-I-1, bycgm-I-1, bycgm-I-C, bycgm-I-A, bycgm-I-2 y bycgm-I-1 sin interpretar. En verde se resalta el nombre y ubicación de los pozos.

las secciones, el Tope-Precretácico sirvió como marcador para ajustar el resto de las líneas a las secciones sísmicas escogidas en primera instancia, con la que se corrigió el desfase entre todas las líneas del proyecto.

4.2.3. Propagación de fallas

A cada falla interpretada en las secciones sísmicas norte-sur seleccionadas se le identificó una serie de características, como el tipo de movimiento, ubicación en el espacio, buzamiento y salto aparente (ambos en tiempo), lo que permitió vincular respuestas similares en las demás secciones a estas fallas. De esta misma manera se identificaron y relacionaron fallas que no están presentes en las secciones impresas, pero que pueden apreciarse en dos o más secciones norte-sur en la plataforma de interpretación. El uso de las secciones norte-sur para identificar las fallas es debido a la disposición espacial de las estructuras en la zona, reportada por PDVSA (1983) con una orientación N67E aproximada.

4.2.4. Propagación de horizontes y construcción de mapas en tiempo

Al igual que las fallas, cada horizonte identificado presenta una respuesta sísmica distintiva, lo que permite encontrarlos fácilmente en las demás secciones (figuras 5.3, 5.4 y 5.5); además se cuenta con los marcadores guías que representan la intersección de los horizontes interpretados previamente con las secciones sin interpretar.

Para garantizar la coherencia en la interpretación de los horizontes, la propagación

de los mismos se realizó conectando secciones que forman polígonos cerrados (rizos), como se muestra en la figura 4.6.

Luego de haber propagado todos los horizontes en el área, se construyeron los mapas de tiempo para cada tope de interés, usando el método de interpolación convergente entre los puntos de cada horizonte interpretado.

4.3. Edición de registros de pozo

Esta etapa consiste en validar, de acuerdo a las necesidades sísmicas, las curvas de los pozos que van a ser usadas en el proceso de interpretación. Para esto, se deben realizar los pasos descritos en la figura 4.7.

4.3.1. Carga de registros

En primer lugar se deben cargar los registros, en formato LAS, a la interfaz de edición. De esta manera, se logra construir una base de datos organizada de los pozos y sus registros respectivos. Posteriormente se le pidió al programa de edición que desplegara las curvas en tres pistas, de manera que en la primera quedan las curvas SP, GR y Caliper, en la segunda las de resistividad (ILD, LLD, etc) y en el tercero las de densidad y sísmico (figura 4.8). En este apartado se incluyen las curvas de resistividad debido a que sirven para controlar la interpretación del comportamiento del registro GR; dichas curvas no fueron tomadas en cuenta para el inventario de la base de datos, ya que se encuentran presentes en todos los pozos y su contribución a esta investigación es poco

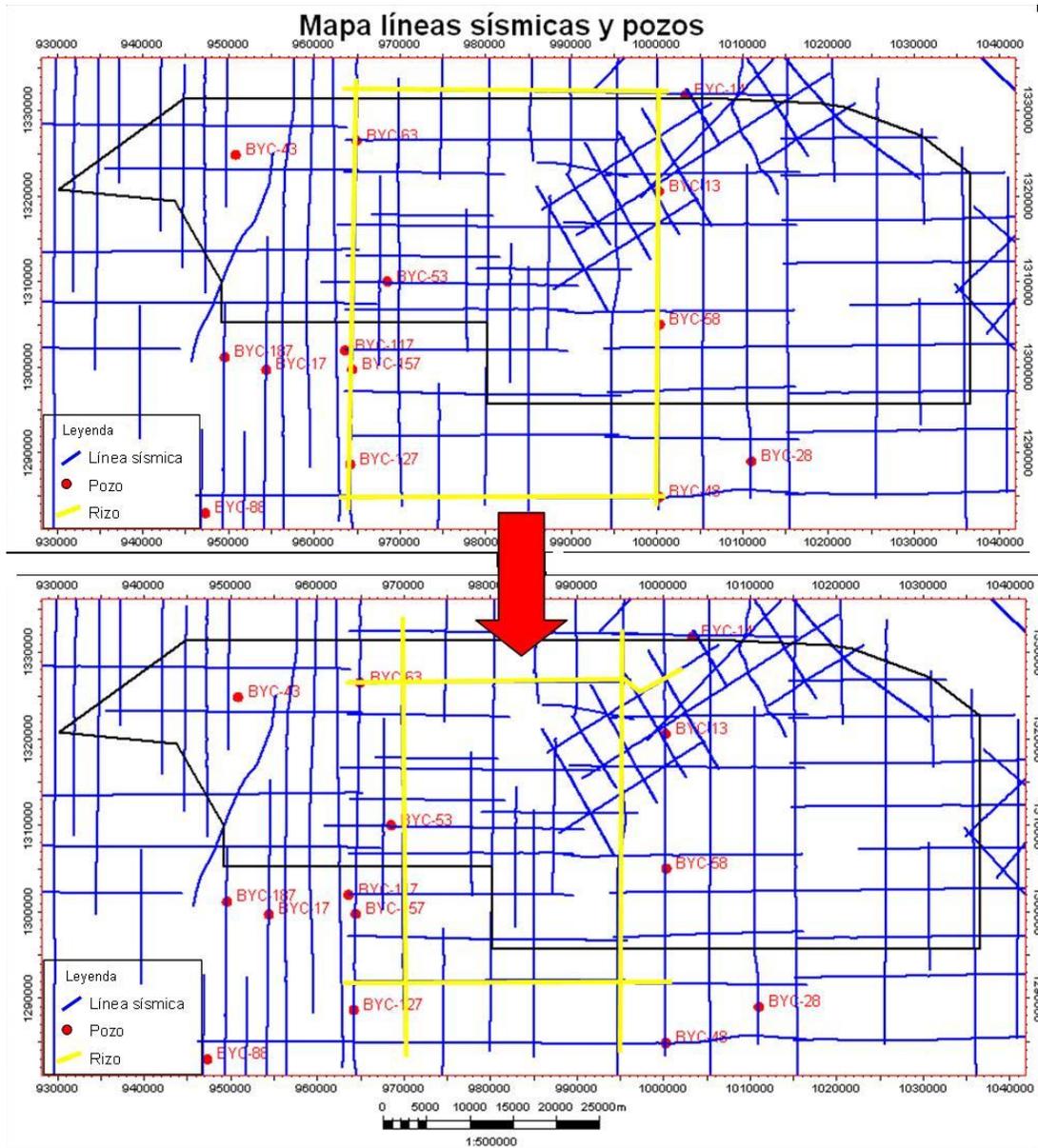


Fig. 4.6. Metodología de rizo usada en la propagación de horizontes. Se empieza por interpretar los rizo que abarquen mayor área (figura superior), para luego interpretar los que estén contenidos en ellos (figura inferior).

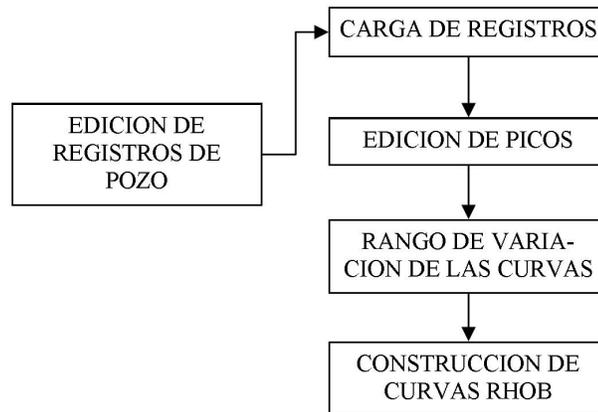


Fig. 4.7. Esquema que refleja la metodología seguida en la edición de los registros de pozo.

representativa.

4.3.2. Edición de picos

Principalmente los registros (DT y densidad) que presentan intervalos aislados sin lectura poseen picos que podrían derivar en reflexiones muy marcadas al realizar los sismogramas sintéticos. Debido a esto, es necesario sustituir estos valores de las curvas por un promedio tomado entre los puntos cercanos (máximo 5 ft), de forma tal que la curva siga la tendencia global en estos puntos (figura 4.9).

4.3.3. Rango de variación de las curvas

Con este paso se restringen a un rango específico (figura 4.3) los valores de los registros, lo cual acota los datos que salen del rango a los límites definidos. Con lo anterior se logra redimensionar todas las curvas, para que aquellas del mismo tipo se

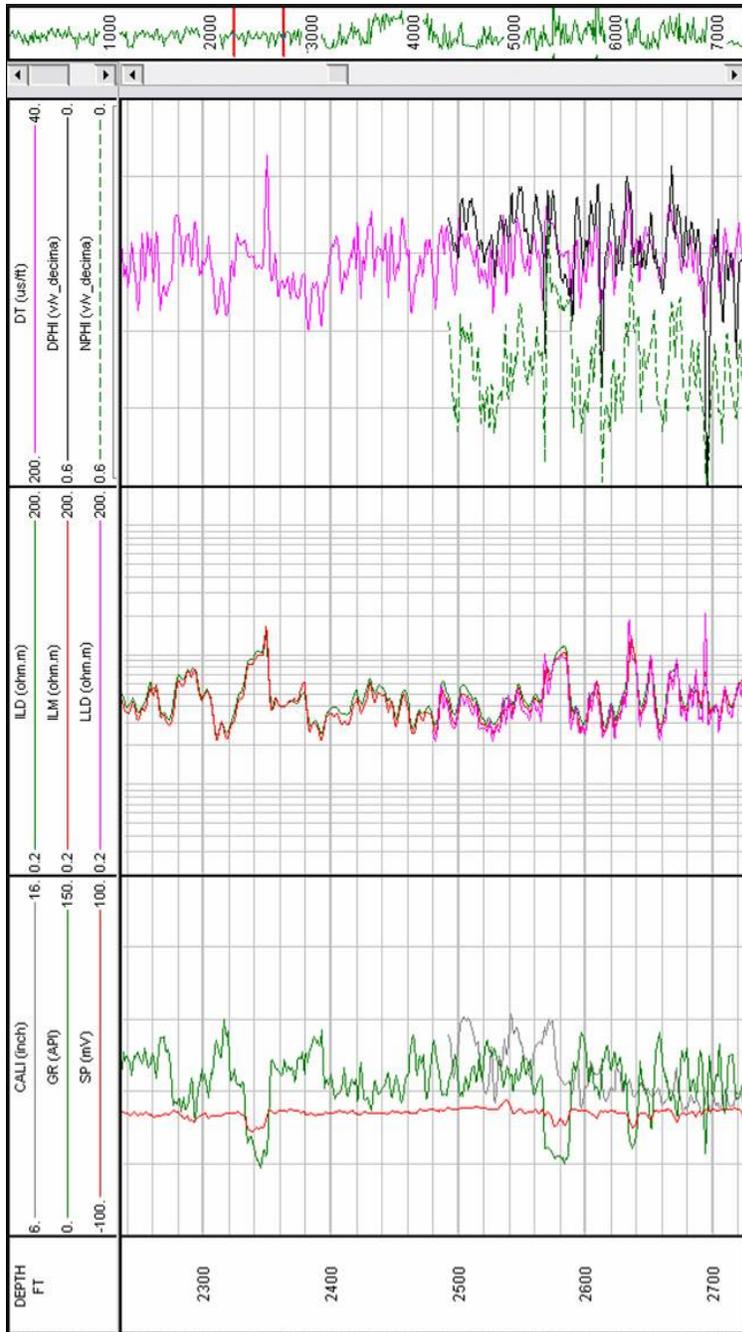


Fig. 4.8. Despliegue de los registros de interés para encontrar valores anómalos.

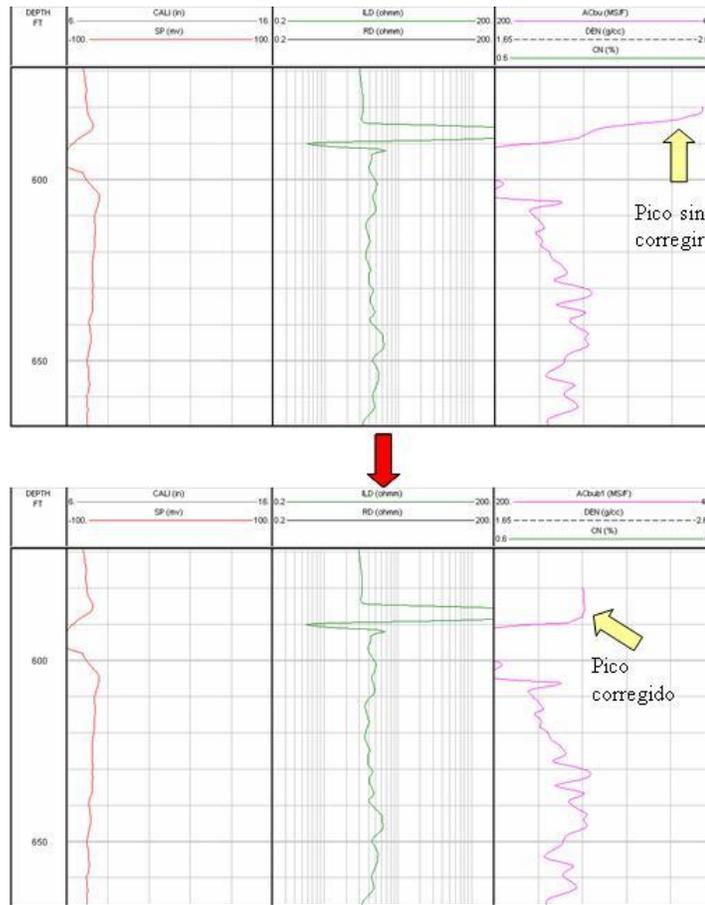


Fig. 4.9. Ejemplo de sustitución de un pico en el registro sónico (en morado) por el valor promedio de esa zona.

encuentren en una misma escala.

4.3.4. Construcción de curvas RHOB faltantes

Todos los pozos inventariados en la base de datos poseen registros de densidad, sin embargo no todos poseen la densidad adecuada (RHOB) para elaborar el sismograma sintético. Lo anterior es debido a que la curva DPHI no se encuentra en una escala apropiada para el tratamiento sísmico, por lo tanto ésta debe ser convertida a RHOB

Tabla 4.3. Rango de variación de los registros de pozo.

Registro	Rango	Unidades
DT	200 a 40	$\mu s \backslash ft$
RHOB	1.9 a 2.9	$g \backslash cm^3$
DPHI	0.6 a 0	$g \backslash cm^3$
GR	0 a 150	$^{\circ} API$
SP	-100 a 100	mV
Caliper	6 a 16 8 a 18	pulgadas
Resistividad (logarítmica)	0.2 a 2000	ohm.m

usando la fórmula de Wyllie (4.1).

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_{fl}} \quad (4.1)$$

donde ϕ es la porosidad (DPHI), ρ_{ma} es la densidad de la matriz de la roca (igual a $2.65 \text{ g} \backslash \text{cm}^3$ de acuerdo a la calibración para correr el registro), ρ_{fl} es la densidad del fluido que contiene la roca (igual a $1 \text{ g} \backslash \text{cm}^3$ debido a que se considera mayormente saturada de agua) y ρ_b es la densidad de la roca (RHOB). Despejando RHOB y sustituyendo en 4.1

$$RHOB = 2,65 - 1,65DPHI \quad (4.2)$$

con la cual se completa el juego de curvas RHOB para construir el sismograma sintético a cada pozo.

4.4. Elaboración de los sismogramas sintéticos

A cada pozo se le construyó un sismograma sintético, siguiendo los pasos señalados en la figura 4.10. De esta manera se logró vincular directamente la información de los registros de pozo con la sísmica, paso fundamental en el proceso de interpretación.

