

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MODELO ESTRATIGRÁFICO 3D DE LA FORMACIÓN MISOA B-SUP Y B-6 (EOCENO), UBICADO EN EL CAMPO COSTANERO BOLÍVAR, ÁREA CABIMAS, EDO. ZULIA.

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela por el Br.
González Velásquez, Edgar Andrés para
Optar al título de Ingeniero Geólogo

Caracas, Junio 2007

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MODELO ESTRATIGRÁFICO 3D DE LA FORMACIÓN MISOA B-SUP Y B-6 (EOCENO), UBICADO EN EL CAMPO COSTANERO BOLÍVAR, ÁREA CABIMAS, EDO. ZULIA.

Tutor Académico: Prof. Lenin González
Tutor Industrial: Geol. Maurizio Mastrolorenzo

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela por el Br.
González Velásquez, Edgar Andrés para
Optar al título de Ingeniero Geólogo

Caracas, Junio 2007

Caracas, Junio 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 Edgar Andrés González Velásquez, titulado:

“MODELO ESTRATIGRÁFICO 3D DE LA FORMACIÓN MISOA B-SUP Y B-6 (EOCENO), UBICADO EN EL CAMPO COSTANERO BOLÍVAR, ÁREA CABIMAS, EDO. ZULIA.”

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

Prof.

Jurado

Prof.

Jurado

Prof. Lenin González

Tutor

Prof.

Jurado

González V. Edgar A.

MODELO ESTRATIGRÁFICO 3D DE LA FORMACIÓN DE MISOA B-SUP Y B-6 (EOCENO), UBICADO EN EL CAMPO COSTANERO BOLÍVAR, ÁREA CABIMAS, EDO. ZULIA

Tutor Académico: Prof. Lenin González. Tutor Industrial: Geol. Maurizio Mastrolorenzo. Tesis. UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2007

Palabras claves: Formación Misoa, Modelo Estratigráfico 3D, Campo Costanero Bolívar, Campo Cabimas, Cuenca del Lago de Maracaibo.

RESUMEN

Este trabajo representa la creación de un modelo estratigráfico 3D, para las arenas de la unidad del B-6, pertenecientes a la Formación Misoa (Eoceno Medio) del Campo Cabimas, al norte del Campo Costanero Bolívar, costa oriental del Lago de Maracaibo, Edo. Zulia.

Para dicho objetivo se correlacionaron 21 pozos evaluando las curvas Rayos Gamma (GR) y Resistividad (R), utilizando como marcador estratigráfico la lutita del tope de la arena B-6-B2 la cual presenta una buena extensión lateral y está bien definida en todos los pozos.

Se crearon secciones estratigráficas en dirección paralela y perpendicular a la sedimentación observando las tendencias y geometrías de los cuerpos de arena presentes en cada sub unidad, representadas por B-6, B-6-B1, B-6-B2, B-6-C y B-6-D. A su vez se crearon mapas de arena neta para determinar las tendencias y espesores de los cuerpos de arena.

Pasando al modelo 3D, primeramente se crearon superficies estructurales para cada unidad de B-Sup y B-6. Posteriormente se modelaron las fallas por medio de la extracción de sus trazas contenidas en mapas estructurales de la Discordancia del Eoceno, B-4 y B-6, provenientes de trabajos anteriores. Como último paso en el modelado estructural, se elaboraron horizontes estructurales desde la discordancia hasta el tope de B-7.

La unidad B-6 se encuentra ubicada en un ambiente de plataforma marino somero con influencia mareal. Los análisis de núcleos han determinado la presencia de estructuras sedimentarias como rizaduras, laminación y estratificación cruzadas planar, estratificación cruzada tipo espina de pescado, indicativo flujos de corrientes de marea de forma bidireccional. Los cuerpos de arenas predominantes que están presentes en B-6, son capas de arena con contacto abrupto hacia el tope y la base; cuerpos de arena contacto con gradacional hacia la base y hacia el tope, evidenciando eventos progradantes y retrogradantes.

El modelo de facies 3D fue realizado usando geoestadística, específicamente el método de simulación secuencial indicadora, generando un modelo lo mas real posible, honrando los datos de los pozos y dándole una distribución espacial bien por este método.

Las mejores áreas prospectos para una posible localización es al sur del Campo Cabimas, en donde es mas elevada la estructura y donde presenta una mejor calidad de roca reservorio, dado el por modelo petrofísico generado a partir de registros de porosidad efectiva.

DEDICATORIA

Este trabajo especial de grado se lo dedico a mis padres, Liliana y Edgar, por su amor sin limites, por siempre darme los consejos mas valiosos en pro de mi bienestar, por calmarme en aquellos momentos difíciles.

A mis hermanitos, Victoria, Ivan y David, por que siempre sigamos unidos y nos cuidemos mutuamente para salir todos juntos adelante. Victoria, hermanita mía, ojala estuvieras aquí conmigo viviendo esta etapa de mi vida tan importante, Yo se que tu desde Argentina vas a estar muy pendiente de mi...eres y siempre serás mi morochita.

A mis abuelos... mi abuelita China, mi abuelo Juan y mi abuelo Enrique, personas con una calidad humana y una calidad para ser abuelos impresionantes. Gracias a Dios y los tengo a mi lado, aprendiendo siempre un poco de cada uno de ustedes.

A mi novia Mayale... eres la mujer de mi vida y te amo infinitamente. La felicidad que me da por tenerte a mi lado no lo puedo ni contar, ni medir, ni describir de lo grande que es.

A mi primo Tirso Andrés, eres como mi hermano mayor, y te veo como un ejemplo al que tengo que seguir. Gracias por estar ahí siempre, a pesar de lo lejos que estés de aquí.

AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer primeramente a Dios y al Espíritu Santo, por que nunca me abandonó en los momentos difíciles. Tu siempre estas ahí para ayudarme y guiarme para tomar las decisiones correctas.

A la Universidad Central de Venezuela, no solo por estar orgulloso de haber estudiado en la principal casa de estudios en el país, sino por que es una universidad que me ha dado lecciones de vida, especialmente en la facultad de ingeniería, en la que nunca debemos rendirnos, y siempre darlo el todo por el todo.

A mis tutores Lenin y Mauricio, por guiarme en la realización del modelo 3D con datos reales y finalizarlo con éxito.

Les agradezco a Petrocabimas, por darme la confianza de hacer mi tesis de grado con sus datos y así generar el modelo estático de sus yacimientos

A mis mejores amigos Rafael y Marianne...gracias por estas ahí siempre cuando los he necesitado.

A Martha Romero, por darme la oportunidad de formar parte del equipo G&G en Schlumberger.

Y a todos mis compañeros de trabajo, Carla, Mariella, Egle, Ángel, Jorge, José Araujo, Ludner. Hemos creado un gran equipo, y les doy gracias por brindarme su amistad y apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
ÍNDICE DE ANEXOS	xviii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. CONSIDERACIONES GENERALES	1
1.1.1. Ubicación	1
1.1.2. Objetivos	2
• General	2
• Específicos	2
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
1.3. ALCANCE	3
1.4. LIMITACIONES	4
1.5. TRABAJOS PREVIOS	4
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	8
2.1. ETAPA 1: Recopilación bibliográfica y adquisición de la data	8
2.2. ETAPA 2: Procesamiento de la data	8
2.2.1. Carga de la data en Petrel	8
2.2.2. Elaboración del Mapa Base	9
2.2.3. Elaboración del Mapa Base	10
2.2.4. Superficies estratigráficas	11
2.2.5. Creación de registro discreto de facies	13
2.2.6. Modelado de Fallas	13
2.2.7. Mallado de Pilares “Pillar Gridding”	16
2.2.8. Creación de Horizontes	19
2.2.9. Creación de Zonas y Capas	21
2.2.10. Modelado Geométrico	23
2.2.11. Escalamiento de Registros	24
2.2.12. Modelado de Facies	25
2.2.13. Modelado Petrofísico	26
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	28
3.1. AMBIENTES DEPOSITACIONALES	28
3.1.1. Ambientes Marinos Siliciclásticos	28

3.1.2.	Ambiente nerítico (plataforma)	29
3.1.2.1.	Procesos de Marea	30
3.1.2.2.	Tipos de Sedimentos	32
	a) Sedimentos de Plataforma	32
	b) Distribución	33
3.1.2.3.	Sucesión sedimentaria vertical	33
3.2.	HERRAMIENTA UTILIZADA	35
	PETREL - Descripción Módulos	35
CAPÍTULO IV: GEOLOGIA REGIONAL		37
4.1.	MARCO ESTRUCTURAL REGIONAL	37
4.2.	EVOLUCIÓN TECTÓNICA	38
4.2.1.	Eoceno	38
4.2.1.1.	Extensión Paleógena de Falcón-Zulia Oriental	39
4.2.1.2.	Control Tectónico regional del arco de Mérida	41
4.3.	ESTRATIGRAFIA REGIONAL	41
4.3.1.	Formación Misoa. Terciario (Eoceno) Estado Zulia	42
4.3.1.1.	Descripción litológica	42
4.3.1.2.	Espesor	43
4.3.1.3.	Formación Paují	44
4.3.1.4.	Formación Trujillo	44
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANALISIS		45
5.1.	GEOLOGÍA LOCAL	45
5.1.1.	Generalidades	45
5.1.2.	Descripción de los Núcleos	45
5.2.	REGISTROS ELÉCTRICOS	47
5.2.1.	Comparación de núcleos con curvas de rayos gamma	48
5.3.	ESTRATIGRAFÍA LOCAL	50
5.3.1.	Generalidades	50
5.3.2.	Descripción de las Sub-unidades	55
5.3.2.1.	Sub-unidad B-6-D	55
5.3.2.2.	Sub-unidad B-6-C	58
5.3.2.3.	Sub-unidad B-6-B2	61
5.3.2.4.	Sub-unidad B-6-B1	64
5.3.2.5.	Sub-unidad B-6	67
5.3.3.	Análisis Ambiental de B-6	70

5.4.	MAPAS ESTRUCTURALES	72
5.4.1.	Interpretación estructural de B-6	73
5.4.2.	Interpretación estructural de B-Superior	75
5.5.	MODELO 3D DEL CAMPO CABIMAS PARA B-6 Y B-SUPERIOR	80
5.5.1.	Modelo estructural 3D	80
5.5.1.1.	Modelo de Fallas	80
5.5.1.2.	Estructuras	82
5.5.1.3.	Modelo estructura final	86
5.5.1.4.	Modelo estratigráfico para B-6	88
5.5.1.5.	Modelado Petrofísico	90
	CAPÍTULO VI: SUMARIO, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
6.1.	SUMARIO	92
6.2.	CONCLUSIONES	94
6.3.	RECOMENDACIONES	96
	REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS	97
	APÉNDICE	100
	ANEXOS	111

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

- Figura 1.1.** Ubicación del Área Cabimas, Campo Costanero de Bolívar (CCB). Tomado de: Trabajo interno de Suelopetrol. 1

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

- Figura 2.1.** Mapas de las ubicaciones de los pozos de B-6 y B-Superior. El Campo Cabimas limita al oeste con la Costa Oriental del Lago de Maracaibo 9
- Figura 2.2.** Ilustración de una sección estratigráfica creada en Petrel a partir de registros de GR y Resistividad 10
- Figura 2.3.** Ilustración de una sección estructural creada en Petrel 11
- Figura 2.4.** Superficie final en 3D del tope de una unidad. Se puede observar que es una superficie continua, sin expresión de los saltos de falla. 12
- Figura. 2.5.** Falla realizada por medio de polígonos de fallas. Los polígonos se aprecian por las líneas de colores en la figura. 14
- Figura 2.6.** Ilustración del uso de nodo o “widget” para el movimiento de los pilares. Este nodo “widget” puede moverse en dirección vertical y en un plano horizontal. 15
- Figura 2.7.** Procedimiento para la conexión de fallas por medio un pilar común para ambas fallas 16
- Figura 2.8.** Modelo de fallas en vista de planta, con el truncamiento hacia el sur de la Falla Principal de Cabimas contra la Falla Limite de Cabimas. Las flechas amarilla indican la dirección del truncamiento. Las fallas de color rojos indican una tendencia N-S para orientar al mallado. Las fallas en color azul muestran que son parte del límite del mallado. 17
- Figura 2.9.** Limite del modelo o “boundary” alrededor del modelo de fallas con líneas azules, en vista de planta. Al noroeste se observan como a dos fallas se les asigno ser parte del límite, cambiando a color azul. 18
- Figura 2.10.** Mallado principal del modelo en vista de planta; y a la derecha, vista del mallado en el tope, medio y base del modelo 3D. 19
- Figura 2.11.** Imagen del tope de una unidad como horizonte, apreciándose los saltos de falla, lo que en las superficies no se observaba. 20

Figura 2.12.	Control de calidad realizado a un horizonte con respecto al salto de falla. Los cubos blancos son nodos, los cuales pueden ser desplazados en dirección vertical para realizar la corrección	21
Figura 2.13.	Tipos de modalidades para la creación de zonas dependiendo de la configuración interna de las zonas	22
Figura 2.14.	Ilustración mostrando los diferentes tipos de capas o “layerigs” que se pueden realizar dentro de un modelo	23
Figura 2.15.	A la izquierda se tiene una ventana de dialogo en la cual se elige el registro y el método de escalamiento. A la derecha se tiene un esquema de la forma como se realiza el escalamiento de los registros entre las celdas que están presentes en el modelo.	25

CAPÍTULO III: MARCO TEORICO

Figura 3.1.	Diagrama de distribución de las zonas oceánicas (Tomado de Baamonde, 1997)	29
Figura 3.2.	Subdivisión de la Plataforma Continental (Tomado de Boggs, 1995)	30
Figura 3.3.	Bloque diagramático conceptual de una llanura de marea con sedimentos silisiclásticos. Se indican también las sub zonas correspondientes para la zona Inframareal, Intramareal y Supramareal; así como una secuencia típica con los sedimentos y las estructuras sedimentarias correspondientes (Tomado y modificado de Baamonde, 2007)	31
Figura 3.4.	Secuencia progradacional tipo, provenientes de depósitos del Precámbrico (Formación Word Canyon). En la tabla se indica el tamaño de grano, estructuras sedimentarias, tipo de transporte y ambiente de depositación (Tomado y modificado de Boggs, 1995).	32
Figura 3.5.	Diagrama esquemático ilustrando dos sucesiones transgresivas típicas de plataforma grano decreciente hacia el tope. A. Diagrama de plataforma continental dominado por marea. B. Diagrama de plataforma dominado por tormenta (Tomado y modificado de Boggs, 1995).	34
Figura 3.6.	Sucesión regresiva tipo de plataforma dominado por tormenta, grano creciente hacia el tope (Tomado y modificado de Boggs, 1995).	34
Figura 3.7.	Flujo de trabajo con el que debe trabajar en un proyecto en Petrel	36

CAPÍTULO IV: GEOLOGIA REGIONAL

Figura 4.1.	Evolución tectónica del norte de Suramérica, durante el Santomiense temprano al Eoceno Temprano (Tomado de Bertorelli y Marquez, 1996)	40
Figura 4.2.	Reconstrucción del norte de Suramérica durante el Eoceno Medio-Tardío (Tomado de Bertorelli y Marquez, 1996)	40
Figura 4.3.	Columna estratigráfica generalizada de la Provincia Oriental de Maracaibo	43

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS

Figura 5.1.	Variabilidad esquematizada de sucesiones de arena con patrones de registros de Rayos Gamma, en términos de comportamientos de migración de capas de arena en plataformas con influencia mareal.	48
Figura 5.2.	Fotos de núcleos extraídos del pozo R-834 para la unidad de B-6, junto con la curva de Rayos Gamma (GR) ubicada a la profundidad de los núcleos. Ambos tipos de imágenes sirven para comparar litología versus geometría de la curva mostrada y poder hacer una extrapolación de la data.	49
Figura 5.3.	El registro (A) corresponde a uno registro generalizado de todas las formaciones presentes en el Campo Costanero Bolívar, pudiéndose observar en el recuadro rojo la unidad correspondiente a B-6 (Tomado y modificado de Schlumberger, 1980). En el registro (B) se muestra el registro tipo para la unidad B-6 de la Formación Misoa, en Campo Cabimas; a su vez se puede observar las respectivas subdivisiones para esta unidad	51
Figura 5.4.	Mapas de correlaciones de B-6, al sur del Campo Cabimas. En el mapa (A) se puede observar 4 secciones realizadas en dirección perpendicular a la dirección de la sedimentación; así como en el mapa (B) donde se observan 3 secciones paralelas a la dirección de la sedimentación	52
Figura 5.5.	Secciones estratigráficas en dirección paralela a la sedimentación	54
Figura 5.6.	Sección estratigráfica F-F, realizada en sentido de la dirección de la sedimentación. Se observa la geometría predominante de los cuerpos de arena para esta sub-unidad descrita	56
Figura 5.7.	Sección perpendicular a la sedimentación.	56

Figura 5.8.	Mapa de arena neta para la sub unidad de B-6-D. Se observa que los valores promedios de espesores varían entre los 75 pies y 60 pies.	57
Figura 5.9.	Se observa en la sección G-G´ la escasa presencia de sedimentos clásticos depositados en este sub unidad	59
Figura 5.10.	Sección estratigráfica F-F´ en dirección paralela a la sedimentación. Se puede ver el poco desarrollo de arenas presentes en esta sub unidad	59
Figura 5.11.	Mapa de arena neta, en donde se observa poca o nula presencia de de depósitos clásticos.	60
Figura 5.12.	Sección estratigráfica F-F´. Se muestran cuerpos de arenas en forma de bloque, con contactos abruptos en base y tope	63
Figura 5.13.	Sección estratigráfica A-A´. Se observa buena continuidad lateral, perdiendo su espesor hacia el Norte	63
Figura 5.14.	Mapa de arena neta para B-6-B2	64
Figura 5.15.	Sección estratigráfica F-F´. Se observan cuerpos de arenas con forma de bloque y gradando de base a tope.	65
Figura 5.16.	Sección estratigráfica A-A´. Presenta buena continuidad lateral manteniéndose la geometría de los cuerpos de arena.	66
Figura 5.17.	Mapa de arena neta para B-6-B1. Presenta los mayores espesores de arena en B-6, con espesores que varían entre 100 pies y 50 pies.	66
Figura 5.18.	Sección estratigráfica F-F´. Se aprecia la disminución de las capas de arena hacia el Este del área de estudio.	68
Figura 5.19.	Sección estratigráfica A-A´. Los cuerpos de arena mantienen su geometria lateralmente.	68
Figura 5.20.	Mapa de arena neta para B-6	69
Figura 5.21.	Reconstrucción paleogeográfica hipotética de parches de arena migrando en dirección SSW, paralelo a la línea de costa (Tomado y modificado de Serra, 1985).	72
Figura 5.22.	Mapa estructural de la discordancia del Eoceno, señalando los nombres de las fallas presentes en el modelo	73

Figura 5.23.	Mapa estructural de B-6. Se aprecia el truncamiento de la falla Principal de Cabimas contra la falla Límite de Cabimas.	74
Figura 5.24.	Corte estructural W-E de B-6	75
Figura 5.25.	Corte Estructural N-S de B-6	75
Figura 5.26.	Corte estructural W-E de B-Superior. Se puede apreciar al Este una estructura de tipo Horst, y la discordancia al tope.	77
Figura 5.27.	Mapas estructurales desde la discordancia (arriba) hasta B-5. De arriba hacia abajo se puede observar a media que se ven los mapas en secuencia, como la falla Limite de Cabimas se va acercando a la falla Limite de Cabimas, al Sur de la estructura.	78
Figura 5.28.	Corte estructural N-S de B-Superior. Se aprecia como las unidades de B-1 y B-2 han sido erosionadas por la discordancia.	79
Figura 5.29.	Modelo de fallas de B-6 y B-Superior en vista de planta. Se observa la configuración estructural de las fallas que controlan el modelo 3D	81
Figura 5.30.	Modelo de fallas 3D con viste desde SW	82
Figura 5.31.	Discordancia del Eoceno en el tope. Se aprecia como dicha estructura erosiona las unidades de B-1 y B-2 hacia el Oeste.	83
Figura 5.32.	Unidad de B-5. Al Oeste se observa una estructura tipo Monoclinal, y al este de esta estructura de observa el Graben, causado por en truncamiento entre las fallas Limite y Principal de Cabimas.	84
Figura 5.33.	Unidad de B-5 con vista desde NE. Se observa la estructura tipo monoclinal fallado el cual esta buzando al Norte.	85
Figura 5.34.	Unidad de B-6, apreciándose la ausencia de la estructura tipo graben, puesto que en B-5-Inf. Ocurrió el truncamiento entre las fallas Principal de Cabimas y la falla Límite de Cabimas.	86
Figura 5.35.	Modelo 3D de las unidades de B-6 y B-Superior de la formación Misoa. Vista desde Suroeste	87
Figura 5.36.	Modelo 3D de las unidades de B-6 y B-Superior de la formación Misoa. Vista desde el Norte	87

Figura 5.37.	Modelo de facies en B-6.	88
Figura 5.38.	Registro de facies escalado (extrema derecha) a partir de un registro de facies discreto, el cual fue creado a partir de las curvas de rayos Gamma (GR)	89
Figura 5.39.	Sección Este-Oeste del modelo de facies para B-6, con ausencia de estructuras, con la finalidad observar la distribución de facies horizontalmente. Se observan depósitos de capas de arenas con alternancias de lutitas, dispuestos de forma horizontal.	89
Figura 5.40.	Sección Norte-Sur del modelo de facies para B-6	90
Figura 5.41.	Modelo de porosidad efectiva para B-6, creado a partir de curvas evaluadas en trabajos previos. Los colorees mas claros indican una mejor porosidad, por lo tanto se puede observar que hacia el Sur del modelo, las arenas tienden a tener mejor calidad de roca, según el modelo.	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1.	Espesor estratigráfico verdadero promedio de las unidades B de la Formación Misoa en el Campo Cabimas	44
Tabla 5.1	Pozos donde se extrajeron núcleos, señalando el intervalo y la unidad a la que pertenece	46

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	Mapa de secciones estratigráficas con dirección perpendicular al sentido de la sedimentación
Anexo 2	Mapa de secciones estratigráficas con dirección paralela al sentido de la sedimentación
Anexo 3	Sección estratigráfica F-F', intervalo B-6-D
Anexo 4	Sección estratigráfica D-D', intervalo B-6-D
Anexo 5	Sección estratigráfica G-G', intervalo B-6-C
Anexo 6	Sección estratigráfica F-F', intervalo B-6-C
Anexo 7	Sección estratigráfica F-F', intervalo B-6-B2
Anexo 8	Sección estratigráfica A-A', intervalo B-6-B2
Anexo 9	Sección estratigráfica F-F', intervalo B-6-B1
Anexo 10	Sección estratigráfica A-A', intervalo B-6-B1
Anexo 11	Sección estratigráfica F-F', intervalo B-6
Anexo 12	Sección estratigráfica A-A', intervalo B-6
Anexo 13	Mapa arena neta de B-6-D
Anexo 14	Mapa arena neta de B-6-C
Anexo 15	Mapa arena neta de B-6-B2
Anexo 16	Mapa arena neta de B-6-B1
Anexo 17	Mapa arena neta de B-6

Anexo 18	Mapa estructural de B-6
Anexo 19	Mapa estructural de la Discordancia del Eoceno
Anexo 20	Mapa estructural de B-1
Anexo 21	Mapa estructural de B-2
Anexo 22	Mapa estructural de B-3
Anexo 23	Mapa estructural de B-4
Anexo 24	Mapa estructural de B-5
Anexo 25	Corte Estructural Oeste – Este en B-6
Anexo 26	Corte Estructural Norte - Sur en B-6
Anexo 27	Corte Estructural Oeste – Este en B-Superior
Anexo 28	Corte Estructural Norte – Sur en B-Superior
Anexo 29	Modelo de fallas 3D
Anexo 30	Estructuras en la unidad de B-5
Anexo 31	Estructuras en la unidad de B-5
Anexo 32	Modelo 3D estructural final
Anexo 33	Modelo 3D de facies sedimentarias para B-6

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. CONSIDERACIONES GENERALES

1.1.1. Ubicación

El Área Cabimas cubre una extensión de 78 km² y está ubicada en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, estado Zulia, al noroeste de Venezuela (*Figura 1.1*). Es parte integral del Campo Costanero de Bolívar que geográficamente se extiende paralelamente a lo largo de la costa oriental del Lago de Maracaibo (González de Juana et al, 1980) por una longitud de 95 km. Sus diferentes áreas productoras, incluyendo el Área Cabimas, han sido descubiertas en el curso de varias décadas, pero las extensiones y el desarrollo de los campos indicaron que se trataba de una sola área denominada Campo Costanero de Bolívar (CCB).



Figura 1.1. Ubicación del Área Cabimas, Campo Costanero de Bolívar (CCB). Tomado de: Trabajo interno de Suelopetrol.

1.1.2. Objetivos

General

Elaborar un modelo estratigráfico de la Formación Misoa B-SUP y B-6 (Eoceno), ubicado en el Campo Costanero Bolívar, Área Cabimas, estado Zulia.

Específicos

- Validar toda la información del yacimiento, mediante todos los datos existentes en los 21 pozos a estudiar, junto con 5 análisis de núcleos. De esta manera, se tendrá un mejor amarre de la información disponible.
- Crear un modelo estratigráfico 3D de los yacimientos B-6 y B-Superior, con la finalidad de mejorar la definición y visualización de las propiedades y disposiciones estratigráficas presentes en los mismos.
- Generar un modelo estructural basado en la utilización de mapas de trazas de fallas en diferentes niveles del Eoceno, para analizar las tendencias de ellas como controles estructurales en los yacimientos.
- Establecer un modelo sedimentológico para identificar e interpretar facies sedimentarias por medio de evaluaciones petrofísicas y evaluación de núcleos. Con esto se pretende definir de manera mas precisa la geometría de cuerpos sedimentarios y la dirección de su depositación.
- Realizar mapas de isopropiedades señalando las características petrofísicas de las rocas que van a ser evaluadas.
- Elaborar mapas de las facies sedimentarias, previamente evaluadas e interpretadas, presentes en las unidades a estudiar.
- Elaborar secciones estratigráficas y estructurales, donde se interprete la disposición de las arenas.

- Crear el modelo 3D para las arenas B-Sup y B-6, de la Formación Misoa, representando la secuencia estratigráfica, estructuras presentes, ambientes sedimentarios.
- Realizar una propuesta en la que se muestre y se justifique el inicio de futuros trabajo para nuevas localizaciones en las áreas de mayor interés para la empresa.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Las nuevas aplicaciones constituyen cada vez una mejor solución para los geólogos a la hora de tomar decisiones de forma más rápida y precisa. Esto hace más atractivo la manera de enfrentarse a proyectos de gran envergadura, ya que con una secuencia de trabajo que integra los distintos estudios de una forma bastante eficiente, se logra llegar a un mejor nivel de visualización y detalle.

El caso del Campo Costanero Bolívar, Área Cabimas, es un campo maduro el cual se ha venido explotando desde 1917, específicamente en las arenas de la Formación Misoa (Eoceno). Poco más de 800 pozos se han perforado desde entonces, y se han practicado numerosas técnicas de recuperación secundaria para el incremento de la producción.

Por esta razón existe la necesidad de generar un modelo geológico en dos de sus yacimientos, enfocado en la caracterización y comprensión de las características geológicas de los yacimientos, a fin de incrementar los planes de explotación de una manera más eficiente, a corto y mediano plazo. Se persigue en este trabajo la posibilidad de desarrollar, a partir de este modelo, un nuevo plan estratégico para continuar e incrementar la recuperación de petróleo.

1.3. ALCANCE

Se pretende generar un modelo geológico en tres (3) dimensiones con la finalidad de tener una mayor visualización de las estructuras (fallas y bloques), las facies y propiedades que están presentes en el modelo.

Este tipo de visualización es ideal para evaluar nuevas localizaciones en el área de estudio, sobre todo cuando se está trabajando con un campo maduro, en donde se tiene que tener precisión para maximizar la recuperación de hidrocarburos.

1.4. LIMITACIONES

Se puede hablar de limitaciones por la falta de sísmica como herramienta a la hora de realizar el modelo estructural. Este obligó a trabajar con trazas de fallas de mapas estructurales de diferentes unidades y con pozos que vieron fallas.

1.5. TRABAJOS PREVIOS

- **GRAVES (1985).** Determinó en los miembros B-5 a B-3 de la Formación Misoa, mediante análisis de núcleos y por correlación de registros, la existencia de una dirección preferencial de sedimentación, la cual tiende a ser paralela a la línea de costa. Las secuencias cíclicas encontradas y su distribución lateral son indicativa de ambientes donde se forman barras marinas.

Concluyó que la deformación estructural por fallamiento, posterior a la sedimentación de los miembros “B” superiores, el subsiguiente levantamiento regional y la erosión de las capas antes de la sedimentación del Mioceno, modificaron las condiciones de entrapamiento y luego, durante el Mioceno y hasta el Presente, la subsidencia de la cuenca hacia el sur y al este ha modificado de nuevo las condiciones de entrapamiento, causando reajustes de los fluidos en sus trampas.

- **CASTILLO (1995).** Determinó la presencia de dos posibles áreas fuentes de sedimentos para el Eoceno, específicamente rocas de las formaciones Trujillo, Misoa y Mirador, basado en el estudio de muestras recopiladas a lo largo de los Andes Venezolanos y parte oriental de la cuenca de Maracaibo.

Después de que estableció la procedencia de las rocas en estudio, relacionó las fuentes de sedimentos anteriormente discriminadas con la tectónica caribe (emplazamiento de las napas de Lara) y con la tectónica andina (levantamiento de

la cordillera central y oriental colombiana). Las condiciones ambientales y la fuente de proveniencia permitieron la acumulación de sedimentos de grano grueso, los cuales dieron origen a un sistema hidrodinámico apto para la migración de fluidos fuera de la cuenca y para el entrapamiento de hidrocarburos.

Finalmente se concluyó que las rocas del nivel estratigráfico C y equivalentes en superficie (formaciones Trujillo y Misoa) tienen su procedencia a partir de una combinación de terrenos característicos de un bloque continental y de dos orógenos reciclados, con un aporte de sedimentos fundamentalmente desde el suroeste hasta el noreste. Por otro lado, las rocas del nivel estratigráfico B del subsuelo, proceden de un orógeno reciclado con características colisionales, con el principal aporte de sedimentos desde el norte.

- **MELÉNDEZ, GHOSH, PESTMAN; (1996):** Estudiaron el desarrollo estructural y sedimentario de la cuenca de Maracaibo, al nivel del Eoceno, basado en el análisis secuencial de información sísmica. Concluyeron que:
 - a) Los rasgos tectónicos Mesozoicos controlaron el marco geológico del Eoceno de la cuenca.
 - b) Durante el Cretácico Tardío – Paleoceno se desarrollan fallas normales con buzamientos hacia el S-SO como consecuencias del desarrollo de la antefosa de Orocué.
 - c) Durante el Eoceno Temprano y el inicio del Eoceno Medio, predominó un régimen extensional, con el desarrollo y la reactivación de fallas normales y lístricas con buzamiento hacia N-NE.
 - d) Se definieron cinco secuencias en el Eoceno Temprano y Medio, cuyos límites reflejan no solo cambios eustáticos, sino también pulsos tectónicos.
 - e) Al inicio del Eoceno Medio empezó la transurrencia a lo largo de las grandes fallas.

- f) Erosión post Eocena removió parte de la secuencia Eocena en casi toda la cuenca, lo que hace estimar la dimensión original de los depósitos.
- **HIGGS; (1996):** Realizó un estudio en las arenas de la Formación Misoa con la finalidad de establecer un nuevo modelo de facies sedimentarias.

Concluyó que la interpretación que se ha venido usando desde 1960 sobre la existencia de facies deltáicas es sospechosa, debido a que los indicadores característicos de las llanuras deltáicas como capas de carbón, raíces y grietas de desecación, entre otros, están ausentes. Por esta razón, propuso un modelo de facies plataforma de marea, para ser considerado en toda la Formación Misoa.

- **MARQUEZ, BERTORELLI, ZAPATA, PADRÓN, REY Y FALCÓN; (1997):** Estudiaron los ambientes depositacionales de la Formación Misoa, Serranía Trujillo, Zulia oriental mediante evidencias de espesores litológicos, de sucesión vertical de facies, madurez textural de las areniscas, contenido fósil faunal y floral y presencia de ignofacies características.

Concluyeron que la Formación Misoa estaba conformado un ambiente de aguas tranquilas, someras y salobres, en un marco de carácter restringido, al nivel de una plataforma interna. Dentro de este marco ambiental se depositaron barras subacuáticas y depósitos intrabarras asociados, con una influencia de mareas lo cual permitió que se generaran condiciones más marinas, representadas en la base de la secuencia por las calizas de quebrada Grande.

- **GHOSH, PESTMAN, MELÉNDEZ, LORENTE Y ZAMBRANO; (1997):** Realizaron un estudio regional de la sección Eocena de la cuenca de Maracaibo, definiendo el marco crono estratigráfico de cada secuencia y los patrones de sedimentación.

Concluyeron que existe un patrón similar de distribución de paleoambientes, señalando que las facies continentales se ubican hacia el suroeste (Táchira, Zulia sur occidental), y las más marinas hacia el noreste (Zulia oriental). La relación arena/lutita y la granulometría de las areniscas disminuyen hacia el noreste. El depocentro se encuentra en Zulia oriental. Las fuentes más importantes de los

depósitos Eoceno en la cuenca de Maracaibo fueron la Cordillera Central Colombiana y el Escudo de Guayana, con otros aportes desde el Macizo de Santa Marta y las Napas de Lara.

- **CHACARTEGUI, CASAS Y CABRERA DE CASAS; (1997):** Realizaron un estudio basado en el control de las facies sedimentarias sobre la acumulación y producción de hidrocarburos, en la Formación Misoa, Lago de Maracaibo. En ella se han identificados cinco familias de facies arenosas (S, S3, S1, S11 Y S2), una heterolítica (H) y una lutítica (L).

se concluyó que las facies sedimentarias identificadas en la Formación Misoa controlan la acumulación de hidrocarburos, siendo las facies S y S3 las que presentan características petrofísicas de mejor calidad. Las facies sedimentarias se encuentran distribuidas en posición estratigráfica específica en las dos asociaciones de facies más comunes: granocreciente y granodecreciente. Las facies S y S3 son potencialmente prospectivas en toda la Formación Misoa, mientras que la prospectividad de las demás facies S11, S1 y S2 depende de su ubicación geográfica y posición estratigráfica.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

La metodología de trabajo empleada se realizó en tres etapas, las cuales van a ser explicadas a continuación:

2.1. ETAPA 1: Recopilación bibliográfica y adquisición de la data

Se precedió a recopilar toda la información geológica disponible sobre el área de estudio y sus adyacencias, con la finalidad de tener una visión general de las características tanto estructurales como estratigráficas del Área Cabimas, perteneciente al Campo Costanero Bolívar. Dicha recopilación se basó en revisión de tesis de grado, publicaciones y trabajos inéditos.

La adquisición de la data se hizo en las instalaciones de Suelopetrol, ubicados en Cabimas, Edo. Zulia, en la cual Maurizio Mastrolorenzo (Tutor Industrial), se apersonó para bajar toda la data disponible, como archivos de registros de todos los pozos, líneas sísmicas 2D, topes estratigráficos, mapas estratigráficos y estructurales de trabajos previos, etc.

En esta etapa, a su vez, se ordenó y se le hizo un control de calidad a cada uno de los archivos para su posterior carga y procesamiento durante el desarrollo de la tesis de grado.

2.2. ETAPA 2: Procesamiento de la data

2.2.1. Carga de la data en PETREL™

Como paso siguiente se cargó toda la data disponible en Petrel, como por ejemplo: polígonos de los límites de Área Cabimas, trazas de fallas de diferentes niveles, cabezales de pozos, desviaciones, registros de curvas, topes estratigráficos, líneas sísmicas 2D.

Todos los datos que fueron importados al programa PETREL™, para el desarrollo del modelo 3D, fueron cargados bajo formatos de tipo ASCII y Binario. También se importaron imágenes con formato Bitmap. Dichos archivos, tanto ASCII como binarios,

tuvieron que ser revisados en el programa de editor de texto Ultra Edit 32, Excel, así como en Block de Notas, para poder cargar correctamente los archivos a Petrel.

2.2.2. Elaboración del Mapa Base

Para la elaboración del mapa base se cargó primeramente el límite del campo Cabimas, junto con la ubicación de los pozos, con el fin de establecer un mallado para las correlaciones de entre los pozos, mediante secciones estratigráficas y estructurales (*Figura 2.1*).

Para esto se establecieron direcciones preferenciales para estas secciones, como una dirección perpendicular y paralela al tren principal de fallas en el área de estudio, para las secciones estructurales; y para las secciones estructurales se estableció un mallado en distintas direcciones, para un mayor control de las unidades estratigráficas en el área de estudio.