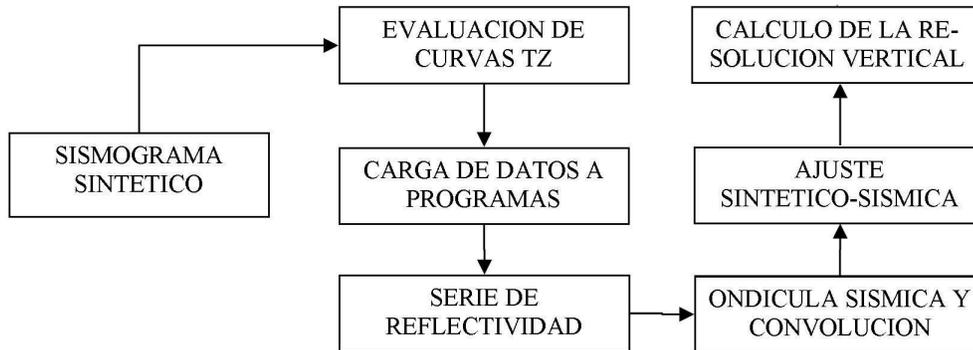


Fig. 4.10. Esquema que refleja la metodología seguida en la construcción de los sismogramas sintéticos.

4.4.1. Evaluación de curvas tiempo-profundidad (tz)

Las curvas tiempo profundidad de cada pozo fueron graficadas con el fin de determinar si cumplen los requerimientos para la elaboración del sismograma sintético. En ellas se busca que reflejen una velocidad siempre creciente con la profundidad, es decir que no exista inversión de velocidades; y que no posean picos anómalos, propios de valores mal medidos (variaciones en el diametro del hoyo) o mal cargados.

Se graficaron todas las curvas a la vez, referenciadas al nivel medio marino, para evaluar la homogeneidad del gradiente de velocidades en la zona. Si el gradiente resulta homogéneo, es suficiente con realizar un sólo sismograma sintético para toda la zona, debido a que la ley de velocidades servirá en cualquier lugar; sin embargo como se puede apreciar en la gráfica 4.11 esto no es necesariamente cierto en este estudio.

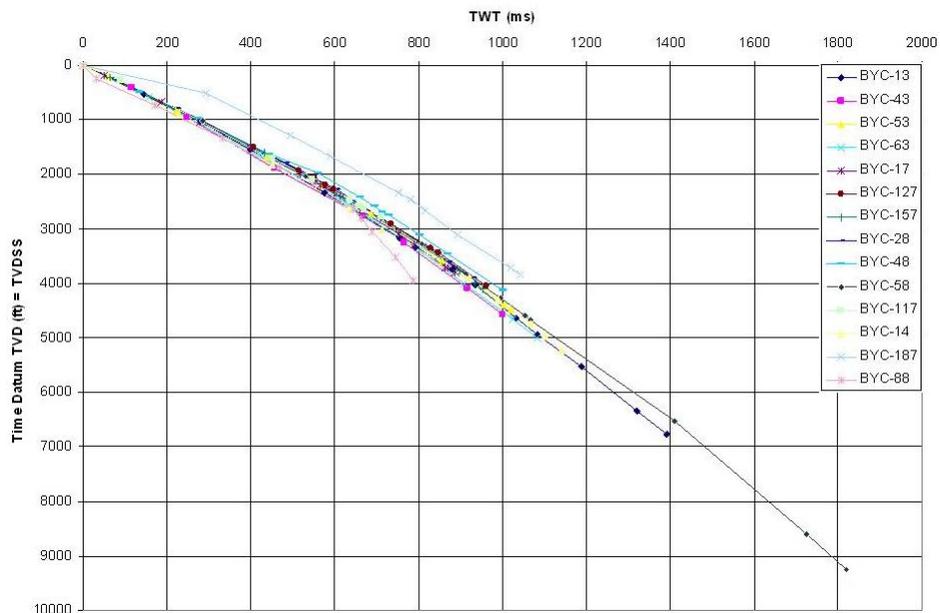


Fig. 4.11. Relaciones tiempo-profundidad iniciales. Obsérvese que el gradiente en la zona no es homogéneo, así como los valores anómalos en las curvas correspondientes a los pozos BYC-88 y BYC-187

4.4.2. Cargado de curvas a la interfase de interpretación

Una vez organizadas las curvas por pozo en el programa de edición, éstas deben ser exportadas en formato LAS, para luego ser cargadas en la plataforma de interpretación. Igualmente las curvas tz de cada pozo deben ser cargadas en esta interfaz para realizar

el sismograma sintético.

4.4.3. Selección de curvas, aplicado de TVS y serie de reflectividad

La interfaz usada para crear el sismograma sintético solicita en primer lugar que se seleccione el pozo al cual se le va a aplicar el procedimiento. Luego, es necesario seleccionar las curvas con que se va a trabajar (DT, RHOB y TVS) del pozo en cuestión, para que el programa pueda continuar con el procedimiento de construcción del sintético.

A continuación se aplica la corrección por TVS al registro sísmico, en la cual se ajusta por tiempos de tránsito interválicos (ITT) las lecturas del sísmico a partir del TVS. Con toda esta información, el programa tiene suficientes datos para elaborar la primera versión del sismograma sintético.

Como fue descrito en el marco teórico, el programa define los tiempos a los cuales se encuentran las interfases, a partir del registro sísmico (corregido por TVS). Luego calcula el TWT hasta cada interfase usando la ecuación 3.2. Igualmente a cada interfase se le determina su coeficiente de reflexión con la fórmula 3.3 en base a los registros sísmico y RHOB. Al asignar cada coeficiente de reflexión calculado a su respectivo TWT, se obtuvo la serie de reflectividad necesaria para la convolución.

4.4.4. Selección de la ondícula sísmica y convolución

En primer lugar se extrajo la ondícula de una ventana sísmica seleccionada de tal manera que abarque la secuencia Intramioceno-Precretácico completa (en tiempo) y al menos tres trazas a cada lado respecto a la posición del pozo (figura 4.12). Se usó el método de autocorrelación para realizar esta extracción.

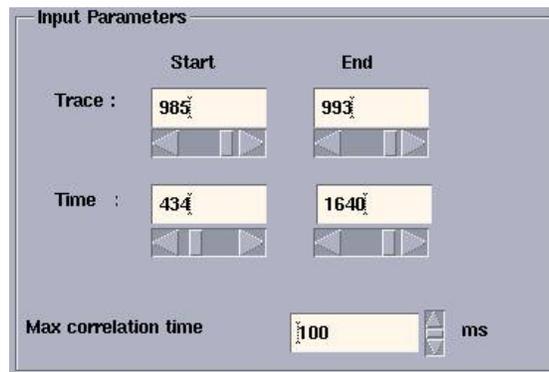


Fig. 4.12. Ventana seleccionada para realizar la extracción de la ondícula en el pozo BYC-13.

Posteriormente se creó una ondícula sísmica tipo Ricker, a la cual se le igualó su frecuencia con la de la ondícula extraída de la sísmica (figura 4.13). Cabe destacar que ambas ondículas son fase cero, y que la que se usó para la convolución fue la tipo Ricker. Lo descrito anteriormente fue realizado para satisfacer las indicaciones encontradas en PDVSA (1983), donde se destaca el uso de ondículas tipo Ricker como fuente en las grabaciones.

Con la serie de reflectividad (determinada en la sección anterior) y la ondícula seleccionada, se procedió a realizar la convolución entre ambas señales, con lo que se obtuvo el sismograma sintético para el pozo seleccionado.

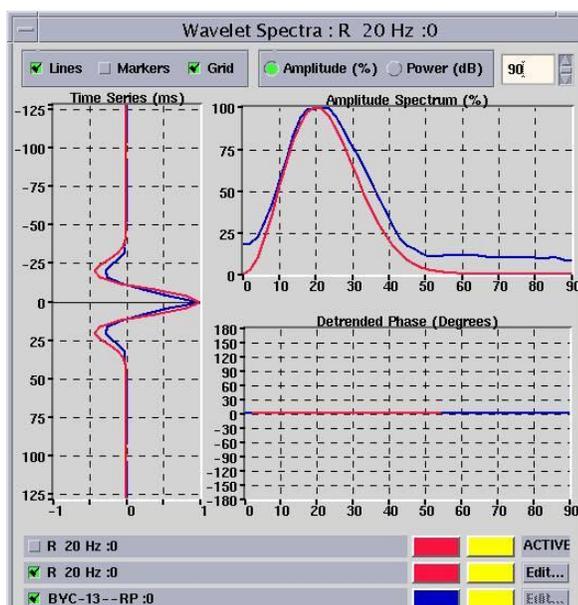


Fig. 4.13. Ajuste de frecuencia realizado a la ondícula tipo Ricker (curva roja) con la ondícula extraída de la sísmica (curva azul) en el pozo BYC-13. Obsérvese que la frecuencia dominante es de 20 Hz y ambas son fase cero.

4.4.5. Ajuste del sismograma sintético a la sísmica

En el programa de construcción de sismogramas sintéticos, este paso contempla la creación de una ventana donde se pueda apreciar la similitud entre las trazas sísmicas correspondientes a la localización del pozo y el sismograma sintético. Esta evaluación se hace normalmente en la ventana definida para la extracción de la ondícula, usando el método de comparación estadístico de la autocorrelación. De esta manera se obtiene un indicio del desfase (en tiempo y fase) existente entre el sintético y los datos de campo.

Con el objetivo de darle un significado geológico al ajuste que se realiza al sintético, se desplegó la interpretación geológica de los registros del pozo, donde se encuentran las posiciones relativas de las superficies erosivas en cuestión. A partir de éstas

se pueden realizar con fundamento pequeñas variaciones en el datum del pozo, lo que permite ajustar la respuesta sintética a las trazas de campo, aumentando la similitud entre el comportamiento de los registros de pozo y la sección sísmica. Al finalizar este paso, se obtiene la traza sintética definitiva (figura 4.14) para el pozo seleccionado al principio, y por ende, la ley de velocidades en ese punto específico. Luego se repite todo el procedimiento de creación del sintético para el resto de los pozos, permitiendo obtener mayor densidad de puntos de velocidad en las superficies de interés, necesarios en la creación de los mapas de velocidades.

4.4.6. Cálculo de la resolución vertical

Para entender mejor las dimensiones de las secuencias interpretadas, se realizó el cálculo de la resolución vertical para la secuencia completa desde el Tope-Intramioceno hasta el Tope-Precretácico (definidos en las secciones geológicas), y para cada secuencia individual. En ambas circunstancias se escogió el pozo BYC-31 para realizar los cálculos.

La velocidad de la secuencia completa fue determinada usando los tiempos y profundidades reflejados en la ley de velocidades del pozo (tabla 4.4), para los topes interpretados como Intramioceno y Precretácico, usando la fórmula $V = \frac{z_{Intra} - z_{Precr}}{t_{Intra} - t_{Precr}}$. La frecuencia dominante del intervalo de interés se estimó por medio de la extracción de la ondícula sísmica usando el método de autocorrelación, de la misma manera en que se hizo para elegir la ondícula en la elaboración del sismograma sintético. Con estos datos y la fórmula $\lambda_{1/4} = \frac{V}{4f_{dom}}$ se obtuvo el límite de resolución vertical, según Rayleigh,

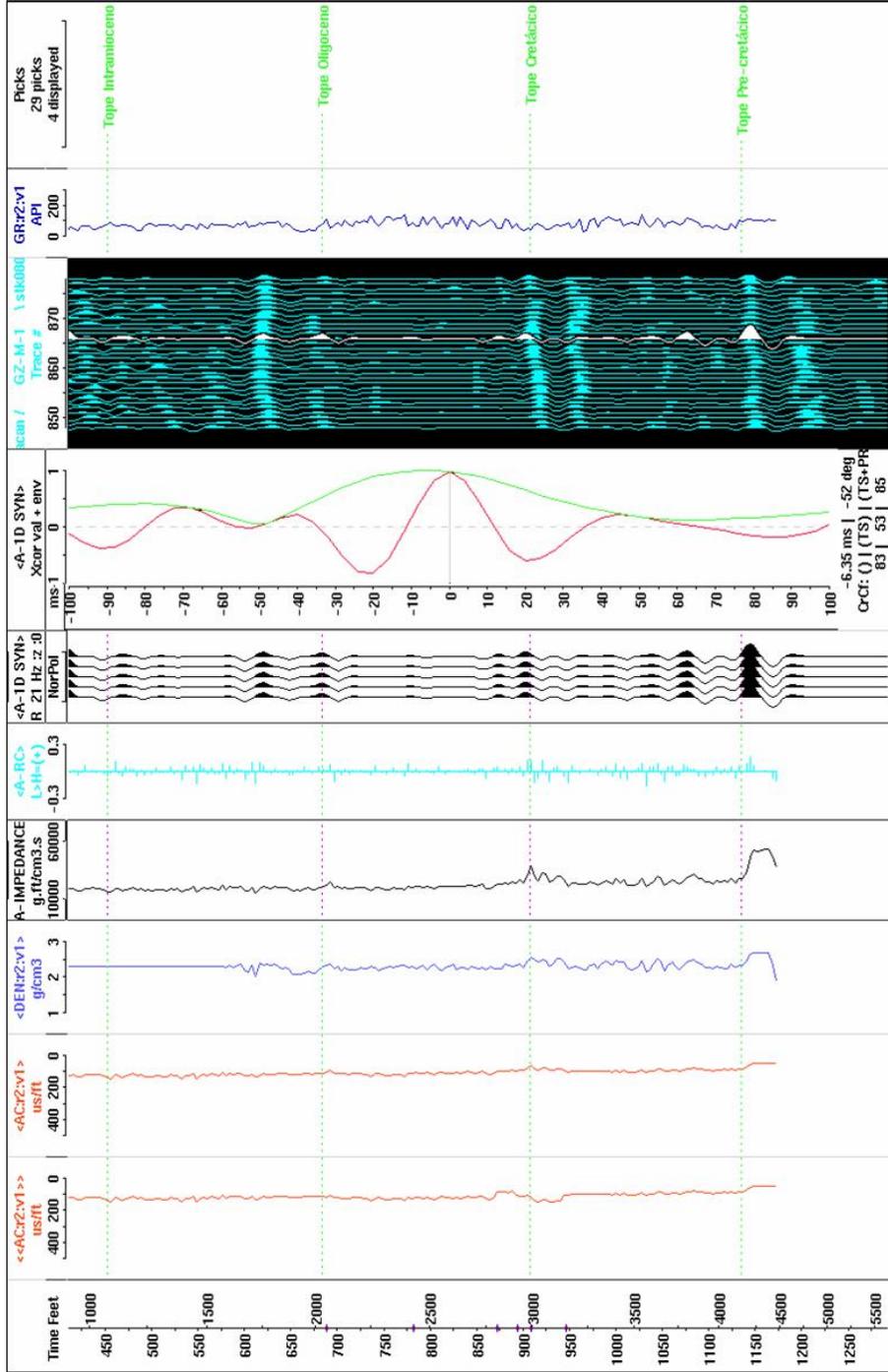


Fig. 4.14. Sismograma sintético del pozo BYC-117. Nótese la manera en que los cambios en el registro GR (en azul) se corresponden con las trazas sísmicas y que el coeficiente de correlación sísmica-pozo es 83 %. De izquierda a derecha las pistas son: relación tiempo-profundidad, registro sísmico, registro RHOB, Coeficientes de impedancia, serie de reflectividad, traza sintética, correlación sísmica pozo, sísmica donde se ubica el pozo, registro GR y el nombre y profundidad de los topes de interés.

para la secuencia completa de interés (tabla 4.5).

En el caso del cálculo del límite resoluble para cada interfase, se aplicó la misma metodología descrita para el caso de la secuencia completa, adaptando las ecuaciones a cada interfase. De estos cálculos se obtuvo el cuadro 4.5, donde se organizan los mínimos espesores resolubles correspondientes a cada interfaz, y a la secuencia completa.