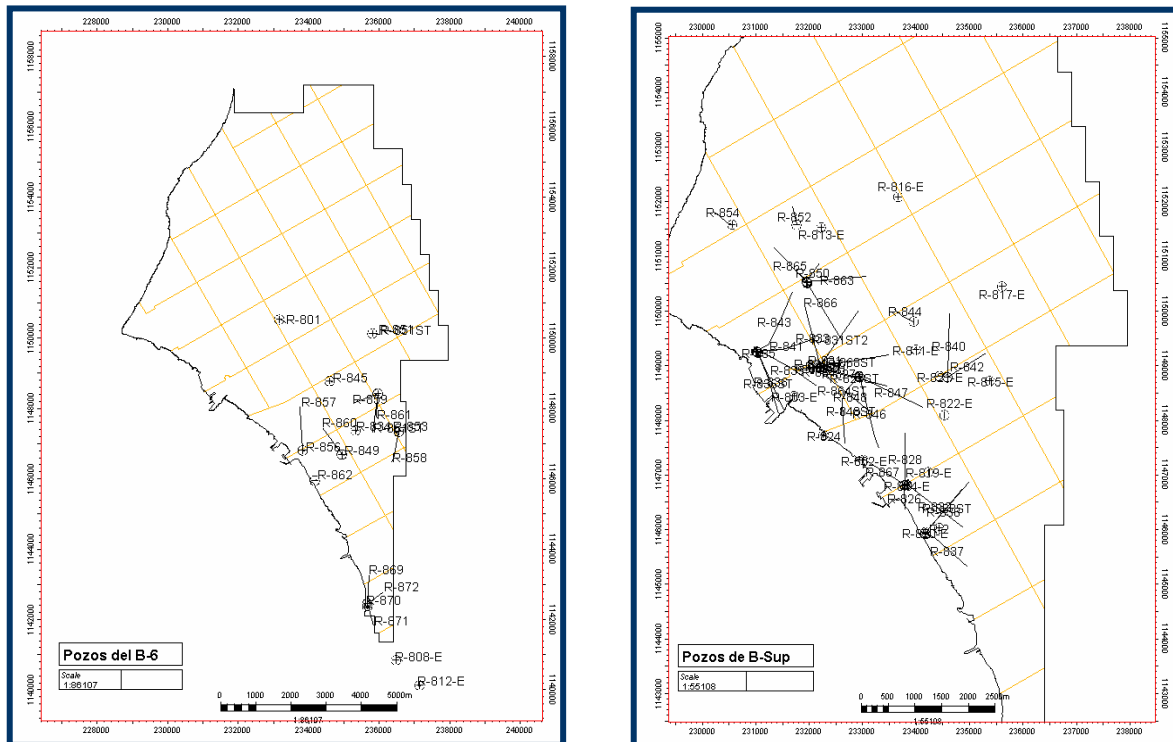


Figura. 2.1. Mapas de las ubicaciones de los pozos de B-6 y B-Superior. El Campo Cabimas limita al oeste con la Costa Oriental del Lago de Maracaibo

2.2.3. Secciones Estratigráficas y Estructurales

Para la elaboración de dichas secciones se abrieron las ventanas de secciones, en donde se seleccionaron los pozos, las curvas de GR y Rt, además de los topes estratigráficos previamente cargados. Dichos topes, previo a realizar las secciones, fueron revisados y corregidos por medio de un pozo tipo (R-834).

Las secciones estratigráficas se generaron a escala 1:500, de acuerdo al mayado que se realizó en el mapa base. Luego se alinearon verticalmente los pozos por medio de un datum, como lo es un buen marcador estratigráfico. En este caso para cada unidad, se escogieron los topes de cada una respectivamente (*Figura 2.2.*).

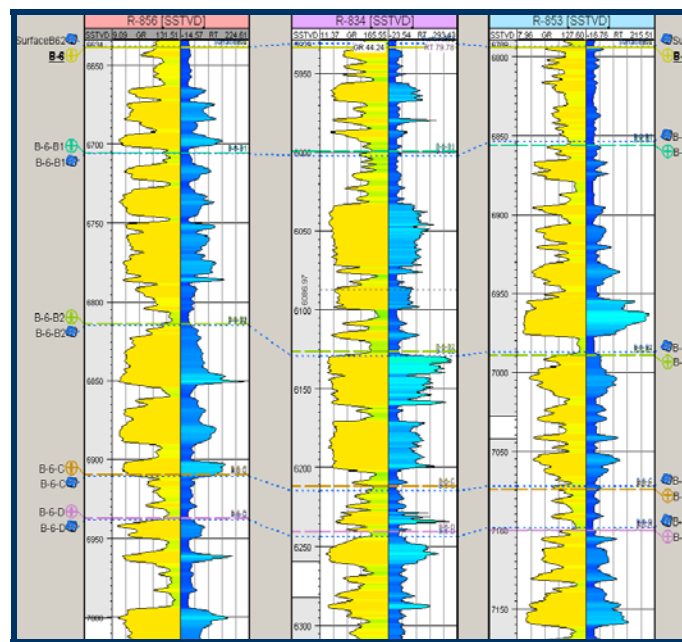


Figura 2.2. Ilustración de una sección estratigráfica creada en PETREL™ a partir de registros de GR y Resistividad

Las secciones estructurales se crearon a escala 1:1000, en dirección paralela y perpendicular al sistema de fallas principal, con la finalidad de observar los principales controles estructurales que gobiernan en el área de estudio. A su vez, se respetó la distancia entre los pozos, de acuerdo a la escala escogida (*Figura 2.3.*).

Tops). Una vez abierta esta ventana, se seleccionó el o los pozos que contengan los topes, mostrándose los topes estratigráficos cargados para cada pozo, con su respectiva ubicación espacial (X, Y y Z). Se tiene que tener en cuenta que dichas coordenadas vienen con su profundidad respectiva en SSTVD, y por lo general no son igual a las coordenadas del cabezal de pozo, puesto que la mayoría de los pozos presentan más o menos desviaciones en su trayectoria.

Ya teniendo la superficie de puntos extendida, debido a la integración de los topes con las superficies anteriores, se generan las nuevas superficies por medio del proceso “Make / Edit Surface”, en el cual se va a introducir como dato de entrada la superficie de puntos editada y convertir en superficie estructural eligiendo previamente el algoritmo de interpolación convergente (*Figura 2.4.*).

Como resultado final en este procedimiento, estas superficies suavizadas reflejaron una tendencia, a priori, de como están dispuestas las unidades espacialmente.

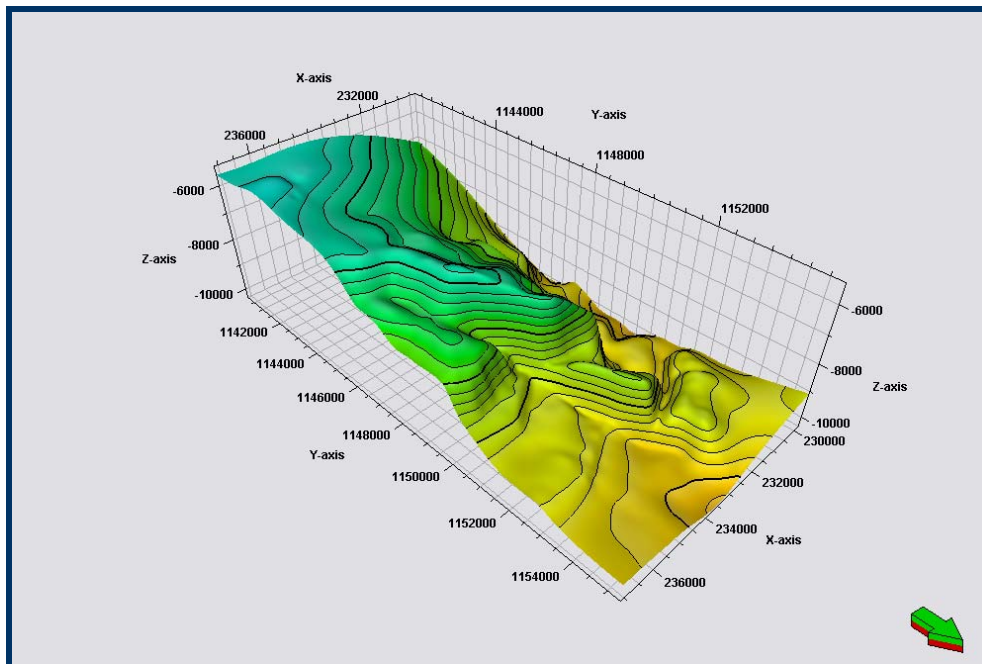


Figura 2.4. Superficie final en 3D del tope de una unidad. Se puede observar que es una superficie continua, sin expresión de los saltos de falla.

2.2.5. Creación de registro discreto de facies

La vía para poblar las propiedades de facies en un modelo de Petrel, es realizando un registro discreto de facies sedimentarias.

Como primer paso se configuró la plantilla de las facies en específico que se van a modelar. Se tiene que tener en cuenta que previo a realizar este paso, se hizo un estudio con los registros de GR y Porosidad, así como de los estudios de núcleo, con la finalidad de determinar los tipos de facies que definieron.

Retomando el primer paso, estas facies ya definidas en la ventana de plantillas, se le seleccionó la litología correspondiente para cada facies. Posterior a esto, haciendo clic derecho sobre el icono de “Global Wells Logs”, se seleccionó la calculadora, con el objetivo de crear una ecuación con valores de cortes de GR, y llamando para cada valor de corte, dentro de la ecuación, al código correspondiente a la facies previamente definida.

De esta misma manera, se creó el mismo registro pero con valores de corte de porosidad, junto con los mismos códigos asignados en la plantilla de facies.

Finalizando, una vez creados ambos registros discretos de facies, se procedió a hacer un control de calidad de manera manual con Petrel. La forma como se realizó este control de calidad, fue activando el registro que sirvió de ayuda para la creación del registro de facies y realizar las correcciones con el “mouse”, en las partes del registro donde la ecuación no haya realizado una discriminación de facies de forma correcta.

2.2.6. Modelado de Fallas

Como no se disponía de datos sísmicos para realizar el modelado de fallas mediante “inlines” y “crosslines”; y posteriormente convertirlas de tiempo a profundidad, se trabajó con mapas estructurales realizados previamente por Suelopetrol.

Se trabajó con los mapas de las unidades B-6 y B-4, de las cuales se extrajeron todas las trazas de fallas para luego ser cargadas a Petrel como líneas, a sus respectivas profundidades.

Al tener cargadas las trazas de fallas, y en conjunto con los mapas estructurales, se procedió a modelar falla por falla en 3D. Para llevar a cabo este procedimiento, se seleccionó una traza de falla tanto en B-6 como en B-4 que tuvieran correspondencia entre si. Luego se selecciona la opción en Petrel, de crear una falla a partir de un polígono de fallas “Create fault from fault polygons” (*Figura 2.5.*). Hay que tener en cuenta también el tipo de fallas que se va a modelar, por lo cual en este caso se seleccionó modelar fallas con pilares lineares.

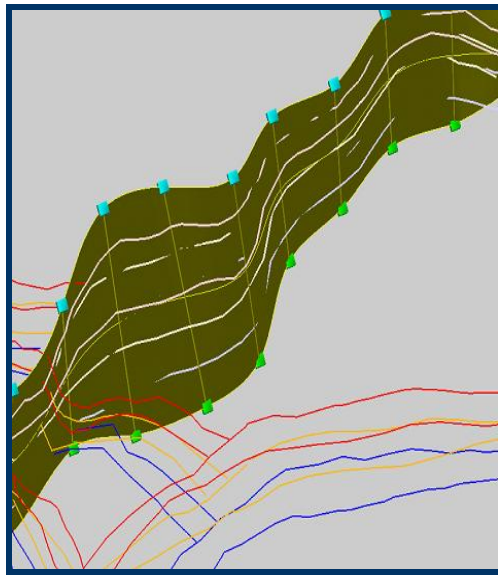


Figura 2.5. Falla realizada por medio de polígonos de fallas. Los polígonos se aprecian por las líneas de colores en la Figura.

Al realizar este procedimiento con todas las fallas, se tuvo que realizar un control de calidad sobre cada una de ellas, por medio de aquellos pozos que vieron fallas. Esta edición de los planos de falla se ejecutó gracias a los nodos “widget” que se encuentran a los extremos de cada pilar, los cuales se pueden mover paralelo al pilar y en un plano (x, y), pudiendo observarse en la *Figura 2.6*, con la finalidad de mejorar la posición de aquellas fallas en las que se tuvieron que realizar control de calidad.

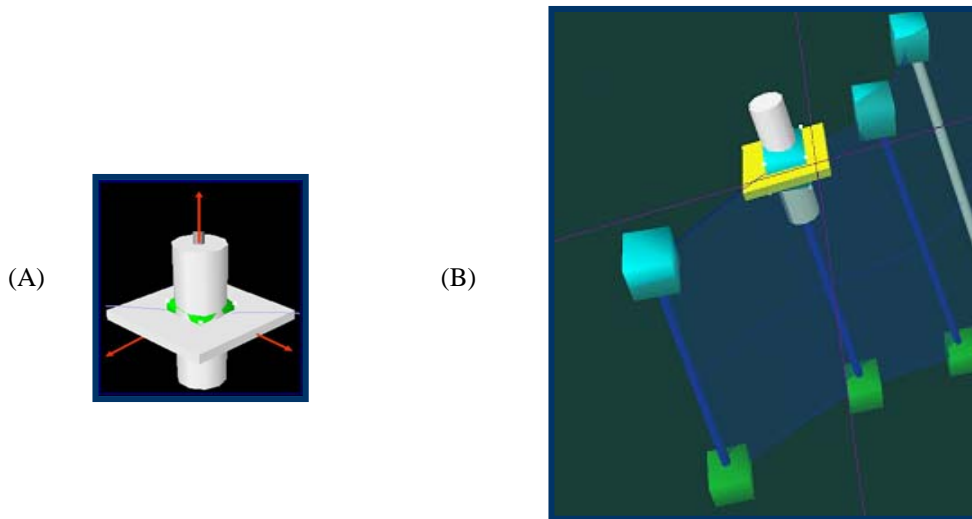


Figura 2.6. (A) Ilustración del uso de nodo o "widget" para el movimiento de los pilares. Este nodo "widget" puede moverse en dirección vertical y en un plano horizontal, tal como se muestra en la Figura (B)

Posterior al modelado de cada una de las fallas, se siguió a la etapa de conectar las fallas entre si. Para este paso, visto en la *Figura 2.7*, se tuvo mucho cuidado de respetar la dirección y buzamiento de cada una de las fallas al momento de la conexión. Dicha conexión entre ellas se realizó ubicando el último pilar de una falla, cerca o dentro del plano de la falla con la cual se va a conectar.

Como en la mayoría de los casos, dichos pilares, de ambos planos, no tienen un mismo buzamiento, uno de los pilares que conforma a una falla de inclina (sin que se salga de dicho plano) de igual forma que la otra falla, de manera que dos pilares, de dos fallas distintas, queden enfrentados con un mismo buzamiento. Por último se seleccionan los dos pilares que se van a conectar y se selecciona la opción de conectar dos fallas "Connect two faults".

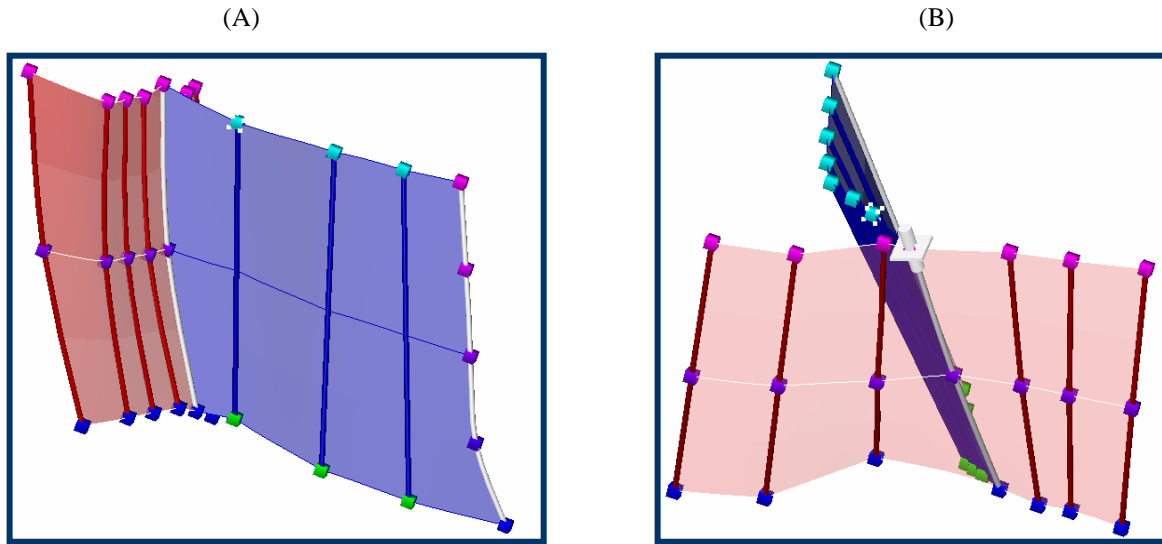


Figura 2.7. La Figura (A) y (B) muestra el procedimiento para la realización de la conexión de fallas por medio de un pilar común para ambos planos

Estas fallas, modeladas y conectadas, se limitaron verticalmente al tope de la unidad del B-7 hacia la base, y hacia el tope con la Discordancia del Eoceno.

2.2.7. Mallado de Pilares “Pillar Gridding”

El mallado de pilares se realizó con el objetivo de crear el modelo estructural por medio de celdas a las cuales posteriormente se le van a introducir propiedades.

El procedimiento para realizar el mallado de pilares comienza activando el proceso de “Pillar Gridding”, en donde automáticamente se va a abrir una ventana 2D, con vista de planta, activándose a su vez el modelo de fallas realizado previamente, con sus conexiones respectivas.

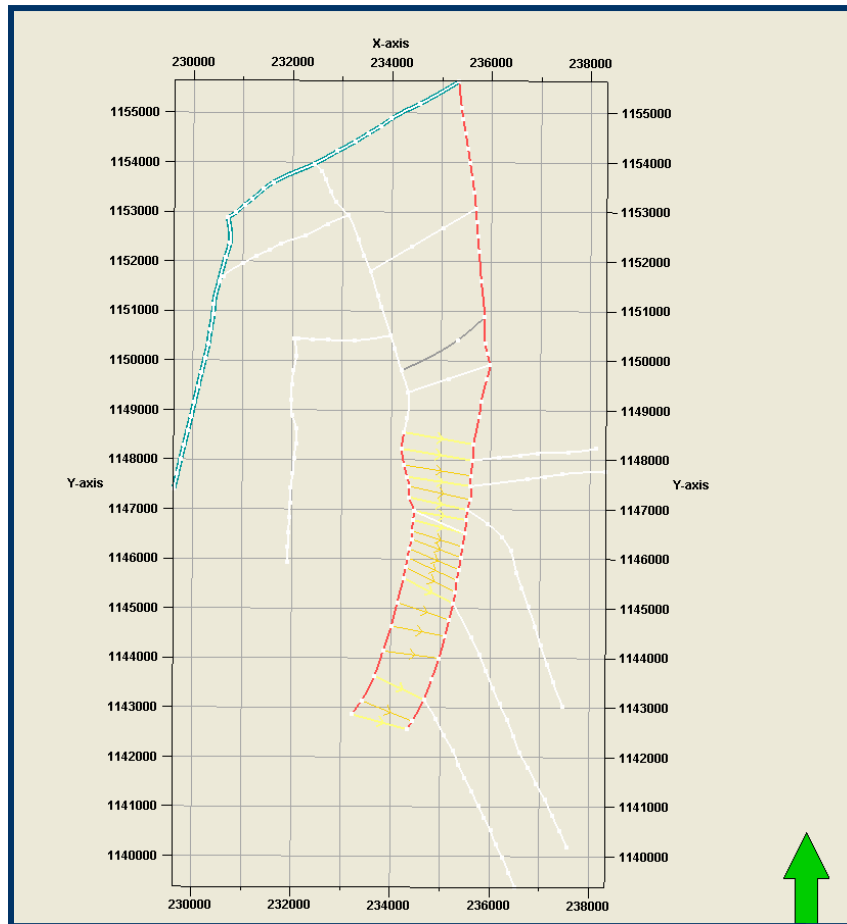


Figura 2.8. Modelo de fallas en vista de planta, con el truncamiento hacia el sur de la Falla Principal de Cabimas contra la Falla Límite de Cabimas. Las flechas amarilla indican la dirección del truncamiento. Las fallas de color rojos indican una tendencia N-S para orientar al mallado. Las fallas en color azul muestran que son parte del límite del mallado.

Esta ventana 2D (*Figura 2.8.*), en donde se va a trabajar para realizar el mallado, se encuentra al nivel medio de todos los pilares de las fallas modeladas. Esto será llamado, posterior a la corrida del mallado, esqueleto medio “Mid Skeleton”.

Como paso siguiente, en la *Figura 2.9.* se puede observar como se creó un limite cerrado o “Boundary”, donde se definió el área del modelo 3D. Una vez cerrado el área del modelo, se le dio a la falla Límite de Cabimas una tendencia principal del mallado, con el objetivo de tener un mayor control al momento de realizar el mallado de pilares “Pillar Griddig”. Esto es debido a que se debe de mantener el paralelismo entre las celdas, y que estas converjan con el tren principal de falla lo más perpendicular posible.

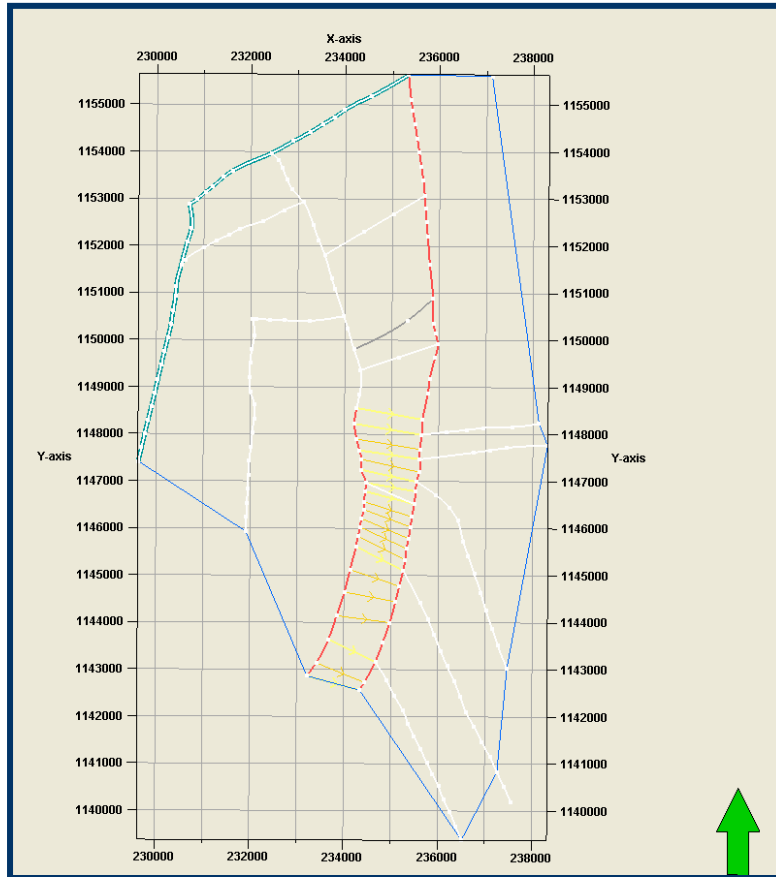


Figura 2.9. Limite del modelo o “boundary” alrededor del modelo de fallas con líneas azules, en vista de planta. Al noroeste se observan como a dos fallas se les asigno ser parte del límite, cambiando a color azul.

Teniendo listo el mallado de pilares “Pillar Gridding”, se crea automáticamente un mallado en el tope del modelo “Top Skeleton” y en la base de este “Base Skeleton”, pudiendo ser visualizados en una ventana 3D, junto con el esqueleto medio “Mid Skeleton”.

En la *Figura 2.10.* se visualiza una ventana 3D en la cual se realizó un chequeo del mallado en el tope, mitad y base. Esto es con el objetivo de descartar posibles errores en la corrida de todo el mallado. El control de calidad se enfocó en aquellas celdas que estuvieran unidas, se cruzaran o siguieran una tendencia errónea. Hubo que atacar el problema en aquellas fallas donde los pilares no estuvieran lo más paralelo posible, o dándole tendencias arbitrarias al mallado, en aquellas zonas donde se ubique el problema.

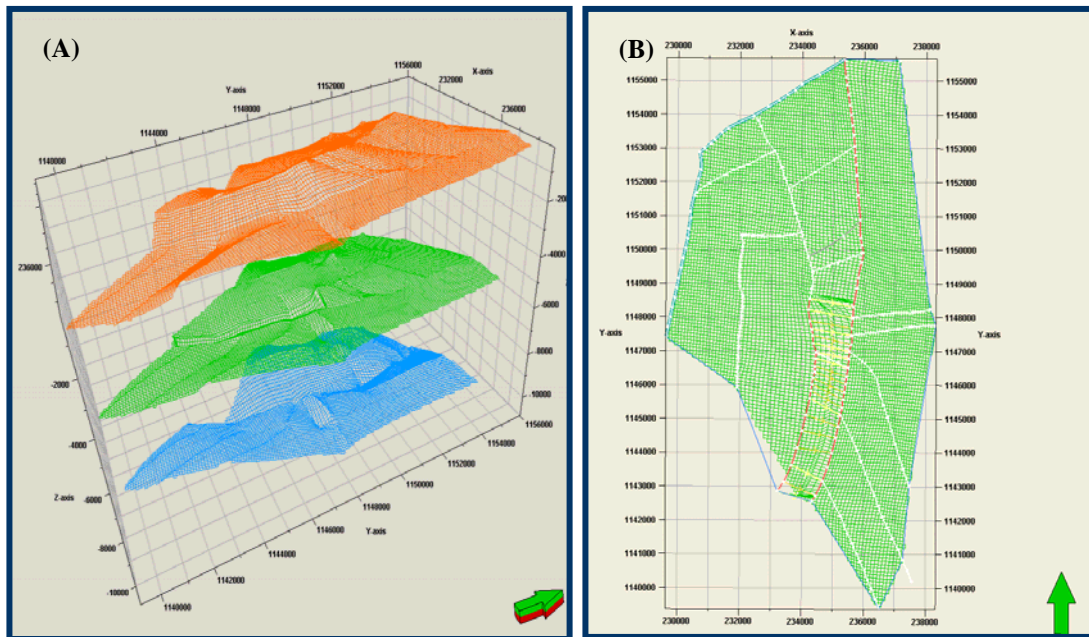


Figura 2.10. Figura (B) mostrando el mallado principal del modelo en vista de planta; y a la derecha en la Figura (A) se aprecia la vista del mallado en el tope, medio y base del modelo 3D

2.2.8. Creación de Horizontes

La creación de los horizontes para cada unidad, es la última etapa del modelado estructural. Para esto, se introducen las superficies generadas, ya sea a partir de interpretación sísmica, topes estratigráficos, o polígonos; honrando el mallado y los saltos de fallas, definidos previamente (*Figura 2.11*).

Como se dijo anteriormente, como dato de entrada se introdujeron las superficies para cada unidad de B-6 y B-Superior, especificando a su vez el tipo de horizonte a modelar, puesto que existen horizontes de tipo erosional, horizontes base, discontinuidades y conformable. Esta última es la que se utilizó con más frecuencia puesto que mantiene la proporción entre los demás horizontes.

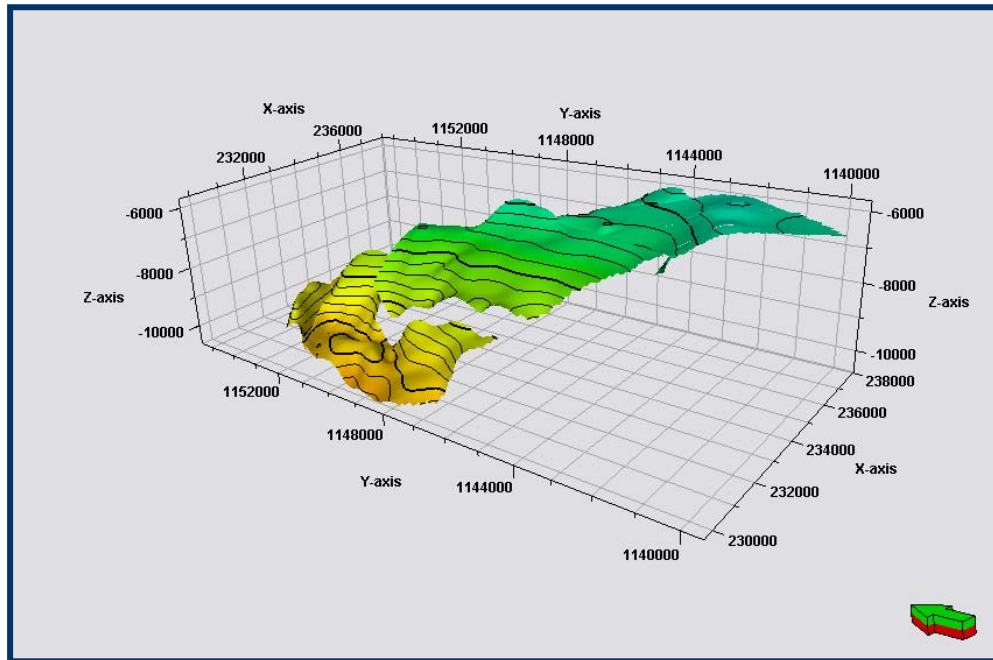


Figura 2.11. Imagen del tope de una unidad como horizonte, apreciándose los saltos de falla, lo que en las superficies no se observaba

Una vez generados los horizontes, se procedió a realizar un control de calidad en cada uno de ellos con respecto a los saltos de fallas, puesto que aunque queden estas representadas en los horizontes, por lo general hay que hacer modificaciones con la finalidad de que quede lo más ajustado tanto con la información de las secciones estructurales como las de los mapas interpretados previamente.

Este procedimiento para realizar el control de calidad con las fallas consta de crear líneas de intersección de los horizontes con cada una de las fallas, observándose en la *Figura 2.12*. Cada línea de intersección va a estar ubicada dentro de los planos de falla, unidos por nodos o “widgets”, el cual tiene la capacidad de moverse para modificar la o las líneas de intersección(es).

Una vez modificadas estas líneas de intersección, se procede a ir a la ventana de “settings” del horizonte en el que se está trabajando y en la pestaña de operaciones se activa la opción de actualizar el modelo de fallas en el modelo principal.

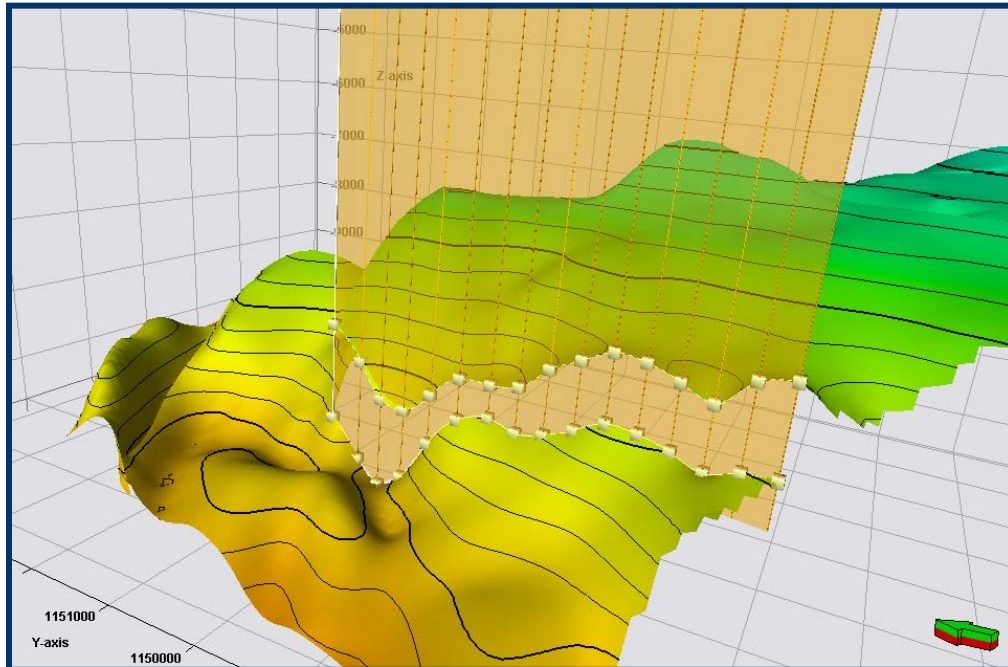


Figura 2.12. Control de calidad realizado a un horizonte con respecto al salto de falla. Los cubos blancos son nodos, los cuales pueden ser desplazados en dirección vertical para realizar la corrección

Por lo general, cuando se actualizan horizontes a partir de la modificación de las intersecciones que estas tienen con los planos de falla, se genera un efecto de curvatura indeseada en dicho sector del horizonte donde se quiere modificar. El siguiente paso es ir a la pestaña de fallas, ubicada dentro del proceso de crear horizontes “Make Horizons”, en la cual se le va a asignar una distancia horizontal entre la falla y el horizonte, con la finalidad de eliminar el doblez del horizonte cuando se acerca a el plano de falla y quede correctamente representado el salto de falla en el lugar que lo requiera.

2.2.9. Creación de Zonas y Capas

Para la creación de zonas solo fue necesario generar los horizontes para las unidades de B-6 y B-Sup, y automáticamente se asignaron zonas para cada unidad. Estas zonas fueron posteriormente editadas para colocar los nombres respectivos de las unidades.

La generación de capas o “Layering” permite subdividir las zonas en sub zonas, dependiendo del espesor de esta. Una de los puntos que se tiene que tener en cuenta a la

hora de hacer el “Layering” es el espesor de toda la unidad y la estratigrafía en ellas, tomar en cuenta el promedio de espesor de los estratos para que a la hora de correr dicho proceso no se omita información importante entre las capas.

Dependiendo de la proceso de sedimentación que haya ocurrido y la disposición de los estratos en cada unidad, se pueden elegir distintos tipos de opciones, tal como se observa en la *Figura 2.13.*: proporcional, seguir a la base de la unidad, seguir al tope de la unidad, fraccionado y que siga a la base con una referencia en específico (*Figura 2.14.*).

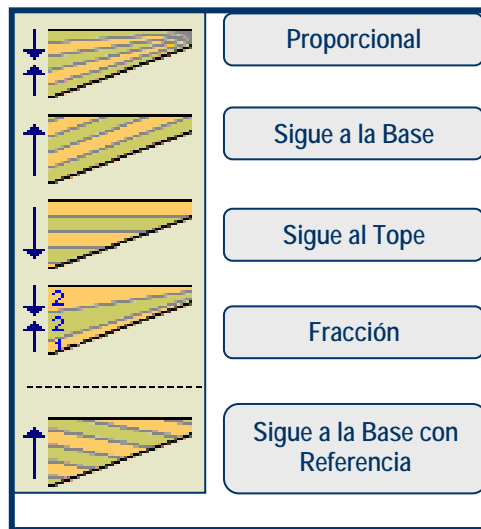


Figura 2.13. Tipos de modalidades para la creación de zonas dependiendo de la configuración interna de las zonas

De este proceso depende el escalamiento de los registros continuos, para ser introducidos dentro del modelo 3D.

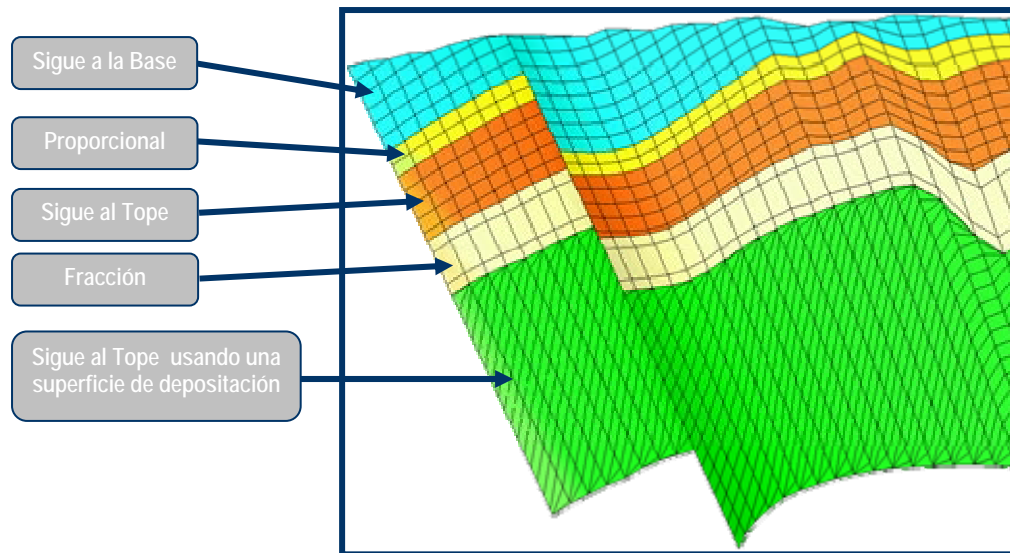


Figura 2.14. Ilustración mostrando los diferentes tipos de capas o "layerings" que se pueden realizar dentro de un modelo

2.2.10. Modelado Geométrico

Las propiedades geométricas son propiedades creadas usando sistemas de variables predefinidas, tales como Altura de Celda, Volumen Aparente, etc.

En este caso se calculó la propiedad de volumen aparente del modelo 3D, el cual representa el volumen total de roca desde la base de B-6 hasta el tope de B-1 ó Discordancia del Eoceno. Esta propiedad fue definida para realizar un control de calidad en el modelo y así detectar posibles celdas negativas. Estas celdas negativas repercutirían en cálculos volumétricos erróneos.

El procedimiento para la búsqueda de celdas negativas consistió en ir a la pestaña de filtros, ubicada en la ventana de "settings" de la carpeta de propiedades. Se activó el filtro para volumen de celdas y como valor máximo colocó el valor de 0 (cero) y como valor mínimo, un valor altamente negativo. De esta forma se garantiza que de haber una o varias celda(s) negativas, van a ser las únicas que se encontraran visibles en la ventana de visualización 3D.

De haber celdas negativas, se tendría que ir al modelo de fallas, ubicar el lugar del problema, donde posiblemente haya pilares cruzados entre las fallas, y que al momento de generar el mallado ó "Pillar Gridding" se crean celdas con volúmenes negativos.

2.2.11. Escalamiento de Registros

El escalamiento de registros, visto en la *Figura 2.15*, es el proceso donde se le asignan valores a las celdas o “layers” en el mallado 3D, que son penetradas por los registros de pozos. Como cada celda puede tener un valor, el registro de pozo se escala promediado por el método “Most of”, el cual, dependiendo de la cantidad de capas o “layers” se le haya asignado para cada zona. El propósito de este procedimiento es ser capaz de usar la información de los registros de pozos como dato de entrada para el modelado de propiedades, así como la distribución de propiedades entre los pozos.

El procedimiento para realizar el escalamiento fue el siguiente:

- Seleccionar los pozos que van a ser escalados. Todos los pozos que serán escalados de la propiedad escalada.
- Seleccionar el registro a escalar, pudiendo escoger a partir de una lista desplegable.
- Elegir el tipo de escalamiento que se va realizar, como el tipo Promedio (Aritmético, Geométrico, Harmónico, etc.), y el Método Simple o Por las celdas vecinas.

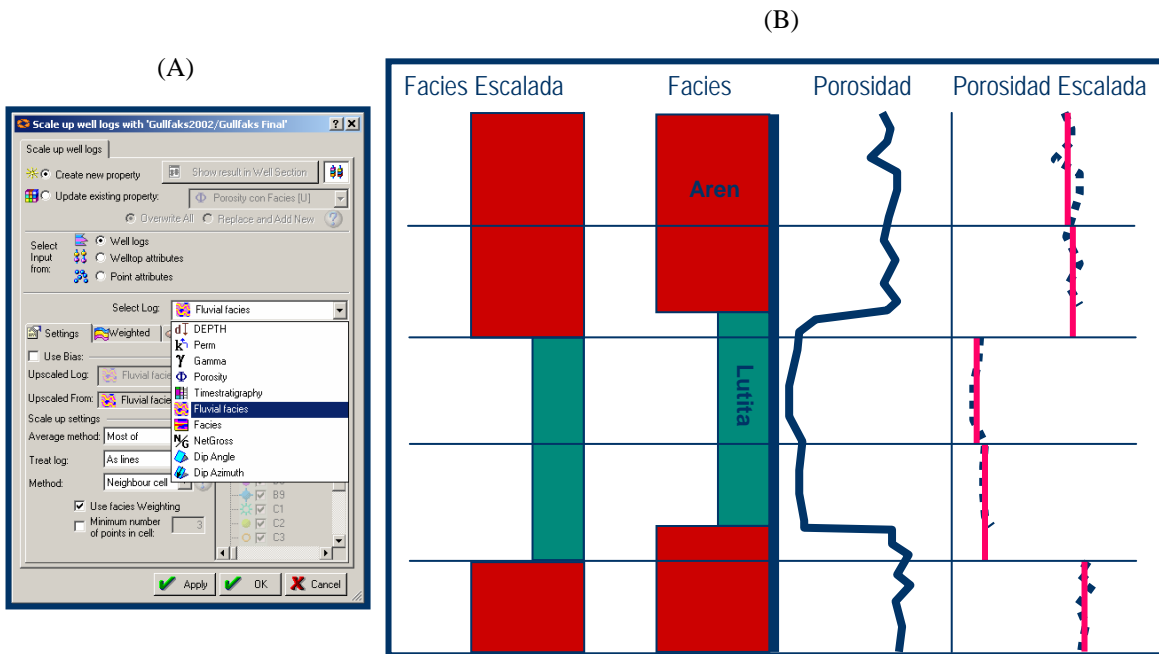


Figura 2.15. A la izquierda (A) se tiene una ventana de dialogo en la cual se elige el registro y el método de escalamiento. A la derecha (B) se tiene un esquema de la forma como se realiza el escalamiento de los registros entre las celdas que están presentes en el modelo.

2.2.12. Modelado de Facies

Para el modelado de facies en 3D, se necesitó del registro de facies que se escaló anteriormente, y en el cual se discretizaron las distintas facies existentes por medio de registros como GR y Porosidad.

El modelado de facies presenta dos vías o dos maneras de generar el modelo, una es el modelo determinístico, el cual es aplicable cuando se tiene una gran densidad de datos duros (gran número de pozos, sísmica, etc.). Esta técnica determinística produce un único resultado.

El modelado de facies por la técnica estocástica es usado en condiciones donde la data presente se encuentra de forma esparcida. Los métodos que están representados por dicha técnica, producen un posible resultado y puede ser usado para producir múltiples realizaciones equiprobables.

La técnica en la que se trabajó para el modelado de facies es la estocástica, usando el algoritmo de Simulación Secuencial Indicadora. Primero se activó el proceso de modelado de facies, y haciendo doble clic sobre este, se abrió una ventana donde se configuró dicho proceso.

Una vez abierta la ventana se procedió a escoger el registro escalado de facies ubicado en la carpeta de propiedades, dentro del modelo que se está creando. Luego, se procedió a trabajar zona por zona, donde en cada una de ellas se escogió el tipo de algoritmo a utilizar (en este caso se trabajo con un mismo algoritmo).

Como paso siguiente, se eligieron las facies que se fueron a modelar, estas facies dan una información sobre la fracción, en porcentaje, que esta representa en la zona a modelar.

2.2.13. Modelado Petrofísico

El Modelado Petrofísico se realizó por medio de los registros, escalados previamente, de porosidad efectiva y permeabilidad.

Dichos registros son utilizados, juntos con el algoritmo que se escogió, para la distribución de propiedades en todo el modelo 3D. Para esto, se hizo una copia de los registros escalados y se renombró cada propiedad, como modelo de porosidad efectiva y modelo de permeabilidad.

Originalmente estas propiedades renombradas son únicamente los registros escalados en todos los pozos, y que posteriormente serán transformados en propiedades distribuidas en todo el modelo, desde B-6 en la base, hasta B-Superior.

La metodología para esta etapa es muy similar al modelado de facies, en donde se abre el proceso de modelado petrofísico, y en la cual se desplegó una ventana en donde se configuró dicho proceso.

En dicha ventana se escogió la propiedad escalada la cual se modeló (en este caso porosidad y permeabilidad), se le asignó a cada zona el método de modelaje llamado Simulación Secuencial Gaussiana.

A su vez, se asignó al modelo de facies previamente realizado en el proceso anterior, para mantener la tendencia sobre el modelo de facies que se creó previamente.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1. AMBIENTES DEPOSITACIONALES

Los ambientes depositacionales han sido definidos de varias formas, sin embargo, todas las definiciones de ambientes tienen en común en que las condiciones ambientales tienen énfasis en procesos físicos, químicos y biológicas.

Un ambiente depositacional está caracterizado por un marco geomorfológico en particular, en donde un particular grupo de procesos físicos, químicos y biológicos operan para generar depósitos sedimentarios.

En este capítulo se van a describir los principales ambientes sedimentarios que están presentes en el área de estudio. Dichos ambientes están caracterizados por ubicarse en la zona de plataforma somera con dominio de mareas.

3.1.1. Ambientes Marinos Siliciclásticos

Según BOGGS (1995) el ambiente marino es esa zona del océano la cual está dominada por procesos litorales. Las profundidades en el reino marino van desde unos pocos metros a más de 10.000 metros. La energía en el fondo del mar, inmediatamente por encima del piso oceánico, es más baja, excepto en ambientes de plataforma continental somera, la cual es afectada por una variedad de procesos de corrientes y vientos; tormentas, actividad de olas, y en algunos lugares del piso oceánico, a grandes profundidades, son susceptibles a la presencia de corrientes de fondo.

El ambiente marino presenta una división, el cual está representado por los Márgenes Continentales y las Cuencas Oceánicas. Dicha división está subdividida como lo muestra la *Figura 3.1*, donde se puede observar la plataforma continental la cual se extiende mar adentro, ubicado desde la zona litoral hasta la línea de bisagra o el quiebre de la plataforma hacia el talud continental. Esta zona presenta un buzamiento promedio de 1°, y a medida que avanza más adentro su buzamiento se va incrementando.

Las demás subdivisiones están referidas al Talud Continental, donde dicha zona se encuentra ubicada a partir del quiebre de la plataforma continental hasta el suelo oceánico, presentando un buzamiento promedio de 4°. La región más profunda del suelo oceánico, dentro del margen continental, se denomina llanura abisal, y está comprendida entre los 2000 mt. y 4000 mt. de profundidad.

Para el caso del estudio que se está realizando, la descripción de los ambientes depositacionales se enfocará en los márgenes continentales y sus diferentes tipos de sedimentos, así como las estructuras características de este tipo de ambiente en particular.

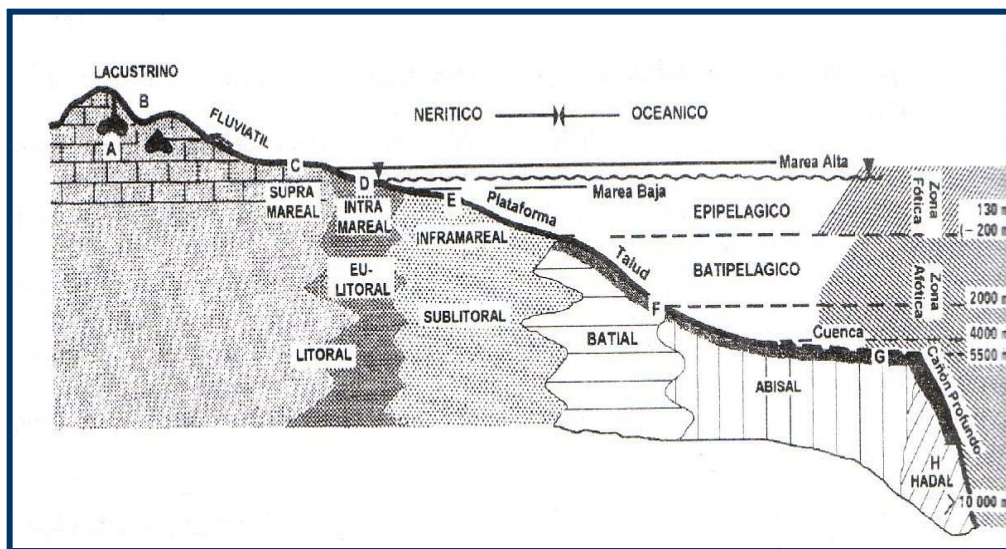


Figura 3.1. Diagrama de distribución de las zonas oceánicas (Tomado de Mendez, 1997)

3.1.2. Ambiente nerítico (plataforma)

En la Figura 3.2. se observa que la plataforma se encuentra limitado por ambientes costeros cercanos al continente y otros ambientes, cercanos al talud continental. Dichos ambientes pueden ser divididos, según BOGGS (1995), en plataforma interna somera, el cual se encuentra principalmente dominado por procesos de mareas, viento y oleaje.

El otro ambiente es llamado plataforma externa profunda, y está principalmente afectado por procesos de corrientes marinas, corrientes de densidad generadas por diferencias de salinidad, y por diferencias en temperaturas (Ver la Figura 3.2.).

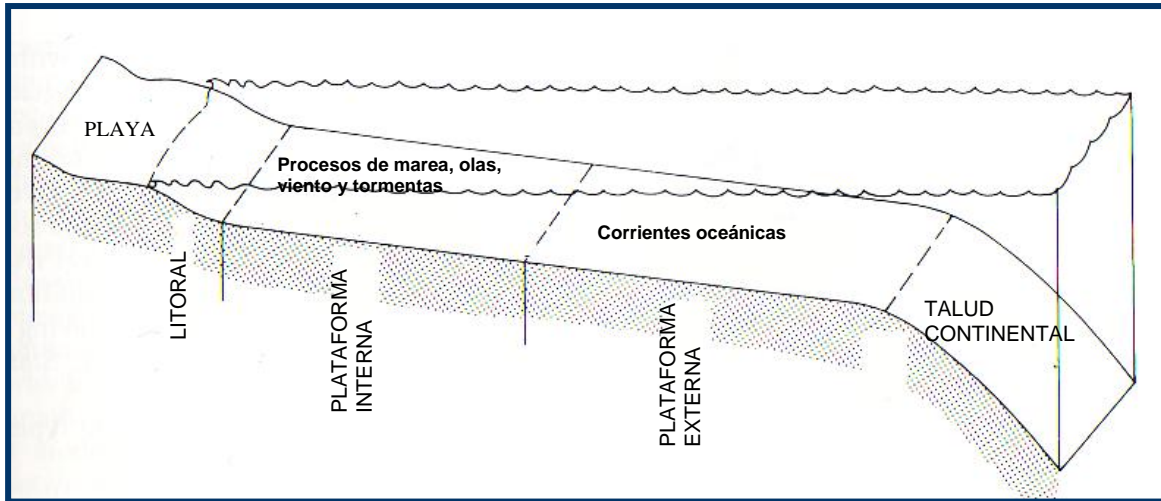


Figura 3.2. Subdivisión de la Plataforma Continental (Tomado y modificado de Boggs, 1995)

3.1.2.1. Procesos de Marea

Las mareas son generadas por atracción gravitacional de la luna y el sol por el planeta tierra en conjunción con la rotación de la tierra. La influencia de las mareas esta manifestada en cualquier localidad costera por elevaciones y caídas del mar, con un promedio de 1 a 4 metros en costas abiertas, pero esta rango puede aumentar a 15 metros aproximadamente, en algunas cuencas cerradas (BOGGS, 1995).

El movimiento vertical, como las elevaciones y caídas del nivel del mar, están acompañadas por movimientos horizontales de agua, y a eso se refieren las corrientes de marea. Las corrientes generadas en la plataforma por mareas, son bidireccionales pero asimétricas con respecto a la velocidad en ambas direcciones, la cual son diferentes.

Las corrientes asimétricas pueden conducir a que el transporte neto de sedimentos sea en la dirección de las corrientes más fuertes. La velocidad de las corrientes de mareas decrece a medida que aumenta la profundidad del mar. Estas corrientes por marea son más importantes, en cuestión de transporte se sedimentos, en aguas someras (BOGGS, 1995).

Mucho de los movimientos de sedimentos por corrientes de mareas ocurren cuando estas corrientes han sido ayudadas por la acción de olas. El movimiento orbital de las olas

puede ser suficiente para levantar granos del fondo del mar, que han sido trasportados previamente por corrientes bastante débiles (BOGGS, 1995).

Mendez (2006) señala que dentro de los procesos mareales, se destaca la presencia de un sistema de llanuras de marea, el cual está dividido en tres zonas: inframareal, intramareal y supramareal. La zona inframareal se encuentra ubicado por debajo del nivel mínimo de la marea; la zona intramareal comprende el espacio situado entre los niveles máximos y mínimo de la marea; y la zona supramareal se encuentra siempre por encima del nivel de la marea, que generalmente están siendo cortados por canales de marea, puesto que esta directamente influenciado por el ascenso de las mareas (*Figura 3.3.*).

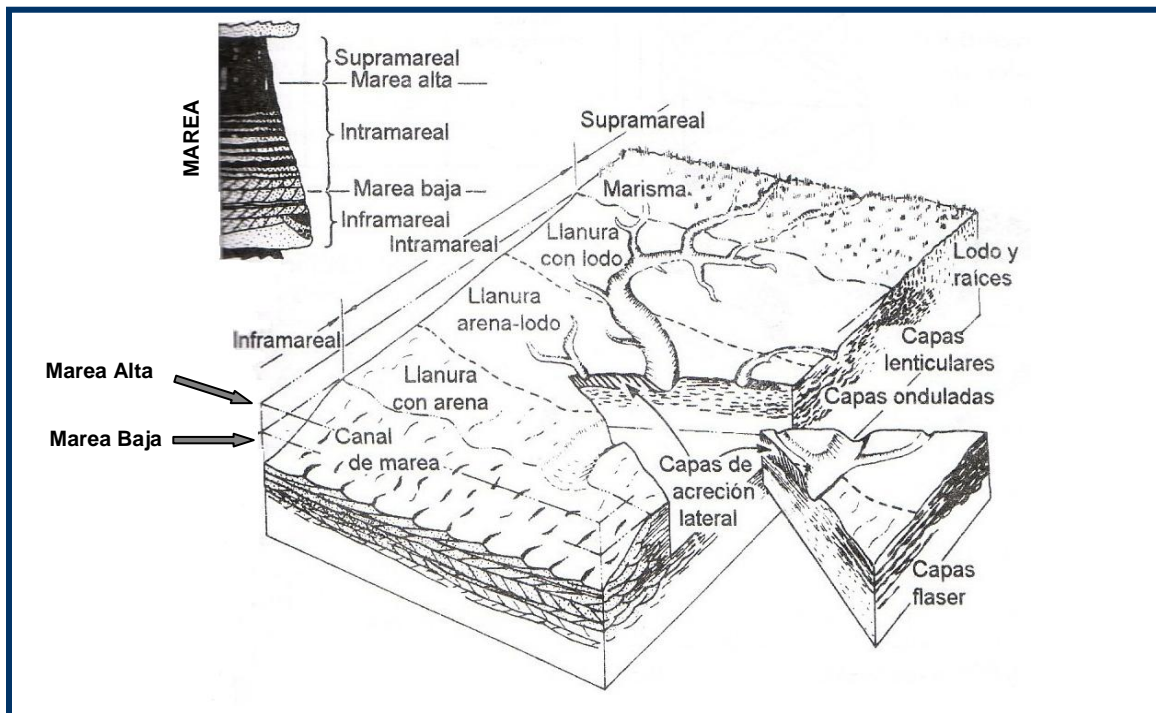


Figura 3.3. Bloque diagramático conceptual de una llanura de marea con sedimentos silisiclásticos. Se indican también las sub zonas correspondientes para la zona Inframareal, Intramareal y Supramareal; así como una secuencia típica con los sedimentos y las estructuras sedimentarias correspondientes (Tomado y modificado de Mendez, 2007)

3.1.2.2. Tipos de Sedimentos

a) Sedimentos de Plataforma

El mayor volumen de los sedimentos aportados a la cuenca son arcillas siliciclásticas y arenas, gracias al flujo de los ríos y a la erosión de la línea de costa. Bajo la categoría de sedimentos modernos.

Estos sedimentos están depositados en equilibrio con las condiciones hidrodinámicas existentes en la plataforma actualmente. Ellos fueron transportados dentro de la plataforma y depositados por procesos que funcionan actualmente en la cuenca, o que fueron también generados por otros procesos en la plataforma (sedimentos químicos y bioquímicos) (BOGGS, 1995).

La mayoría de las arenas de plataformas están caracterizadas por presentar estructuras como estratificación cruzada. Rizaduras y laminación cruzada, producto de la migración de dunas y lomas de arena son muy similares. La dirección de buzamiento de la laminación cruzada puede ser bidireccional o unidireccional, dependiendo de la influencia de las mareas (Figura 3.4).

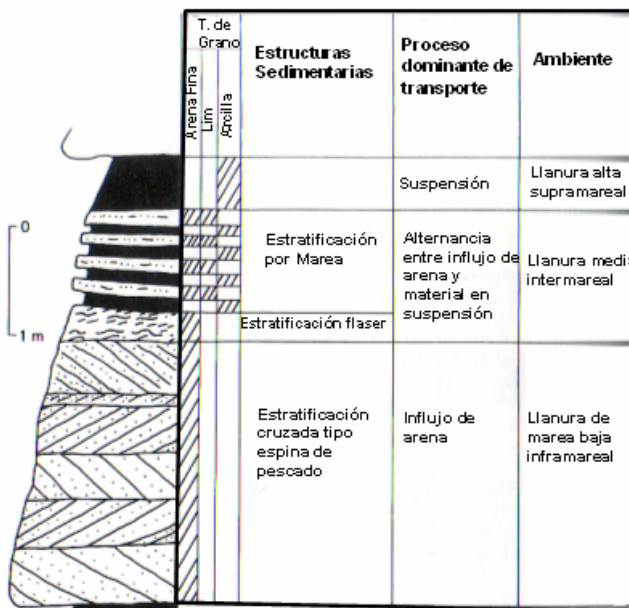


Figura 3.4. Secuencia progradacional tipo, provenientes de depósitos del Precámbrico (Formación Word Canyon). En la tabla se indica el tamaño de grano, estructuras sedimentarias, tipo de transporte y ambiente de depositación (Tomado y modificado de Boggs, 1995).

b) Distribución

Los sedimentos de plataformas siliciclásticas modernas consisten mayormente en depósitos de arcillas y arenas, aunque algunos sedimentos de grava están presentes en muchas áreas. La distribución areal de las arcillas y arenas varía marcadamente para diferentes plataformas. En algunas plataformas, las arenas cercanas a la costa gradan hacia el mar por una zona de transición con una mezcla de arenas y arcillas, y más arcillas en aguas más profundas.

Las plataformas modernas con esa mezcla de sedimentos modernos y reliquia pueden no ser perfectamente análogas para plataformas continentales viejas.

3.1.2.3. Sucesión sedimentaria vertical

Muchos tipos de sucesiones verticales pueden ser generados con sedimentos de plataforma, dependiendo del lugar que tome la depositación durante una trasgresión o una regresión, y también de que proceso de plataforma este operando durante la depositación.

BOGGS (1995) reconoce que es difícil identificar este tipo de sucesiones, exceptuando a los procesos transgresivos, que tienden a generar sucesiones de depositación grano decreciente de base a tope (*Figura 3.5.*). Todo lo contrario para en caso de los procesos regresivos los cuales producen sucesiones grano creciente de base a tope (*Figura 3.6.*).

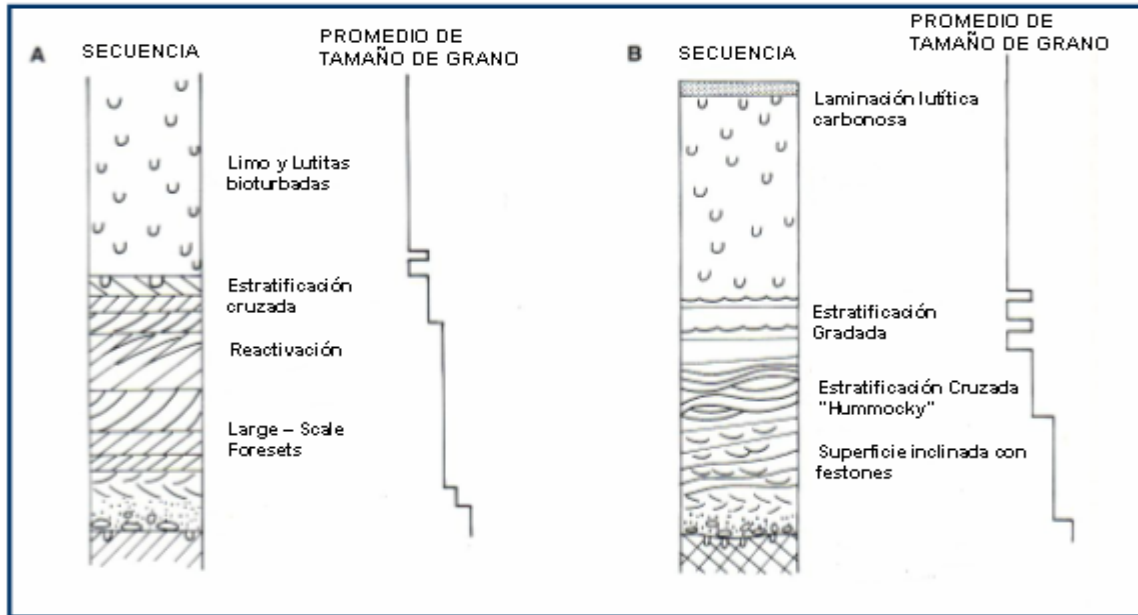


Figura 3.5. Diagrama esquemático ilustrando dos sucesiones transgresivas típicas de plataforma grano decreciente hacia el tope. A. Diagrama de plataforma continental dominado por marea. B. Diagrama de plataforma dominado por tormenta (Tomado y modificado de Boggs, 1995).

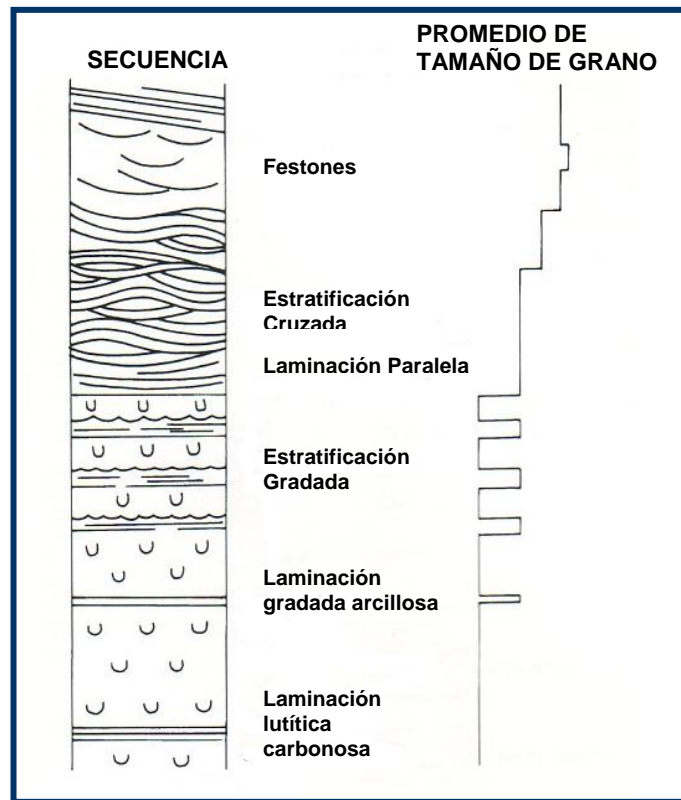


Figura 3.6. Sucesión regresiva tipo de plataforma dominado por tormenta, grano creciente hacia el tope (Tomado y modificado de Boggs, 1995)

3.2. HERRAMIENTA UTILIZADA

PETREL™

Es una aplicación a nivel computacional que combina los dominios de la geofísica, la geología y la ingeniería de yacimientos. La secuencia de tareas de PETREL™ constituyen una solución completa desde la sísmica hasta la simulación; eliminando las barreras que existían entre las distintas disciplinas y técnicas, en materia de comunicación, secuencia de tareas y aplicaciones de computación. Esto permite abrir el camino para la descripción de yacimientos en tiempo real. Con PETREL™ todos los procesos de trabajo conducen a un modelo de subsuelo unificado, que posibilita la toma de mejores y más rápidas decisiones.

Geofísica: este modulo permite ejecutar todas las tareas de interpretación sísmica tradicionales que forman parte de la secuencia de análisis de subsuelo 2D/3D. El geofísico puede, sin salir de la interfaz de la aplicación, interpretar horizontes y fallas, generar sismogramas sintéticos, analizar y corregir desajustes entre líneas 2D, realizar conversiones de tiempo a profundidad, crear mapas y recolectar la información requerida para brindar soporte a la perforación de un siguiente pozo propuesto.

Geología: ofrece una gama completa de herramientas que le permiten al geólogo aplicar el tradicional picado de marcadores, realizar la correlación entre pozos, aplicaciones de cartografía y graficación, además del modelaje de escala fina de alta resolución 3D. Posee métodos geoestadísticos, siendo de gran ayuda para la distribución especial de propiedades dentro del modelo 3D. De esta manera se cuenta con modelos de yacimientos actualizables y confiables en los cuales se basan las decisiones de negocio a lo largo de la vida útil del mismo.

Ingeniería de yacimientos: permite realizar la simulación de yacimientos sobre la base de modelos geológicos y geofísicos del subsuelo vigente. A su vez, se pueden realizar ajustes en los datos históricos de producción hasta el momento en que se esta efectuando el estudio y luego completar los resultados con un análisis económico y de incertidumbre. Este proceso es compatible con el simulador ECLIPSE.

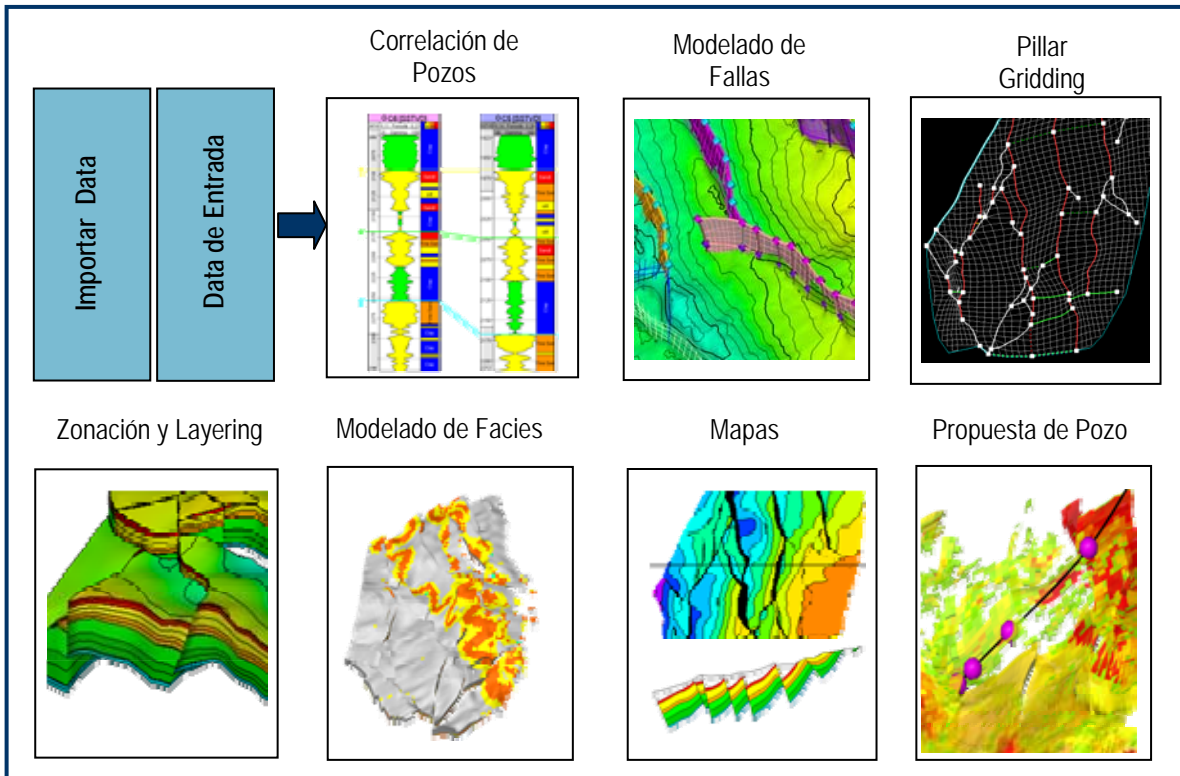


Figura 3.7. Flujo de trabajo con el que debe trabajar en un proyecto en PETREL™

CAPÍTULO IV: GEOLOGÍA REGIONAL

4.1. MARCO ESTRUCTURAL REGIONAL

La cuenca de Maracaibo está localizada dentro de un área de deformación activa en el centro del bloque tectónico de Maracaibo, una cuña tectónica triangular al noroeste del continente suramericano está activamente escapando hacia el norte sobre una fina corteza del mar caribe a lo largo de la falla transcurrente dextral de Bocono y la falla transcurrente sinistral de Santa Marta-Bucaramanga. El deslizamiento relativo del bloque de Maracaibo alrededor de la placa de Suramérica esta limitada por menos de 100 km. a lo largo de la zona de fallas entre Bocono y Santa Marta-Bucaramanga (SALVADOR, 1986) y parece haber comenzado entre el Mioceno Medio a Tardío.

La Cuenca de Maracaibo es generalmente un sinclinal y contiene más de 7 kilómetros de rocas sedimentarias no metamorfizadas del Jurásico Temprano. A su vez forma una depresión topográfica rellena por el Lago de Maracaibo (profundidad máxima del agua de 31 mts.) y esta rodeado por los Andes. Al Este y Sureste de la cuenca se encuentran los Andes de Mérida de Venezuela y al Oeste y Sureste esta la Sierra de Perijá de Venezuela y Colombia. Hacia el límite Norte de la cuenca hay mucha menor elevación, con una conexión estrecha entre el Lago de Maracaibo y el Mar Caribe. El levantamiento al Norte de los Andes en el Mioceno causó que la Cuenca de Maracaibo se convirtiera en un vasto depósito de sedimentos erosionados de las montañas que las rodean. Rocas sedimentarias Neógenas en la parte Este del lago alcanzan un espesor máximo de 3 km. Por esta razón muchas estructuras del Mesozoico y Terciario Temprano y rocas en la Cuenca de Maracaibo esta enterradas profundamente, y llegan a ser accesibles a través de métodos geofísicos indirectos y con pozos profundos (LUGO y MANN, 1995).

4.2. EVOLUCIÓN TECTÓNICA

En esta sección del marco teórico, se procederá a explicar la evolución de la Cuenca del Lago de Maracaibo a partir del Eoceno, que es cuando comienza la depositación de los sedimentos de la Formación Misoa.

4.2.1. Eoceno

OSTOS (1990) señala que para el Eoceno Medio, la placa Caribe colisiona con las Bahamas. El incremento de la presión convergente entre las placas Caribe y Sur América, junto con el cambio de movimiento convergente entre esta última placa y la de Norte América (OSTOS, 1990), resulta en el sobrecorrimiento hacia el sur de las Napas de Falcón-Lara. Así la migración hacia el este de terrenos transpresionales a lo largo del margen septentrional de Sur América, hizo cabalgar a las Napas de Lara sobre depósitos de “flych” Paleoceno-Eoceno, en el oeste de la Formación Matatere, y depósitos del Eoceno en el este de la Formación Guárico (OSTOS, 1990; CASTILLO, 1995).

Durante el Paleoceno Tardío-Eoceno Medio, se inicia de manera progresiva y oblicua el sobrecorrimiento de la Placa Caribe en el borde septentrional de la placa Suramericana. La deformación asociada produce el emplazamiento de las Napas de Lara, en dirección sur-sureste. El frente de deformación de las mismas, al este de la costa oriental del Lago de Maracaibo (Zulia Oriental y Falcón Occidental), no puede ser ubicado con precisión, debido a que el contacto está enmascarado y modificado por los episodios erosivos del Eoceno Tardío y Mioceno, así como la tectónica distensiva-transtensiva del Eoceno Tardío-Oligoceno (DE TONI et al., 1994).

En esta cuenca se depositan espesas secuencias de sedimentos detríticos. Al producirse la flexura litosférica, se desarrollan localmente fallas normales hacia el borde periférico de la cuenca (DE TONI et al., 1994). En la cuenca del Lago de Maracaibo, los principales alineamientos preexistentes en el “substratum”, se reactivan en extensión (Paleoceno? – Eoceno Temprano) y en transpresión – transtensión (Eoceno Medio – Tardío). En el Eoceno – Oligoceno, se registra un periodo importante de erosión en la parte centro y oriental de la Cuenca de Maracaibo. Simultáneamente ocurre una

redistribución de los depocentros hacia el oeste del area, lo que implica el levantamiento de la proto-Sierra de Perijá y una reorganización del contexto regional (DE TONI, 1994).