4.5. Mapas de velocidad

En primer lugar se determinó el valor de la velocidad en cada pozo, para cada superficie de interés. Este procedimiento se explica con el siguiente ejemplo:

Si se trabaja con los datos del pozo BYC-13, se obtiene una profundidad para cada superficie de interés (Intramioceno, Oligoceno, Cretácico y Precretácico) de 2073 ft, 3368 ft, 4793 ft y 7068 ft respectivamente. Es importante destacar que estas profundidades están medidas respecto al datum al cual está referida la sísmica (558 ft) ya que apartir de él se inician los tiempo de reflexión, sin embargo debido a que se necesitan los espesores, este hecho es irrelevante en los cálculos que siguen. Los valores de tiempo doble de viaje (TWT) a cada interfase (639.17 ms, 927.14 ms, 1215.88 ms y 1594.95 ms respectivamente) se obtienen interpolando los valores de profundidad en la ley de velocidades del pozo (tz), determinada en la sección anterior, con el ajuste del sismograma sintético a la sísmica. Usando la fórmula $V_n = \frac{2000*(z_n - z_{(n-1)})}{t_n - t_{(n-1)}}$ se obtiene la velocidad interválica (V_n) correspondiente a cada capa, conociendo que z_n es el valor de la profundidad en la interfase n-ésima y t_n es el valor del TWT en la interfase

Tabla 4.4. Tabla tiempo profundidad (tz) perteneciente al pozo BYC-13. Los valores están referidos al datum sísmico (558 ft sobre el nivel del mar).

Profundidad (ft)	TWT (ms)
-94	45.00
464	246.09
1000	391.91
1500	524.08
2000	643.97
2800	823.22
3200	911.68
3632	1000.72
3800	1039.76
4200	1129.26
4480	1180.52
5100	1280.17
5400	1329.42
6000	1435.36
6800	1566.72
7240	1637.70

Tabla 4.5. Cálculo de la resolución sísmica vertical en la secuencia Intramioceno-Precretácico y en cada capa de interés. Los valores están referidos al nivel del mar.

Capa	Profundidad (ft)	TWT (ms)	Velocidad (ft/s)	Frecuencia extraída de la sísmica (Hz)	Resolución vertical (ft)
Intramioceno	1515	639,17	6486.49	21	77.22
Oligoceno	2810	927.14	8994.18	21	107.07
Cretácico	4235	1215.88	9870.43	19	129.87
Precretácico	6510	1594.95	12003.03	19	157.94
Secuencia Completa	4995	955.78	10452.00	20	130.65

n-ésima. Es importante resaltar que la interfase 0 ($n = 0$) corresponde a 558 ft. El 2000 multiplicador aplica para transformar las medidas de ms a s, a la vez que convierte las lecturas de TWT a tiempo simple.

Luego de calcular los valores de velocidad en cada pozo para cada capa, se procedió a realizar un mapa de velocidad por nivel, interpolando entre los valores de los pozos. En este paso se usó el método de interpolación convergente. A los mapas obtenidos se les realizó una evaluación cualitativa, resultando que los mapas correspondientes al Tope-Intramioceno y Tope-Oligoceno carecen de sentido geológico (figuras 4.15 y 4.16). Para solventar esta situación, se extrajo el valor de velocidad perteneciente al pozo BYC-43 del Intramioceno, ya que este se aleja más de dos desviaciones estándar de la media de los datos (figura 4.17); y el valor del pozo BYC-117 del Oligoceno debido a que induce una dupla de picos de velocidad irreales desde el punto de vista geológico y físico. Una vez descartados los valores anómalos, se construyeron los mapas de velocidad definitivos, los cuales fueron utilizados para la conversión tiempo profundidad.

4.6. Mapas en profundidad

Una vez obtenidos los mapas de velocidad y tiempo correspondiente a cada interfase de interés, fue posible realizar la conversión a profundidad aplicando la fórmula $z_n = z_{(n-1)} + \frac{V_n * (t_n - t_{n-1})}{2000}$, donde z_n es el mapa en profundidad de la superficie de interés, V_n es el mapa de velocidad intervállica correspondiente a esa interfase, y t_n es el

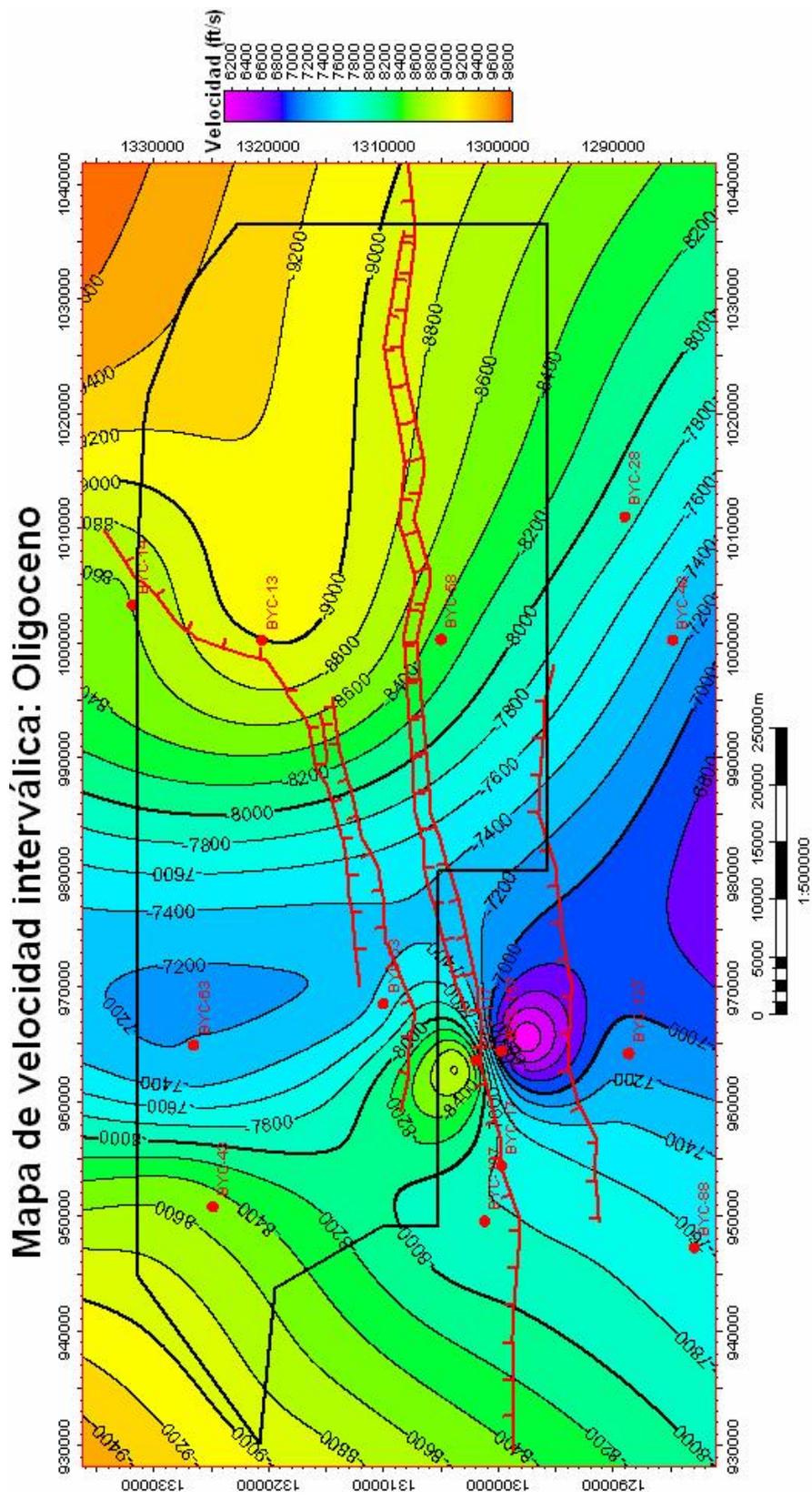


Fig. 4.16. Mapa de velocidad correspondiente a la superficie Tope-Oligoceno incluyendo el pozo BYC-117. Con líneas rojas se destacan las fallas de este nivel, los puntos rojos representan los pozos y el polígono negro es el límite de la zona en estudio.

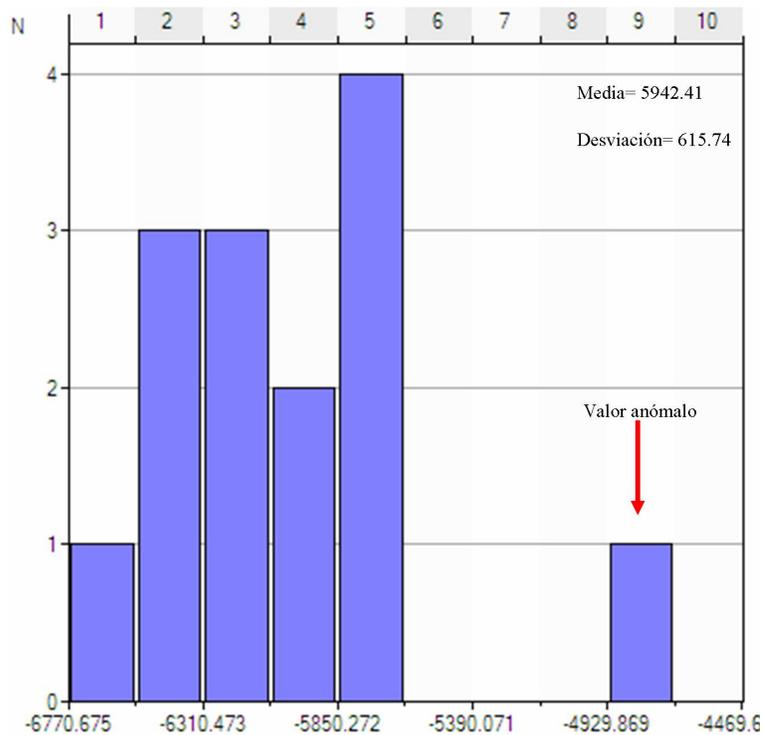


Fig. 4.17. Histograma donde se muestran los valores de velocidad del Intramioceno en los pozos. Observe la lejanía que existe entre el valor de velocidad en el pozo BYC-43 (señalado en rojo) y el resto de los datos.

mapa en tiempo de la n -ésima interfase. El 2000 multiplicador aplica para convertir el TWT a tiempo simple, y los ms a s. Es importante aclarar que en el caso de la superficie intramioceno ($n = 1$), la superficie z_0 corresponde a una superficie horizontal de cota 0 msnm. Debido a que el mapa de tiempo se encuentra referido al datum sísmico (558 ft), los mapas resultantes de esta operación también estarán atados a este nivel, por lo tanto, para obtener los mapas respecto al nivel medio marino fue necesario restar 558 ft a cada mapa.

Posteriormente, cada mapa tuvo que ser editado a mano para darle sentido geológico en las zonas donde el programa interpolador no funciona adecuadamente. Igualmente,

te fue necesario editar las curvas de nivel para expresar los saltos de las fallas calculados previamente, ya que los programas usados en la construcción de los mapas no interpolan apropiadamente contra las fallas.

4.7. Evaluación de la utilidad de los mapas

Como método de comprobación del modelo de profundidad obtenido, se consiguió las coordenadas e interpretación secuencial del pozo BYC-23 (figura 5.8), el cual, no fue utilizado en la realización de los modelos debido a que no posee TVS. Al conseguir los valores de profundidad correspondientes a la ubicación de este pozo, en los mapas construidos para cada nivel, y compararlos con los dados por la correlación se pudo verificar la utilidad de los mapas elaborados.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Sismograma sintético

En la tabla 5.1 se observa que el ajuste en la correlación varía entre 30 % y 83 %, ocurriendo el mejor ajuste en el pozo BYC-117 ubicado en la línea sísmica bycgz-M-1. Los bajos valores en la correlación pueden ser debido a la ondícula seleccionada para la convolución, ya que, si en vez de escoger una ondícula tipo Ricker se hubiese elegido una trapezoidal adecuada a cada pozo, la similitud del sintético con la sísmica hubiese mejorado significativamente. Sin embargo, de acuerdo con PDVSA (1983), la ondícula introducida al medio asemeja una tipo Ricker, por lo tanto, ésta fue elegida para elaborar el sismograma sintético, encontrándose el peor coeficiente de correlación para las líneas de la campaña bycgm.

A pesar de lo anterior se considera que, en general, los sintéticos presentan buena correlación con los datos sísmicos y permite acentuar las características geológicas de las trazas sísmicas, tal y como se observa en la figura 5.1, donde la superficie erosiva Tope-Precretácico es identificada en el registro GR por el aumento en el conteo de isótopos, y además éste representa un máximo de amplitud positiva en la traza sintética, debido al aumento de velocidad y densidad de las rocas precretácicas respecto a las cretácicas.

Tabla 5.1. Coeficientes de correlación entre los sismogramas sintéticos y las trazas sísmicas.

Pozo	Línea sísmica usada en el ajuste	Coefficiente de correlación (%)	Frecuencia de la ondícula (Hz)
BYC-88	bycgm-23A	54	36
BYC-13	bycgz-13	73	20
BYC-43	bycgm-23-2	61	28
BYC-53	bycsd-2	59	20
BYC-63	bycgz-20B	71	17
BYC-14	bycgz-G-1	59	20
BYC-17	bycgm-22	27	34
BYC-117	bycgz-M-1	83	21
BYC-217	bycgz-20A	67	25
BYC-517	bycgz-20A	62	21
BYC-817	bycgm-23-3	30	31
BYC-28	bycgz-11	77	21
BYC-48	bycgz-13	49	25
BYC-58	bycgz-13	52	21

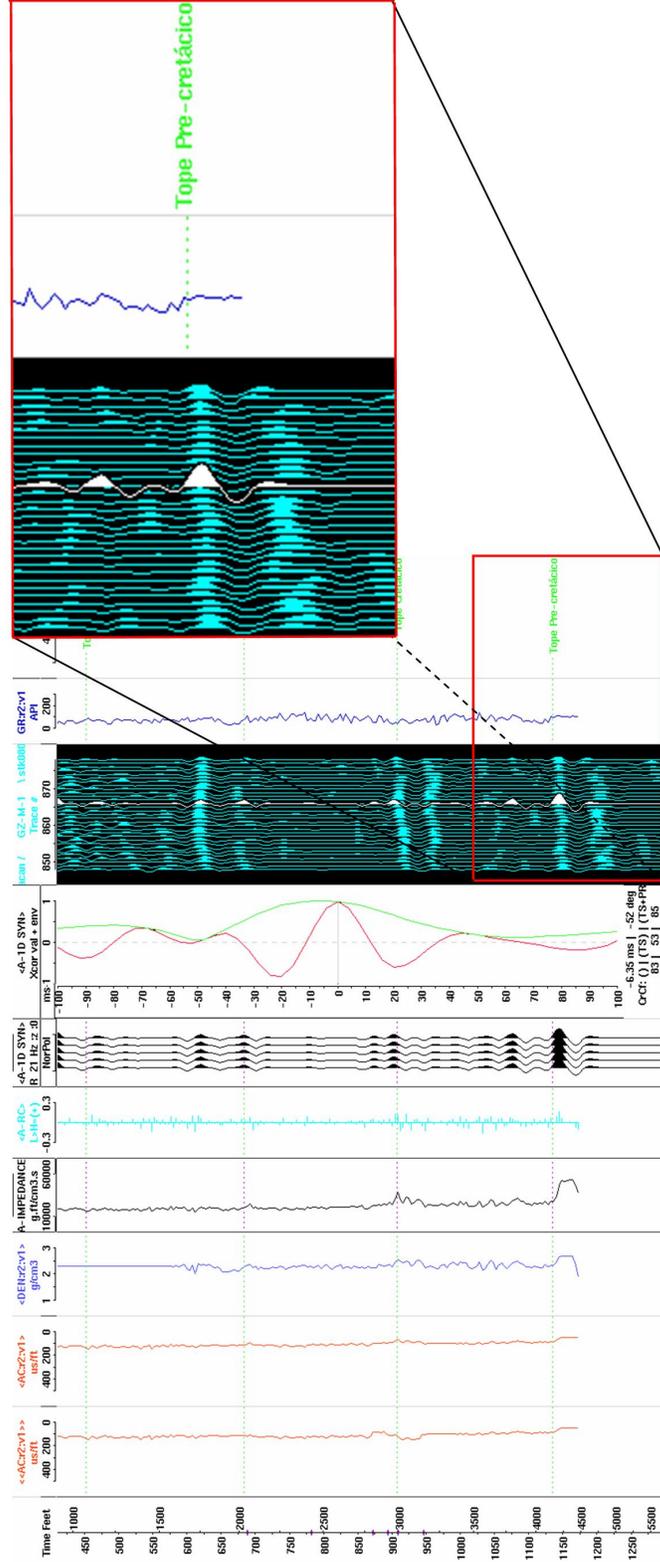


Fig. 5.1. Correspondencia entre el registro GR y el sismograma sintético del pozo BYC-117.

5.2. Interpretación sísmica

Como consecuencia del buen ajuste de los sismogramas sintéticos a la sísmica y a los registros del pozo, era de esperarse que la interpretación sísmica en las secciones se correspondiera con la interpretación de los registros litológicos (GR y resistividad) de cada pozo. Como se observa en la figura 5.2, cada capa interpretada presenta un patrón de reflexión diferente al de los demás, lo que las hace fácil de asociar a los eventos geológicos que las describen.

En el caso del Tope-Precretácico, las truncaciones son evidentes en la sección bycgz-13 (figura 5.3), las cuales indican la existencia de la superficie erosiva, previa a la transgresión del Cretácico. Para el Tope-Cretácico, los downlaps de principios del Oligoceno son apreciables en la figura 5.4, representando la regresión (progradación) de finales del Cretácico. De la misma manera se observan downlaps en la superficie Tope-Oligoceno (figura 5.5), sugiriendo la continuación del proceso regresivo en esta parte de la cuenca, para este período. El Tope-Intramioceno, en la zona de estudio, es concordante por lo que resulta difícil distinguir en la mayoría de los casos, además se añade el hecho de que las secciones sísmicas en este nivel son de baja calidad.

Cabe destacar que la relación sísmica-geológica más resaltante en este estudio se encuentra en la secuencia Oligoceno, debido a la presencia de una secuencia de baja energía que se acuña hacia el sur, la cual ha sido asociada con la lutita de la Formación Roblecito, como se observa en las figuras 5.6 y 5.7. De acuerdo con el LEV III (1997), ésta se vuelve más arenosa hacia el sur, lo que sugiere que la forma de cuña en esta

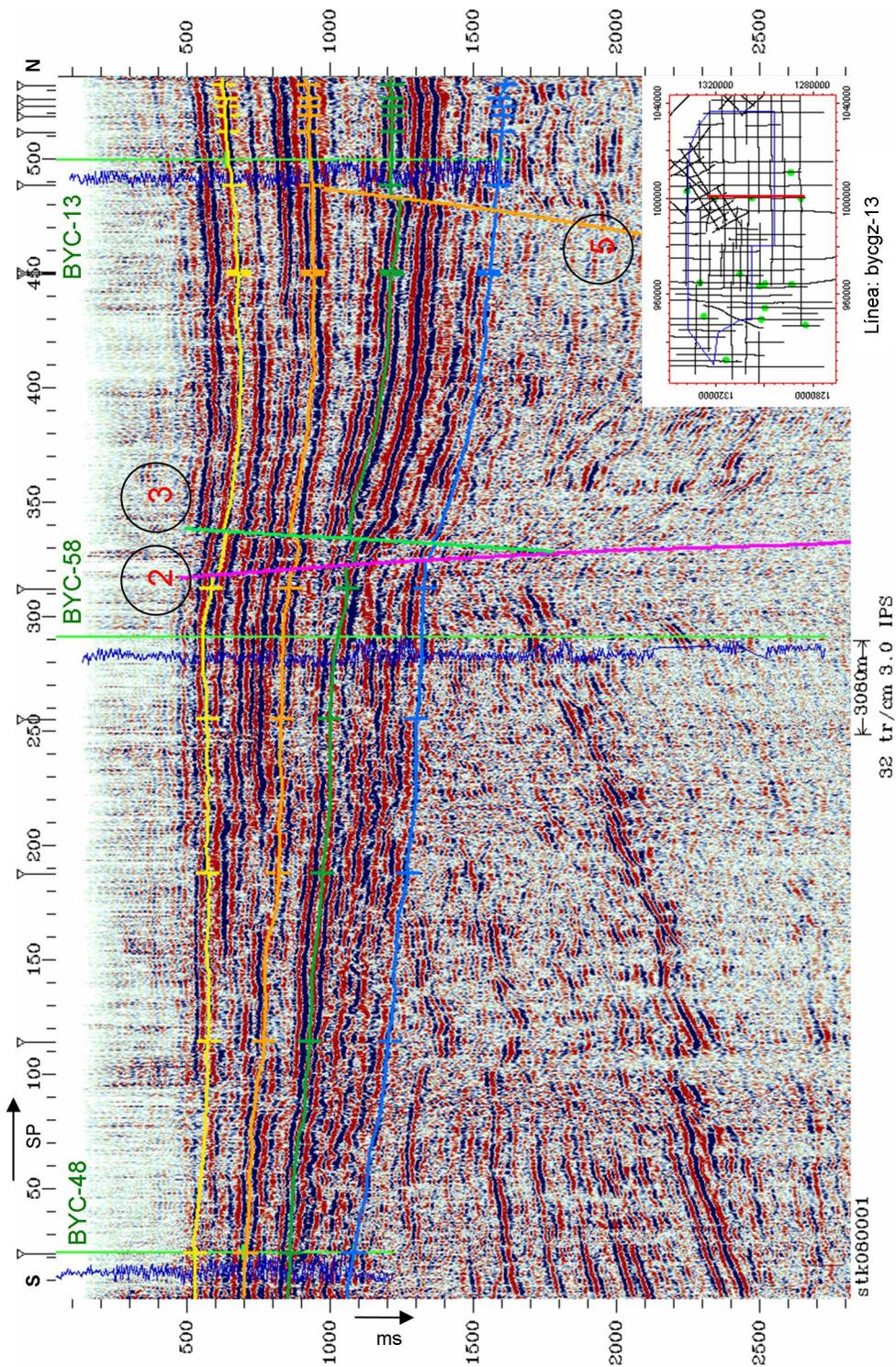


Fig. 5.2. Sección sísmica bycgz-13 interpretada en tiempo. En verde se resalta el nombre y ubicación de los pozos, en azul se encuentran los registros GR correspondientes, encerrados en círculos y numerados están los nombres de las fallas. De abajo hacia arriba los horizontes son: Precretácico (azul claro), Cretácico (verde claro), Oligoceno (verde anaranjado) e Intramioceno (amarillo).

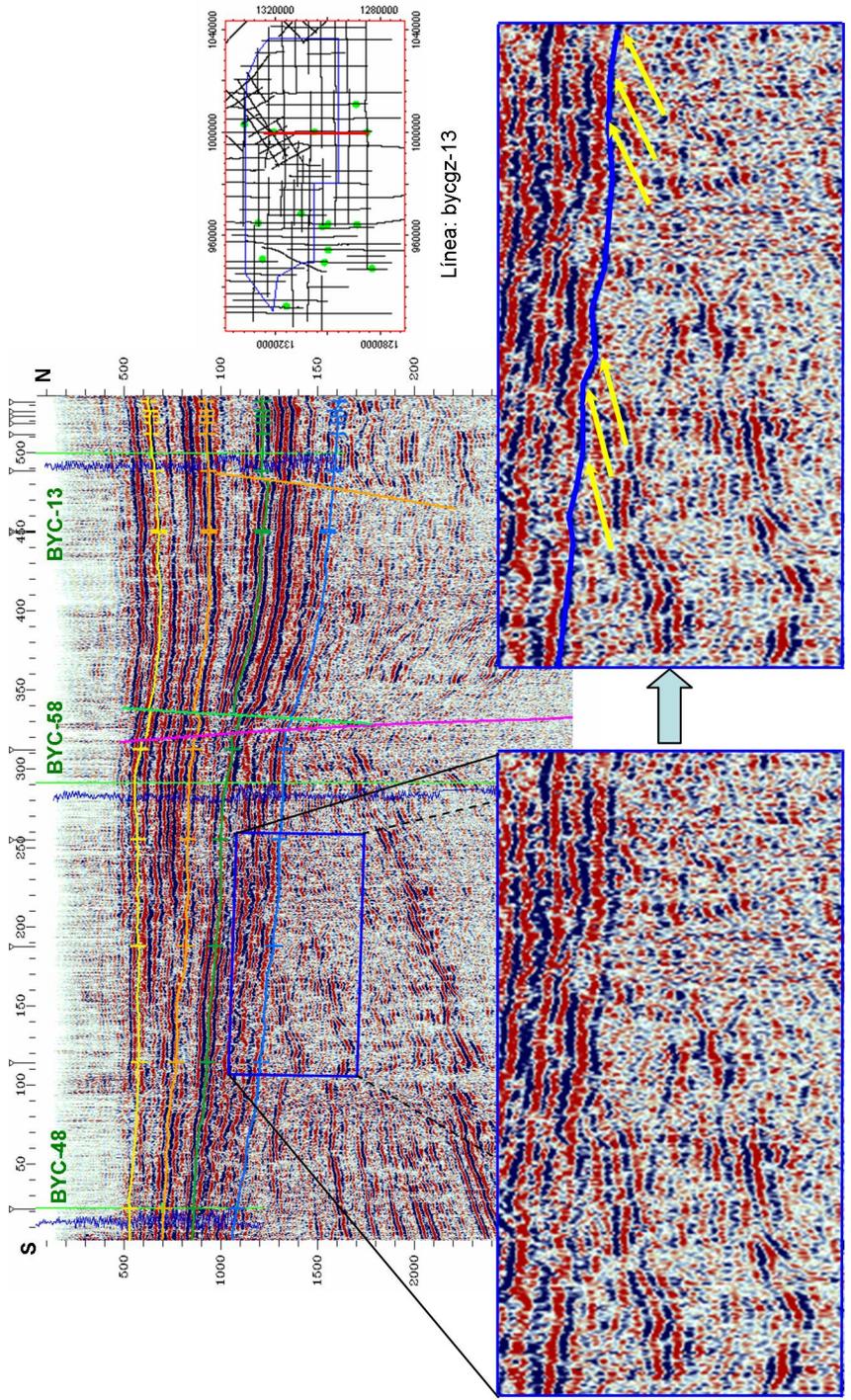


Fig. 5.3. Truncaciones que marcan la superficie erosiva Precretácico. Con flechas amarillas se resaltan las truncaciones y en azul el Tope-Pre-cretácico.

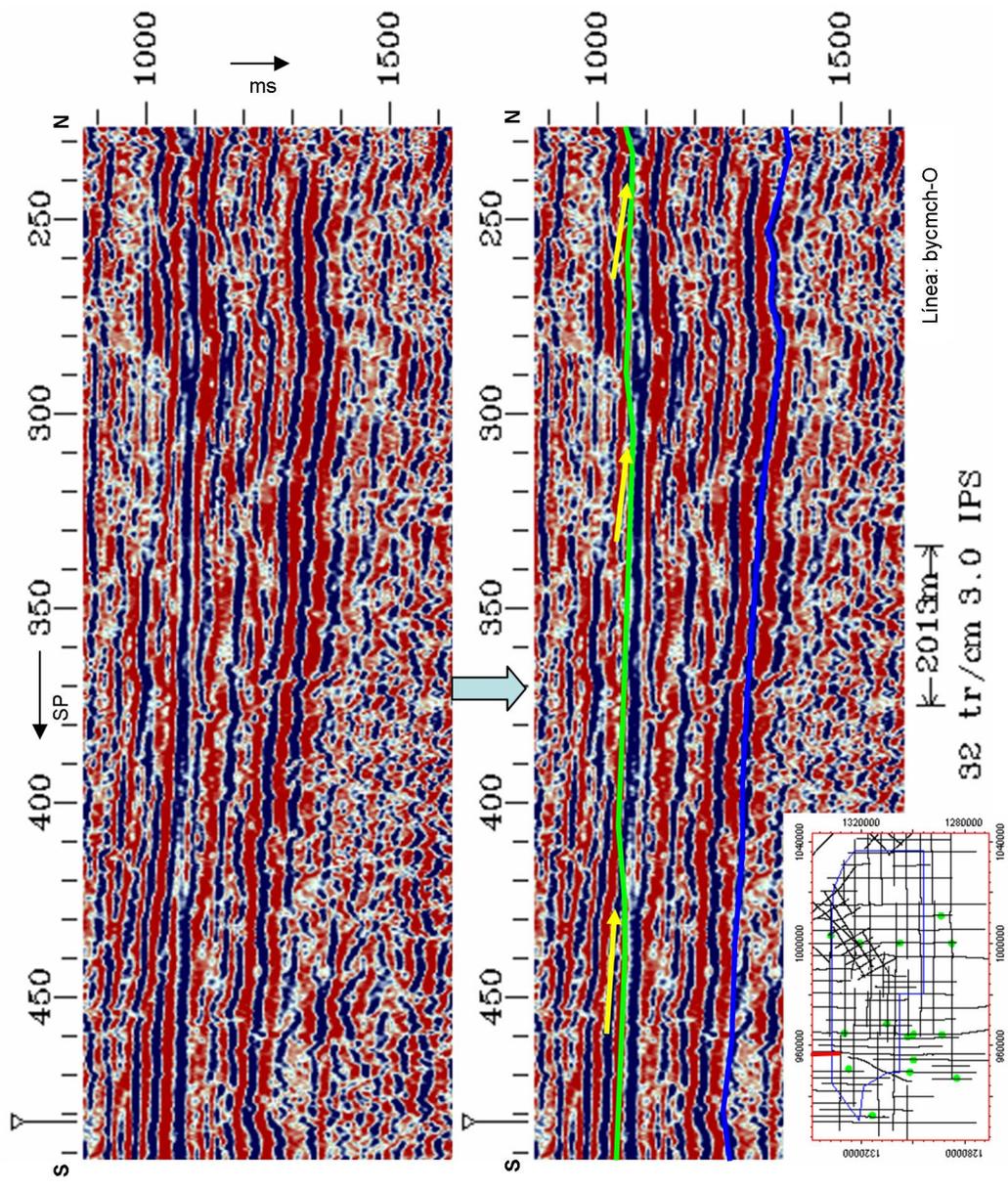


Fig. 5.4. Donwlaps que marcan la superficie erosiva Cretácico. Con flechas amarillas se resaltan los donwlaps, en azul el Tope-Precretácico y en verde el Tope-Cretácico.

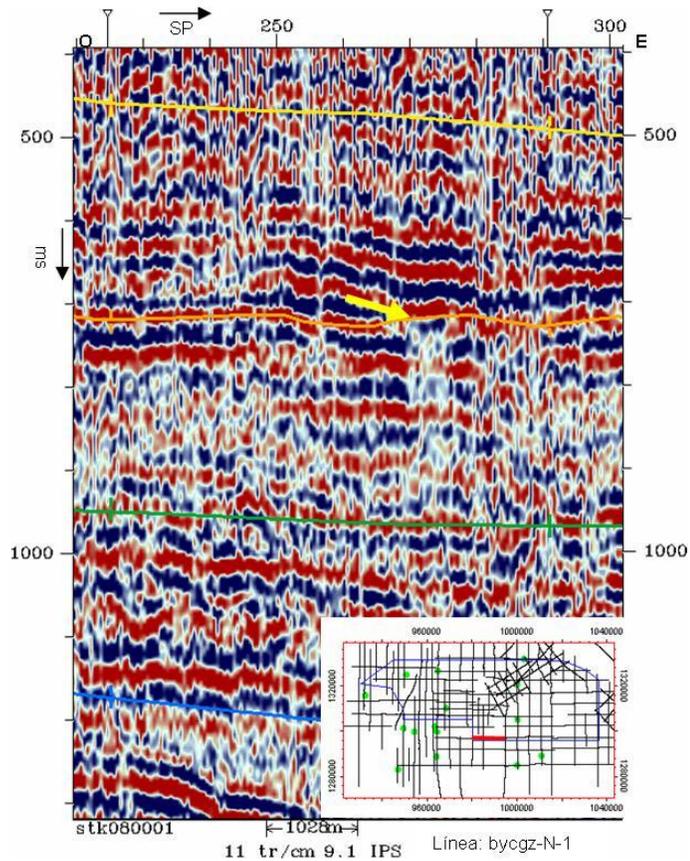


Fig. 5.5. Donwlaps que marcan la superficie erosiva Oligoceno. Con flecha amarilla se resalta el donwlap, en azul el Tope-Precretácico, en verde el Tope-Cretácico, en anaranjado el Tope-Oligoceno y en amarillo el Tope-Intramioceno.

dirección es debido a un cambio de facie.