4.2.1.1. Extensión Paleógena de Falcón-Zulia Oriental

Durante el Eoceno Tardío – Oligoceno, ocurrió un evento de extensión y/o tracción que afectó Falcón y Zulia Oriental. Este evento distensivo modificó la configuración estructural de esta área. En Zulia Oriental se observa que las estructuras representan fallas normales lítricas, o semigrábenes (evidenciado por sísmica) con depósitos sintectónicos, mientras que en el sector del Lago de Maracaibo este estilo está completamente ausente (DE TONI et al., 1994).

Las estructuras están asociadas con la deformación del basamento, en el cual los alineamientos estructurales jurásicos, se reactivaron en extensión, plegando pasivamente la cobertura sedimentaria paleógena. La existencia de un nivel de desacoplamiento dentro de las secuencias lutíticas de las formaciones Colon-Trujillo, indujo simultáneamente con la deformación del basamento, el desarrollo de las fallas lítricas en los niveles superiores. Esta fase de extensión podría ser el resultado de: 1) el colapso orogénico de la zona de colisión de la placa suramericana; o 2) el rebote elástico-isostático del basamento cristalino debido a un cambio en el vector del movimiento relativo de las placas del Caribe y Suramérica (DE TONI, 1994).

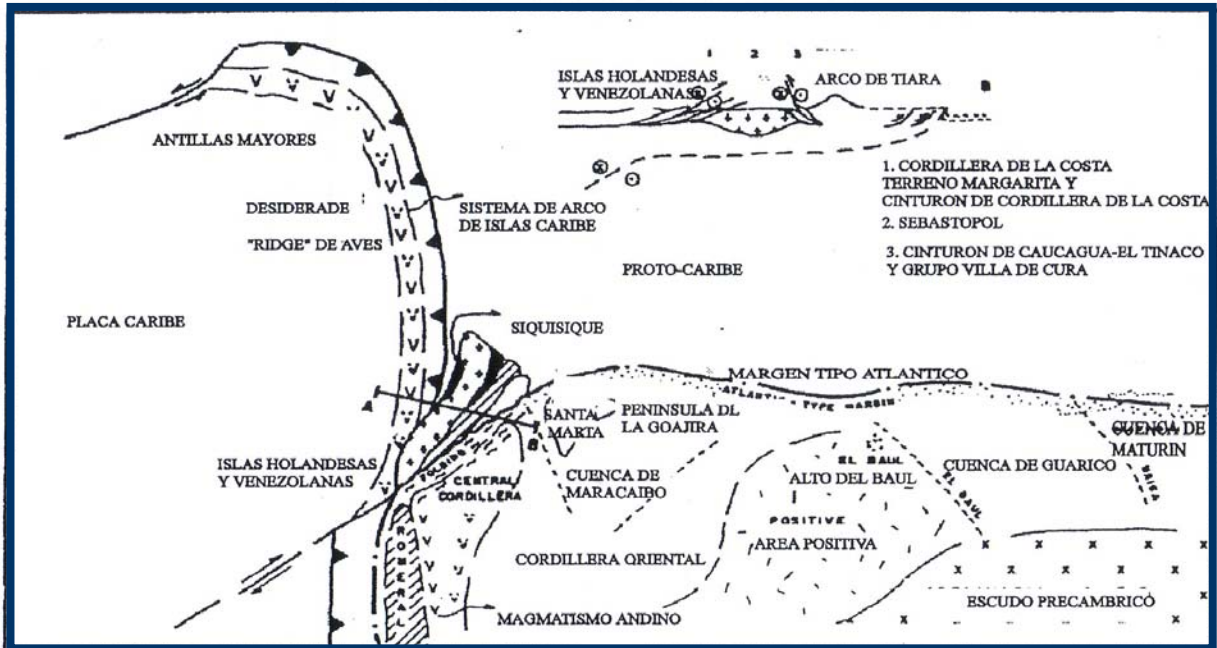


Figura 4.1. Evolución tectónica del norte de Suramérica, durante el Santomiense temprano al Eoceno Temprano (Tomado de Bertorelli y Marquez, 1996)

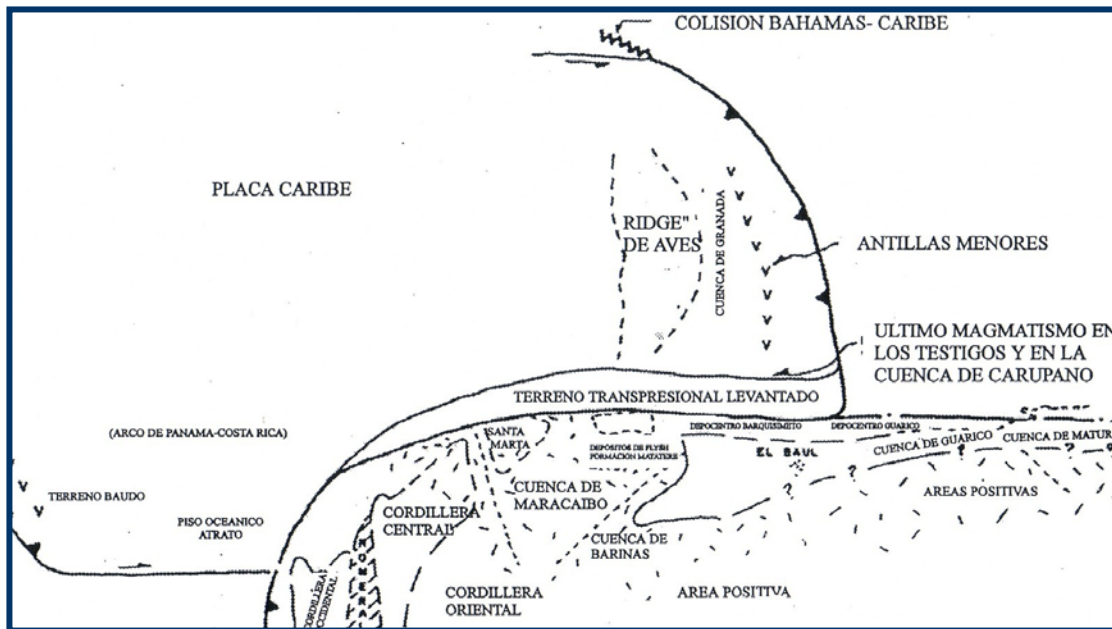


Figura 4.2. Reconstrucción del norte de Suramérica durante el Eoceno Medio-Tardío (Tomado de Bertorelli y Marquez, 1996)

4.2.1.2. Control Tectónico regional del arco de Mérida

LUGO (1994) propone que el arco de Mérida permaneció parcialmente expuesto en dos periodos: del Jurásico al Cretácico y, del Paleoceno al Eoceno Temprano, ejerciendo un control tectonosedimentario en esas épocas.

Para el Eoceno Temprano-Medio la orientación N-O del cinturón de corrimientos, a lo largo del eje de la cuenca de Maracaibo, como consecuencia del movimiento al este de la placa Caribe, es anómalo (LUGO, 1994). Por ello este autor plantea que la presencia del arco de Mérida pudo haber actuado, en conjunto con la placa Caribe (la cuenca se agrandaba en dirección S S-E, debido al empuje de las Napas de Lara) de tendencia N-O a una más hacia el este.

A medida que la placa Caribe se mueve al este, se cierra el área entre el arco de Mérida y el cinturón de corrimientos, Napas de Lara, obligando a estas áreas a reorientarse paralelas al arco, de dirección NO-SE. La cuenca tiene, en cualquier instante una forma triangular, debido a sus límites, definidos por el cratón, al sur, el área suturada al oeste y, el cierre del área de la cuenca, al este.

La última fase de deformación importante intracontinental, comenzó en el Neógeno y continúa activa. A ella se asocia el levantamiento de los Andes Venezolanos. El evento resulta en la depositación de una tectonosecuencia (molasa andina) que se lenticulariza hacia el noreste. El plegamiento de ella evidencia la última fase de reactivación e inversión transpresiva de las estructuras de Ceuta – Pueblo Viejo, Mene Grande, Motatán, Burro Negro y Valera.

4.3. ESTRATIGRAFIA REGIONAL

En esta sección del CAPÍTULO 4 se muestra una descripción estratigráfica generalizada proveniente del Lexico Estratigráfico, para la Formación Misoa; y una breve descripción de las formaciones suprayacentes e infrayacentes a dicha formación.

4.3.1. Formación Misoa. Terciario (Eoceno) Estado Zulia

4.3.1.1. Descripción litológica

Las características de los sedimentos de la Formación Misoa, dependen de su posición en la cuenca, del ambiente de sedimentación, de la distancia entre ellos y de la fuente de los mismos. Hacia el noreste hay más lutitas y areniscas de grano fino, mientras que hacia el sur y sureste, el porcentaje de arena aumenta al 80 y 90% de la sección, y los granos se hacen más gruesos. Se encuentran areniscas, limolitas y lutitas intercaladas en distintas cantidades, en toda la sección y hacia el este, en la sierra, algunas capas de caliza en la parte-inferior. En el área del lago se encuentran capas delgadas de caliza, en la parte inferior (Miembro C-7).

Las areniscas presentan tamaños variados de grano, pero en general, son de grano fino y gradan a limolitas y luego a lutitas. Son generalmente auras, micáceas, frecuentemente carbonáceas y generalmente bien estratificadas a macizas. Se presentan en unidades compuestas, con espesores normales de varias decenas de metros, las cuales localmente se agregan para totalizar espesores de centenares de metros, formando serranías pronunciadas. En el subsuelo, estas mismas arenas forman yacimientos múltiples verticales, con distribución lateral de decenas de kilómetros. GHOSH y ODREMAN (1989) identificaron los tipos de arcosa-subarcosa y sublitarenita-subarcosa, en las áreas de Urdaneta-Lagunillas y cuarzo-arenitas en la de Barúa-Motatán.

Las lutitas tienen composición variable, casi siempre son micáceas, arenosas a limolíticas, con abundantes estratos delgados, estrías y películas de arena, limo y material carbonáceo (incluyendo restos de hojas), que les den un aspecto laminado con estructura "flaser". Se presentan tanto en forma de intercalaciones menores en las unidades compuestas de arenisca-limolita, como en secuencias que alcanzan varios centenares de metros de espesor, entre complejos de areniscas. Las lutitas han sido depositadas en ambientes de prodelta, de aguas someras, e interdeltico, principalmente, y son diferenciables por las delgadas capas de lignito y por el material carbonáceo que contienen.

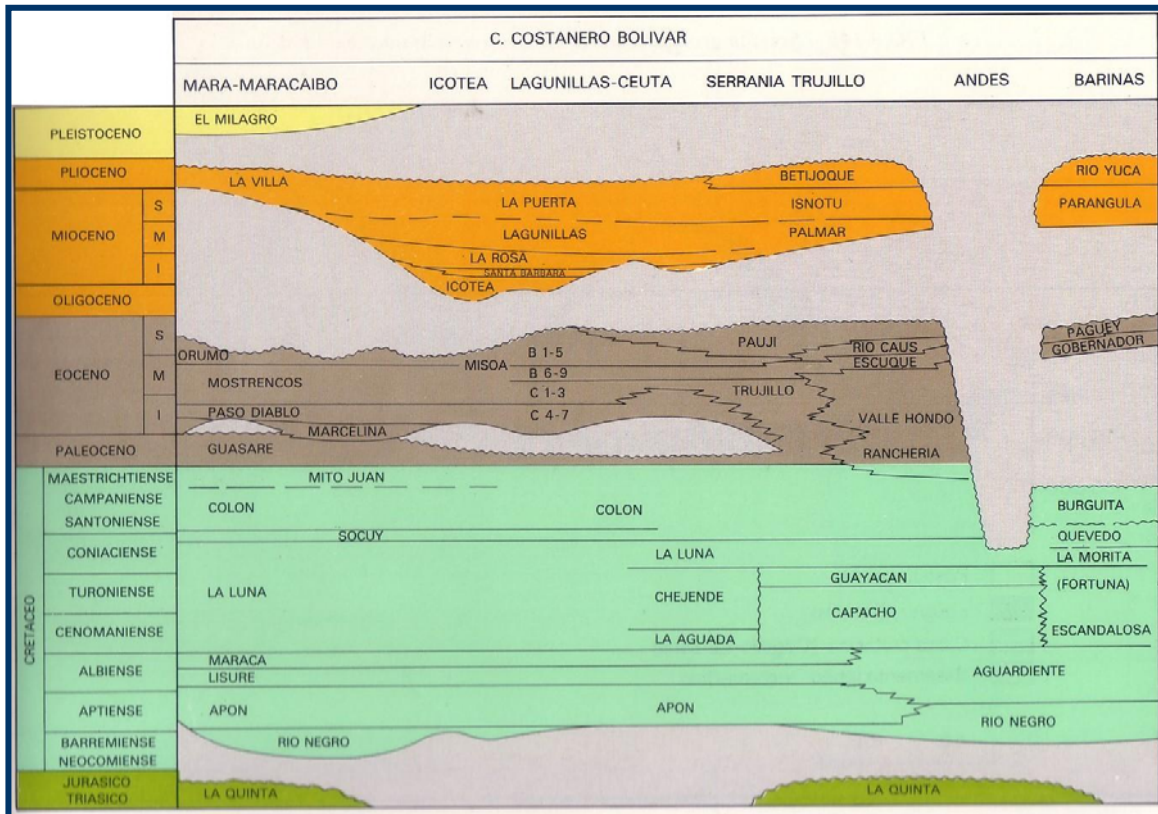


Figura 4.3. Columna estratigráfica generalizada de la Provincia Oriental de Maracaibo (tomado de Schlumberger, 1980)

Las calizas son escasas y se presentan en la base de la formación, en la región sur oriental y en el subsuelo del lago. BRONDIJK (1967) las describe como de color gris a gris azulado, duro, con espesores de menos de un metro a varios metros, arenoso, gradando a areniscas calcáreas. Generalmente son bioclásticas, con foraminíferos grandes, algas y fragmentos de moluscos. En las antiguas referencias se denominaban Segundo Horizonte de Orbitoideos.

4.3.1.2. Espesor

En la región descrita por BRONDIJK (1967) se mencionó un espesor compuesto de 5.000 m, y sugirió una probable variación de 3.500 a 5.500 m. La unidad adelgaza hacia el oeste, donde se encuentra reducida por la erosión. Al norte del lago, frente a Maracaibo, hay 3.000 m preservados, con aproximadamente 1.500 m erosionados. En el campo Urdaneta norte y en Cabimas, hay 4.600 m.

Unidades de Misoa B-Miembro	Espesor Promedio [pies]
B-1	870
B-2	1,150
B-3	1,066
B-4	2,492
B-5	1,520
Misoa B-Superior	7,098
B-6	406
B-6-Superior	67
B-6-Medio1	118
B-6-Medio2	92
B-6-Intermedio	26
B-6-Inferior	102
B-7	240
B-8	180
B-9	870
Misoa B-Inferior	1,696
Misoa B-Miembros Total	8,794

Tabla 4.1. Espesor estratigráfico verdadero promedio de las unidades B de la Formación Misoa en el Campo Cabimas

4.3.1.3. Formación Paují

Esta Formación presenta un contacto concordante hacia la base con la Formación Misoa. Según GONZÁLEZ DE JUANA et al. (1980), esta formación consiste en una gruesa sección de lutitas macizas a fisiles de color gris a gris oscuro. El contacto de la parte basal de la Formación Paují con el tope de la formación Misoa, puede ser nítido o puede encontrarse en una zona de transición con alternancias de areniscas, limonitas y lutitas.

4.3.1.4. Formación Trujillo

La Formación Trujillo infrayace a la Formación Misoa, y se define como una secuencia estratigráfica predominantemente turbidítica, presentando el tipo de sedimentación en el talud continental de la Provincia de Plataforma. La formación

Trujillo esta compuesta básicamente por lutitas homogéneas puras a arenosas, de color gris oscuro a negro (GONZÁLEZ DE JUANA et al., 1980).

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. GEOLOGÍA LOCAL

5.1.1. Generalidades

La Formación Misoa, según el Lexico Estratigráfico Venezolano, es de edad Eoceno Medio a Temprano. Se extiende al Lago el área de Maracaibo (incluyendo el Campo Costanero Bolívar) como la Formación Trujillo y es cubierto por la Formación Paují. La Formación Misoa fue subdividida por NATERA (1961) en los miembros “C” y “B”. NATERA estableció el Miembro Misoa C presenta una subdivisión en siete unidades, desde C 1 hasta C 7 unidades.

El mismo NATERA (1961) también subdividió al Miembro de Misoa B en nueve unidades, desde las unidades B-1 a la B-9 (estas unidades son nombradas del más joven al más viejo). Natera compiló a las unidades B-1 a la B-5 a una parte superior, ahora llamada Misoa B con el Submiembro “Superior”, y las unidades B-6 a la B-9 a una parte inferior, a la que ahora llamaron Submiembro “Inferior” del miembro Misoa B.

La Formación Misoa B-Superior originalmente comprende casi 7.100 pies, y Misoa B-Inferior presenta casi 1.700 pies de sedimentos clásticos (medidos en el pozo no fallado R-853). El espesor de las unidades es más o menos constante, exceptuando la discordancia del Eoceno, el cual erosionó parte de las unidades suprayacentes de Misoa B; o unidades que han sido falladas en ciertos sectores.

5.1.2. Descripción de los Núcleos

HIGGS (1999) realizó un estudio de facies basado en una descripción detallada de núcleos en los diferentes niveles de Misoa B-6 y B-Superior, con la finalidad de entender de manera más precisa en que ambientes fueron depositados los sedimentos que dieron origen a los yacimientos de hidrocarburos en el área de estudio.

A continuación de muestra una tabla mostrando los pozos a los cuales se les extrajo núcleos, el intervalo de muestreo, y a que unidad corresponde.

Tabla 5.1: Pozos donde se extrajeron núcleos, señalando el intervalo y la unidad a la que pertenece

Pozo	Fecha	Tope	Base	Arena
R-824	16-Nov-98	2300,0	2321,0	Sta. Bárbara
R-824	16-Nov-98	2361,0	2774,0	B-3X
R-825	13-Dic-98	2826,0	2948,0	B-3X
R-835	31-May-99	1962,0	1990,0	L. Lagunillas Inferior
R-835	08-Jun-99	3970,0	4056,0	B-3X
R-834	23-Abr-99	2795,0	2855,0	B-3X
R-834	29-Abr-99	4350,0	4408,0	B-4X
R-834	14-May-99	6360,0	6420,0	B-6X
R-845	27-Sep-99	6657,0	6853,5	B-6-X

HIGGS (1999) describió para B-6 (pozo R-834) la presencia de capas de arena con estratificación cruzada, en la que el tamaño de grano no excede de grano fino. Este intervalo está caracterizado por tener espesores de arenas de decímetros, con finas laminaciones de arcillas, o sedimentos heterolíticos arcillosos y cementación de siderita. A su vez, se observaron capas de arena de mayor espesor con presencia de estructuras sedimentarias como rizaduras, pero con ausencia de laminación interna.

Manchas de color negro pertenecen a rellenos de arcilla en madrigueras de *Arenocolites*, observados en el tope de los ripples. También fueron identificados bioturbaciones de la ichnotaxa *Ophiomorpha* y *Dactyloidites*; y pequeños fragmentos de madera.

La siguiente unidad descrita por HIGGS (1999), a partir de los análisis de núcleo que realizó, fue para la unidad B-3, específicamente en los pozos R-834 (intervalo 4350'-4408' de profundidad); y R-835 (intervalo 3970'-4056' de profundidad). En este intervalo de núcleo, se observaron estratificación en forma de espina de pescado, estratificación y laminación cruzada. Las capas de arena mas gruesa presentan hacia el tope estructuras sedimentarias estilo ripples, pero con ausencia de laminación interna.

El grado de bioturbación es moderado, siendo identificados icnofosiles como: *Arenicolites*, *Dactyloidites*, *Gyrochorte*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Rhizocorallium*, *Teichichnus*, *Teredolites* y *Thalassinoides*. Se encontraron fragmentos de rocas o moldes dispersos y de tamaños milimétricos.

En los pozos R-825 (en el intervalo 2826'-2948' de profundidad) y R-834 (intervalo 2826'-2948') se observó en la unidad B-2, hacia la base de esta sección del núcleo, la presencia de intercalaciones de arena y un alto contenido de lutita. Estructuras sedimentarias como as rizaduras, generalmente asimétricos, fueron también descritas, con finas interlacaciones de arcilla (mm.).

Hacia el tope del núcleo se presentan laminación cruzada con arenas heterolíticas intercaladas con lutitas.

El pozo que contiene núcleos con la unidad B-1 es el R-824 (intervalo entre 2361'-2774' de profundidad). Se observó estratificación cruzada hacia la base del núcleo con estructuras sedimentarias como rizaduras, con ausencia de laminación interna en los cuerpos de arena. Hacia el tope la litología se ha haciendo más arcillosa, aumentando la relación arena-lutita.

5.2. REGISTROS ELÉCTRICOS

En esta sección se pasará a calibrar los registros de Rayos Gamma (GR) en conjunto con los núcleos extraídos de las diferentes unidades, con la finalidad de establecer una relación lógica entre los registros eléctricos y la litología. A su vez, se señalarán las características generales de los registros de Rayos Gamma (GR), para cada unidad, y así observar la geometría de la curva (*Ver Figura 5.1*).

Se va utilizar como registro tipo para esta descripción el pozo R-834, el cual es un pozo no fallado y en donde el registro de Rayos Gamma (GR) fue corrido por todo B-Inferior y B-Superior.

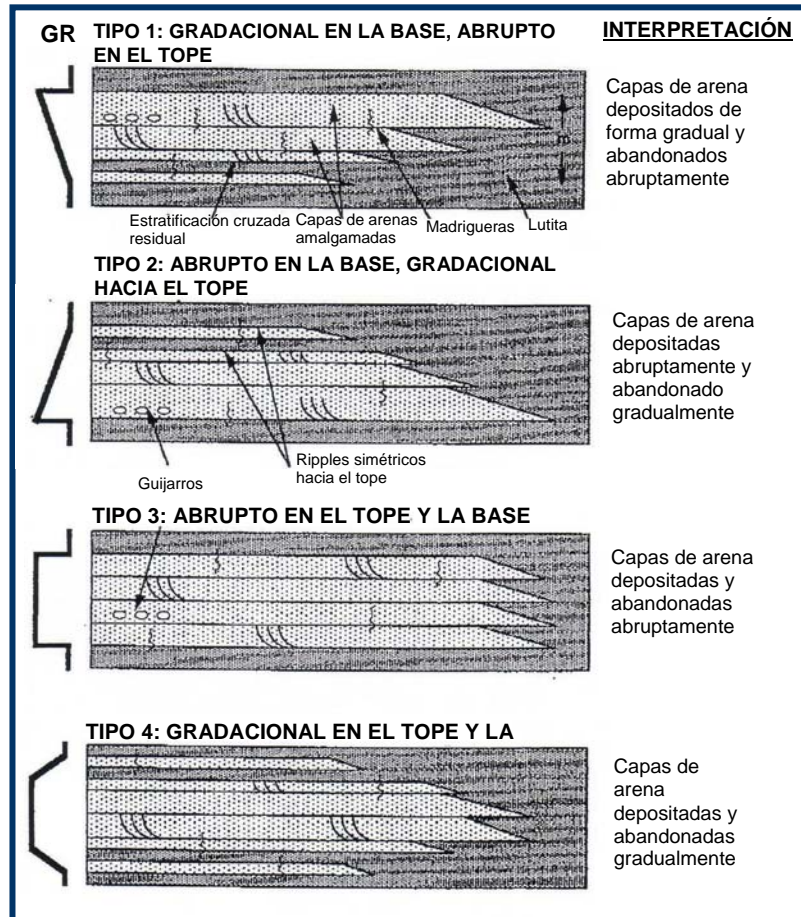


Figura 5.1. Variabilidad esquematizada de sucesiones de arena con patrones de registros de Rayos Gamma (electrofacies), en términos de comportamientos de migración de capas de arena en plataformas con influencia mareal (Tomado y modificado de Higgs, 1996).

5.2.1. Comparación de núcleos con curvas de Rayos Gamma

Se procedió a comparar de forma visual núcleos extraídos en B-6, en los pozos R-834, en conjunto con curvas de Rayos Gamma. Esto es con la finalidad de poder asociar tipos de litología con cuerpos de arena que se observan en los registros.

En la *Figura 5.3.* se muestran dos imágenes con núcleos extraídos del pozo R-834 en la unidad B-6, y un registro de Rayos Gamma (GR) ubicado en la profundidad de los núcleos. Se observa en la curva, la presencia de un cuerpo de arena con tendencia grano creciente hacia el tope, terminando con un contacto abrupto. La foto (A) muestra la presencia de intercalaciones entre arena y arcillas, con una serie estructuras sedimentarias como rizaduras asimétricas. La foto (B) muestra areniscas con estratificación cruzada, y estructuras en forma de rizaduras.

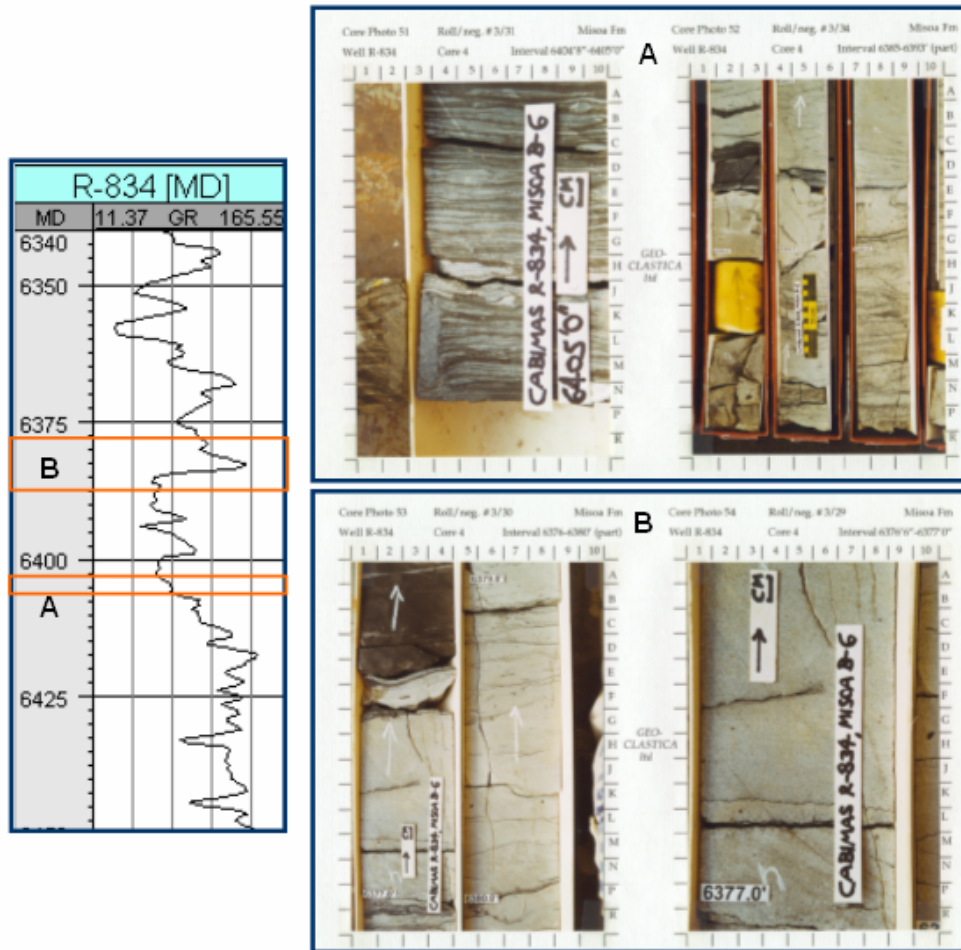


Figura 5.2. Fotos de núcleos extraídos del pozo R-834 para la unidad de B-6, junto con la curva de Rayos Gamma (GR) ubicada a la profundidad de los núcleos. Ambos tipos de imágenes sirven para comparar litología versus geometría de la curva mostrada y poder hacer una extrapolación de la data.

5.3. ESTRATIGRAFÍA LOCAL

5.3.1. Generalidades

La unidad B-6, perteneciente al Miembro B-Inferior, se encuentra dividida en varias unidades operacionales B-6, B-6-B1, B-6-B2, B-6-C Y B-6-D. La columna estratigráfica esta caracterizada por ser una unidad predominantemente arenosa. La base de la unidad presenta un comportamiento grano creciente con un contacto abrupto en el tope de la arena. Seguidamente comienza un comportamiento de intercalaciones de arenas con espesores promedio de 5 pies y lutitas finas capas de lutitas (*ver la Figura 5.3*).

Hacia la parte media de la unidad se observan cuerpos de arena homogéneos, presentando una geometría en forma de bloque, con un espesor aproximado de 30 a 40 pies. Este tipo de geometría en la curva de Rayos Gamma (GR) está representado en la *Figura 5.1* como tipo 3. Se evidencian contactos abruptos hacia la base y tope de esta secuencia previamente descrita.

Al tope de la unidad se puede ver un comportamiento similar a la base, en el cual se aprecian intercalaciones arena-lutita con espesores que no exceden los 5 pies, con excepción de una capa de arena que presenta un espesor de 12 pies.

En líneas generales, se observa un comportamiento cíclico en B-6, donde en la base y hasta la parte media de la unidad existen intercalaciones de arena-lutita con tendencias grano creciente y grano decreciente; luego se entra a la parte media con cuerpos de arenas con un considerable incremento del espesor, y con forma de bloques, tipo 3 (*Fig.5.1*). Ya en el tope ocurre una tendencia muy similar a la de la base.

Se procedió a realizar 7 secciones estratigráficas distribuidas en la zona (*ver la Figura 5.4, Anexo 1 y 2*). En dichas secciones se desarrollaron las correlaciones para obtener el comportamiento estratigráfico y observar las variaciones laterales entre los pozos del campo, proporcionando las relaciones de las facies y los posibles eventos depositacionales en B-6.

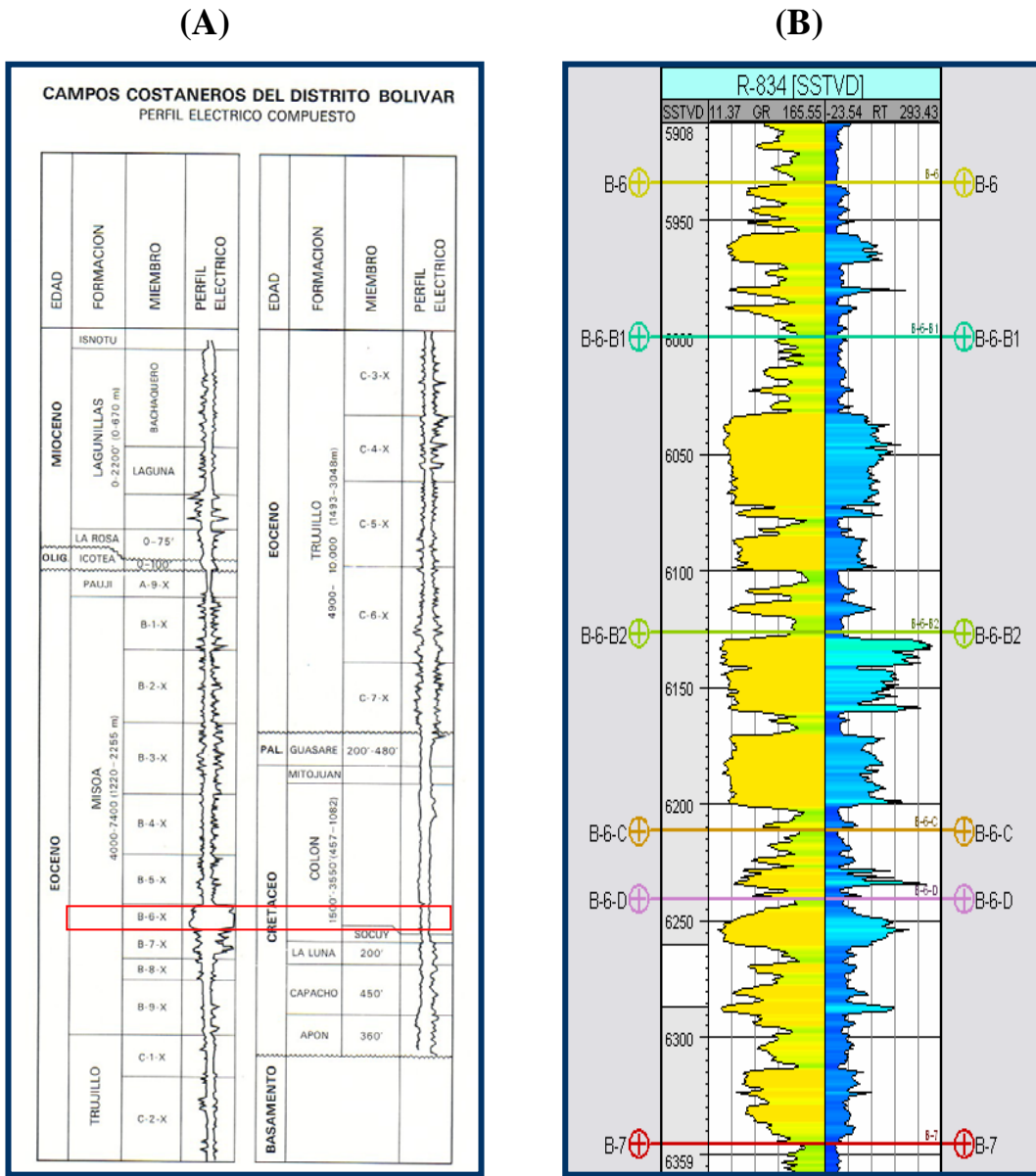


Figura 5.3. El registro (A) corresponde a un registro generalizado de todas las formaciones presentes en el Campo Costanero Bolívar, pudiéndose observar en el recuadro rojo la unidad correspondiente a B-6 (Tomado y modificado de Schlumberger, 1980). En el registro (B) se muestra el registro tipo para la unidad B-6 de la Formación Misoa, en Campo Cabimas; a su vez se puede observar las respectivas subdivisiones para esta unidad

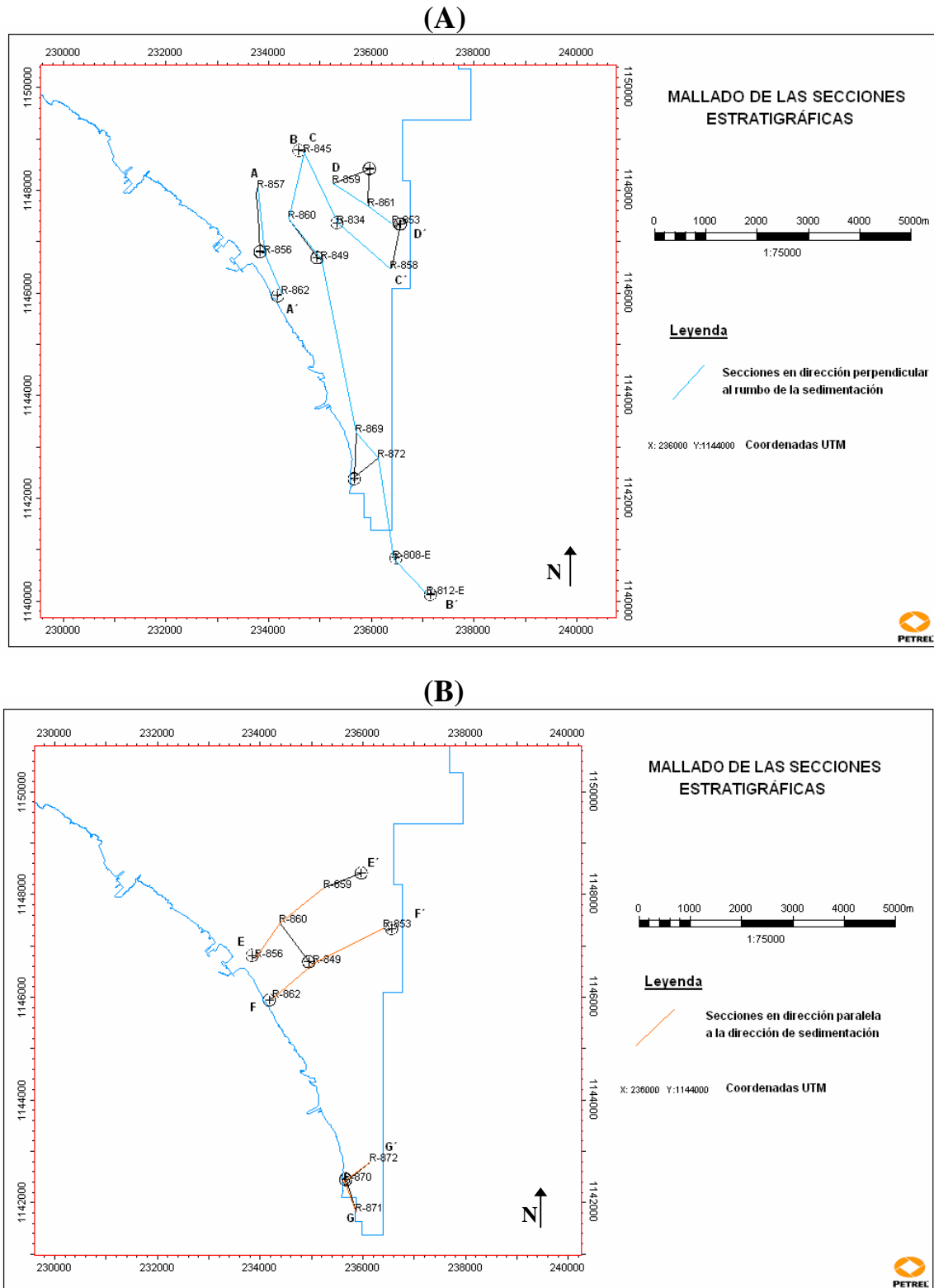
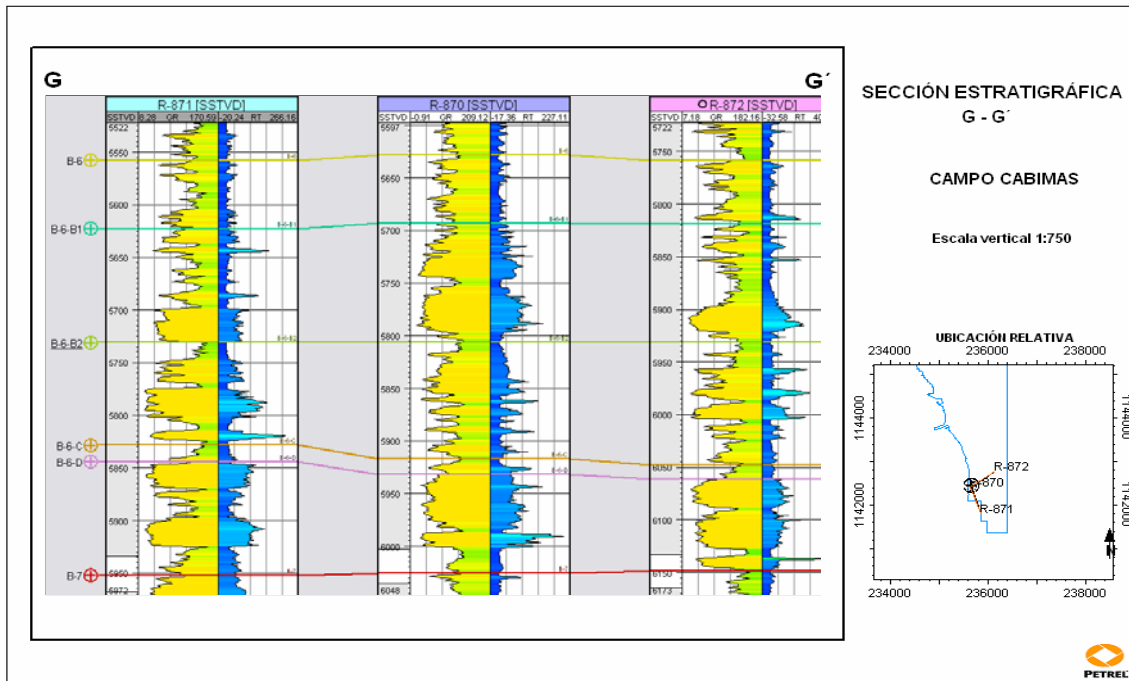


Figura 5.4. Mapas de correlaciones de B-6, al sur del Campo Cabimas. En el mapa (A) se puede observar 4 secciones realizadas en dirección perpendicular a la dirección de la sedimentación; así como en el mapa (B) donde se observan 3 secciones paralelas a la dirección de la sedimentación

La base de la unidad B-6 está definida por una superficie de depositación de lutita de espesor variable entre los 10 pies (pozo R-858) y 3 pies (pozo R-845), debido a la ausencia de aportes clásticos en la plataforma somera. En el tope de la lutita presenta un cambio abrupto un cuerpo de arena con un espesor variable entre 40 pies (pozo R-858) y 12 pies (pozo R-845), con buena continuidad lateral, definiendo el final del evento de depositación de las arcillas (*ver Figura 5.5 A y B*).