5.3. Mapas en tiempo

En general, los mapas en tiempo presentan dos tendencias predominantes (apéndices A, B, C y D). La primera se identifica en los cuadrantes noroeste, suroeste y sureste con curvas que gradualmente buzanan al noreste, con un gradiente promedio de 11.16 ms/km para las cuatro superficies de interés. La segunda es una depresión que

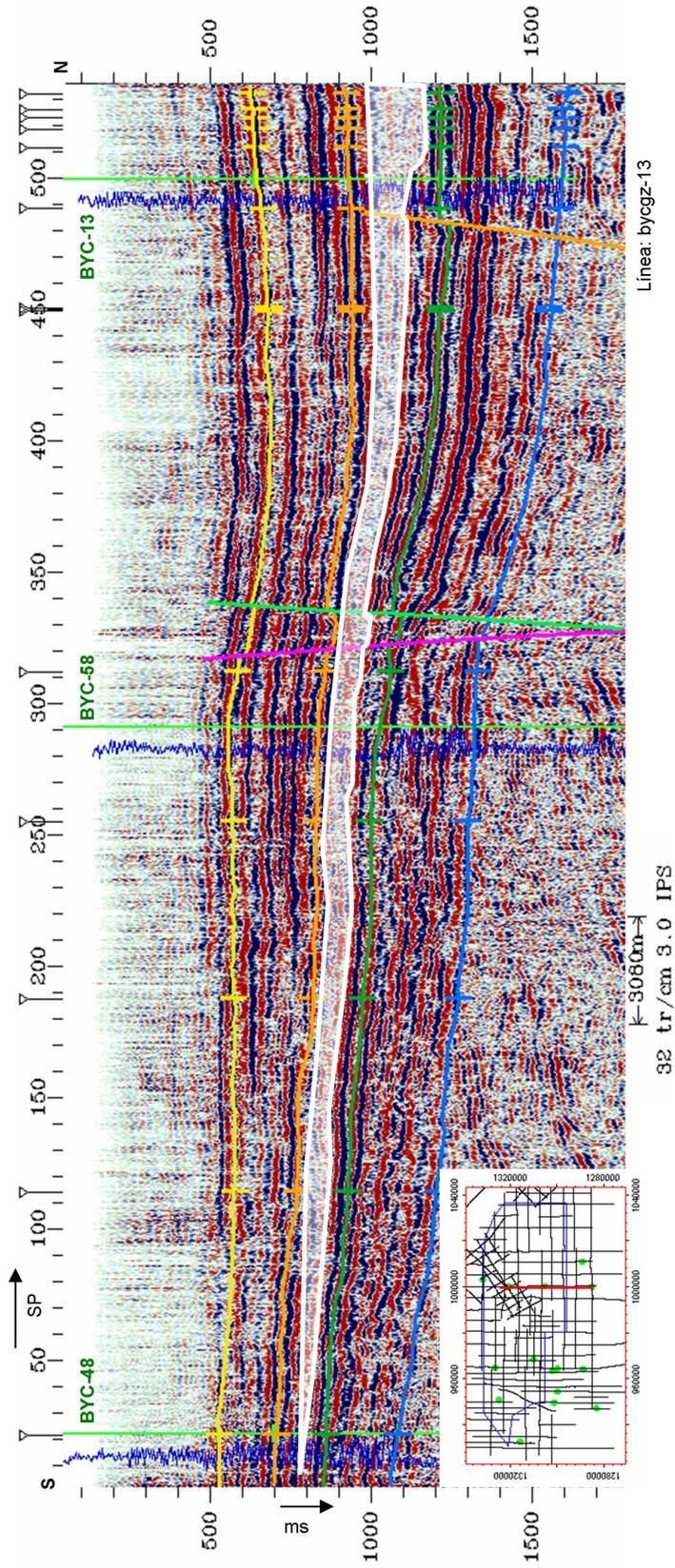


Fig. 5.6. Comportamiento sísmico de la interpretación de la lutita de Roblecito. El polígono blanco encierra el patrón de reflexión de baja energía asociado a la lutita.

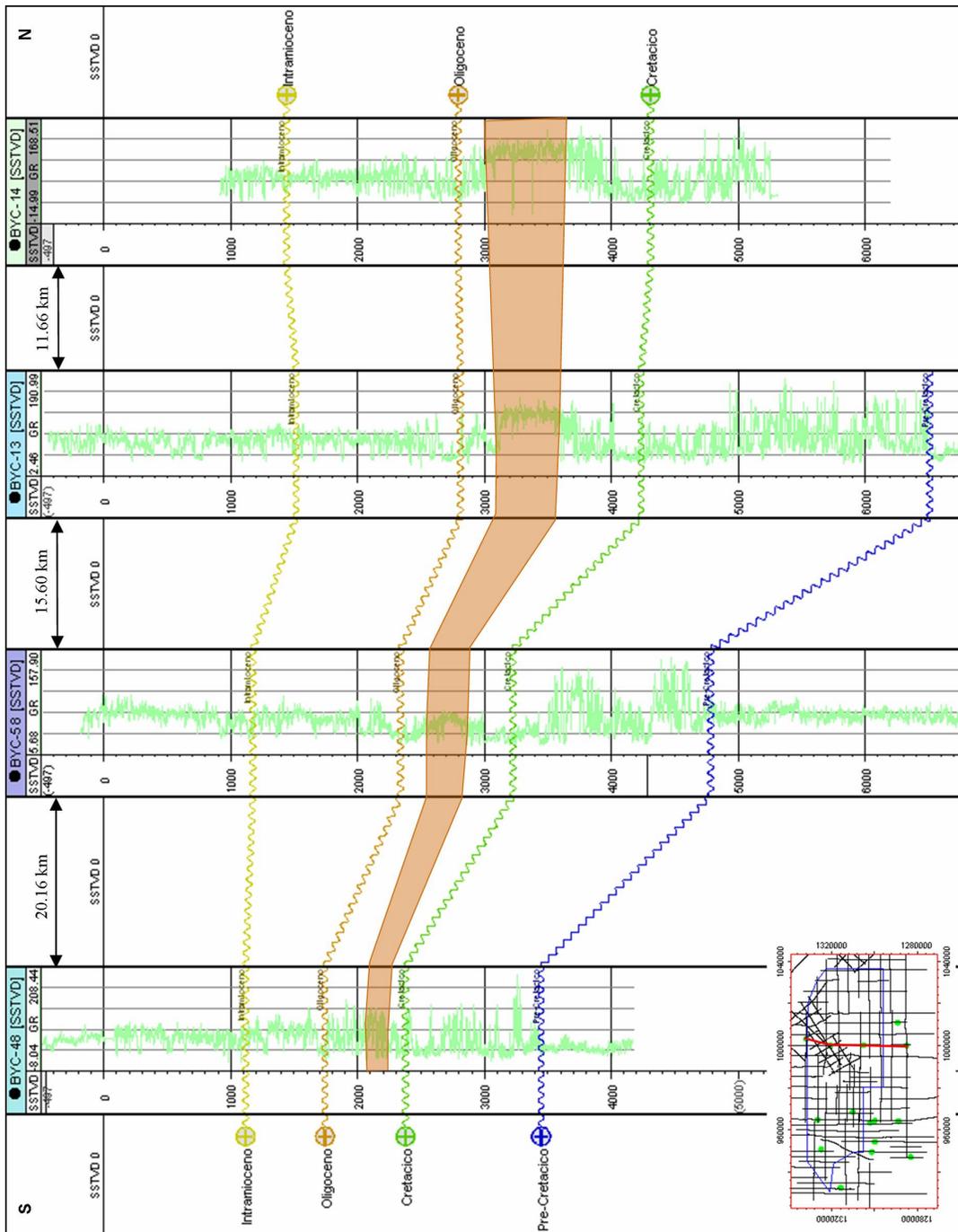


Fig. 5.7. Interpretación secuencial de la sección de pozos que coincide con la líneas sísmicas byczg-13 y byczg-13-1, usando las curvas GR. En marrón se destaca la interpretación de la lutita de Roblecito.

ocurre en el noreste, donde las curvas poseen un gradiente que varía de 15.45 ms/km en el Tope-intramioceno hasta 23.41 ms/km en el Tope-Precretácico, con orientación preferencial de máximo crecimiento N45E. Los horizontes llevados en la interpretación sísmica son casi paralelos entre si, de lo que se deriva que ninguno de ellos se acuña en la zona estudiada. También se debe resaltar que las elongaciones que dividen el bloque noreste, tanto por su lado este como por el lado sur, corresponden con las fallas interpretadas, por lo cual éstas podrían usarse para definir los límites entre ambos bloques que conforman la zona estudiada.

Otro punto importante sobre la interpretación de las fallas es que los saltos calculados varían entre 78 ft y 308 ft (tabla 5.2), y están acorde a los saltos interpretados en el reporte del año 1983 por PDVSA, en el cual, mencionan sin detalle para esta área, saltos mayores a 90 ft. Lo anterior puede ser la consecuencia de la manera en que se efectuaron las medidas del salto, por lo que hay que recordar que las fallas no son necesariamente ortogonales a las secciones sísmicas, lo que indica que en realidad los saltos calculados en esta investigación son aparentes. También hay que considerar que estas medidas fueron realizadas en donde el salto de la falla es mayor, ya que éste varía en la mayoría de las fallas hasta desaparecer en sus bordes.

5.4. Mapas de velocidad

El mapa final de velocidad del Tope-Intramioceno (apéndice E) posee una tendencia homogénea que varía de suroeste a noreste entre 5450 ft/s y 7290 ft/s, ocurriendo

Tabla 5.2. Características de las fallas interpretadas. Las fallas se numeran de sur a norte.

Nombre de la falla	Salto (ft)	Buzamiento (°)	Orientación
1	78	N 88	EO
2	141	N 89	N80E
3	178	S 87	N80E
4	141	N 87	N70E
5	167	S 88	N70E y N45E
6	308	S 89	N70E y N45E

una franja de mínimo gradiente entre las curvas 6000 ft/s y 6600 ft/s, con orientación N45W y anchura 40.4 km aproximadamente. Se destaca el mínimo de 5600 ft/s que ocurre en el norte del cuadrante suroeste, valor que se encuentra altamente influenciado por el dato del pozo BYC-117, el cual, posee una velocidad menor que la del pozo BYC-157 probablemente debido a la falla normal que buza hacia el norte (falla 2) que los separa, colocando el Tope-Intramioceno a una profundidad mayor en el pozo BYC-117, lo que aumenta su tiempo de viaje.

En este caso no se consideró el tope del pozo BYC-43 debido a que éste induce una disminución abrupta en la velocidad hacia el noroeste del mapa, lo cual no se pudo justificar ni desde el punto de vista físico ni geológico, y además, según el histograma realizado con los datos del mapa de velocidad, este punto de velocidad se aleja más de dos desviaciones estandar de la media estadística, por lo tanto se justifica su exclusión para la generación del mapa de velocidades final del Tope-Intramioceno.

Las velocidades del mapa correspondiente al Tope-Oligoceno (apéndice F) varían de este a oeste con una tendencia que se ciñe a una franja mínima relativa, de orientación norte-sur aproximada, con un ancho de 17.9 km, en la parte central de la zona estudiada. En la parte sur de esta franja se encuentra el mínimo absoluto de 6600 ft/s, y al norte un mínimo relativo de 7200 ft/s. Al alejarse de la franja, las curvas de nivel se inclinan progresivamente hasta alcanzar una orientación este-oeste, lo que forma un máximo relativo de 9200 ft/s en el centro del cuadrante noreste y uno de 9400 ft/s en la zona más noroeste.

La exclusión del punto de velocidad para el Tope-Oligoceno del pozo BYC-117 se produce debido a que éste induce la aparición de una dupla de picos, uno por encima de la tendencia regional y uno por debajo, lo cual al igual que el caso del pozo BYC-43 en el Tope-Intramioceno, no puede ser explicado de manera física ni geológica satisfactoria. A diferencia del caso anterior, estos puntos se ubican dentro de los rangos de datos aceptables definidos estadísticamente (dos desviaciones estándar alejados de la media, equivalentes al 95,44 % de intervalo de confianza aceptable), sin embargo en el contexto local en que se encuentran son bastante anómalos (figura 4.16).

En el mapa de velocidades del Tope-Cretácico (apéndice G) la tendencia de las curvas al sur es este-oeste y se deflecan gradualmente hasta volverse norte-sur para rodear el máximo absoluto (9800 ft/s) ubicado en la zona centro-norte del mapa. En general, las velocidades aumentan de suroeste a noreste, siendo afectadas por un máximo relativo (8600 ft/s) en el centro del cuadrante suroeste.

La tendencia de las curvas de velocidad correspondientes al Tope-Precretácico (apéndice H) es bastante homogénea, éstas crecen desde 8800 ft/s hasta 13200 ft/s de sur a norte, con dirección este-oeste de las curvas dominantes, ocurriendo un mínimo absoluto (8800 ft/s) en la parte sureste del cuadrante suroeste. De todos los mapas de velocidad el mapa correspondiente al Tope-Precretácico es el que presenta menor contraste lateral.

5.5. Mapas de profundidad

Los mapas en profundidad obtenidos son dominados estructuralmente por las fallas interpretadas (apéndices I, J, K y L), ya que ellas dividen la zona estudiada en dos localidades geológicas, como se mencionó anteriormente. Los cuadrantes noroeste, suroeste y sureste poseen un gradiente mucho más suave (22.64 ft/km para el Tope-Intramioceno y 62.57 ft/km para el Tope-Precretácico) que el encontrado en el cuadrante noreste (91.93 ft/km para el Tope-Precretácico). Este hundimiento, aparentemente, está vinculado con la depresión de Altamira, la cual se encuentra a pocos kilómetros al sureste de la zona.

Cabe destacar que todas las superficies interpretadas poseen una componente principal de buzamiento al norte, con excepción del Tope-Intramioceno, que tiende a disminuir su profundidad en el cuadrante noroeste, lo cual se corresponde con la geología de la zona, ya que este límite aflora en el área estudiada según los mapas geológicos de superficie actuales. La profundidad en los mapas varía (respecto al nivel del mar) entre

0 ft y 3400 ft en el Intramioceno, 1000 ft y 4400 ft en el Oligoceno, 2800 ft y 8600 ft en el Cretácico y 2400 ft y 8600 ft en el Precretácico.

Al analizar el movimiento de las fallas interpretadas se define un sistema de esfuerzos completamente extensivo, lo que se corresponde hasta cierto punto con lo indicado en la evolución de la cuenca. La falta de fallas inversas indica que, al menos con la escala de este estudio, el proceso compresional del Oligoceno no provocó grandes inversiones en el movimiento de las fallas, o en su defecto, éstos no fueron lo suficientemente grandes para invertirlas. También hay que considerar que la resolución sísmica es baja, por lo cual no se debe descartar la existencia de fallas inversas en la zona, debido a que quizás sus saltos no son resolubles.

Igualmente, cabe destacar que no necesariamente las fallas interpretadas son las únicas que existen en la zona, debido al problema de la resolución sísmica. En este sentido, las fallas interpretadas quizás se extiendan a niveles superiores e inferiores, sin embargo sus saltos pueden ser menores al límite resoluble, por lo tanto no se ven en las secciones sísmicas.

5.6. Comprobación del modelo

Con la colocación del pozo estratigráfico BYC-23 (que no posee TVS) en la zona de estudio, se comprobó que el modelo en profundidad elaborado se puede aplicar efectivamente. Luego de efectuar la interpretación secuencial de los registros de este pozo, a través de la creación de la sección geológica que se muestra en la figura

5.8, se determinó que las profundidades (respecto al nivel del mar) de los Topes Intramioceno, Oligoceno, Cretácico y Precretácico son 984 ft, 2207 ft, 3664 ft y 5555 ft respectivamente. Posteriormente se encontró la profundidad reflejada en los mapas de profundidad elaborados para cada nivel, proyectando las coordenadas del pozo BYC-23 en cada mapa, con lo que se obtuvieron las profundidades respectivas 1016 ft, 2275 ft, 3569 ft y 5477 ft. Estos datos se resumen en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Errores calculados entre la profundidad del pozo BYC-23 y los mapas en profundidad de cada interfase.

Superficie	Profundidad en el mapa estructural(ft)	Profundidad en el pozo (ft)	Error (ft)	Resolución vertical (ft)
Intramioceno	984	1016	32	77.22
Oligoceno	2207	2275	68	107.07
Cretácico	3664	3569	-95	129.87
Precretácico	5555	5477	-78	157.94

En la tabla 5.3 se observa que el error en cada interfase es menor que su correspondiente resolución vertical, lo cual, es la mejor prueba de que el modelo de profundidades creado funciona. Sin embargo, hay que destacar que mientras más alejado se encuentre el punto de prueba con respecto a los pozos usados para la construcción de los mapas, probablemente el error asociado a la profundidad de cada interfase será mayor.

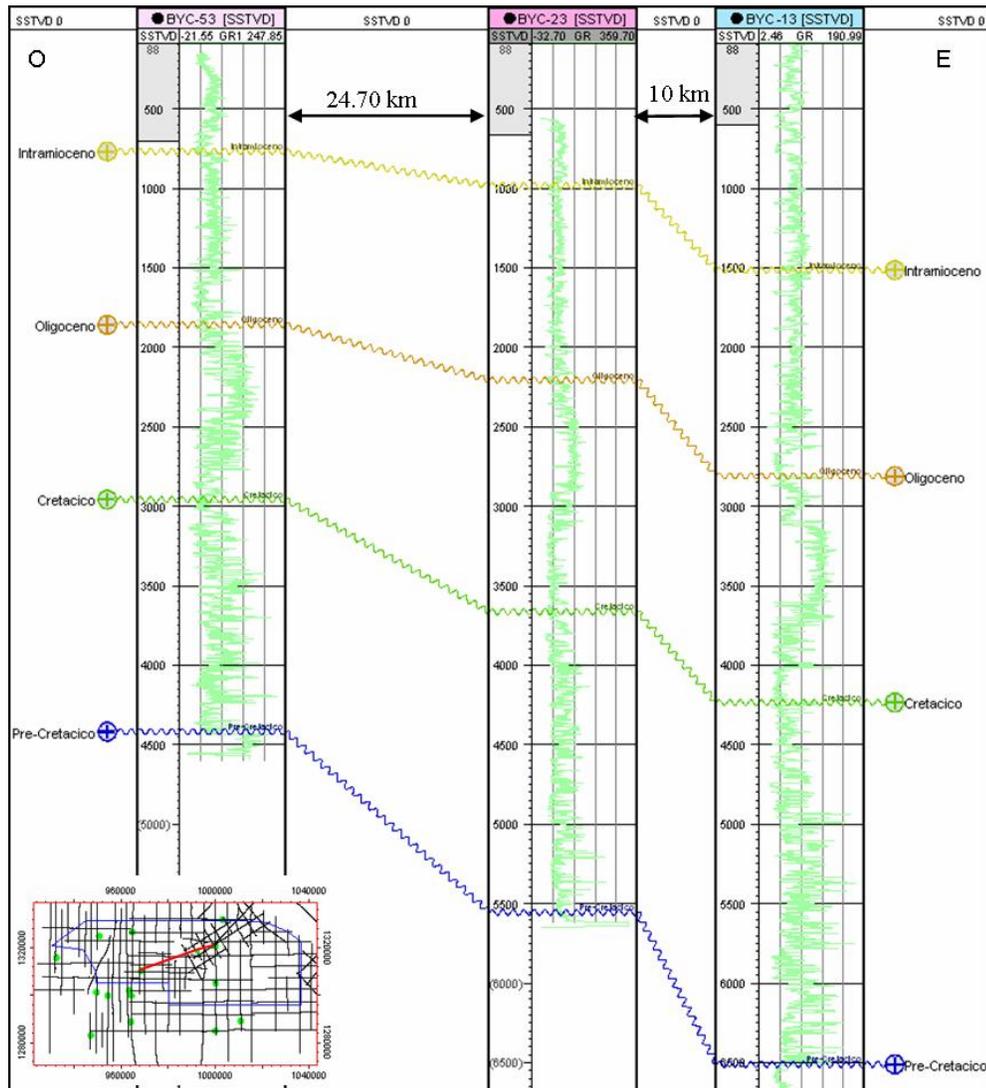


Fig. 5.8. Sección geológica donde se muestra la correlación secuencial del pozo de prueba BYC-23 con los pozos BYC-53 y BYC-13.

5.7. Breve historia geológica de la zona según las secciones sísmicas

Quizás como resultado de la Orogenesis Caledoniana y/o Herciniana las rocas precretácica fueron plegadas y metamorfizadas, mientras estaban expuestas a la erosión. Con los movimientos tensionales de las placas tectónicas en el Mesozoico Inferior se inicia el proceso de separación de las placas Suramericana y Norteamericana, con lo que se crea el Graben de Espino, y los sistemas de fallas profundas asociados a él, presentes en la zona. Luego, con la transgresión del Cretácico y posterior sedimentación de la capas de esta edad, fue posible la preservación del Tope-Precretácico, fácilmente identificable en las secciones sísmicas por sus truncaciones pronunciadas.

Al iniciarse la regresión a finales del Cretácico, se empieza a formar la superficie erosiva Tope-Cretácico debido a la exposición de las rocas previamente depositadas, la cual se propaga de sur a norte (dirección de la regresión). Hubo un hiatus en el Paleoceno y el Eoceno (no se depositaron), y un nuevo aumento en el nivel medio marino permitió la depositación de la secuencia Oligoceno, así como la preservación de parte de la secuencia Cretácica, identificado al sur por sus suaves truncaciones y en la zona de estudio por downlaps. De esta misma forma se depositó la secuencia Mioceno, para preservar parte de la secuencia Oligocena, sin embargo, la secuencia Post-mioceno no es identificable sísmicamente en los datos utilizados, por lo que, se trabajó con el Tope-Intramioceno el cual representa una regresión de edad Mioceno (no necesariamente la última).

Cabe destacar que aparentemente los procesos tectónicos extensivos perduraron

hasta el Mioceno, ya que la mayoría de las fallas interpretadas cortan todas las secuencias. También hay que considerar el proceso compresivo del Oligoceno (asociado al paso de la placa Caribe por el norte de Suramérica) el cual, a pesar de no verse reflejado en las secciones sísmicas, haya restado salto a las fallas existentes al invertir su movimiento.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El ajuste en la correlación sísmica-pozo varía entre 30 % y 83 %, ocurriendo el mejor ajuste en el pozo BYC-117 ubicado en la línea sísmica bycgz-M-1. El peor ajuste (30 %) ocurrió en el pozo BYC-817, ubicado en la línea bycgm-23-3. Evidentemente la selección de la ondícula adecuada influencia de manera determinante el porcentaje de ajuste entre las trazas sísmicas y la traza sintética. Se considera que, en general, los sismogramas sintéticos construidos presentan buena correlación con los datos sísmicos y permite acentuar las características geológicas de las trazas sísmicas.
- En las secciones sísmicas en TWT, el tope-Precretácico se distingue por la presencia de truncaciones en toda la zona estudiada, las cuales indican la existencia de la superficie erosiva, previa a la transgresión del Cretácico. El tope-Cretácico se reconoce por los downlaps de principios del Oligoceno apreciables en la parte norte de la zona, representando la regresión (progradación) de finales del Cretácico. Al igual que el caso anterior, el tope-Oligoceno presenta downlaps distinguibles en la parte sur de la zona, indicando la presencia del proceso regresivo correspondiente a éste período, en esta parte de la cuenca. Por otro lado, el tope-Intramioceno en la zona de estudio es concordante, por lo que resulta difícil

distinguir en la mayoría de los casos.

- La relación sísmica-geológica más resaltante en este estudio se encuentra en la secuencia Oligoceno, debido a la presencia de una secuencia de baja energía que se acuña hacia el sur, la cual, ha sido asociada con la lutita de la Formación Roblecito. También se destaca el contraste entre la roca Precretácica con la secuencia Cretácico-Terciario.
- En general, los mapas en tiempo presentan dos tendencias predominantes. La primera se identifica en los cuadrantes noroeste, suroeste y sureste con curvas que gradualmente buzan al noreste, con un gradiente promedio de 11.16 ms/km para las cuatro superficies de interés. La segunda es una depresión que ocurre en el noreste, donde las curvas poseen un gradiente que varía de 15.45 ms/km en el tope-Intramioceno hasta 23.41 ms/km en el tope-Precretácico, con orientación preferencial de máximo crecimiento N45E. Los horizontes llevados en la interpretación sísmica son prácticamente paralelos entre sí, de lo que se deriva que ninguno de ellos se acuña en la zona estudiada. También se debe resaltar que las elongaciones que dividen el bloque noreste, tanto por su lado este como por el lado sur, corresponden con las fallas interpretadas, por lo cual éstas pueden usarse para definir los límites entre ambos bloques que conforman la zona estudiada.
- Los mapas de velocidad correspondientes a cada capa presentan una tendencia homogénea que aumenta su valor de sur a norte, con variación lateral de velocidades entre 5600 ft/s y 7200 ft/s en el Post-Intramioceno (Tope-Intramioceno),

6600 ft/s y 9800 ft/s en el Intramioceno (Tope-Oligoceno), 7600 ft/s y 1000 ft/s en el Oligoceno (Tope-Cretácico) y 8800 ft/s y 13200 ft/s en el Cretácico (Tope-Precretácico).

- Los mapas en profundidad obtenidos son dominados estructuralmente por las fallas interpretadas, ya que ellas dividen la zona estudiada en dos localidades geológicas. Los cuadrantes noroeste, suroeste y sureste poseen un gradiente mucho más suave (22.64 ft/km para el Tope-Intramioceno y 62.57 ft/km para el Tope-Precretácico) que el encontrado en el cuadrante noreste (91.93 ft/km para el Tope-Precretácico). Todas las superficies interpretadas poseen una componente principal de buzamiento al norte, con excepción del Tope-Intramioceno, que tiende a disminuir su profundidad en el cuadrante noroeste, lo cual se corresponde con la geología de la zona, ya que este límite aflora en el área estudiada según los mapas geológicos de superficie actuales. La profundidad en los mapas varía (respecto al nivel del mar) entre 0 ft y 3400 ft en el Intramioceno, 1000 ft y 4400 ft en el Oligoceno, 2800 ft y 8600 ft en el Cretácico y 2400 ft y 8600 ft en el Precretácico.
- Los saltos de fallas calculados en la interpretación varían entre 78 ft (falla 1) y 308 ft (falla 6), verificándose los saltos de 90 ft reportados sin más detalle por PDVSA en 1983. Estas fallas interpretadas definen un sistema de esfuerzos completamente extensivo, lo que se corresponde hasta cierto punto con lo indicado en la evolución de la cuenca. La falta de fallas inversas indica que, al menos con la

escala de este estudio, el proceso compresional del Oligoceno no provocó grandes inversiones en el movimiento de las fallas, o en su defecto, éstos no fueron lo suficientemente grandes para invertirlas. También hay que considerar que la resolución sísmica es baja, por lo cual no se debe descartar la existencia de fallas inversas en la zona, debido a que sus saltos no son resolubles.

- Con la colocación del pozo estratigráfico BYC-23 (que no posee TVS) en la zona de estudio, se comprobó que el modelo en profundidad elaborado se puede aplicar efectivamente. El error en cada interfase (Intramioceno: 32 ft , Oligoceno: 68 ft, Cretácico: -95 ft, y Precretácico: -78 ft) es menor que su correspondiente resolución vertical (77.22 ft, 107.07 ft, 129.87 ft, 157.94 ft respectivamente), lo cual es la mejor prueba de que el modelo de profundidades creado funciona. Sin embargo, hay que destacar que mientras más alejado se encuentre el punto de prueba con respecto a los pozos usados para la construcción de los mapas, probablemente el error asociado a la profundidad de cada interfase será mayor.
- De acuerdo con los resultados obtenidos se recomienda adquirir nuevos datos sísmicos, con orientación ortogonal al rumbo de las fallas presentes en los mapas de profundidad, que permitan realizar estudios estratigráficos de mayor detalle. Además se sugiere buscar con detalle las velocidades de apilamiento y migración usadas en el procesamiento de las secciones interpretadas, con el fin de aumentar la calidad de los mapas de velocidad elaborados, en las zonas lejanas a los pozos. Finalmente se recomienda referenciar las secciones sísmicas al nivel medio

marino, para evitar confusiones en investigaciones futuras.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

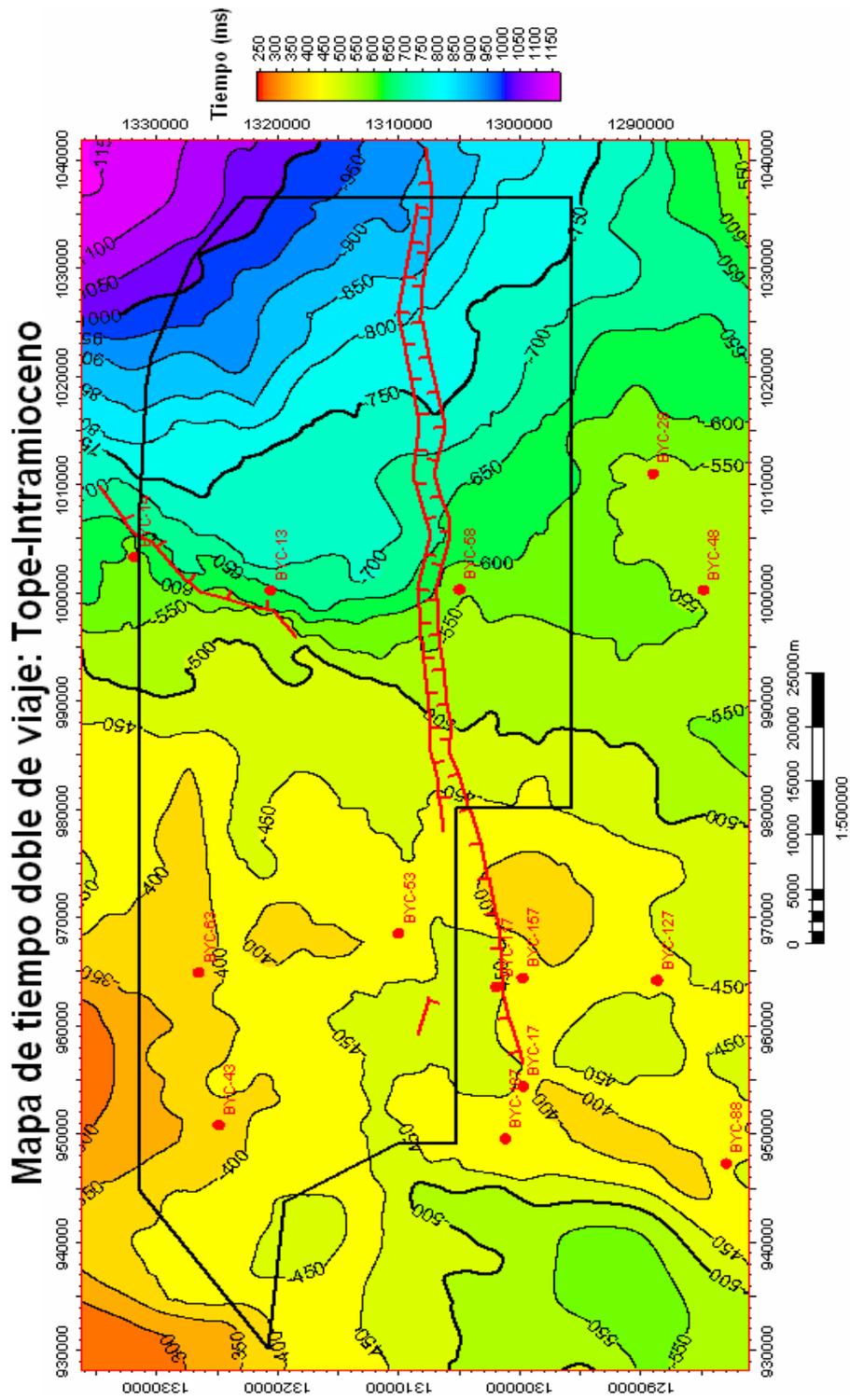
- Bally, A. (1987). Atlas of seismic stratigraphy. AAPG, vol 1, pp 1-9.
- Bot, P. y J. Perdomo (1986). Estratigrafía sísmica introducción y aplicaciones. Lagoven
- Box, R. y P. Lowrey. (2003). Reconciling sonic logs with check-shot surveys: Stretching synthetics seismograms. The Leading Edge, 22, no. 6, 510-517 pp.
- Comité Interfilial de Estratigrafía y Nomenclatura (1997). Léxico Estratigráfico de Venezuela (LEV). PDVSA – INTEVEP. Recuperado el 23 de febrero, 2007, de: <http://www.pdv.com/lexico>
- Erlich, R. and S. Barrett (1992). Petroleum Geology of the Eastern Venezuelan Foreland Basin in Foreland Basins and Fold Belts. Editores R.W.Macqueen and D.A.Leckie. Memorias de la AAPG 55: 341-362.
- Escalona, N. (1977). Formaciones propicias para la exploración de uranio en la región de los llanos y en la región oriental de Venezuela. Memoria del V Congreso Geológico Venezolano, pp. 1023-1037.
- González de Juana C., J. Iturralde de Arozena y X. Picard (1980). Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas. Ed. Foninves, 2 tomos, pp. 1021.