El tope de la secuencia de la unidad de B-6 se encuentra definido por una lutita con un espesor que presenta una variación entre los 11 pies (pozo R-872) y 4 pies (pozo R-853), de buena continuidad lateral, siendo esta un buen marcador regional para la correlación (*ver la Figura 5.5 A y B*).

A



B

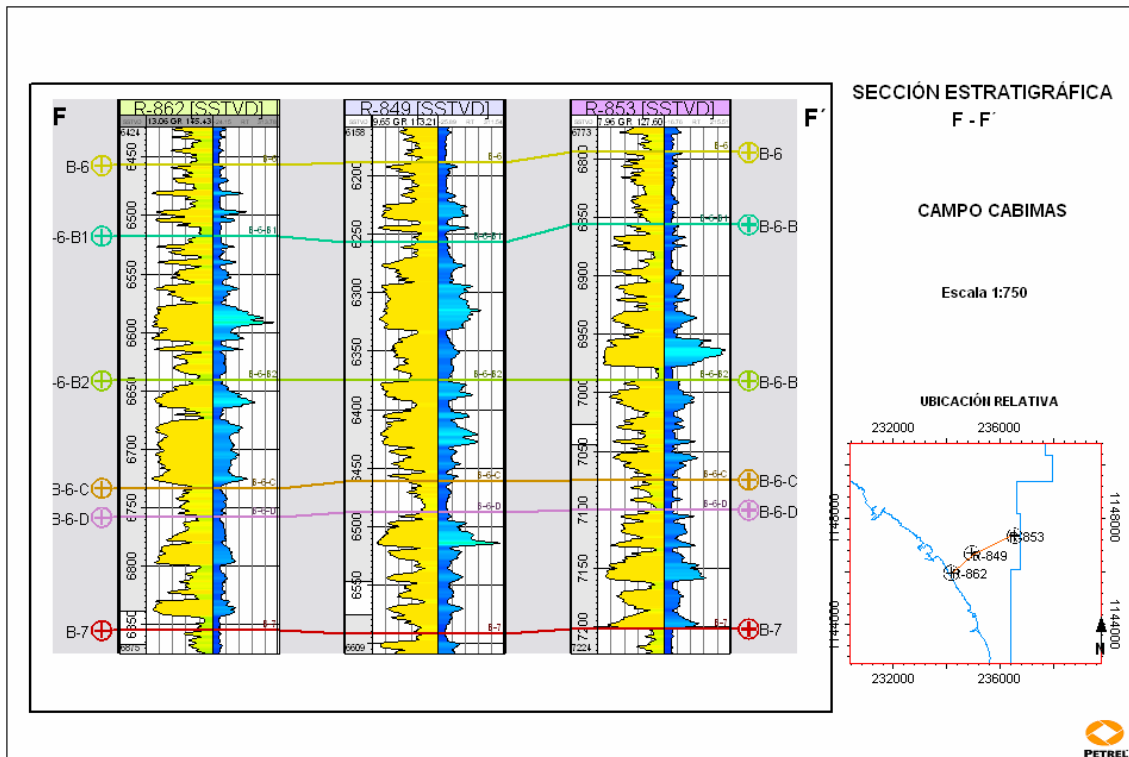


Figura 5.5. Secciones estratigráficas en dirección paralela a la sedimentación

5.3.2. Descripción de las Sub-unidades e interpretación de electrofacies

A continuación se va a realizar una descripción estratigráfica de las diferentes sub-unidades de B-6, así como de las electrofacies definidas a partir de registros de Rayos Gamma (GR). En la Figura 5.1 se muestran las tendencias de los registros de Rayos Gamma y su interpretación ambiental, enfocado al marco depositacional en el cual se encuentran las sub-unidades a ser descritas.

5.3.2.1. Sub-unidad B-6-D

La base de esta sub-unidad coincide con la base de la unidad B-6. El tope de B-6-D está representado por una lutita de espesor relativamente constante, el cual varía entre los 8 pies (pozo R-862) y 4 pies (pozo R-853).

Esta lutita, a pesar de no presentar un gran espesor, tiene buena extensión lateral, puesto que se puede observar en todos los pozos. Esto indica que no hubo una erosión previa a la depositación de la sub-unidad superior.

La unidad de B-6-D, vista en la *Figura 5.6, Anexo 3*, exhibe un espesor promedio de unos 100 pies. Dentro de esta sub-unidad se puede observar la presencia de varios cuerpos de arenas, con espesores que van desde los 10 pies, hasta los 25 pies. La geometría que estos cuerpos tipo 1 (*ver Figura 5.1*) con un contacto abrupto hacia la base y otros cuerpos de arena con forma gradacional hasta el tope, tipo 1. Como secuencia vertical, estas dos geometrías de arenas se depositan una seguida de la otra, haciendo ver esta tendencia como ciclos de depositación.

En términos de extensión lateral, la sección F-F' (paralela a la dirección de sedimentación) muestra una muy buena continuidad lateral en las arenas, a su vez siendo muy correlacionables por las lutitas depositadas entre cada capa de arena.

En el caso de la sección D-D' (perpendicular a la dirección de sedimentación), se observa una variación con respecto a los cuerpos de arena observados entre los pozos R-862 y R-849 (*ver Figura 5.7, Anexo 4*), en el que el primer pozo presenta una capa de arena tipo 3, con un espesor de 47 pies, con contacto abrupto hasta la base y hacia el

tope; lo cual no ocurre con el pozo R-849, el cual presenta capas de arena con aumento de intercalaciones de lutitas.

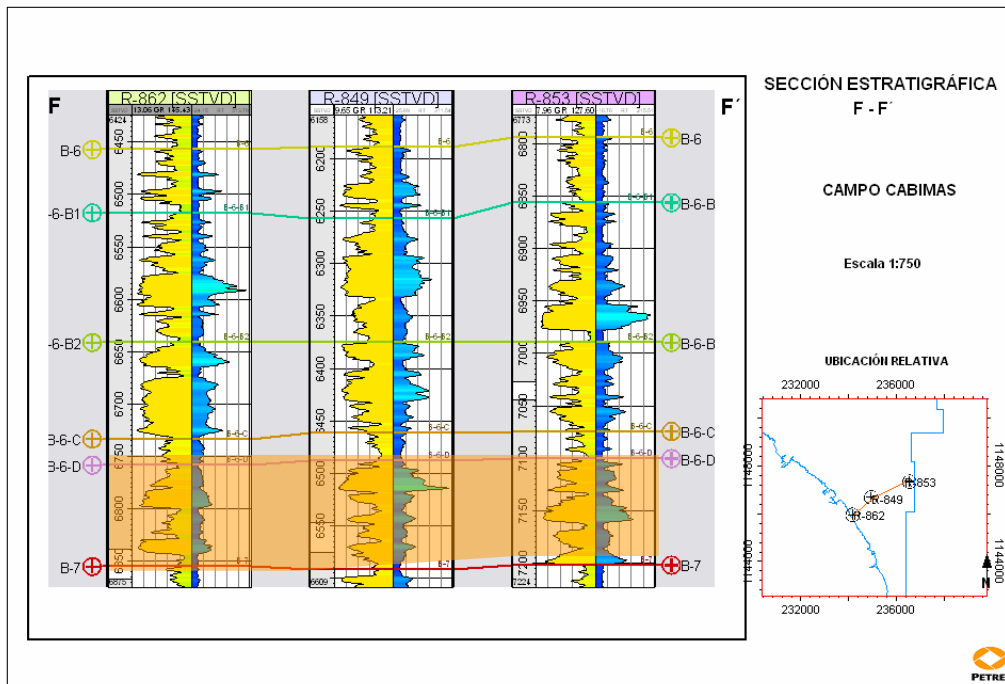


Figura 5.6. Sección estratigráfica F-F', realizada en sentido de la dirección de la sedimentación. Se observa la geometría predominante de los cuerpos de arena para la sub-unidad B-6-D

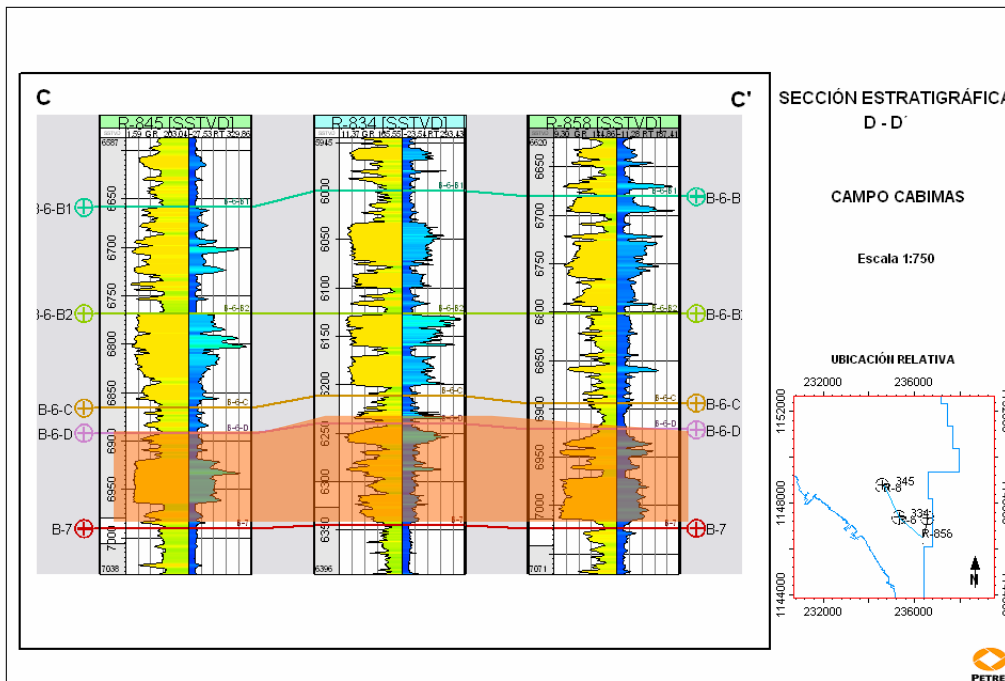


Figura 5.7. Sección perpendicular a la sedimentación.

La *Figura 5.8., Anexo 13,* muestra un mapa de arena neta, el cual indica la tendencia que tienen las arenas con respecto su espesor total. Para la sub-unidad B-6-D, se observa una relativa constancia en los espesores de arena. Al norte del mapa, donde están ubicados la mayor cantidad de pozos es donde se encuentra la menor variación, ubicándose entre los 60 pies y 50 pies.

Hacia el sur del campo los espesores presentan una variación que va entre los 70 y 60 pies. Esto aporta más evidencia respecto a que esta unidad presenta gran continuidad horizontal en el área de estudio. Cabe destacar que en el pozo R-834 se observa una disminución en el espesor de arena neta, y eso se debe que los cuerpos de arena tipo parches de arena, no son regulares en su depositación, en donde pudo haber sido un paso de flujo cargado de sedimentos sin depositación.

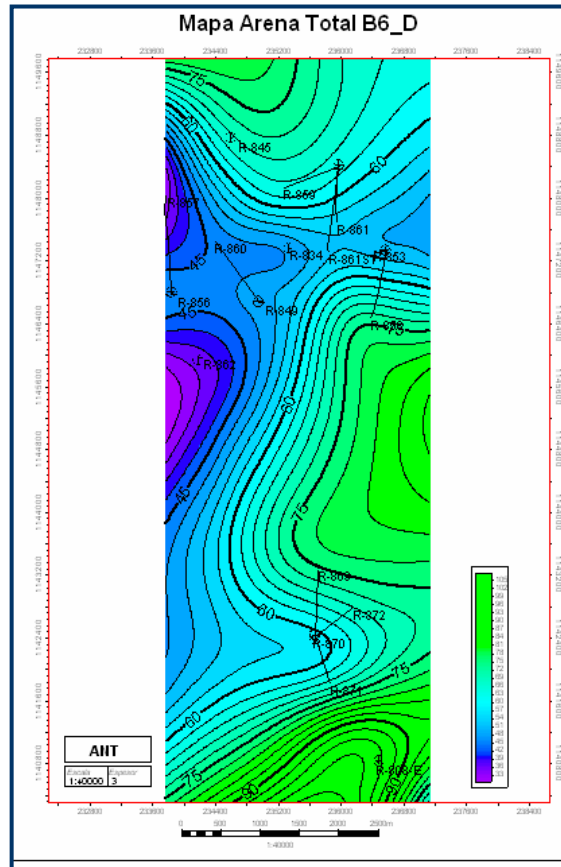


Figura 5.8. Mapa de arena neta para la sub unidad de B-6-D. Se observa que los valores promedios de espesores varían entre los 75 pies y 60 pies.

5.3.2.2. Sub-unidad B-6-C

La base de esta sub-unidad la representa la lutita que suprayace a la sub-unidad B-6-D. Esta presenta un espesor que varia entre los 8 pies (pozo R-862) y 4 pies (pozo R-853). El tope de la sub-unidad coincide con una lutita la cual varía entre 9 pies (pozo R-845) y 2 pies (pozo R-834).

Esta sub-unidad presenta un espesor que varia entre 30 pies (pozo R-845) y 14 pies (pozo R-872). Esta sub-unidad presenta un comportamiento lutítico con finas capas de arena.

En la sección F-F' (paralela a la dirección de la sedimentación), se observan finas intercalaciones de arenas y lutitas (*ver* Figura 5.9, *Anexo 5*). Las finas capas de arenas no tienen buena extensión lateral, observándose acuñamientos (pozo R-858). Dichos comportamiento lutítico en B-6-D se debe a la falta de aporte de sedimentos clásticos debido a la poca o casi ausencia de corrientes de marea, por ende la depositación de material en suspensión como las arcillas. El acuñamiento al noreste se produce como consecuencia de que se está alejando de la fuente de sedimentos, llegando al límite de la plataforma externa, la cual tiende a ser una zona más arcillosa.

De manera similar, ocurre en dirección perpendicular a la sedimentación, representada por la *Figura 5.10, Anexo 6*, donde se observan finas intercalaciones de arenas con lutitas, donde las capas de arenas tienden a desaparecer hacia el este del campo.

Observando el mapa de arena neta (*ver* *Figura 5.11, Anexo 14*), se aprecian valores muy bajos de espesores de arena. En algunos pozos como el R-858, el mapa indica un espesor de 0 pies, mientras que en el pozo R-834 presenta un valor de espesor de arena de aproximadamente 11 pies.

En general, se concluye que esta sub-unidad no presenta una buena distribución de las arenas, haciéndola casi en su totalidad de tipo lutítico, especialmente hacia el centro del mapa, donde se registra de forma constante la ausencia de arenas.

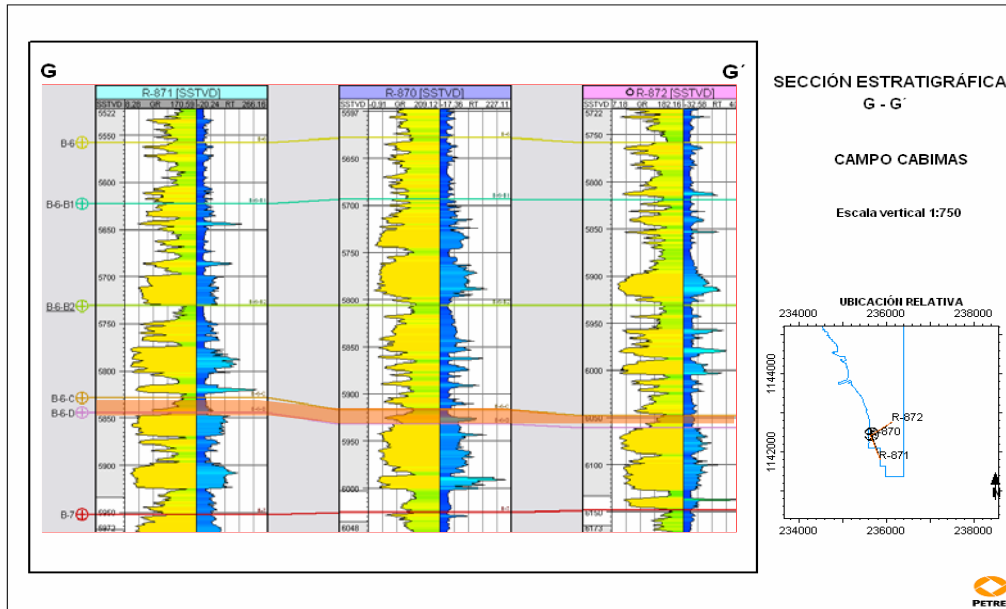


Figura 5.9. Se observa en la sección G-G' la escasa presencia de sedimentos clásticos depositados en este sub unidad

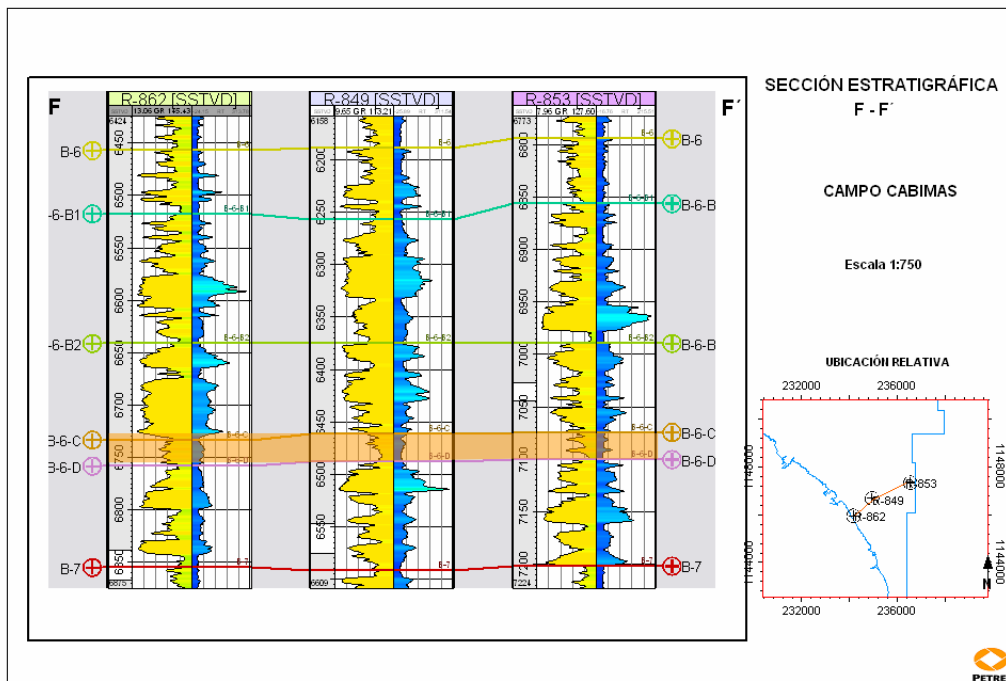


Figura 5.10. Sección estratigráfica F-F' en dirección paralela a la sedimentación. Se puede ver el poco desarrollo de arenas presentes en esta sub unidad

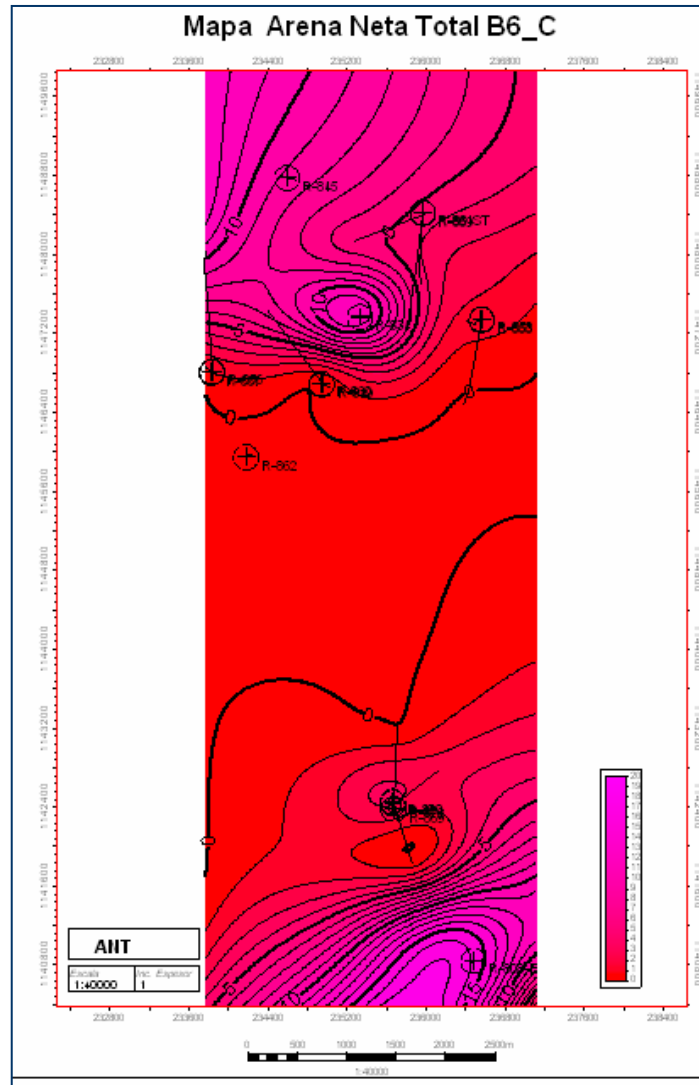


Figura 5.11. Mapa de arena neta, en donde se observa poca o nula presencia de de depósitos arenosos.

5.3.2.3. Sub-unidad B-6-B2

La base de esta sub-unidad esta representada por una lutita la cual presenta un espesor que varia entre los 8 pies (pozo R-862) y 4 pies (pozo R-853). Esta lutita no se ve en todos los pozos, puesto que B-6-C es en su mayoría arcillosa, hay cierta continuidad vertical hasta llegar a esta sub-unidad. El tope de B-6-B2 está limitado por una lutita con un espesor que varía entre 16 pies (pozo R-871) y 8 pies (pozo R-862). Esta lutita, al tope, es la que más extensión lateral tiene, y la más utilizada para la correlación entre los pozos, puesto que es fácilmente reconocible en todo el campo.

En la sección estratigráfica F-F' (*ver Figura 5.12, Anexo 7*) se observan cuerpos de arena simétricos tipo 3 (*ver Figura 5.1*), con contacto abrupto hacia la base y hacia el tope. Los espesores de estos cuerpos de arena son de 30 pies a 40 pies, a excepción de las arenas del pozo R-853 (al este de la zona de estudio).

E este pozo no se observan curvas que muestren ese tipo de geometría de bloque (tipo 3), observándose hacia la base de esta sub-unidad una secuencia grano creciente con un contacto abrupto en el tope. Seguidamente, por enciman de esta capa, surge una secuencia de alternancias de arenas con espesores de 10 pies con lutitas; y hacia el tope de B-6-B2, para el pozo R-853, se aprecia otra capa de arena con características similares a la que se encontraba en la base, grano creciente hacia el tope, terminando con un contacto abrupto.

La sección A-A' (*ver Figura 5.13, Anexo 8*) muestra para esta sub-unidad una buena continuidad lateral, manteniendo una constancia con la sección F-F'. Se mantienen los espesores de las capas de arena con geometría en forma de bloques (tipo 3), con una pequeña excepción hacia el norte (pozo R-857), en la que el espesor de los cuerpos de arena disminuye.

A su vez, el espesor promedio de toda la sub-unidad presenta variaciones mínimas, presentando espesores entre los 100 pies (pozo R-857) y 90 pies (pozo R-849).

La *Figura 5.14. Anexo 15*, muestra el mapa de arena neta para B-6-B2, la cual muestra que los espesores entre los pozos presentan cierta homogeneidad, ubicándolos

entre un rango de 75 pies (pozo R-857) y 50 pies (pozo R-869). La única excepción la tienen los pozos ubicados al este del mapa, R-858 y R-853, la cual presentan espesores de arena neta promedio entre los 20 pies y 30 pies respectivamente.

La razón de esta disminución de espesor de los cuerpos de arena ubicados hacia el este de la zona de estudio y vista por las secciones estratigráficas y por el mapa de arena neta, lo cual se interpreta como un cambio de ambiente de plataforma interna dominada por mareas a un ambiente de plataforma externa, de dominio litológico más arcilloso, con cuerpos de arena tipo 1 ó 2 (*ver Figura 5.1,*).

Al norte (pozo R-857) se observa el caso similar con el pozos R-853, el cual se encuentra ubicado al este de la zona de estudio. Para este caso en particular con el pozo R-857, se puede inferir que como el flujo de sedimentos proviene del suroeste en dirección al noreste, y partiendo de la premisa de que los cuerpos de arena como las capas de arena o también llamados capas de arenas; o los parches de arena, presentan una extensión lateral limitada, estos tienen a disminuir su espesor en dirección perpendicular a la sedimentación (*ver Figura 5.21*).

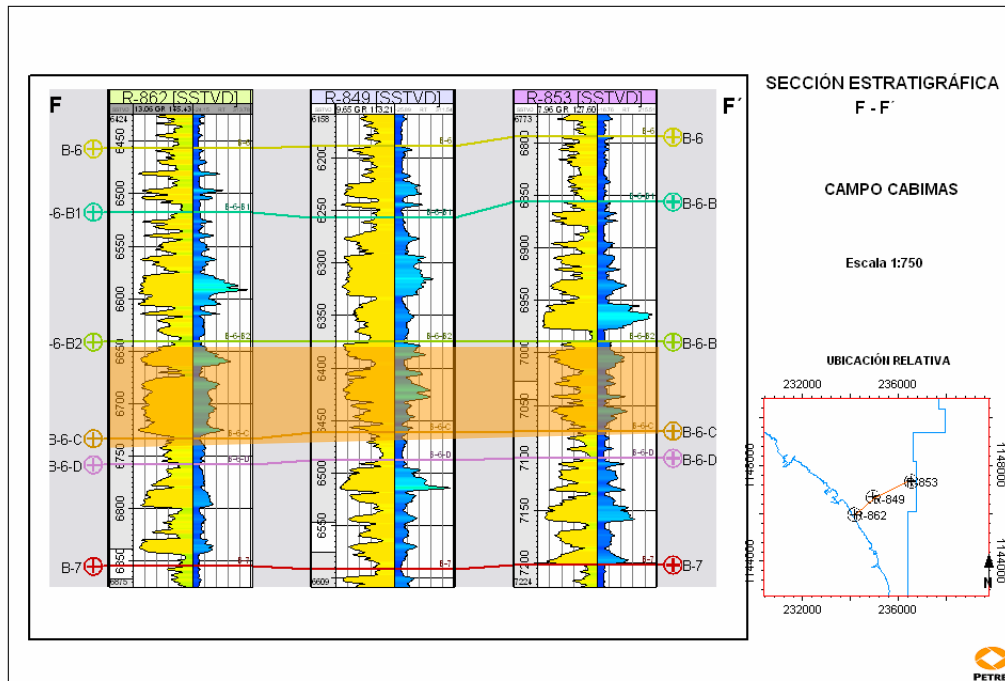


Figura 5.12. Sección estratigráfica F-F'. Se muestran cuerpos de arenas en forma de bloque, con contactos abruptos en base y tope

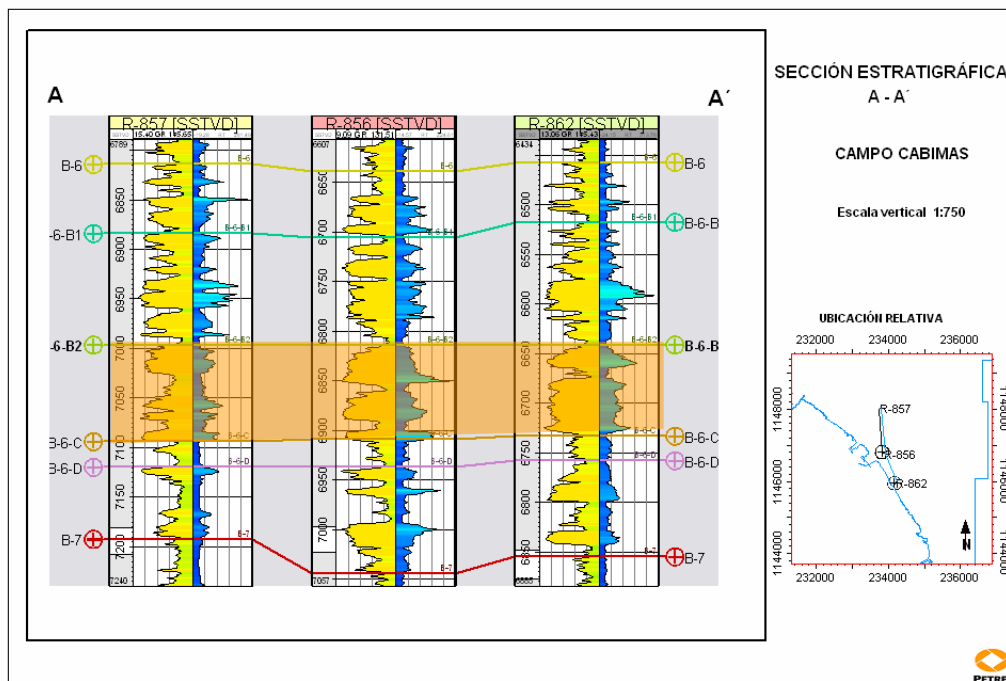


Figura 5.13. Sección estratigráfica A-A'. Se observa buena continuidad lateral, perdiendo su espesor hacia el norte

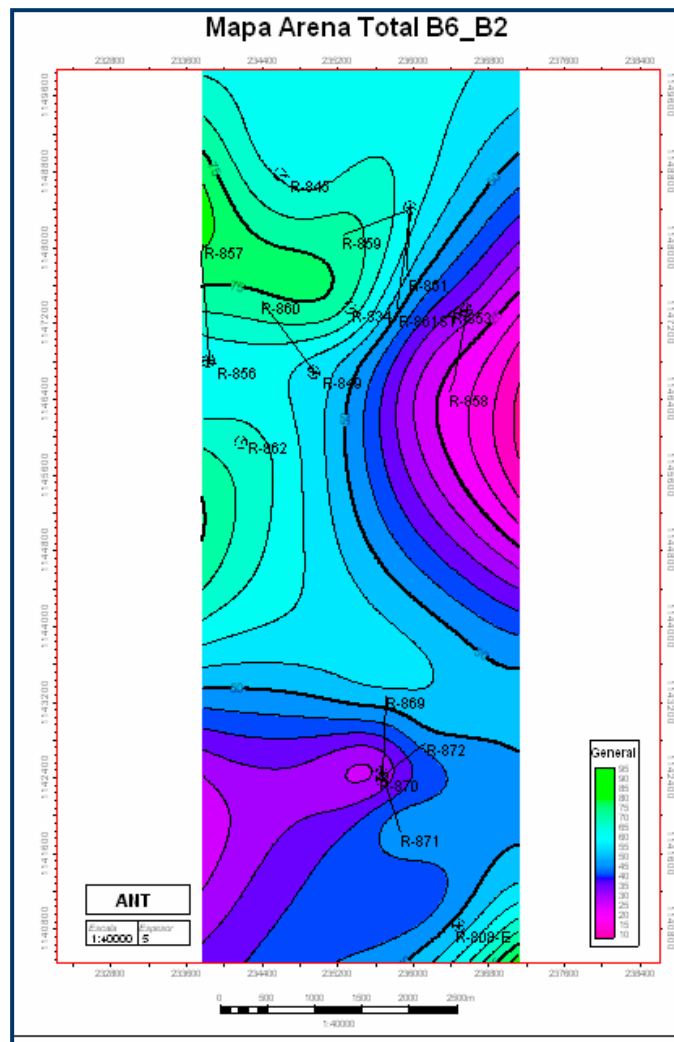


Figura 5.14. Mapa de arena neta para B-6-B2. Se observa al este y al sur una disminución de los espesores de arena neta

5.3.2.4. Sub-unidad B-6-B1

La base de esta sub-unidad es la lutita mayor de definición en B-6, siendo la mejor correlacionable entre todos los pozos. Presenta un espesor que varía entre 16 pies (pozo R-871) y 8 pies (pozo R-862). Hacia el tope se encuentra una lutita con un espesor que varía entre los 10 pies (pozo R-856) y 3 pies (pozo R-870). Esta lutita no presenta una buena variación lateral, siendo difícil la correlación de esta sub-unidad. El espesor promedio de la unidad es de 130 pies (pozo R-862).

La sección F-F' (ver Figura 5.15, Anexo 9) muestra cuerpos de arena con geometría (pozo R-862) en forma de bloque, con un espesor de 40 pies (pozo R-849); y cuerpos de arena con gradación hacia el tope. Se observa que hacia el tope de la subunidad, esta va perdiendo espesor en las capas de arena, modificándose así la geometría de las capas inferiores. Estas capas presentan espesores entre los 10 pies (pozo R-853) y 5 pies (pozo R-862).

En dirección perpendicular a la sedimentación, vista desde la sección A-A' (ver Figura 5.16, Anexo 10), los cuerpos de arena presentan buena continuidad lateral, conservando la geometría de toda la secuencia para esta sub-unidad.

El mapa de arena neta (ver Figura 5.17, Anexo 16), presenta espesores que varían entre los 100 pies (pozo R-849) hasta 50 pies (pozo R-845 y R-872). El porcentaje de espesores es de 80% para los espesores comprendidos entre 80 pies y 100 pies. Se observa también una tendencia noreste con respecto a la disposición de estos depósitos de arena.

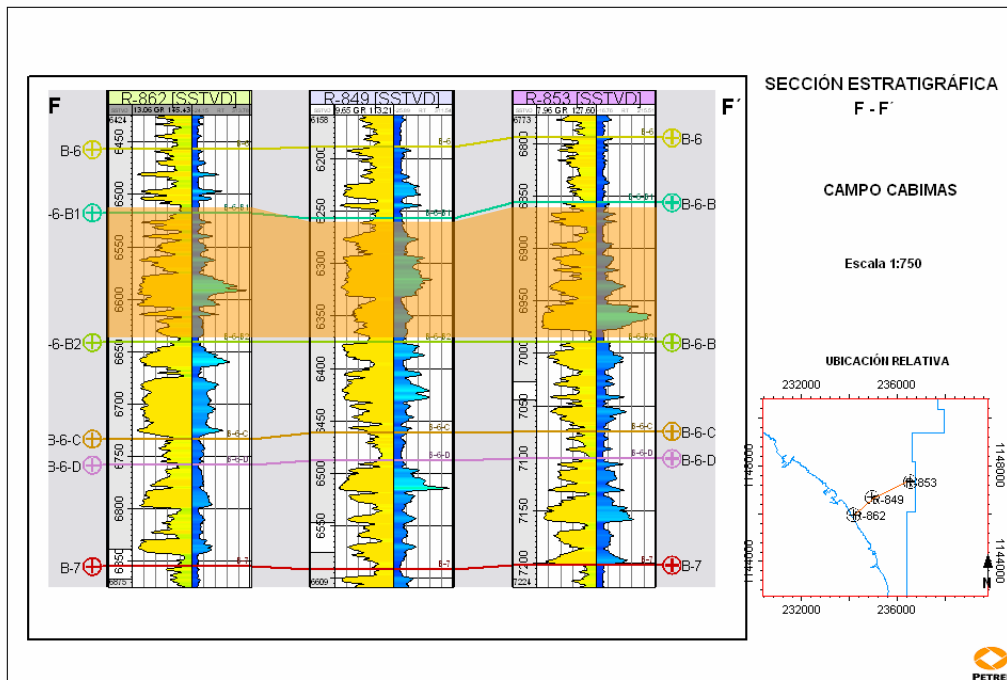


Figura 5.15. Sección estratigráfica F-F'. Se observan cuerpos de arenas con forma de bloque y gradando de base a tope.

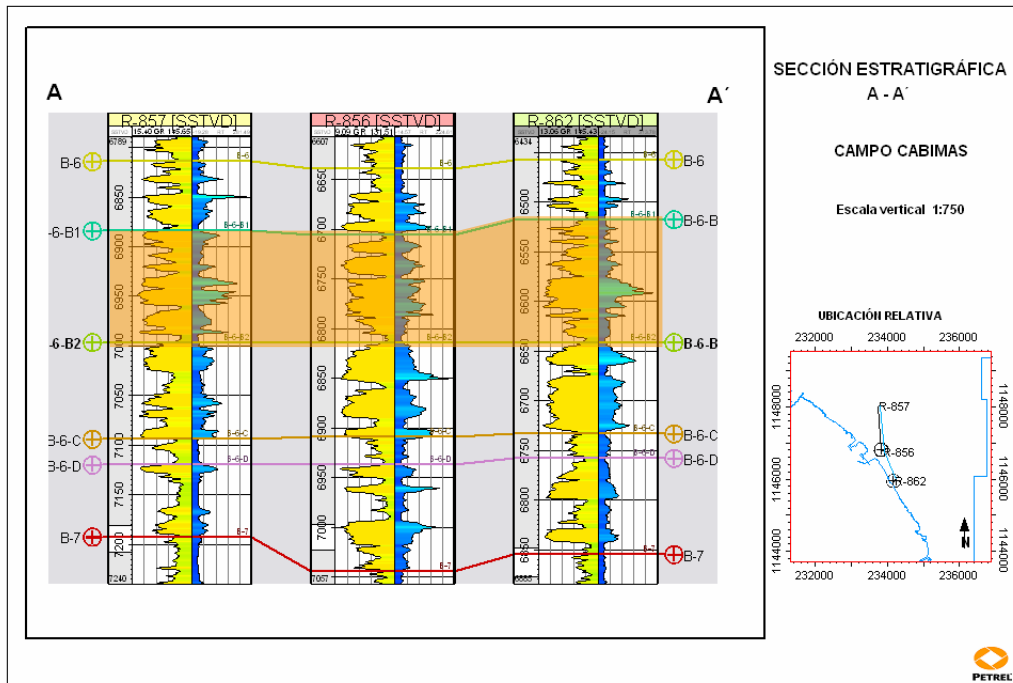


Figura 5.16. Sección estratigráfica A-A'. Presenta buena continuidad lateral manteniéndose la geometría de los cuerpos de arena.

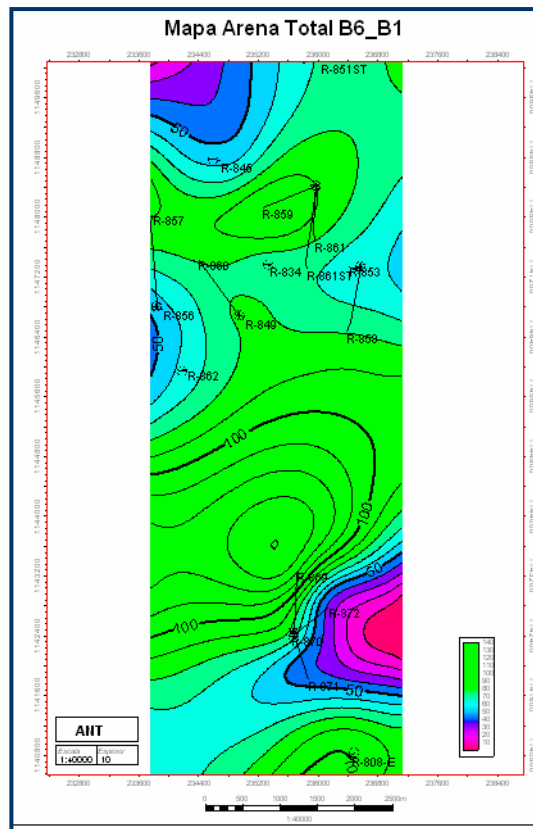


Figura 5.17. Mapa de arena neta para B-6-B1. Presenta los mayores espesores de arena en B-6, con espesores que varían entre 100 pies y 50 pies.

5.3.2.5. Sub-unidad B-6

Esta sub unidad se encuentra ubicada al tope de B-6, y está limitada en la base por una lutita de 10 pies de espesor (pozo R-862). El tope la limitado por una lutita con un espesor promedio de 8 pies, la cual presenta buena extensión lateral.

La sección F-F', en la *Figura 5.18, Anexo 11*, muestra un incremento en la relación de lutita con respecto a los cuerpos de arena presentes en dicha sub unidad. Se aprecia también que hacia el este del área de estudio, las arenas tienden a desaparecer.

La variación lateral que tienen las capas de arena es buena, puesto que preservan los espesores y la geometría de dichas capas (*ver Figura 5.19, Anexo 12*).

La *Figura 5.20, Anexo 17*, correspondiente al mapa de arena neta total presenta espesores que varían entre 15 pies y 60 pies. Estos espesores mayores de arena se encuentran ubicados al noroeste del mapa, siendo visto por los pozos R-859 y R845 con una orientación Noroeste.

Hacia el sur del mapa se encuentran valores con espesores de arena entre los 15 pies y 18 pies, donde se encuentran los pozos R-869, R-879, R-871, R-872 y R-808. Al centro del mapa se observan los valores más bajos de espesor, con un rango entre los 15 y 9 pies. Se puede inferir que hacia el norte hay mayor espaciamiento para que se puedan depositar los mayores espesores de arena, transportados por mareas.

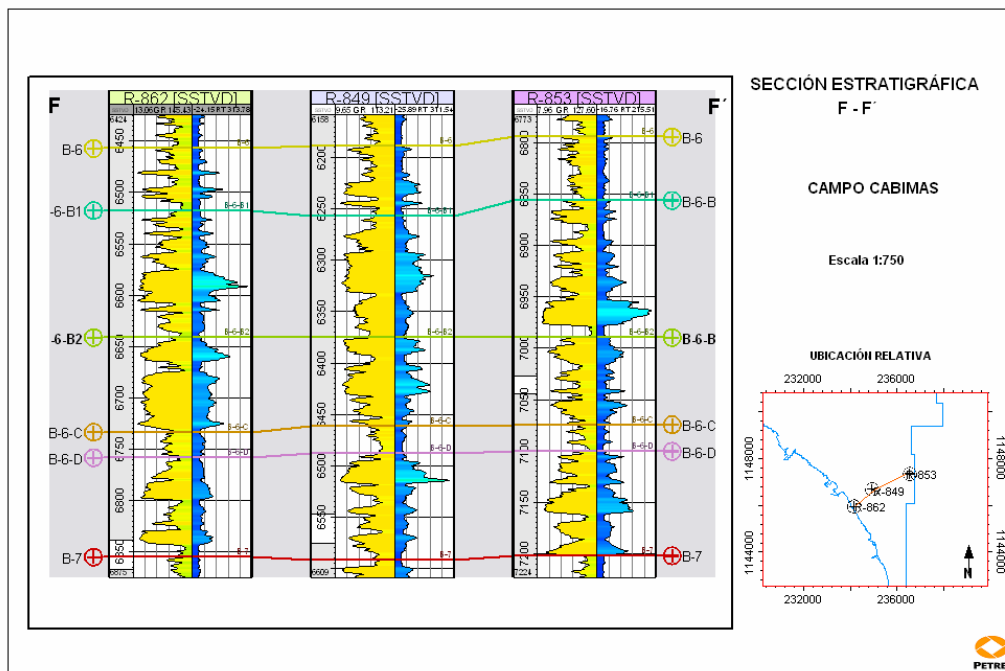


Figura 5.18. Sección estratigráfica F-F'. Se aprecia la disminución de las capas de arena hacia el este del área de estudio.

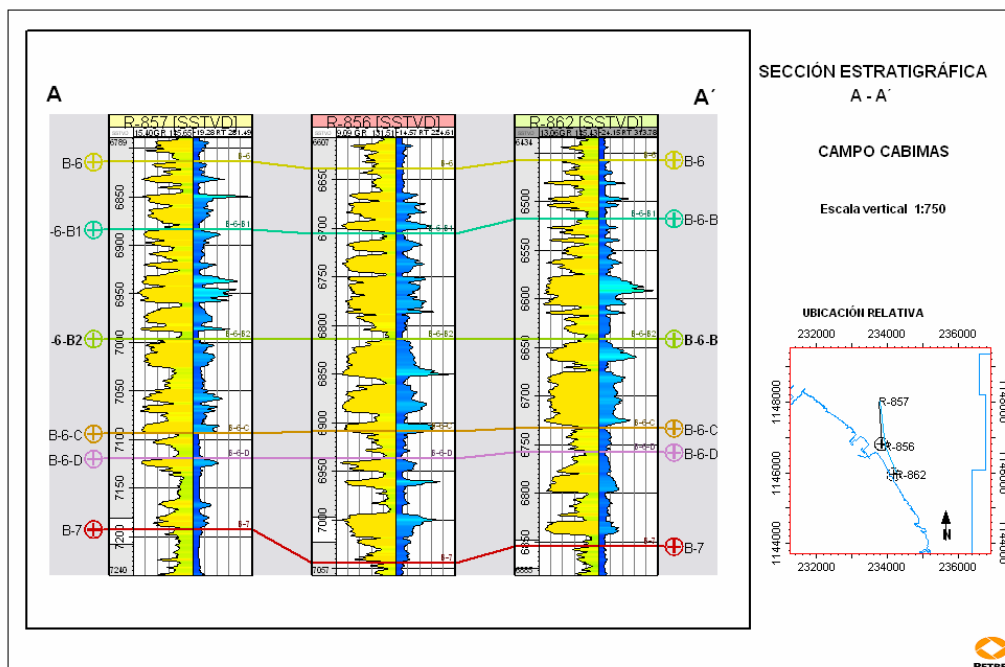


Figura 5.19. Sección estratigráfica A-A'. Los cuerpos de arena mantienen su geometría lateralmente.

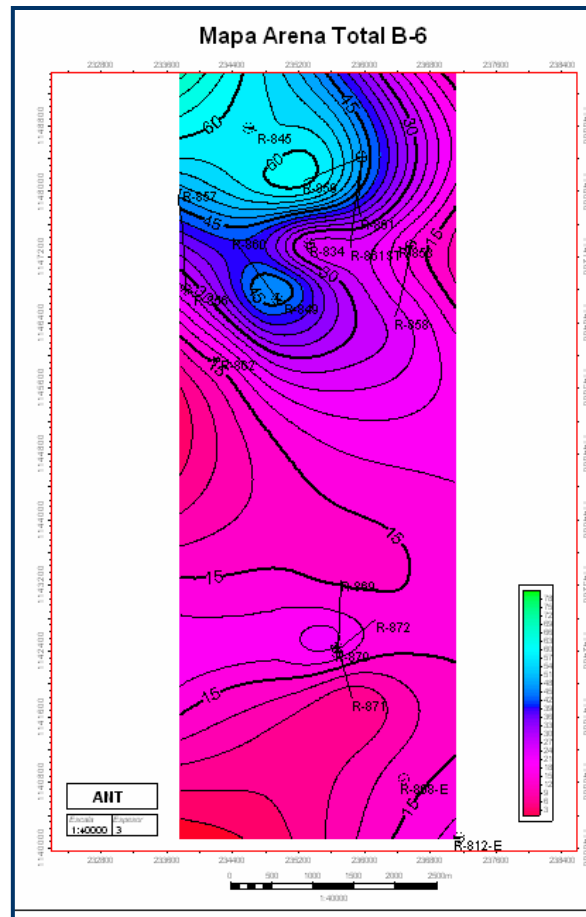


Figura 5.20. Mapa de arena neta para B-6. Se aprecia un espesor constante de 10 pies, con excepción al norte donde los espesores aumentan

5.3.3. Análisis Ambiental de B-6

Los espesores verdaderos de las sub-unidades del yacimiento de B-6 resultan de la correlación de las secciones estratigráficas con registros de rayos gamma y de resistividad para cada sub-unidad.

Se interpretó también la distribución clásica de las arenas y arcillas en el ambiente depositacional correspondiente, además de la dirección de aporte de sedimentos.

El espesor, relativamente constante del tope de B-6 hasta B-7, sugiere que al finalizar la depositación de B-7 el nivel del mar subió, por lo cual no se observan señales de erosión subareal en el área de estudio.

Así como la presencia de cuerpos de arenas con contactos abruptos (*ver pozos de la Figura 5.18*), debido al rápido flujo de depositación en la base de la sub unidad, seguido de una regresión forzosa al final de la depositación, dando lugar a la generación de este tipo de contactos; las bases de las capas de arena con gradación hacia el tope, reflejan una programación litológica más continua de influjo de arena.

La relación favorable entre el contenido de arena neta y los espesores de cada sub-unidad, en el área de estudio, favorece a una interpretación de que el Campo Cabimas estuvo expuesto a regimenes retrogradantes y progradantes, caracterizado por esos abruptos flujos de arena seguidamente de un rápido abandono, teniendo pruebas de una fuerte influencia de mareas.

A su vez, observaciones e interpretaciones derivadas de la correlación de pozos y mapas de arena neta y evaluación de núcleos, tienden a un ambiente de plataforma dominado por mareas (*ver Figura 5.21*).

Asumiendo que la tasa de subsidencia de la cuenca fue constante durante la depositación de B-6, el espesor uniforme por un lado, y la variedad de cuerpos y capas de arena por otro lado, sugiere que la sedimentación en un ambiente marino somero fue sensible a las diversas fluctuaciones del nivel del mar (pequeñas oscilaciones eutocásticas controlados por cambios en el volumen del agua de mar, por influjo de

sedimentos o actividad tectónica que induzca a fluctuaciones de mareas o corrientes locales) (ver *Figura 5.22*).

En la *Figura 5.1*, se señalan los tipos de geometría de la curva de Rayos Gamma (GR) con su interpretación estratigráfica, especificada para ambientes de plataforma dominado por mareas; se observan cuerpos con geometrías de bloque y con gradación hacia el tope, generando cuerpos de arena de mayor magnitud, como lo son los parches de arena, dunas, lomas y barras de arena. Estos cuerpos suelen estar cubiertos por planos de arcilla, debido a la ausencia de fluctuación del nivel del mar, que por ende son los responsables del proceso de sedimentación.

Con un alto influjo de arena en la base y en el medio de B-6, la plataforma interna esta cubierta en su mayoría por capas de arena. Durante el momento en el cual se estaba depositando la sub-unidad de B-6, comenzó un proceso de bajo influjo de arena; la plataforma externa, la cual presenta un mayor contenido lutítico con intercalaciones de arena, retrogradó hacia el suroeste e impulsó a la plataforma interna a moverse en la misma dirección (suroeste).

Los pozos con mayor contenido de arena neta son el R-808 y R-812 (pozos ubicados al sur del campo), que aun no estando dentro del área del Campo Cabimas, dan una fuerte referencia de que esas potentes capas de arena fueron producto de un aporte constante de arena, provenientes de una fuente cercana, como lo son los canales distributarios de un posible delta ubicado al suroeste.

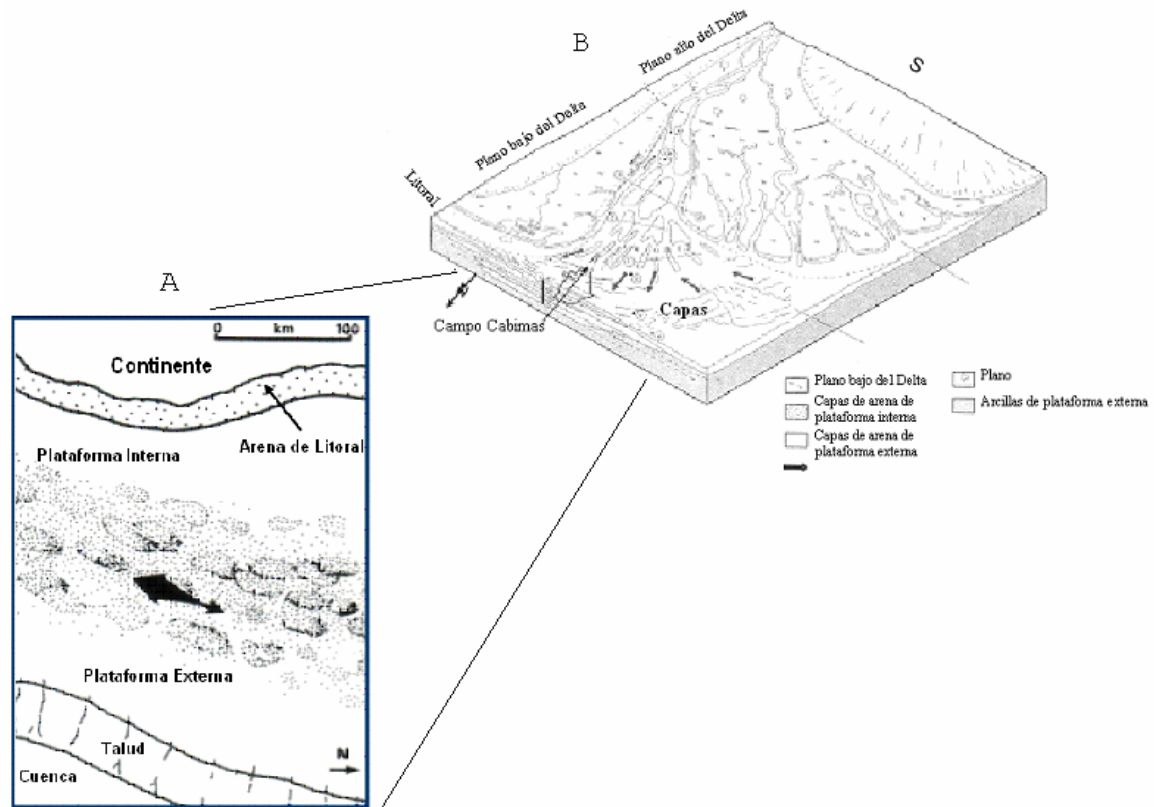


Figura 5.21. A: Reconstrucción paleogeográfica hipotética de parches de arena migrando en dirección SSW, paralelo a la línea de costa (Tomado y modificado de Serra, 1985).

B: Modelo de capas de arena dominados por marea, situado en un ambiente de plataforma marina somera interna y externa

5.4. MAPAS ESTRUCTURALES

La estructura de Cabimas está formada por dos sistemas de fallas principales, el sistema de fallas de Icoatea con una orientación SO a NE, y el sistema de fallas Pueblo Viejo/Tía Juana, con dirección NNO a SSE. La Falla Principal de Cabimas, como parte del sistema de fallas Pueblo Viejo/Tía Juana, atraviesa el centro del campo, ocasionando una separación estructural al este y oeste del campo. La Falla Limite de Cabimas, esta situado en el borde este del campo y representa la segunda falla principal del campo Cabimas.

El tope de la Formación Misoa (*Figura 5.22*) lo representa la discordancia erosional-angular, el cual presenta un buzamiento de entre 6° a 8° en dirección al SO, teniendo forma de monoclinial, y erosionando distintos niveles de Misoa B-Superior. La

unidad de B-3 Inferior es la primera unidad estratigráfica por debajo de la discordancia del Eoceno que no esta parcialmente erosionada

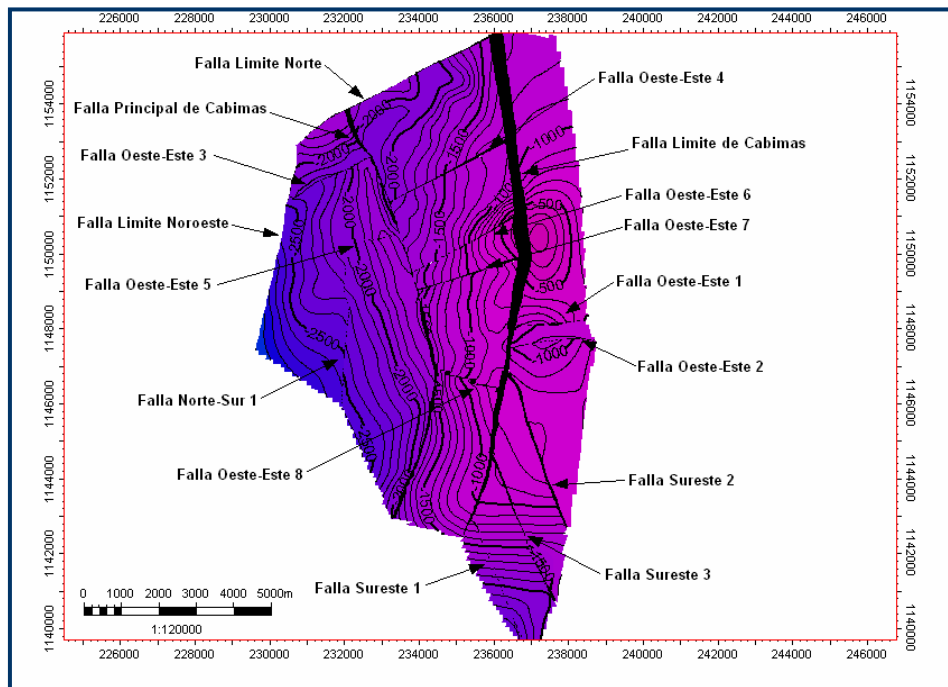


Figura 5.22 Mapa estructural de la discordancia del Eoceno, señalando los nombres de las fallas presentes en el modelo

Los espesores relativamente constantes de las capas de Misoa B-Sup y B-6 indican que las fallas normales principales se crearon después de la depositación de la Formación Misoa. La Falla Principal de Cabimas muestra en los niveles del Eoceno una separación vertical de aproximadamente 1200 pies.

Los mapas estructurales de las unidades de B-6 y B-Superior presentan gran similitud, puesto que en las secciones estratigráficas se evidenciaron que los espesores mantienen una cierta constancia a lo largo del campo.

5.4.1. Interpretación estructural de B-6

El mapa estructural de B-6, mostrado en la *Figura 5.23, Anexo 18*, puede ser apreciado un monoclinal en la parte mas elevada del tope de B-6, el cual presenta un buzamiento de aproximadamente 15° en dirección suroeste, cortado por un sistema de fallas normales. Este sistema de falla normales, a su vez, mantiene deprimida el área

norroeste, formando una especie de graben como también al este del Campo Cabimas. Estas depresiones presentan saltos de más de 1100 pies.

La sección W-E (*Figura 5.24, Anexo 25*) comprueba la existencia del monoclinal limitado por fallas normales, así como el truncamiento entre la Falla Principal de Cabimas contra la Falla Limite de Cabimas al nivel de B-5, hacia el sur del campo.

En la sección N15°W (*Figura 5.25, Anexo 26*) se aprecia también el truncamiento de las dos principales fallas en el campo Cabimas. Además se observa la depresión que esta presente hacia el norte, con un salto de mas de 1000 pies, controlado por la falla O-E 3.

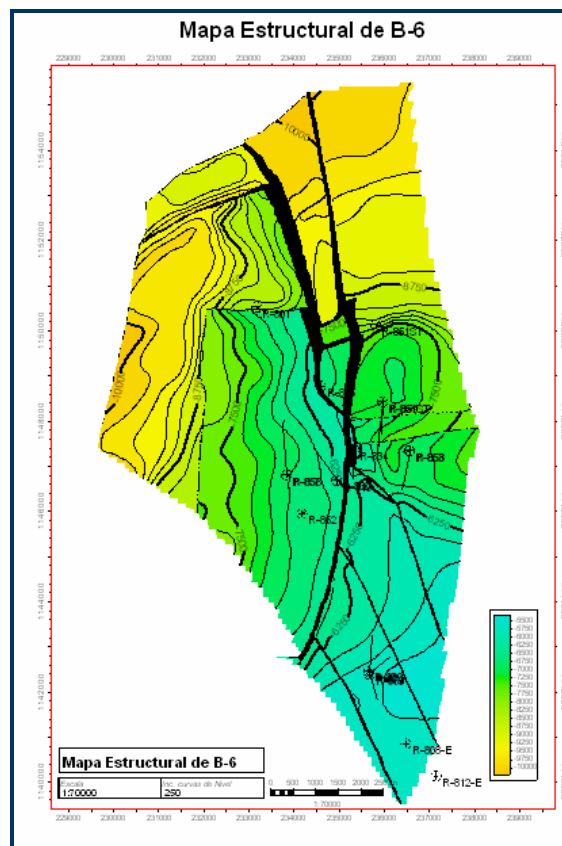


Figura 5.23. Mapa estructural de B-6. Se aprecia el truncamiento de la falla Principal de Cabimas contra la falla Límite de Cabimas.

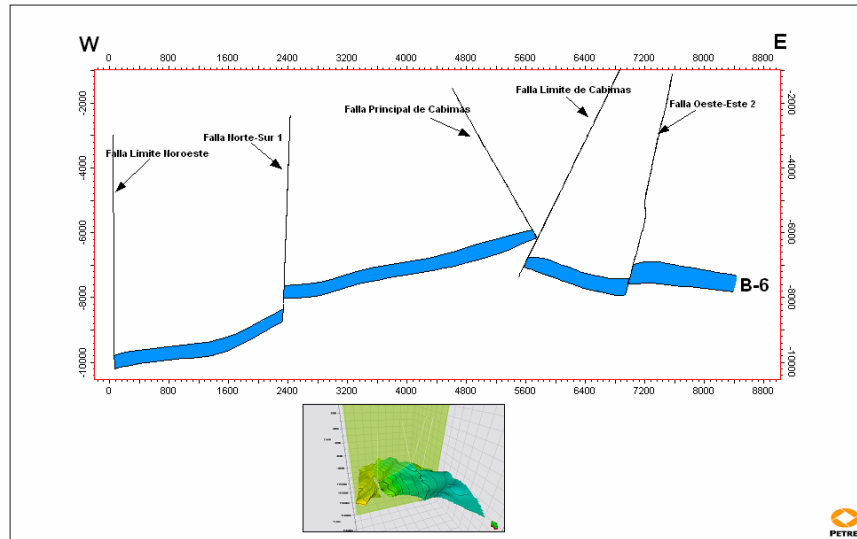


Figura 5.24. Corte estructural W-E de B-6. se observa el truncamiento entre la falla Principal de Cabimas y la falla Limite de Cabimas

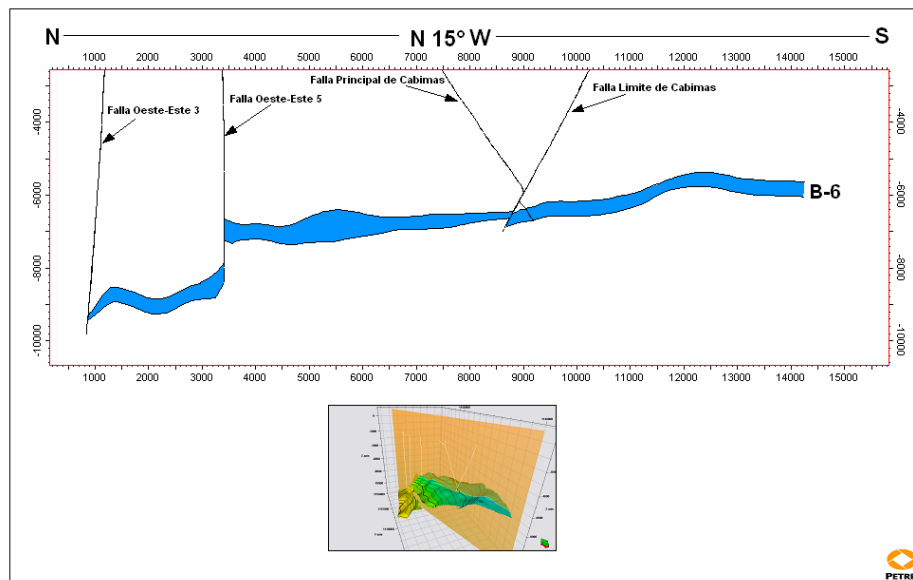


Figura 5.25. Corte Estructural N-S de B-6. La zona estructuralmente más elevada yace al sur del área de estudio

5.4.2. Interpretación estructural de B-Superior

Al observar los mapas estructurales de B-Superior, se puede ver que mantienen una similitud con respecto a la relación que existe entre las fallas y la disposición de los bloques. Se observan dos patrones de fallas principales, pertenecientes a Falla Principal

de Cabimas (Sistema de Falla Pueblo Viejo/Tía Juana), con rumbo NNW-SSE, con un buzamiento aproximado de 70° al este (*ver Figura 5.26, Anexo 27*); y la Falla Limite de Cabimas (Sistema de Fallas de Icotea), presentando un rumbo aproximado de 80° y en dirección al oeste.

A su vez hay un sistema de fallas normales sintéticas, con una orientación casi perpendicular a las fallas principales, con un rumbo aproximado O-E y buzamientos por el orden de los 80° aproximadamente, con sentido norte (*Figura 5.27*).

De tope (discordancia del Eoceno) a base (B-5) de B-Superior, se puede hacer un seguimiento de la convergencia hacia sur, entre las fallas Principal de Cabimas con la Falla Límite de Cabimas. En la *Figura 5.28, Anexo 19 a 24*) ambas fallas, por pertenecer a dos sistemas de fallas distintos y presentar buzamiento en direcciones opuestas, ocurre dicho truncamiento al sur del campo.

El corte estructural en sentido O-E, da una clara visión de la erosión de las unidades suprayacentes de B-Superior causada por la discordancia del Eoceno y afecta específicamente a B-1 y B-2.

Hacia el este del campo se aprecia una estructura en forma de Horst, controlado por las fallas normales de N-S 1 y O-E 3.

En el corte norte-sur, puede observarse que las estructuras mas elevadas están al sur de Campo, y con consecuencia de la erosión de B-1 y B-2 hacia este sector. Por otro lado, las zonas más deprimidas se encuentran al norte del Campo, ocurriendo una mayor preservación de las unidades suprayacentes a la discordancia del Eoceno (*Figura 5.29*).

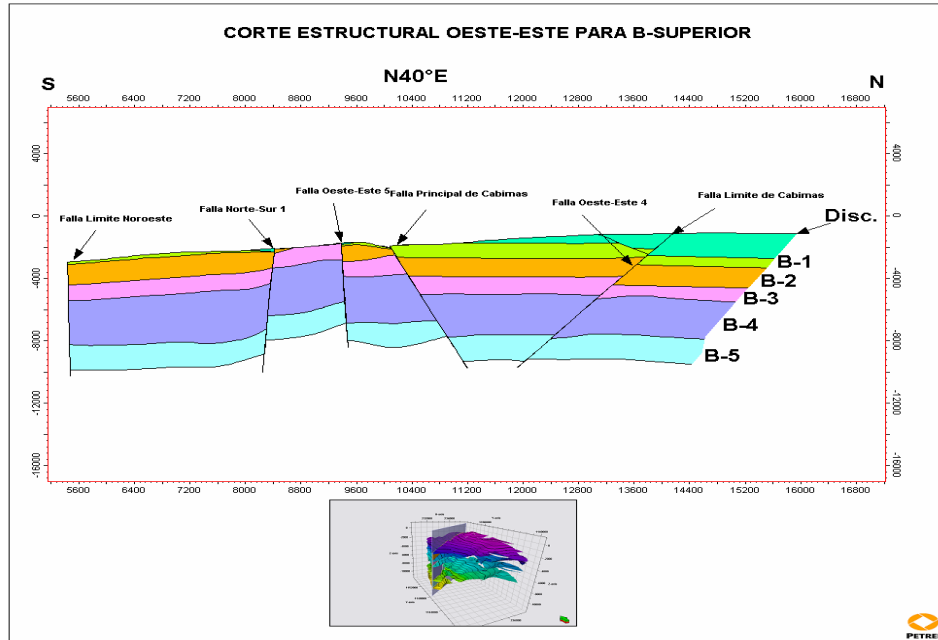


Figura 5.26. Corte estructural W-E de B-Superior. Se puede apreciar al Este una estructura de tipo Horst, y la discordancia al tope.

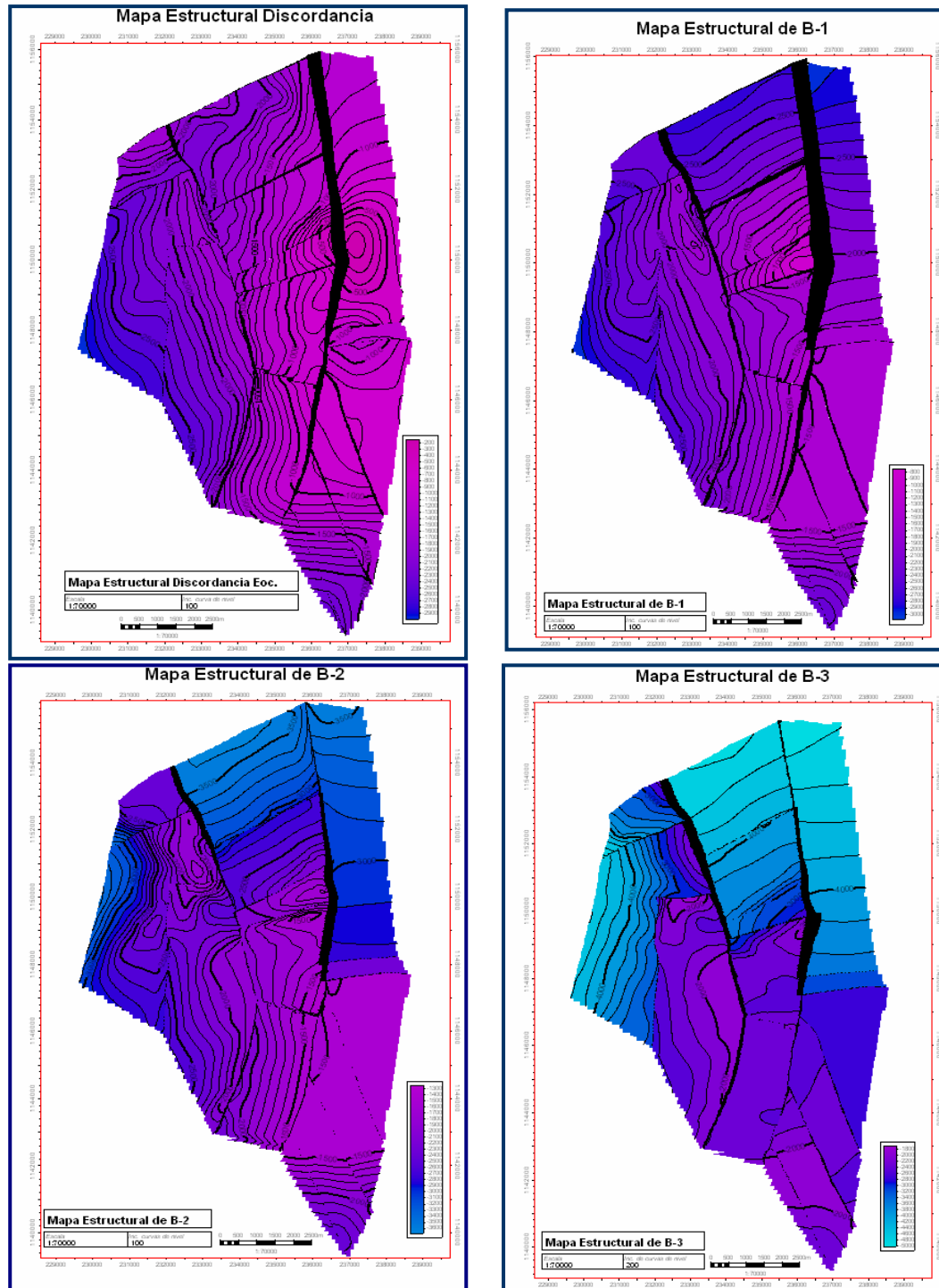


Figura 5.27. Mapas estructurales desde la discordancia (arriba) hasta B-5. De arriba hacia abajo se puede observar a media que se ven los mapas en secuencia, como la falla Limite de Cabimas se va acercando a la falla Limite de Cabimas, al sur de la estructura.