- Hedberg, H. and H. Funkhouser (1947). Oilfields of the Greater Oficina Area, central Anzoátegui, Venezuela. AAPG, 31(12): 2089-2169.
- Henry, S. (2000). Pitfalls in synthetics. The Leading Edge, 19, no. 06, 604-606.
- Isea, A. (1987). Geological synthesis of the Orinoco Oil Belt, Eastern Venezuela. Journal of Petroleum Geology, 10(2): 135-148.
- Kiser (1987). Exploration Results, Machete Area, Orinoco Oil Belt, Venezuela. Journal of Petroleum Geology, 10(2): 149-162.
- Liner, C. (2004). Elements of 3D seismology. Segunda edición, Editorial PennWell, 608 pp.
- Mencher, E., H. Fichter, H. Renz, W. Wallis, J. Patterson and R. Robie (1953). Geology of Venezuela and its oil fields. AAPG, Boletín 37(4): 690-777.
- Mitchum, R. (1977). Seismic stratigraphy and global changes of sea level. Part 11: glossary of terms used in seismic stratigraphy. En: Payton, C.E. (Ed.), Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration, vol. 26. A.A.P.G. Memoir, pp. 205–212.
- Moticska, P. (1985). Volcanismo Mesozoico en el subsuelo de la Faja Petrolífera del Orinoco, Estado Guárico, Venezuela. Memorias del VI Congreso Geológico Venezolano, pp. 1929-1943.

- Parnaud, F., Y. Gou, J-C. Pascual, Truskowski, O. Gallango, H. Passalacqua, and F. Roure, (1995). Petroleum Geology of the Central Part of the Eastern Venezuelan Basin, in Petroleum Basins of South America. Editores Tankard, Suarez y Welsink. Memorias de la AAPG 62, p. 741-756.
- Patterson, J. and J. Wilson (1953). Oil fields of Mercedes region, Venezuela, AAPG. Boletín 37(12): 2705-2733.
- PDVSA (1983). Evaluación exploratoria de la Faja Petrolífera del Orinoco Área Machete. Coordinación de la Faja Petrolífera del Orinoco, Vol VI, pp. 347.
- Schlumberger (1997). Evaluación de pozos (WEC). Capítulo I. Cuencas petrolíferas. Versión Multimedia (CD).
- Sheriff, R. (2002). Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics. 4th edition, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Van Erve, A. (1985). Palinoflora del Jurásico del pozo NZZ-108X en el área de Zuata, Faja Petrolífera del Orinoco, Venezuela oriental. Memorias del VI Congreso Geológico Venezolano, pp. 1205-1209.

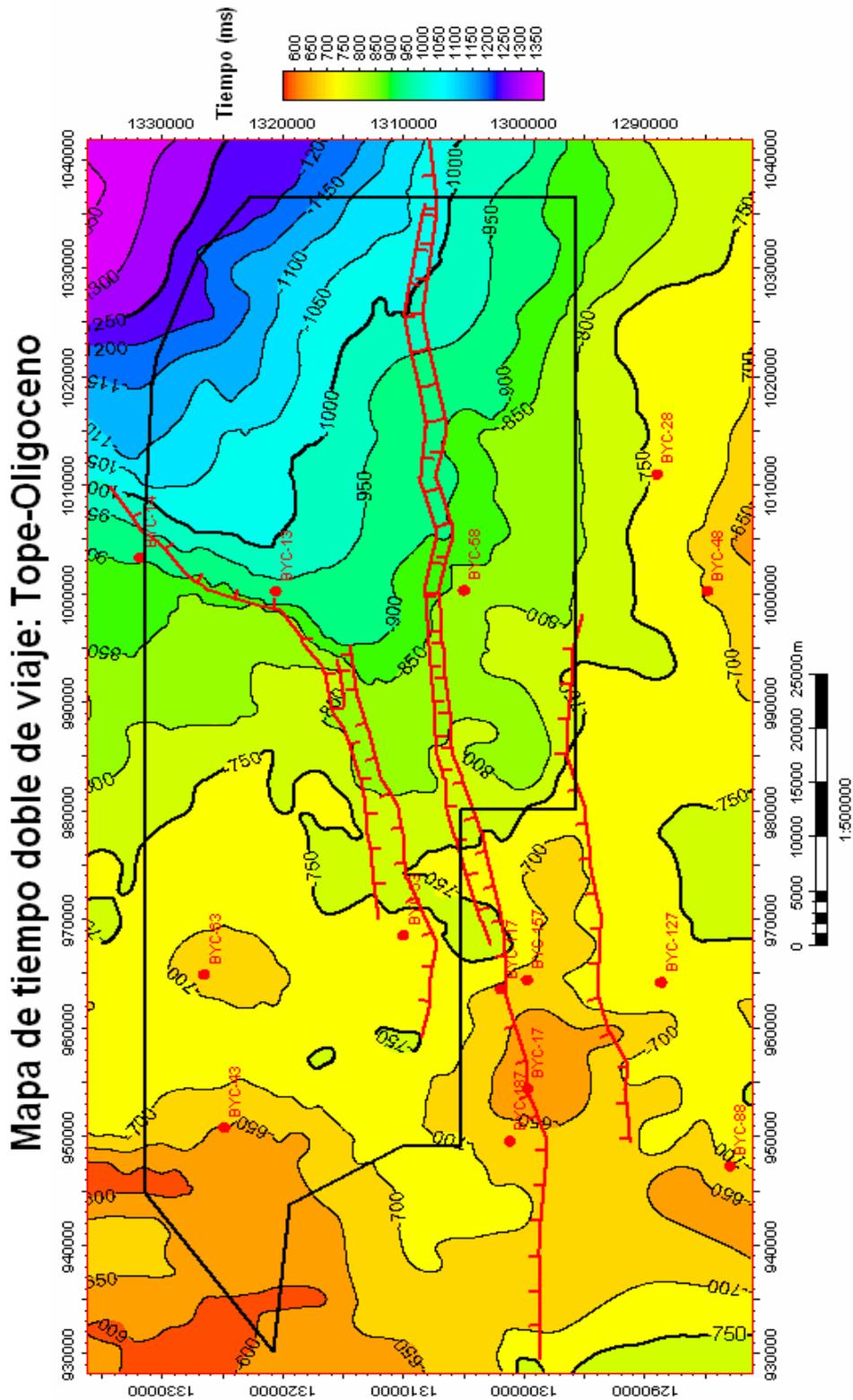
APÉNDICES

APÉNDICE A



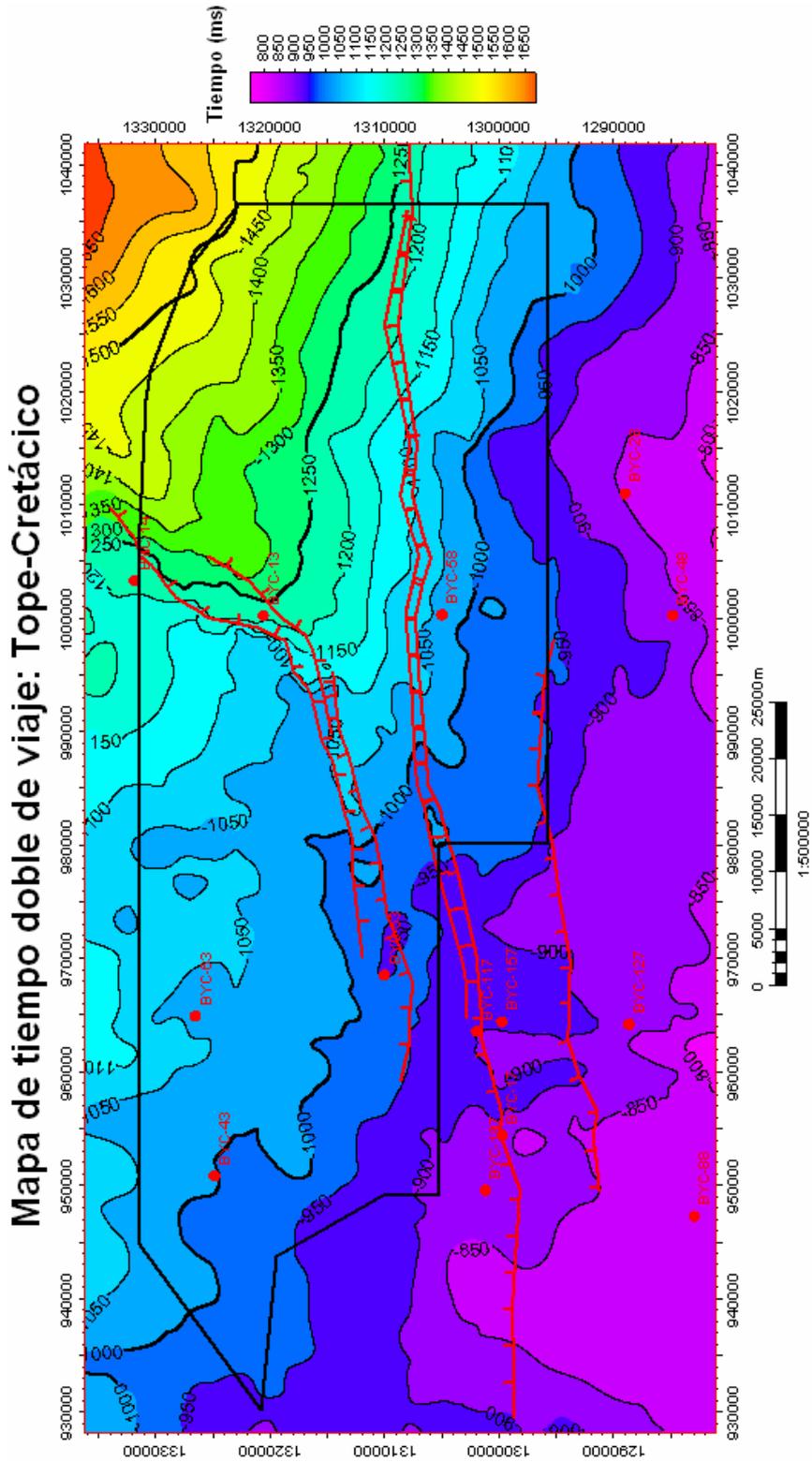
Mapa de tiempo doble de viaje correspondiente a la superficie Intramioceno. Con líneas rojas se destacan las fallas de este nivel, los puntos rojos representan los pozos y el polígono negro es el límite de la zona en estudio.

APÉNDICE B



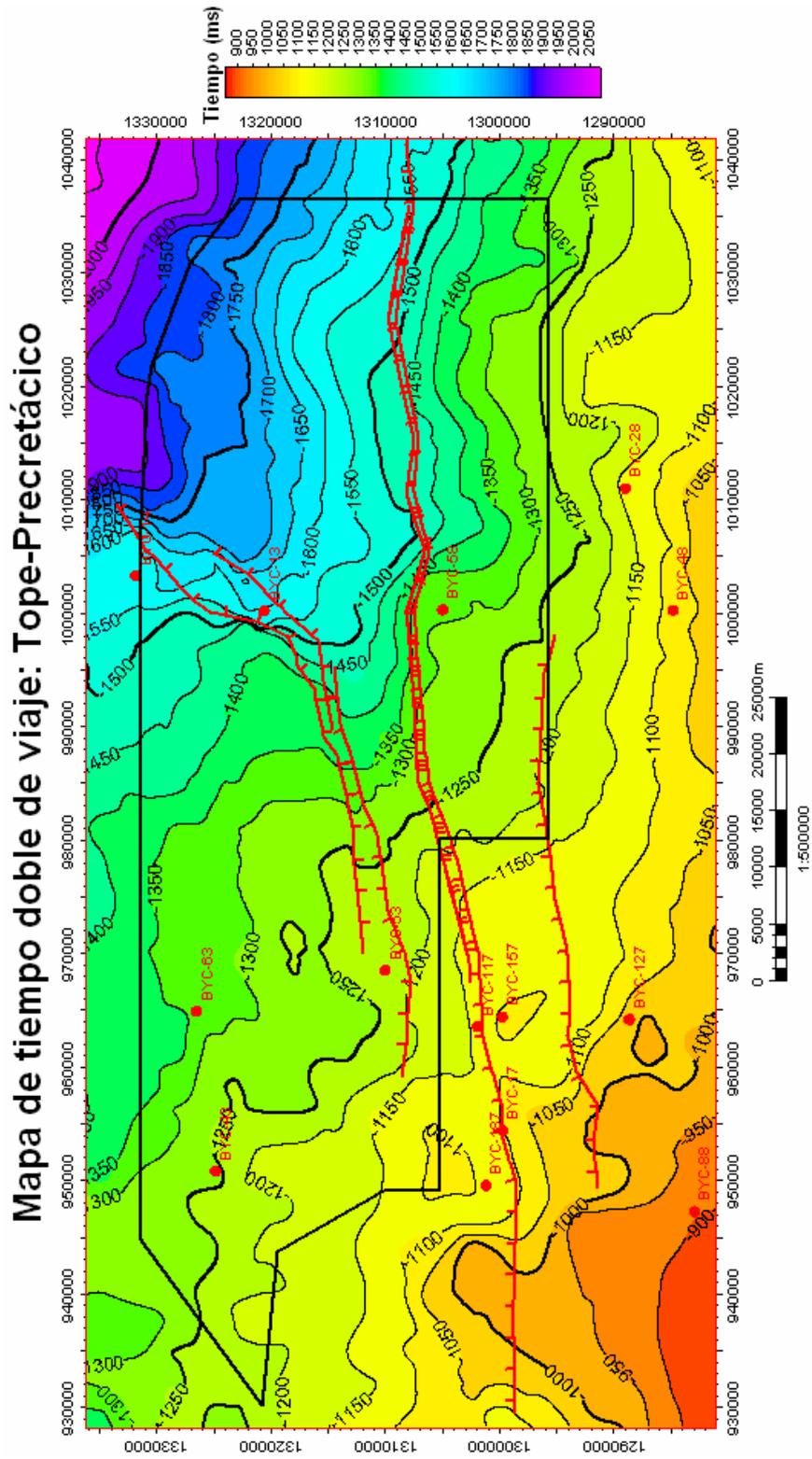
Mapa de tiempo doble de viaje correspondiente a la superficie Oligoceno. Con líneas rojas se destacan las fallas de este nivel, los puntos rojos representan los pozos y el polígono negro es el límite de la zona en estudio.