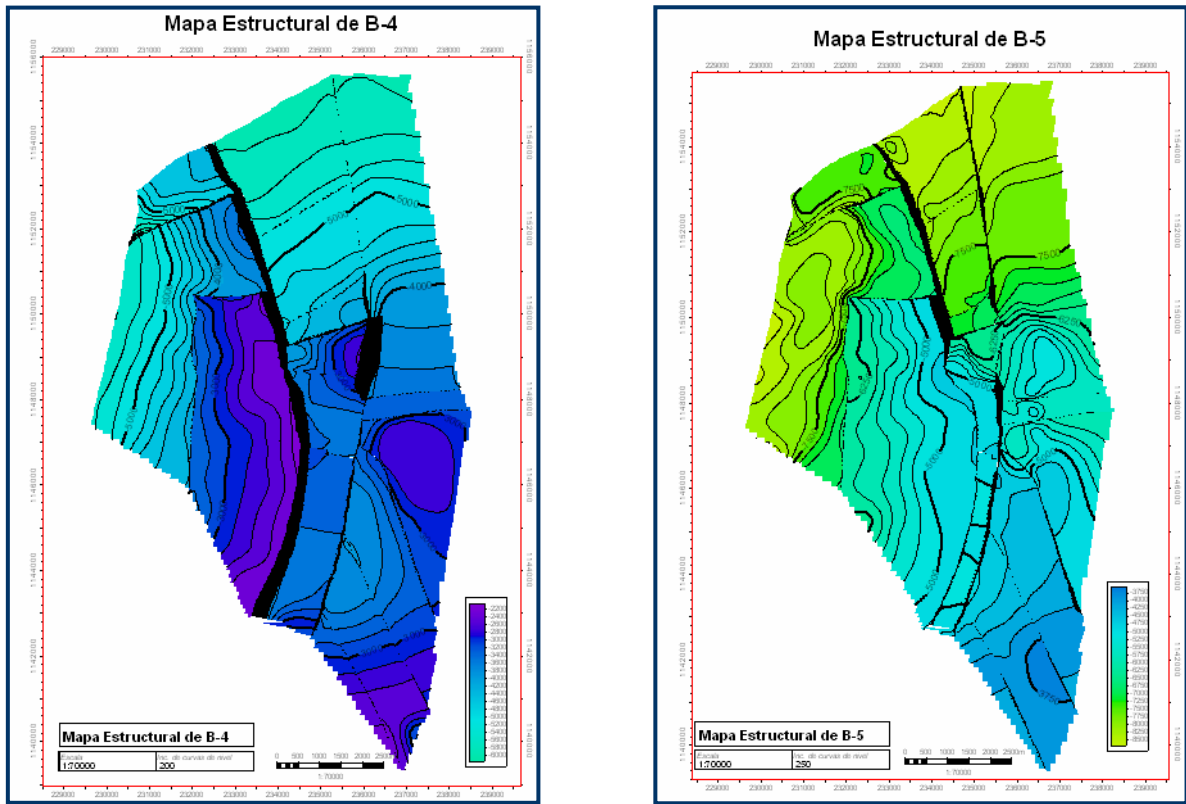


Figura 5.27. Continuación de la Figura anterior 5.27, proveniente de la página anterior

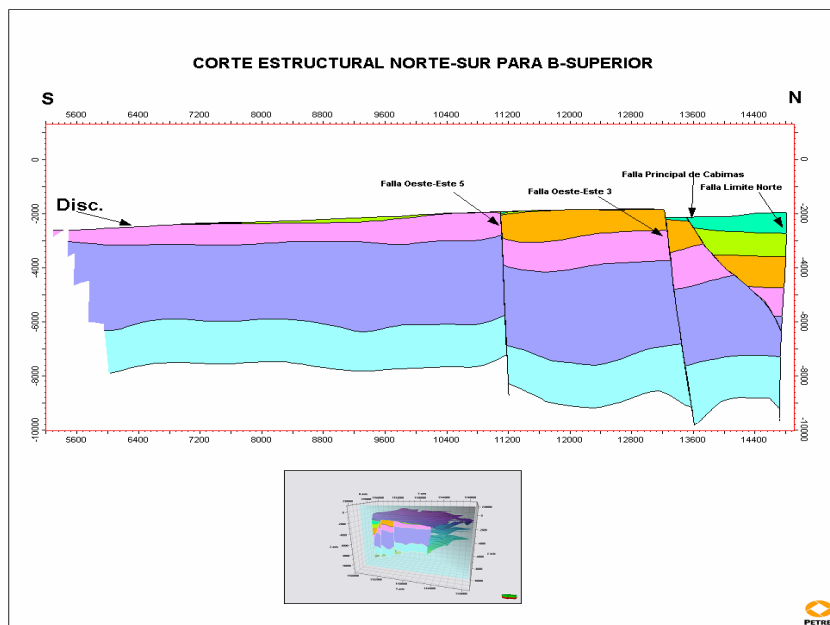


Figura 5.28. Corte estructural N-S de B-Superior. Se aprecia como las unidades de B-1 y B-2 han sido erosionadas por la discordancia.

5.5. MODELO 3D DEL CAMPO CABIMAS PARA B-6 Y B-SUPERIOR

Es una realidad de que todos estos tipos de estudios que han sido realizado durante muchos años, hayan sido plasmados en mapas, registros con curvas evaluadas para extraer propiedades petrofísicas, etc. Siendo obvio, que el tipo de visualización sea en dos dimensiones, de forma areal (X y Y), y mostrando su componente vertical ya sea mediante curvas nivel o por curvas de isopropiedades.

En esta sección, del capítulo de Resultados y Análisis, se van a mostrar los resultados y análisis previamente realizados, en tres dimensiones, mostrando en todo momento, la componente vertical (Z) del modelo estratigráfico de B-6 y B-Superior. Proporcionando una innovadora forma de visualizar volúmenes de yacimientos en el subsuelo, lo mas real posible, con la finalidad de poder reducir cada vez mas el grado de incertidumbre a la hora de realizar tomas de decisiones sobre el modelo de un yacimiento.

5.5.1. Modelo estructural 3D

5.5.1.1. Modelo de Fallas

La *Figura 5.29.* muestra la configuración de fallas que esta presente en el Campo Cabimas, entre las unidades de de B-6 y B-Superior, hasta la Discordancia del Eoceno, en el tope.

Las fallas principales que dominan estructuralmente a estas unidades son la Falla Principal de Cabimas y la Falla Límite de Cabimas, mostradas en la *Figura 5.29.* Dichas fallas presentan sentidos de buzamientos opuestos, en donde la Falla Principal de Cabimas se encuentra buzando hacia el este con una inclinación de aprox. 75°. En el caso de la Falla Límite de Cabimas, está se encuentra buzando hacia el oeste presentando una inclinación de 80° aprox.

Como se observa en la *Figura 5.30, Anexo 29,* la Falla Límite de Cabimas, la cual presenta un buzamiento menor, se trunca contra la Falla Límite de Cabimas hacia el sur del campo Cabimas, producto de los regimenes compresivos en esta zona. Dicha

configuración estructural fue creada por la colisión entre la Placa del Caribe contra la Placa de Suramerica, la cual generó grandes esfuerzos con componentes transpresivos, representado por la Falla de la Oca con rumbo Este-Oeste.

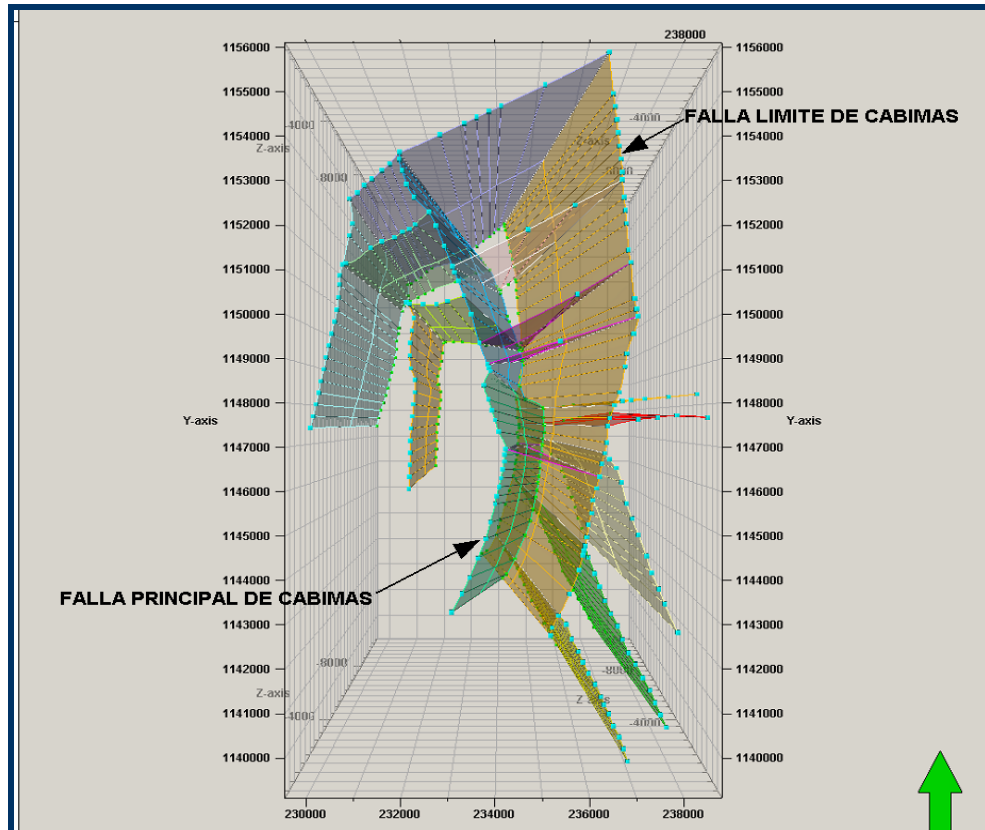


Figura 5.29. Modelo de fallas de B-6 y B-Superior en vista de planta. Se observa la configuración estructural de las fallas que controlan el modelo 3D

Este régimen de esfuerzos compresivos y laterales, generó sistemas de fallas normales de componente sinistral, presentando rumbos NNE (Sistema de Fallas de Urdaneta e Icotea), y sistemas de fallas normales con componente dextral con rumbos NNO (Sistema de Fallas de Tía Juana y Pueblo Viejo, y Burro Negro).

Hacia el sureste del campo se observa un sistema de fallas normales con rumbo N30W y buzamiento de 85° con sentido suroeste (fallas sureste 1, 2 y 3), pertenecientes al sistema de fallas de Tía Juana.

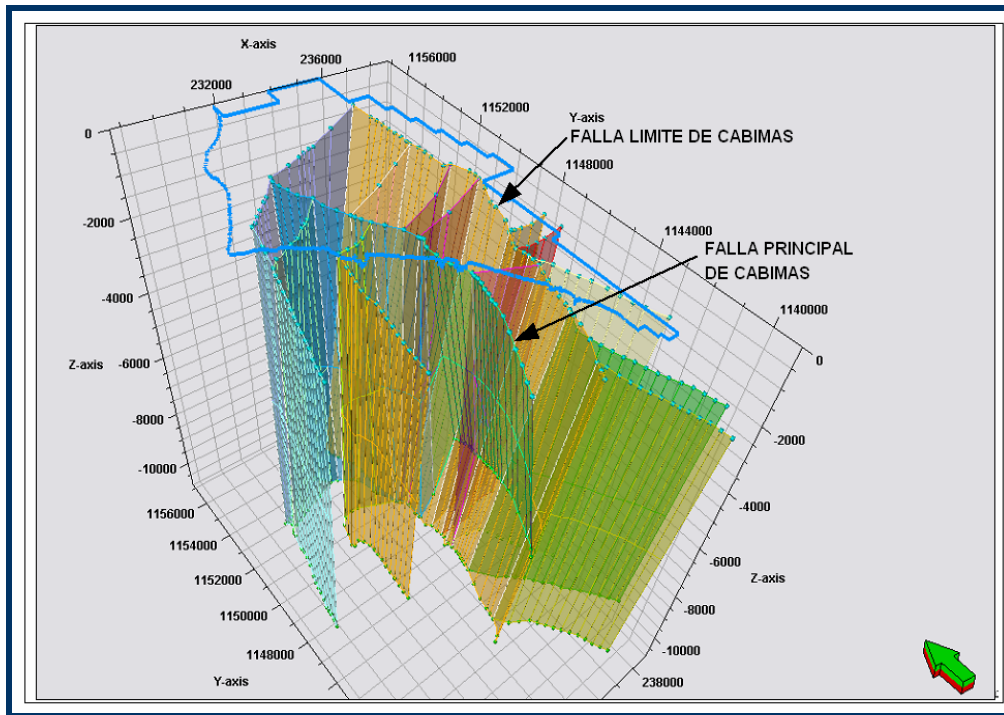


Figura 5.30. Modelo de fallas 3D con viste desde SW

Al noroeste del campo se aprecian fallas normales con rumbo NNW, representadas por las fallas Limite noreste (falla que limita al modelo hacia el oeste del Campo Cabimas) y N-S 1. Estas fallas no presentan buzamiento, siendo fallas verticales.

Hacia el norte se presenta una falla llamada Falla Limite Norte la cual limita estructuralmente al modelo. Esta falla presenta un rumbo aproximado N60E con un buzamiento de 80° hacia el sur. Esta falla forma parte de un sistema de fallas con el mismo rumbo, donde las demás fallas están representadas de norte a sur por: F. Oeste-Este 4, F. Oeste-Este 6, F. Oeste-Este 6, F. Oeste-Este 7, F. Oeste-Este 1, F. Oeste-Este 2 y F. Oeste-Este 8 (esta presenta rumbo de N75E).

5.5.1.2. Estructuras

Los horizontes de B-Superior muestran similitud entre cada una de ellos, estos es debido a que primero ocurrió la sedimentación y luego los eventos tectónicos donde hubo la secuencia de fallamientos en todo el Campo Cabimas. Dicha afirmación es confirmada por los espesores constantes para todas las unidades, tanto B-6 como B-Superior, con

excepción de B-2 y B-1, donde la Discordancia del Eoceno erosionó gran parte de sus estructuras.

Es por esto que los bloques tectónicos más importantes que están presentes en B-Superior exhiben poca variación estructural. Para describir los principales rasgos estructurales en B-Superior, se va a tomar como ejemplo a B-5, visto en las próximas Figuras a mostrar.

El tope del modelo esta representado por la Discordancia del Eoceno, caracterizado pero ser un monoclinal con buzamiento al suroeste. Dicha discontinuidad, erosionó de forma angular a las unidades superiores de B-Superior, como B-1 y B-2. Estas unidades se preservan al este del Campo Cabimas (*ver Figura 5.31*).

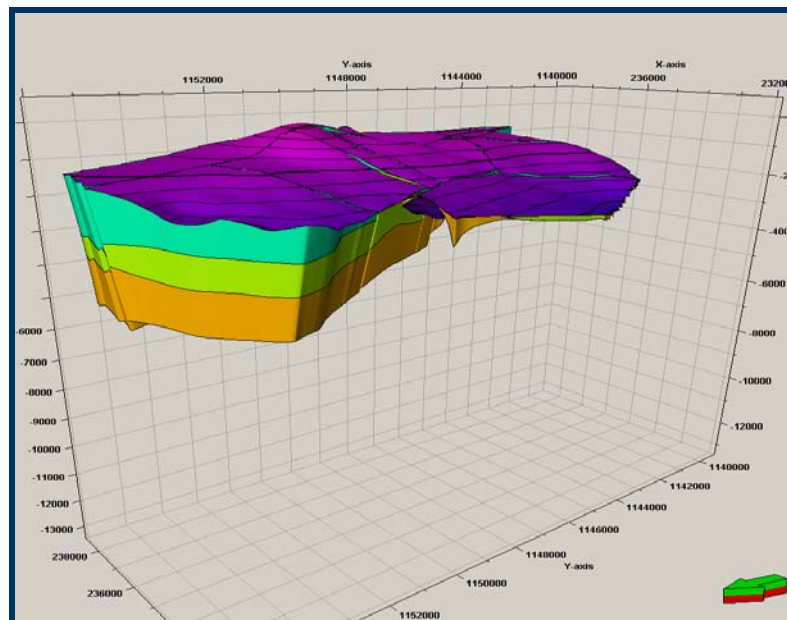


Figura 5.31. Discordancia del Eoceno en el tope. Se aprecia como dicha estructura erosiona las unidades de B-1 y B-2 hacia el oeste.

Las estructuras observadas en B-5 están dominadas por fallas con componente normal y alto grado de buzamiento. A continuación se nombran las estructuras más predominantes en B-5:

- **Monoclinal:** Esta estructura está ubicada en la región oeste del modelo presentando un buzamiento de 10° al suroeste. Se encuentra limitado al oeste

por la falla Norte-Sur 1, al norte por la falla Oeste-Este 5, al Este por la falla Principal de Cabimas y al sur por el límite del Campo Cabimas. Todas las fallas presentan alta componente vertical, observándose saltos de falla entre los 600 pies al oeste, 1.400 pies al norte y 250 pies aprox. al este (ver Figura 5.32, Anexo 30).

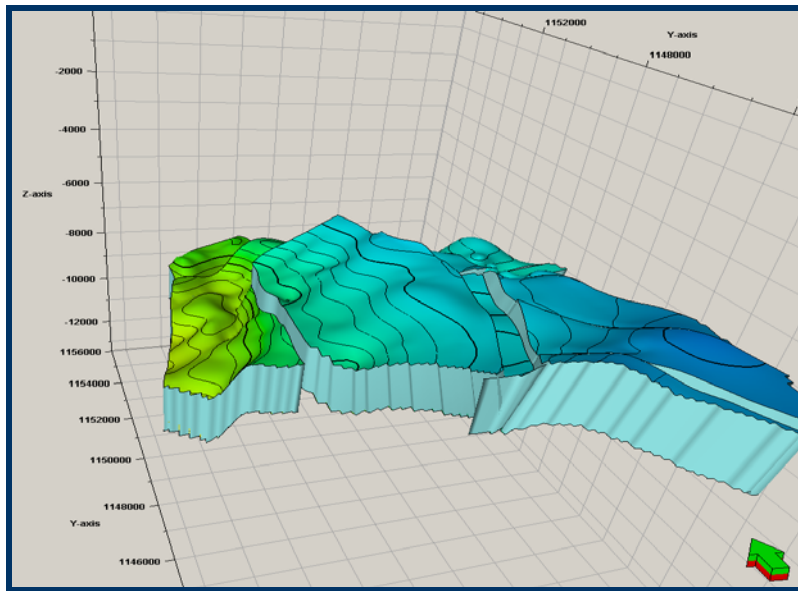


Figura 5.32. Unidad de B-5. Al oeste se observa una estructura tipo monoclinal, y al este de esta estructura se observa el graben, causado por el truncamiento entre las fallas Límite y Principal de Cabimas.

- **Graben:** Se encuentra ubicado en la región central del modelo (ver Figura 5.32). Esta estructura está limitada al oeste por la falla Principal de Cabimas, al este por la falla Límite de Cabimas, al norte por la falla Oeste-Este 8 y al sur por el límite del Campo Cabimas. Dicha estructura fue originada por el truncamiento de la falla Principal de Cabimas con la falla Límite de Cabimas, presentando saltos de falla de 300 pies al oeste y 500 pies al este.
- **Monoclinal Fallado:** Dicha estructura, como se puede observar en la Figura 5.33, está ubicada al noreste del modelo, y está caracterizada por ser un volumen estrecho y alargado, presentando un buzamiento de unos 5° al norte. Se encuentra limitada al oeste por la falla Principal de Cabimas, al este por la falla Límite de Cabimas, al sur por la falla Oeste-Este 7, y al norte por la falla Límite Norte. La zona más elevada de la estructura se encuentra hacia al sur,

observándose un sistema de fallas normales generando un escalonamiento en dirección al sentido del buzamiento del monoclinial. El salto de falla más representativo es de 1100 pies con respecto a la falla Principal de Cabimas.

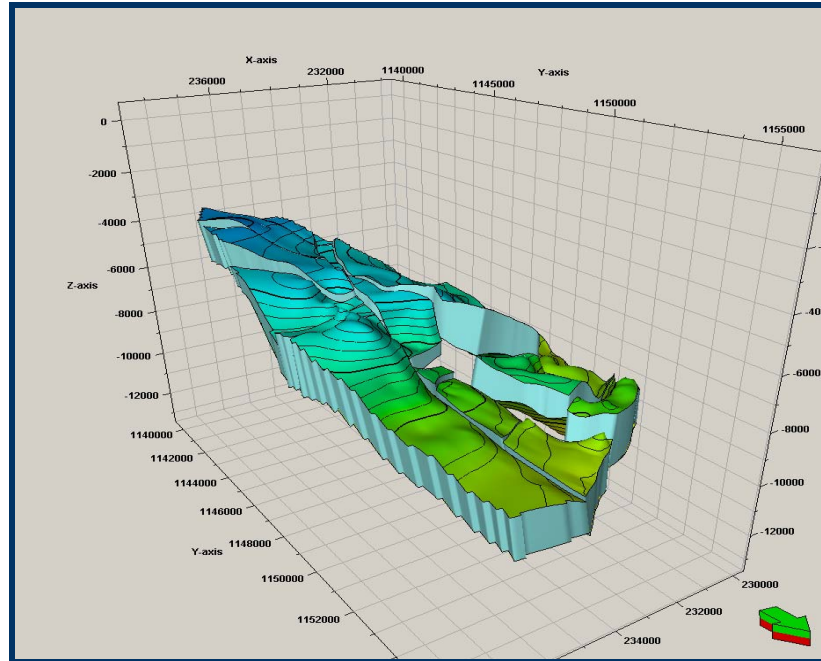


Figura 5.33. Unidad de B-5 con vista desde NE. Se observa la estructura tipo monoclinial fallado el cual esta buzando al norte.

Para B-6, las estructuras presentes son similares a las de B-Superior, la única diferencia notable es la ausencia del graben, ubicado entre el truncamiento de la falla Principal de Cabimas y la falla Limite de Cabimas, ya que dicho truncamiento ocurrió a nivel de B-5 (ver *Figura 5.34, Anexo 31*).

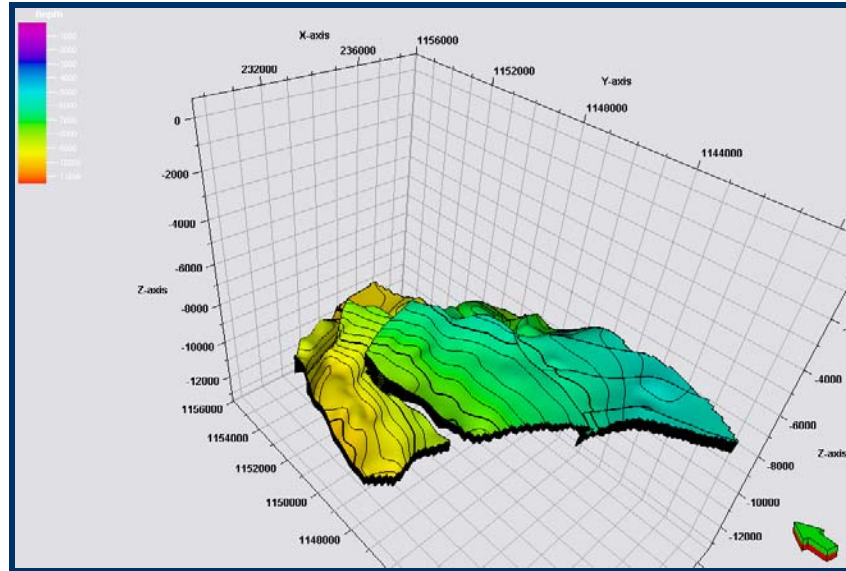


Figura 5.34. Unidad de B-6, apreciándose la ausencia de la estructura tipo graben, puesto que en B-5-Inf. ocurrió el truncamiento entre las fallas Principal de Cabimas y la falla Límite de Cabimas.

Cabe destacar que la zona más elevada de B-6 se encuentra al sur del Campo Cabimas (pozo R-808: -5600 pies de profundidad). La estructura va tendiendo a profundizarse hacia el norte, siendo el pozo R-801 en el que se observa una mayor profundidad para B-6 con -8040 pies.

5.5.1.3. Modelo Estructural final

Como lo muestra la *Figura 5.35, Anexo 32 y Fig. 5.36*, se puede apreciar resultado final de todo el proceso del modelado estructural en B-Superior y B-6, pudiendo observarse en verdadero tamaño los espesores y volúmenes de cada unidad, los diferentes bloques estructurales limitados por las fallas y su configuración estratigráfica.

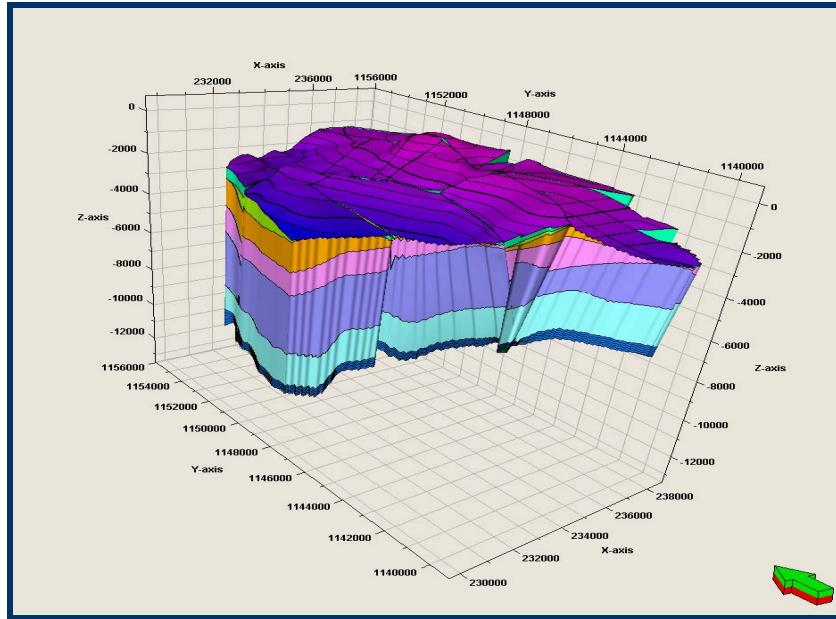


Figura 5.35. Modelo 3D de las unidades de B-6 y B-Superior de la formación Misoa. Vista desde suroeste

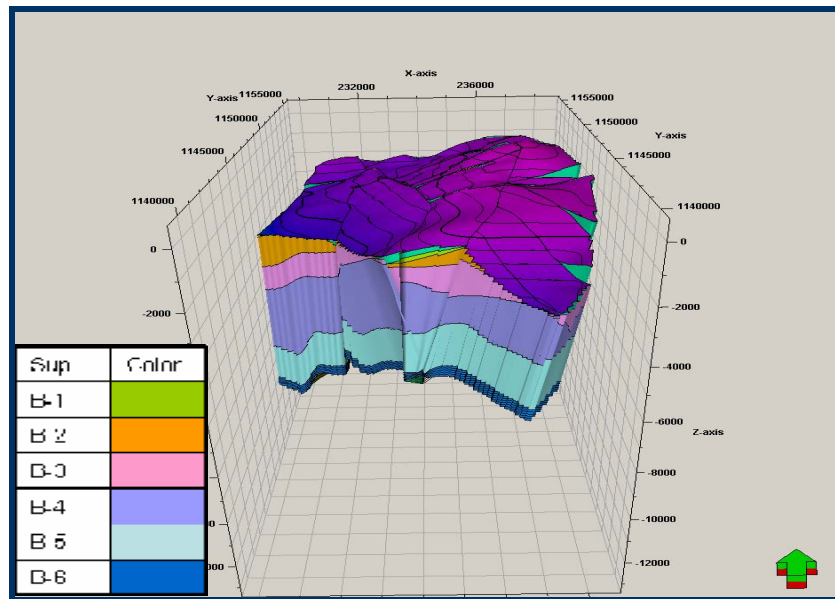


Figura 5.36. Modelo 3D de las unidades de B-6 y B-Superior de la formación Misoa. Vista desde el sur

5.5.1.4. Modelo estratigráfico para B-6

El modelado de facies se realizó con métodos geoestadísticos (*ver Apéndice*) para la distribución de propiedades en las celdas que pueblan el modelo 3D. Esto se debe a que, si bien se estableció buen control estratigráfico en forma vertical, por medio de los registros, desde el punto de vista de extensión estratigráfica horizontal ó areal es donde realmente aplican estos métodos (*ver Figura 5.37, Anexo 33*).

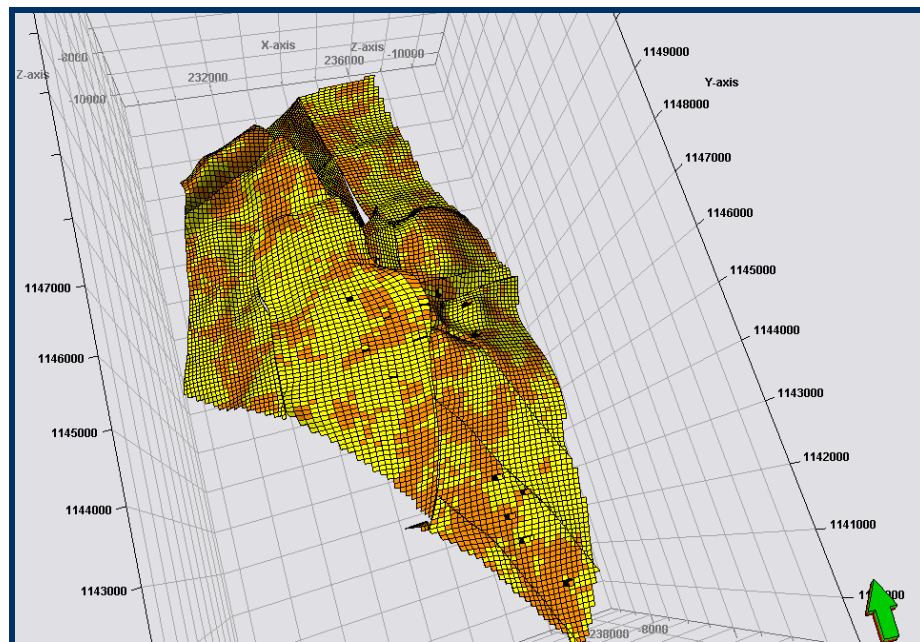


Figura 5.37. Modelo de facies en B-6, representando los cuerpos de arena irregulares, en forma de parches o capas. El color amarillo representa la litología de arena, y de color marrón los depósitos de lutita

Como este modelo se creó con el propósito de que fuese empleado a futuro para un modelo dinámico de fluidos, se agruparon las facies clásticas en una sola, y otro grupo para las facies arcillosas.

En la creación de capas o “layers”, se midió el espesor promedio de la unidad de B-6 y, sabiendo los espesores promedios de los cuerpos de arenas de mayor relevancia para el modelo, se generaron 20 capas con la finalidad de que el escalamiento del registro de facies se adecuara lo más real posible al registro de facies que se interpretó previamente, por medio de los registros de rayos gamma y de porosidad (*ver Figura 5.38*).

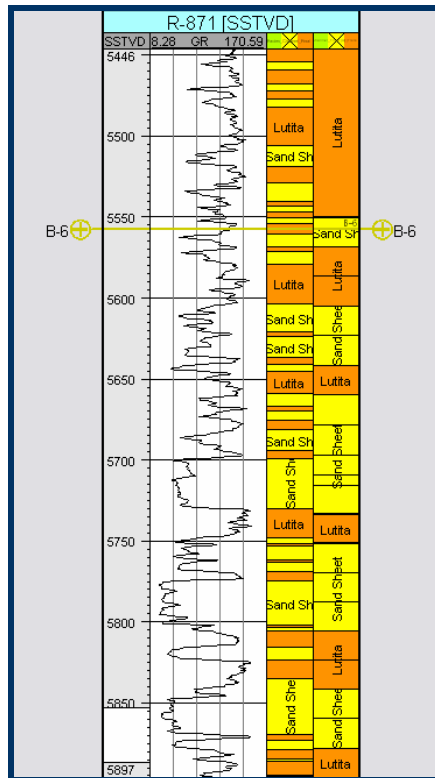


Figura 5.38. Registro de facies escalado (extrema derecha) a partir de un registro de facies discreto, el cual fue creado a partir de las curvas de Rayos Gamma (GR)

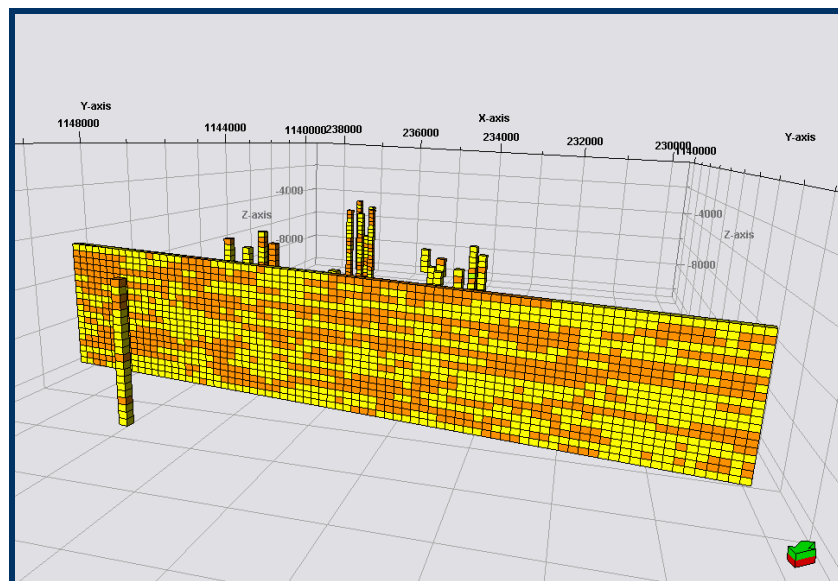


Figura 5.39. Sección E-O del modelo de facies para B-6, con ausencia de estructuras, con la finalidad observar la distribución de facies horizontalmente. Se observan depósitos de capas de arenas con alternancias de lutitas, dispuestos de forma horizontal.