APÉNDICE C



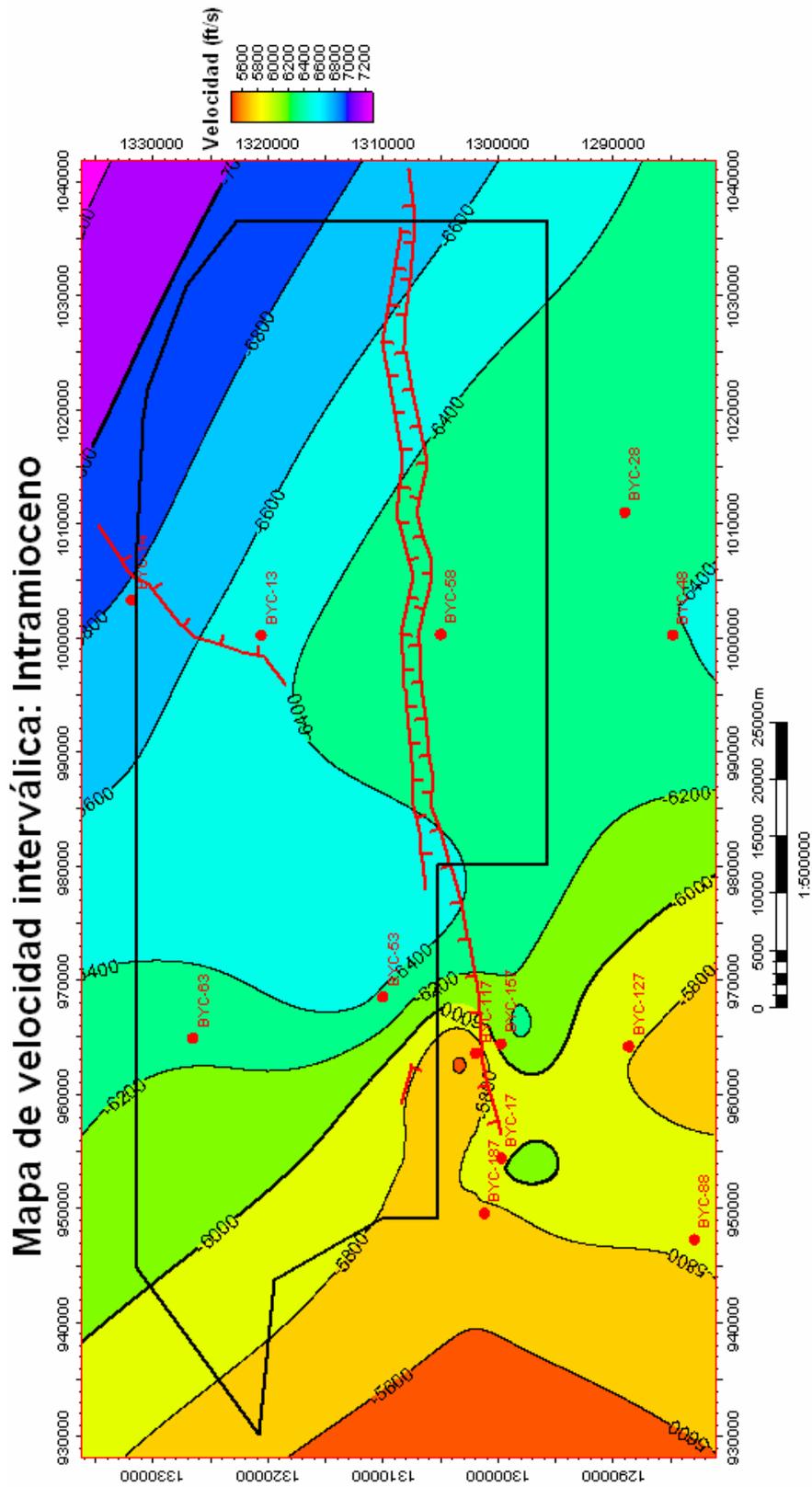
Mapa de tiempo doble de viaje correspondiente a la superficie Cretácico. Con líneas rojas se destacan las fallas de este nivel, los puntos rojos representan los pozos y el polígono negro es el límite de la zona en estudio.

APÉNDICE D



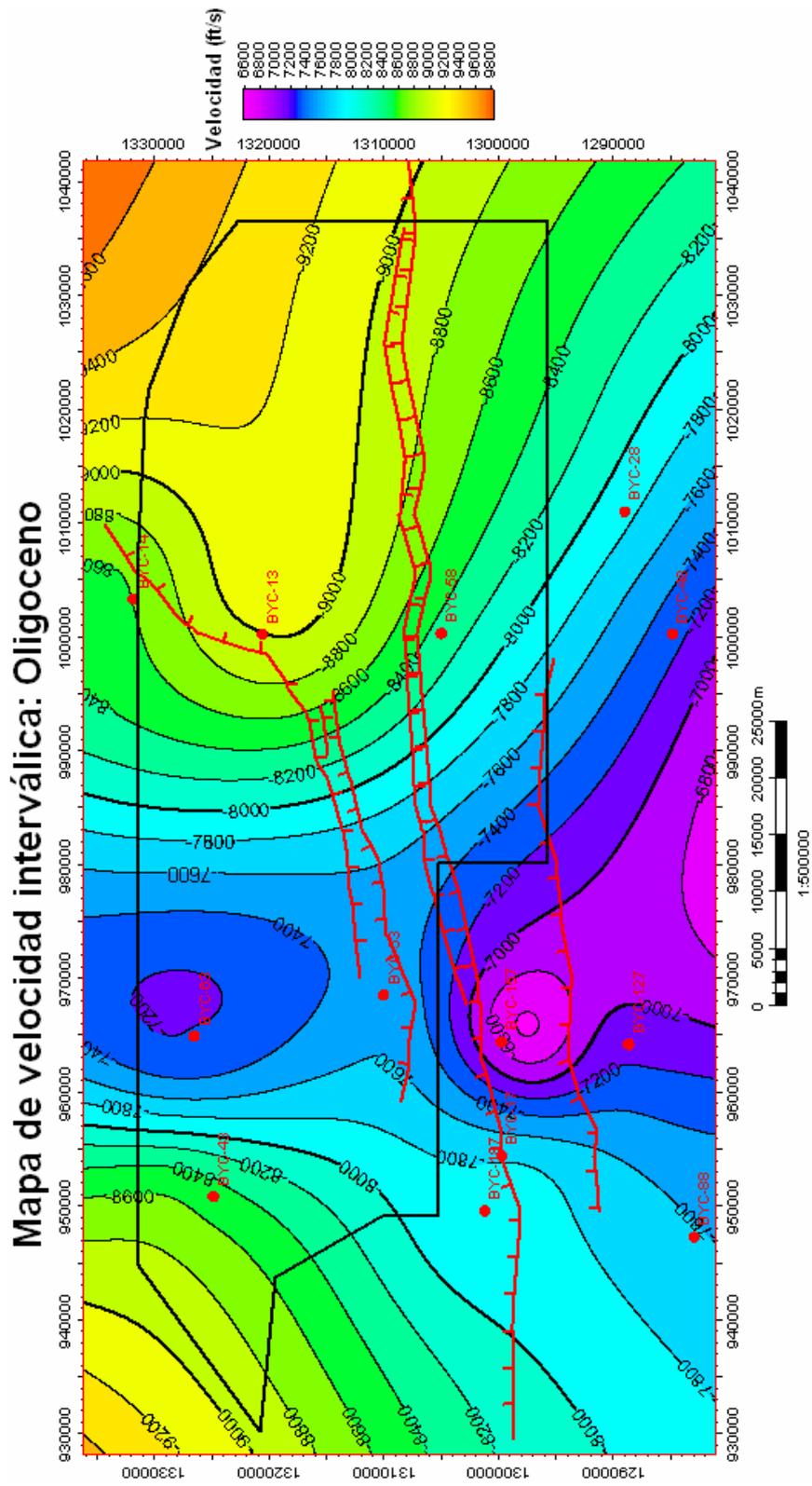
Mapa de tiempo doble de viaje correspondiente a la superficie Precretácico. Con líneas rojas se destacan las fallas de este nivel, los puntos rojos representan los pozos y el polígono negro es el límite de la zona en estudio.

APÉNDICE E



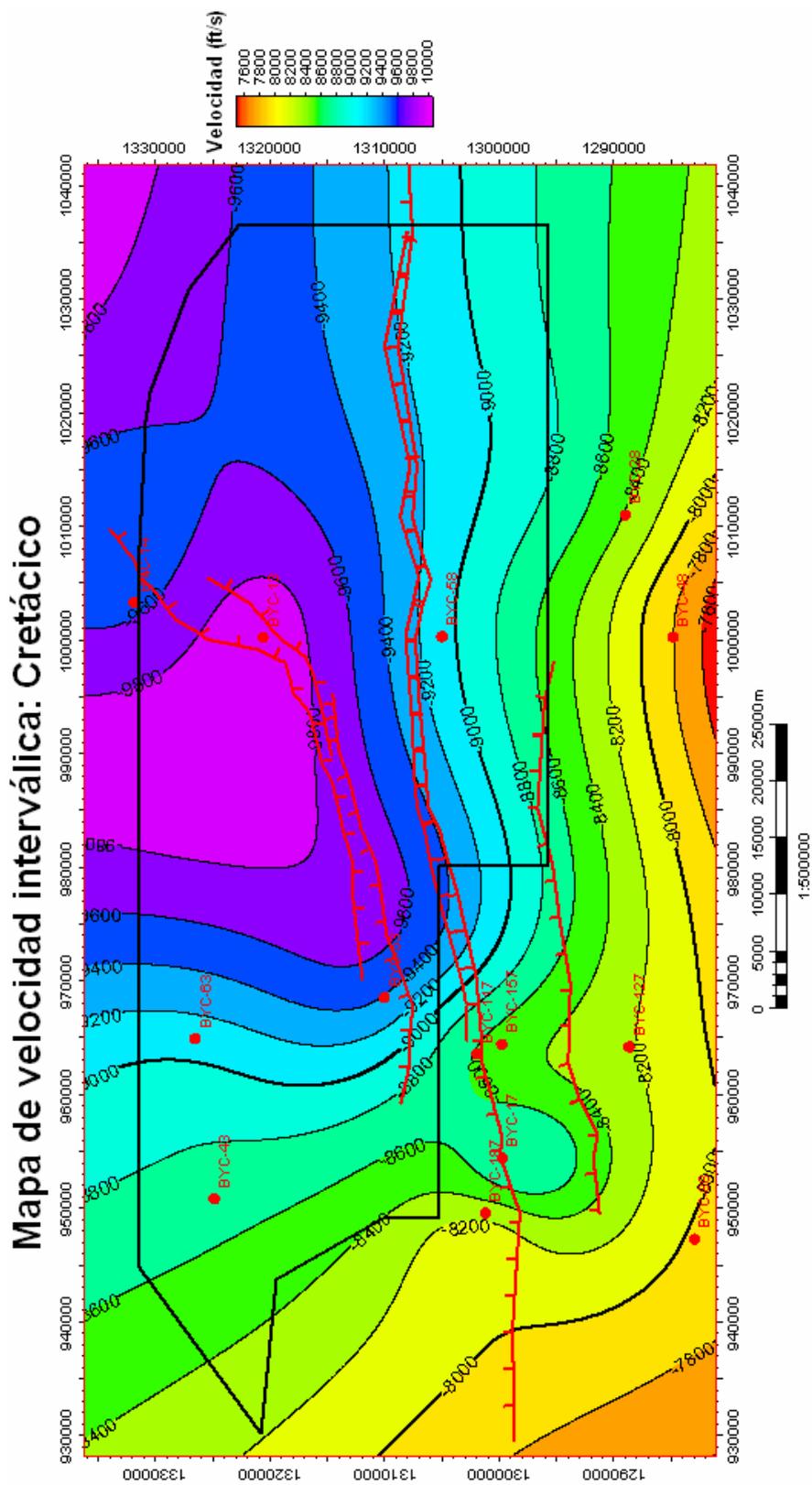
Mapa de velocidad interváltica correspondiente a la capa Post-intramioceno. Con líneas rojas se destacan las fallas de este nivel, los puntos rojos representan los pozos y el polígono negro es el límite de la zona en estudio.

APÉNDICE F



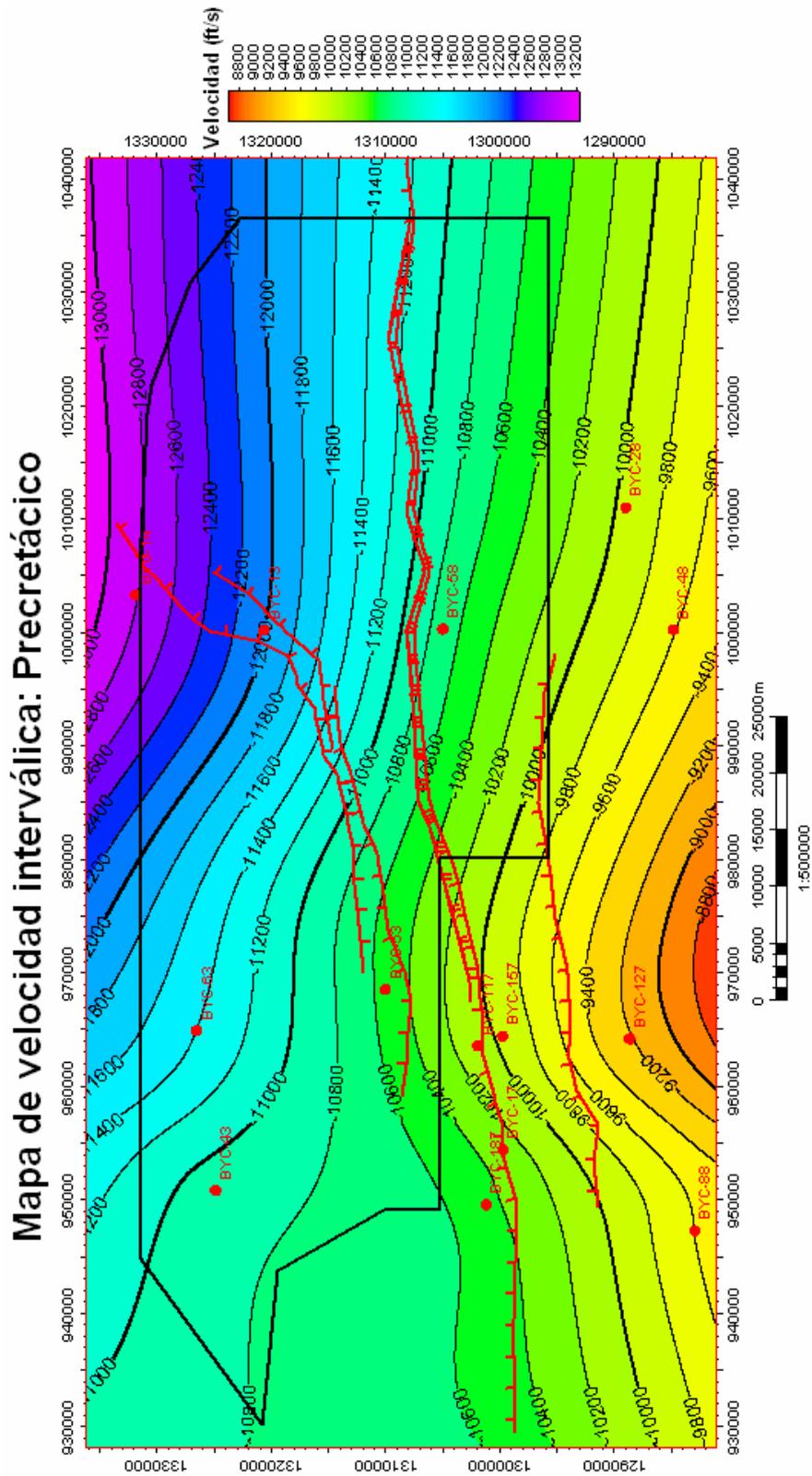
Mapa de velocidad interválvica correspondiente a la capa Intramioceno. Con líneas rojas se destacan las fallas de este nivel, los puntos rojos representan los pozos y el polígono negro es el límite de la zona en estudio.

APÉNDICE G



Mapa de velocidad interválvica correspondiente a la capa Oligoceno. Con líneas rojas se destacan las fallas de este nivel, los puntos rojos representan los pozos y el polígono negro es el límite de la zona en estudio.

APÉNDICE H



Mapa de velocidad interválvica correspondiente a la capa Cretácico. Con líneas rojas se destacan las fallas de este nivel, los puntos rojos representan los pozos y el polígono negro es el límite de la zona en estudio.