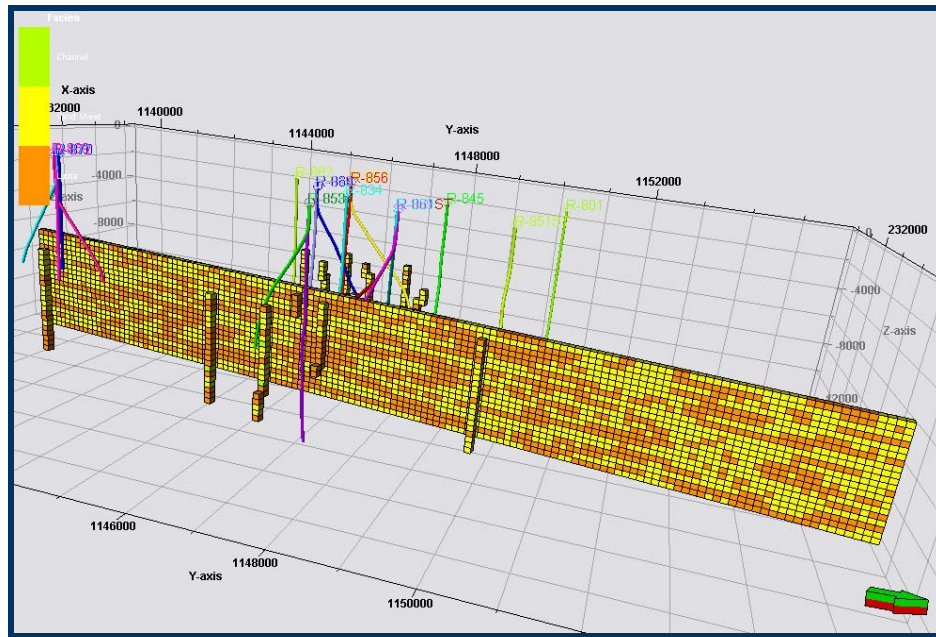


Figura 5.40. Sección N-S del modelo de facies para B-6.

5.5.1.5. Modelado Petrofísico

De igual forma, se modeló la porosidad efectiva a partir del modelo de facies, la cual forma parte de la base para el modelado de dichas propiedades petrofísicas. Para estos modelos se utilizó el método geostatístico (*ver Apéndice*) de simulación secuencial gaussiana, ya que es la que mejor se adapta para este tipo de modelado.

Como se observa en la *Figura 5.42* los colores mas claros presentan una mayor porosidad. Para esta capa o layer, se observa que al sur se exhibe una buena porosidad efectiva, partiendo de la premisa que el parámetro de corte dado por estudios petrofísicos previos es del 5% para las arenas. Esto se debe a una gran compactación y segmentación de cuarzo entre los granos, según análisis petrofísicos y petrográficos.

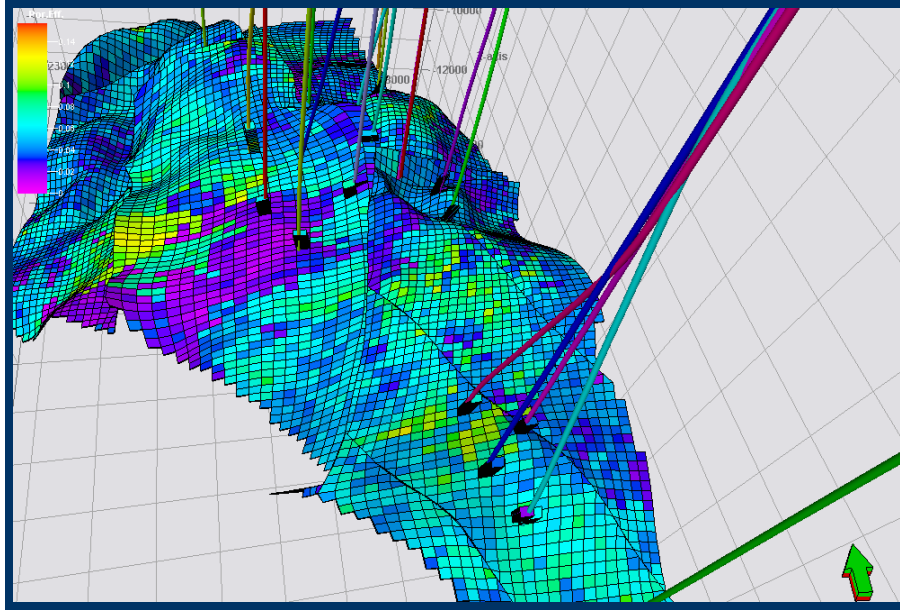


Figura 5.41. Modelo de porosidad efectiva para B-6, creado a partir de curvas evaluadas en trabajos previos. Los colourees mas claros indican una mejor porosidad, por lo tanto de puede observar que hacia el sur del modelo, las arenas tienden a tener mejor calidad de yacimiento, según el modelo.

CAPÍTULO VI:

SUMARIO, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. SUMARIO

El presente arrojó un modelo estratigráfico 3D para las unidades de B-6, pertenecientes a la Formación Misoa en el Campo Cabimas, Campo Costanero Bolívar, Edo. Zulia.

- Se utilizaron topes estratigráficos de B-6 y B-Superior, mapas estructurales de la Discordancia del Eoceno, B-4 y B-6, con la finalidad de generar las superficies y posteriormente los horizontes de los topes de cada sub unidad.
- Se elaboró el mapa base en la cual se señalaron las secciones estratigráficas paralelas a la dirección de sedimentación y perpendicular a ella, para las unidades B-6.
- Se revisaron evaluaciones de núcleos con fotografías de cada uno de los intervalos extraídos, con la finalidad de poder calibrar de manera mas real las curvas de rayos gamma para los diferentes pozos que contengan núcleos, a fin de poder extrapolar la información al modelo.
- Las secciones estratigráficas se crearon utilizando como datum el tope de la sub unidad B-6-B2 para la correlación, a fin de identificar los cuerpos arenosos y sus variaciones laterales.
- Se generaron mapas de arena neta para las sub unidades presentes en B-6, con la finalidad de evaluar la tendencia de la depositación de las arenas.
- Se creó un modelo de fallas 3D extrayendo las trazas de fallas de los mapas estructurales.
- Se elaboraron superficies de los topes de las unidades de B-6 y B-Superior, a partir de topes, mapas estructurales e interpretaciones previas.

- A partir de las superficies creadas previamente, en conjunto con el modelo de falla, se crearon los horizontes estructurales de todas las unidades, observando así, las estructuras presentes en el modelo 3D.
- Se realizó un modelo de facies 3D para B-6, a partir de un registro discreto que se elaboro a través de curvas de rayos gamma y porosidad, tomando en cuenta el número de capas que se le asignó a B-6.
- Elaborar un modelo 3D de porosidad efectiva para B-6 a partir de registros de porosidad evaluados dados por la compañía, mostrando la distribución de propiedades en el modelo.
- Las facies interpretadas en la unidad de B-6 son en base a electrofacies definidas por un modelo conceptual propuesto por Higgs (1996) y por evaluaciones de núcleo en unidades infra suprayacentes, lo cual da una aproximación de los tipos de facies señalados.
- Los tipos de cuerpos de arena predominantes en B-6 son en forma de bloques, tipo 3, con contacto abrupto en base y tope; y cuerpos de arena con gradación hacia la base y abrupto hacia el tope.
- La lutita que se utilizó como datum estratigráfico para correlacionar las sub unidades de B-6, fue la del tope de B-6-B6, siendo esta la que mejor se identifica en los demás pozos dentro del área de estudio.
- Las estructuras sedimentarias observadas con mayor frecuencia en los análisis de núcleos son la estratificación cruzada planar, estratificación cruzada tipo espina de pescado y rizaduras, los cuales son frecuentes en este tipo de ambientes marino somero.
-

6.2. CONCLUSIONES

- El espesor relativamente constante del tope de B-6 hasta B-7, sugiere una depositación constante de sedimentos en el área de estudio, durante el Eoceno Medio.
- El marco estructural del modelo esta caracterizado por presentar fallas normales de alto ángulo con rumbos noroeste y noreste, pertenecientes a los sistemas de falla de Icoatea y Tía Juana/Pueblo Viejo. Dichas fallas fueron modeladas a partir de la conexión de trazas de fallas extraídas de mapas estructurales realizados en trabajos anteriores, siendo bien amarrados a pozos que hayan visto fallas. A pesar de esto, este marco estructural no ha sido confirmado por una interpretación sísmica, debido a la ausencia de una sísmica de buena resolución, lo cual hace que se genere cierta incertidumbre en el modelo.
- Para el modelado de facies en 3D se utilizo el método geoestadístico estocástico de simulación secuencial indicadora, para la distribución de facies para B-6. Con vista a que dicho modelo sea utilizado para un modelo dinámico, se unificaron las facies clásticas, por un lado, y las facies lutíticas por otro lado, a fin que quedara representado los principales cuerpos de arena en el modelo.
- La etapa en la cual se dedico más tiempo fue en la de modelado estructural, en el modelado de todas las fallas presentes en el modelo, así como en la generación de los horizontes a partir de las superficies. Esto es debido a que, como se dijo anteriormente, se carece de una sísmica en donde se pueda realizar interpretaciones de fallas y horizontes con una gran densidad de puntos interpretados por cada superficie. Esto indica que se tuvo que trabajar minuciosamente junto con los mapas estructurales, para llevar a cabo el modelo estructural lo más real posible.
- Se considera realmente cuesta arriba, para un trabajo especial de grado, un estudio estratigráfico-estructural que integre B-6 y todo B-Superior, lo cual se

esta hablando de una columna estratigráfica con un espesor aproximado de 7400 pies.

- Una zona que se propondría como posible prospecto de pozo, sería al Sur del Campo Cabimas y del área de estudio, puesto que estructuralmente es la zona más elevada en B-6, y donde se reportan mejor calidad de roca, visto en el modelo de porosidad efectiva al sur del área de estudio.

6.3. RECOMENDACIONES

- Realizar un levantamiento sísmico 3D de alta resolución, con la finalidad de realizar toda la interpretación de fallas y de los horizontes de las unidades principales. Todo esto es con la finalidad de reducir el grado de incertidumbre a la hora de crear el modelo estructural, el cual abarca el modelado de fallas en el área de estudio y la posterior generación de horizontes a partir de los horizontes sísmicos.
- A la metodología que se aplicó para este trabajo especial de grado, se le agregaría una interpretación estructural detallada mediante sísmica 3D, con la finalidad de lograr tener un mejor control estructural de la zona de estudio.
- Realizar un estudio más detallado para cada unidad, definiendo de forma más precisa las facies presentes en las zonas de estudio.
- Crear modelos 3D en los campos adyacentes al Campo Cabimas, con el principal objetivo de unificar la información que haya en cada uno de estos campos, y tener una mejor visualización y entendimiento del marco, tanto estructural, como estratigráfico de toda la Cuenca de Maracaibo, para estas unidades en específico.
- Estudiar la factibilidad de crear una campaña exploratoria hacia la zona que se encuentra ubicada entre los dos grupos de pozos en B-6, mas alineados con los pozos ubicados más al sur del campo. Y tener un mejor control estratigráfico.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BOGGS, S.. (1995). **Principles of Sedimentology and Stratigraphy**. Second Edition. Prentice Hall. Oregon USA. 407 - 463.
- BRONDIJK, J. F.. (1967). **Contributions of the A. V. G. M. P. Maracaibo Basin Nomenclature committee: III The Misoa and Trijillo Formations**. Asociación Venezolana de Geología, Minería y Petroleo 10(1). Caracas Venezuela. 3 - 19.
- CASTILLO C., M. V.. (1995). **Procedencia de las rocas clásticas del Eoceno en el sector oriental de la Cuenca de Maracaibo y su relación con la tectónica caribe y andina**. Trabajo Especial de Grado, Inedito. Universidad Central de Venezuela. Caracas Venezuela. .
- CHACARTEGUI, F. J.; J. CASAS; L. CABRERA DE CASAS. (1997). **Control de las facies sedimentarias sobre la acumulación y producción de hidrocarburos. Formacion Misoa. Lago de Maracaibo**. I congreso latinoamericano de sedimentologia. Caracas Venezuela. 185 - 192.
- DA SILVA, C.. (2006). **Evaluación Geoestadística 3D de Calidad de Roca. Campo Santa Barbara, Venezuela**. Trabajo especial de grado. Magister Scientarium en Geofísica. UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geofísica.. Caracas Venezuela. .
- DE TONI, B.; D. LOUREIRO; B. COLLETTA; F. ROURED; Y. GOU y C. MARQUEZ. (1994). **Análisis geológico integrado de las cuencas Barinas y Maracaibo**. Informe Interno 02963,94 INTEVEP, S.A.. Caracas Venezuela. .
- FELDER, B.; A. BRIE; J. GARTNER; V. HEPP, M. HRABIE; M. KERVELLA. (1980). **Evaluación de Formaciones en Venezuela**. Schlumberger. Caracas Venezuela. 1 - 23.
- GHOSH, S.ODREMAN, O.. (1989). **Estudio sedimentológico-paleoambiental del Terciario en la zona del valle de San Javier, Edo.Merida**. Sociedad Venezolana de Geología. Caracas Venezuela. 3 - 46.

- GHOSH, S.; P. PESTMAN; L. MELENDEZ; M. LORENTE; E. ZAMBRANO. (1997). **El Eoceno en la Cuenca de Maracaibo: Facies Sedimentarias y Paleogeografía**. I congreso latinoamericano de sedimentología. Caracas Venezuela. 283 - 293.
- GONZALEZ DE JUANA, C.; J. ITURRALDE; X. PICARD. (1980). **Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas**. Tomo II. Caracas Venezuela. 462 - 480.
- GRAVES, G. R.. (1985). **Ambientes sedimentarios y entrapamiento de hidrocarburos en las arenas “B” superiores de la Formación Misoa en el área LL-370, Lago de Maracaibo**. VI Congreso Geológico Venezolano. Caracas Venezuela. 3085 - 3101.
- HIGGS, R.. (1999). **Facies analysis of cores interpreted depositional environment and predicted reservoir geometry, misoa formation, wells R-824, 825, 834 & 835, Cabimas field, Venezuela**. Informe Interno Schlumberger. Caracas Venezuela. .
- HIGGS, R.. (1996). **A new facies model for the misoa formation (Eocene)**. Venezuelas main oil reservoir in journal of sedimentary petrology. Vol 19 (3). . 249 - 269.
- LUGO, J; P. MANN. (1995). **Jurassic - Eocene tectonic evolution of Maracaibo Basin Venezuela**. Petroleum Basins of Southamerica - A.A.P.G. Memoir. . 699 - 725.
- LUGO, J. (1994). **Control Tectónico sobre la sedimentación desde el mesozoico tardío hasta el cenozoico temprano en el occidente venezolano..** Simposio Bolivariano - Exploración petrolera en cuencas subandinas. . 291 - 310.
- MARQUEZ, F; G. BERTORELLI; E. ZAPATA; V. PADRON; O. REY y R. FALCON. (1997). **Ambientes depositacionales de la Formación Misoa, Serranía de Trujillo, Zulia oriental**. I congreso latinoamericano de sedimentología. Caracas Venezuela. 23 - 27.

- MARQUEZ, F; BERTORELLI, G.. (1996). **Determinación de ambientes sedimentarios y fuente de aporte de sedimentos, para el Eoceno en un area de Zulia Oriental, Edo. Zulia.** Departamento de Geología; Escuela de Geología, Minas y Geofísica; Facultad de Ingeniería; UCV. Caracas Venezuela. 280.
- MELENDEZ, L.; S. GHOSH; P. PESTMAN. (1996). **El Eoceno en la Cuenca de Maracaibo: Evolución tectonosedimentaria.** 8vo Congreso Venezolano de Geofísica. Maracibo Venezuela. 157 - 164.
- MENDEZ, J.. (2006). **Petrología.** Instituto de Ciencias de la Tierra, UCV, PDVSA INTEVEP. Caracas Venezuela. 363.
- NATERA. (1961). **Correlation of the Upper B-X Members in the distric of Bolivar, State of Zulia.** Asociación Venezolana de Geología, Minería y Petroleo: V-4. Caracas Venezuela. 265 - 283.
- OSTOS, M. (1990). **Evolución Tectonica del Caribe basado en datos geoquímicos.** Geos N 30. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. UCV. Caracas Venezuela. 1 - 294.
- SALVADOR, A.. (1986). **Comment on "Neogene blocks tectonics of eastern Turkey and northern South America:continental applications of the finite difference method"**. by J. F. Dewey and J. L. Pindell: Tectonics, v. 5. . 697 - 701.
- SCHLUMBERGER. (1989). **Log Interpretation Principles/Aplications.** Schlumberger. . .
- SERRA, O. (1985). **Sedimentary environments from wireline logs.** Schlumberger. . 129 - 142.

APÉNDICE

GEOESTADÍSTICA

La Geoestadística se define como la aplicación de la teoría de funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales. Es una herramienta útil para modelar la relación espacial entre los datos disponibles permitiendo un análisis y una predicción de los fenómenos espaciales y temporales y ofreciendo una serie de herramientas determinísticas y estadísticas para entender la variabilidad espacial de un modelo físico.

Los fenómenos distribuidos en el espacio, presentan un carácter mixto, un comportamiento caótico o aleatorio a escala local, pero a la vez estructural a gran escala.

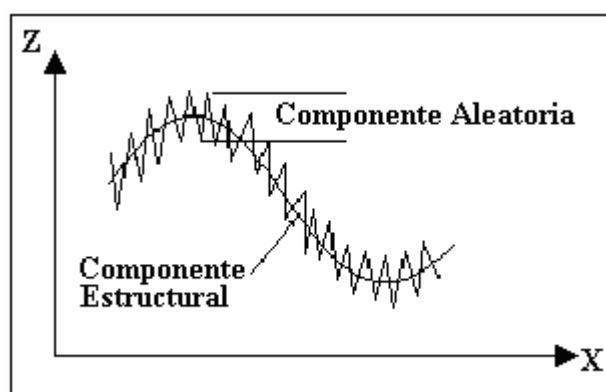


Figura A.1. Carácter mixto de una función aleatoria (tomado de Da Silva, 2006)

Se puede entonces sugerir la idea de estos fenómenos en términos de una función aleatoria (*FA*), donde a cada punto x del espacio se le asocia una variable aleatoria denominada $Z(x)$, teniendo para dos puntos diferentes x e y , dos variables aleatorias $Z(x)$ y $Z(y)$ diferentes pero no independientes, y es precisamente su grado de correlación el reflejo de la continuidad del fenómenos en estudio. De este modo, el éxito de la técnica depende de la determinación de la función de correlación espacial de los datos en estudio.

El objetivo principal de la geoestadística es construir modelos realistas de la distribución de propiedades del yacimiento, evitando el uso de promedios lineales. Esta técnica permite tomar en cuenta la heterogeneidad, continuidad, anisotropía y

propiedades azimutales de los datos. Las técnicas geoestadísticas proveen métodos estocásticos que permiten generar múltiples realizaciones de la distribución de las propiedades del yacimiento y con ellas se puede cuantificar la incertidumbre asociada al modelo.

Antes de comenzar el estudio geoestadístico se debe discutir todos los elementos que aporten conocimiento del problema a resolver, así como organizar y verificar la información disponible, y finalmente realizar el análisis exploratorio de los datos.

1.1. Conceptos básicos de estadística

1.1.a. Población y muestra

La estadística se define como la ciencia cuyo objetivo es reunir una información cuantitativa concerniente a individuos, grupos, serie de hechos, entre otros y deducir de ellas, a través del análisis de estos datos, algún significado preciso o previsiones para el futuro.

En función de esto, podemos deducir que la estadística esta directamente relacionada con la recolección de datos, su descripción y análisis, a partir de los cuales se sacaran diversas conclusiones, se puede decir que la estadística se divide en dos ramas: la estadística *descriptiva*, la cual se encarga de describir y resumir datos, y la estadística *inferencial*, la cual se encarga de la obtención directa de conclusiones a partir de los datos.

A la colección total de elementos de la cual se quiere obtener una información se le denomina población. Frecuentemente, la población es demasiado grande como para que se examinen cada uno de sus miembros, es por ello, que se selecciona y examina a un subgrupo de los mismos. Este subgrupo recibe el nombre de muestra. A partir de estas definiciones, surge la duda sobre si la muestra seleccionada es representativa en toda la población. En general, no se puede asumir que una muestra dada sea representativa en toda la población si no se ha seleccionado de forma aleatoria, es decir que la elección se realiza de un modo tal que todas las formas posibles de elegir a los elementos sean igualmente probables. Si la elección de la muestra se hace de alguna forma no aleatoria, probablemente, la muestra estará sesgada hacia ciertos valores y directamente opuestos a los otros.

1.1.b. Descripción numérica de datos

1.1.b.1. Medidas de tendencia central

Una vez conseguida la clasificación de los datos originales, es necesario calcular un conjunto de indicadores que caractericen de forma más precisa la distribución que se está estudiando. En primer lugar, se estudiarán medidas (estadígrafo) que representen valores centrales en torno a las cuales se agrupan las observaciones, las cuales son de extraordinaria utilidad tanto en el análisis de una distribución como en la comparación entre distribuciones.

- **Media aritmética:** es la medida más común de tendencia central o localización de los datos. Debido a que casi siempre consideramos a los datos como la muestra, nos referimos a la media aritmética como la media de las muestras. Se define como el valor que se obtiene al dividirla suma de todas las observaciones sumadas.
- **Mediana:** es el valor medio en la distribución de frecuencia. Si todos los valores observados de la variable se ordenan en sentido creciente o decreciente, la mediana es el valor de la variable que ocupa el lugar central, es decir, el que deja a un lado y a otro el mismo número de observaciones. La mediana tiene la ventaja de no verse afectada de manera considerable por los valores extremos, esto es, valores mucho más grandes o mucho más pequeños que el conjunto mayoritario de datos.
- **Moda:** es el valor de mayor frecuencia en la muestra. En gráficos de frecuencia la moda se ve representada por el valor correspondiente a la barra de mayor frecuencia.

Si los datos son simétricos, entonces coinciden la media y la mediana. Si además, los datos solo tienen una moda, es decir, los datos son unimodales, entonces coinciden la media, la mediana, y la moda.

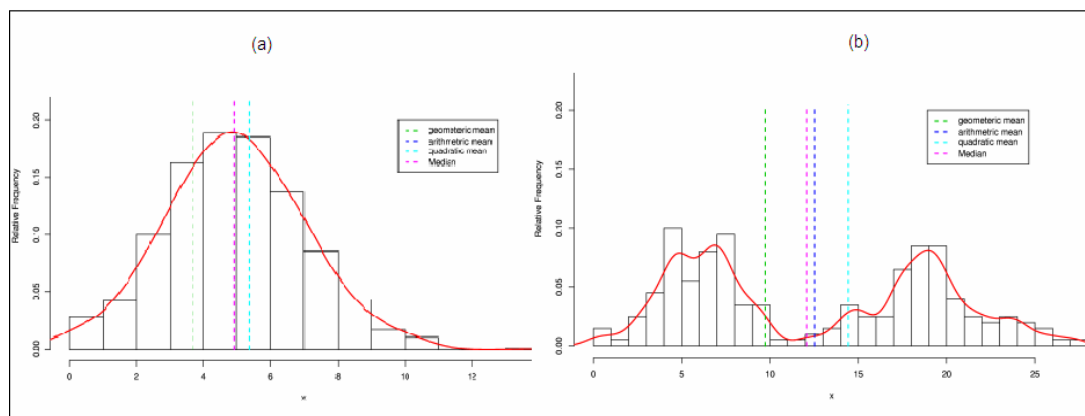


Figura A.2. Representación de una función unimodal y bimodal. (a) Unimodal, (b) Bimodal (tomado de Da Silva, 2006)

- **Cuartiles y percentiles:** además de la mediana, que divide en mitades un conjunto de datos, se pueden considerar otros puntos de división. Cuando un conjunto ordenado de datos se divide en cuatro partes, los puntos de división resultantes se llaman cuartiles de muestra. El primer cuartil, Q_1 , es un valor con un cuarto, o 25%, de las observaciones por debajo de su valor. Los cuartiles vienen dados por el 25, 50 y 75 percentil:

Primer cuartil Q_1 = percentil 25

Segundo cuartil Q_2 = percentil 50

Tercer cuartil Q_3 = percentil 75

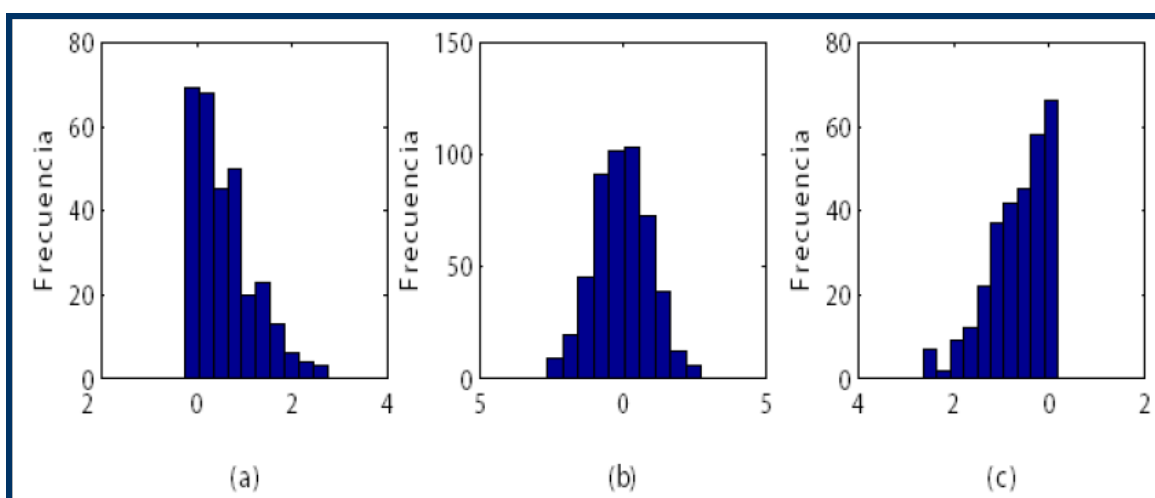


Figura A.3. Ejemplo de distribuciones de datos sesgados: (a) hacia la izquierda, (b) Simetrica, (c) hacia la derecha (tomado de Da Silva)

En términos generales se define al percentil 100p de la muestra como el valor en el que al menos 100p% de la observaciones son iguales o menores a este valor y al menos 100(1-p) % son iguales o mayores a este valor.

1.1.b.2. Medidas de dispersión

Una vez caracterizada la distribución a través de estadígrafos de tendencia central y conociendo el tipo de asimetría que presenta la distribución de los datos, es de importancia tener indicaciones, acerca del grado de heterogeneidad con que la variable se distribuye en el conjunto de observaciones.

- **Varianza:** es la medida de desviación o dispersión de la distribución y se calcula

por:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2$$

Si la varianza es pequeña, hay una pequeña variabilidad en los datos, por el contrario si es grande, la variabilidad será relativamente grande.

Las unidades de medida para la varianza de la muestra son el cuadrado de las unidades originales de la variable, por lo tanto no es fácil interpretarla. El problema de la dimensionalidad, se resuelve trabajando con la raíz cuadrada (positiva) de la varianza, denominada *desviación estándar de la muestra*. Esto brinda una medida de la dispersión expresada en las mismas unidades que la variable original.

- **Desviación estándar:** se define como la raíz cuadrada de la varianza y al igual que esta, describe la tendencia o dispersión de la distribución. Se define también como la medida de desviación de los valores alrededor de la media. Se calcula por:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

- **Rango o intervalo de la muestra:** es la diferencia entre los valores máximo y mínimo de la variable de estudio.

$$R = \max(x_i) - \min(x_i)$$

Este valor brinda una primera aproximación de la heterogeneidad de la distribución de los datos, sin embargo, tiene el inconveniente que solo toma en cuenta los valores extremos, ignorando el conjunto de valores intermedios. Esto trae como consecuencia que si uno de los valores extremos se encuentra accidentalmente desplazados y no es un valor representativo de la distribución, el rango es exagerado y la dispersión obtenida para la distribución será distorsionada.

- **Rango intercuartil:** representa la variación en la mitad intermedia de los datos, tomando en cuenta el recorrido entre el primer y tercer cuartil. Se describe mediante:

$$RI = 3er \text{ cuartil} - 1er \text{ cuartil} = Q_3 - Q_1$$

- **Coefficiente de variación:** tanto la varianza como la desviación estándar tienen como inconveniente ser medidas absolutas, ya que en el caso de indicaciones sobre dispersión es importante no tomar en cuenta la posición de la distribución, lo cual es característico de este tipo de indicadores. Este hecho puede deformar conclusiones asociadas a dispersión de la distribución.

En respuesta a este inconveniente, surge la necesidad de disponer de un indicador que tome en cuenta la tendencia central de la distribución. Se define de esta forma el coeficiente de variación como la razón entre la desviación estándar y la media aritmética.

$$CV = \frac{\sigma}{X_m}$$

Se puede decir que el coeficiente de variación es útil cuando se compara la variabilidad de dos o más conjuntos de datos que difieren de modo considerable en la magnitud de las observaciones.

1.2. Etapas en el análisis Geoestadístico

El análisis geoestadístico se basa en la aplicación de técnicas estadísticas a fin de analizar y predecir valores de una propiedad distribuida en espacio o tiempo, los cuales

no se consideran independientes sino correlacionables unos con otros, es decir, poseen dependencia espacial.

El análisis geoestadístico esta compuesto por tres etapas:

1.2.a. Análisis exploratorio de datos

Se basa en aplicar técnicas estadísticas convencionales que permitan obtener todo un conjunto de información, desconocida en primera instancia sobre la muestra en estudio.

En este análisis se realiza un balance entre la cantidad de detalle que debe existir, la complejidad de los cálculos y la facilidad de usar dicho recurso, para la cual se hace necesario representar gráficamente los datos de la muestra.

1.3. Presentación grafica de los datos

- **Distribuciones de Frecuencia, Frecuencia Relativa y Frecuencia Relativa Acumulada.** Una distribución de frecuencias es un resumen mas compacto de datos que las observaciones originales. Para construir una distribución de frecuencia, se debe dividir la gama de datos en intervalos de clase. Generalmente, los intervalos de clase son de igual ancho para incrementar y facilitar el entendimiento de la información visual en la distribución de frecuencias. El número de intervalos de clase que se utiliza depende del número de observaciones y de la cantidad de discriminación y dispersión en los datos. La distribución de frecuencia relativa se determina dividiendo la frecuencia observada en cada intervalo de clase por el número total de observaciones.
- **Histogramas.** Son una representación grafica de la distribución de frecuencias, siendo un ejemplo típico del histograma el mostrado en la figura YYY. Estos proporcionan una imagen visual de la distribución de los datos de acuerdo a la frecuencia de ocurrencia, permitiendo detectar errores como muestras anómalas de valores altos o bajos y permitiendo manejar la posibilidad de dividir los datos en poblaciones estadísticas separadas, mostrando cuanta asimetría respecto a su media puede presentar la muestra y la orientación de la cola en caso que la distribución la presente. Para realizar

un histograma, se usa el eje de las abscisas para representar la escala medida, colocando las fronteras de los intervalos de clase, el eje de las ordenadas representa la escala de frecuencia o frecuencia relativa según el caso. El histograma brinda una interpretación visual de la forma de la distribución de las mediciones, así como información acerca de la dispersión de los datos.

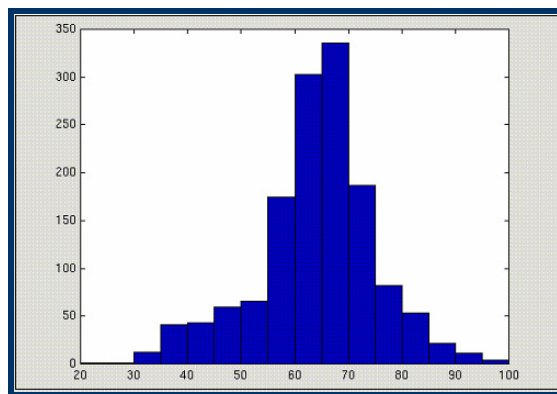


Figura A.4. Representación gráfica de los datos a través de un histograma (tomado de Da Silva, 2006)

- **Gráficos Probabilísticos.** Estos gráficos proporcionan una idea del comportamiento de la función de distribución acumulada $F(x)$ de la muestra y permite determinar si una distribución es normal o no. Para esto se grafica la correspondiente frecuencia acumulada en un sistema de ejes cartesianos; si los datos presentan una distribución normal, el grafico será una línea aproximadamente recta. Si se utilizan ejes semi logarítmicos y se obtiene como resultado una recta, los datos presentarían una distribución lognormal.

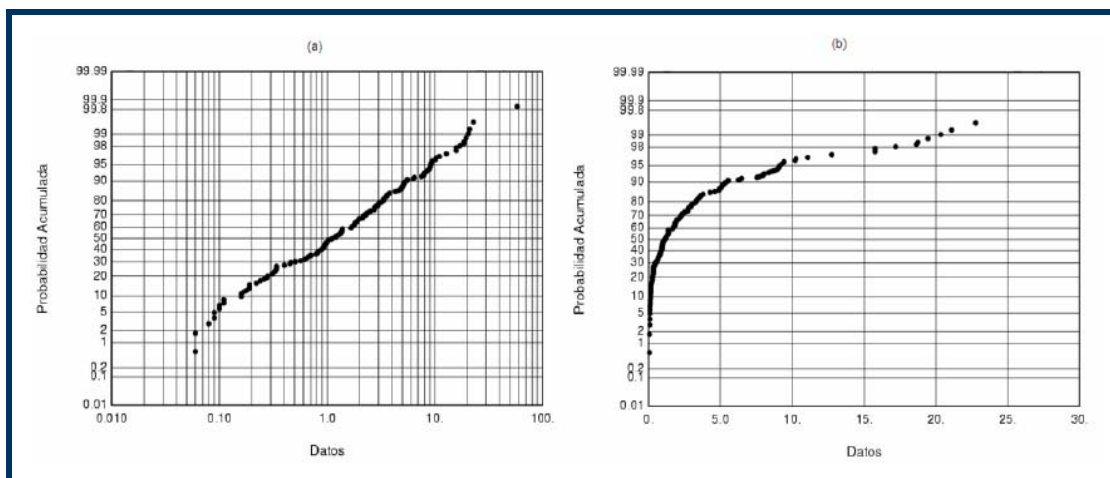


Figura A.5. Gráficos probabilísticos: (a) distribución lognormal, (b) distribución normal

1.4. Análisis Estructural

Se basa en el proceso de estimación de la función que describe la correlación espacial de una variable regionalizada. Este análisis está compuesto por el cálculo del semivariograma experimental y ajuste del variograma a un modelo teórico conocido.

- **Variograma:** se define como la media aritmética de todos los cuadrados de las diferencias entre pares de valores experimentales separados una distancia h , o lo que es lo mismo, la varianza de los incrementos de la variable regionalizada, en las localizaciones separadas una distancia h :

$$Var\{Z(x+h) - Z(x)\} = 2\gamma(h)$$

Donde:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_p(h)} \sum_{i=1}^{N_p(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2$$

$N_p(h)$: número de pares a una distancia h

h : incremento ó distancia en una dirección definida

$Z(x_i)$: valor de una variable aleatoria en la localización x_i

$Z(x_i + h)$: valor de la variable aleatoria en la localización $(x_i + h)$

El cálculo del semivariograma experimental es la herramienta geoestadística más importante en la determinación de las características de variabilidad y correlación espacial de un fenómeno en estudio, dado que representa el cambio de la variable aleatoria de una localización a otra.

Es una herramienta para investigar y cuantificar la variabilidad de un fenómeno espacial, a través del estudio de la geometría y continuidad de la variable lo que genera un impacto en las predicciones de los modelos numéricos. Este análisis tiene como condiciones:

- La distribución estadística

- La existencia de valores aberrantes o anómalos

.- La presencia de zonas homogéneas o posibles zonaciones de la variable aleatoria en ciertas localizaciones.

- ***Componentes del semivariograma experimental***

.- Azimut (α): ángulo medido en grados en dirección horaria a partir del norte

.- Dip angle (θ): ángulo medido en grados negativos en el plano horizontal

.- Ancho de banda: desviación máxima aceptable, medida a partir del vector de dirección.

.- Tolerancia angular: desviación medida en grados a partir del vector de dirección y hasta el ancho de banda

.- Distancia del lag: distancia de desplazamiento de las muestras

- **Parámetros del semivariograma**

- *Discontinuidad en el origen (efecto nugget)*: si tomamos en cuenta la definición de semivariograma, este es nulo en el origen. Sin embargo en la práctica las funciones obtenidas pueden presentar una discontinuidad aparente en el mismo, a esta discontinuidad se le llama *Efecto Nugget* y puede ser producto de errores en las muestras o discontinuidad geológica a escala fina. Se obtiene trazando una línea recta entre los primeros puntos del semivariograma empírico y extendiendo esta hasta que se intercepte con el eje Y.

- *Valor máximo de variabilidad (meseta)*: es el valor de $\gamma(h)$ para el cual el aumento de h su valor permanece constante. Puede obtenerse trazando una línea paralela a la abcisa y que se ajuste a los puntos de mayor valor del semivariograma, siendo leído su valor en la intersección de esta línea con la ordenada.

- *Área de influencia de la correlación (alcance o rango)*: se define como la distancia h para la cual las variables $Z(x)$ y $Z(x+h)$ son independientes, es decir, las distancias para la cual los valores de la variable dejan de estar correlacionados, o lo que es lo mismo, la distancia para la cual el

semivariograma alcanza el valor de $\gamma(h) = 1$. También es conocido como longitud de la correlación. (Da Silva, 2006)

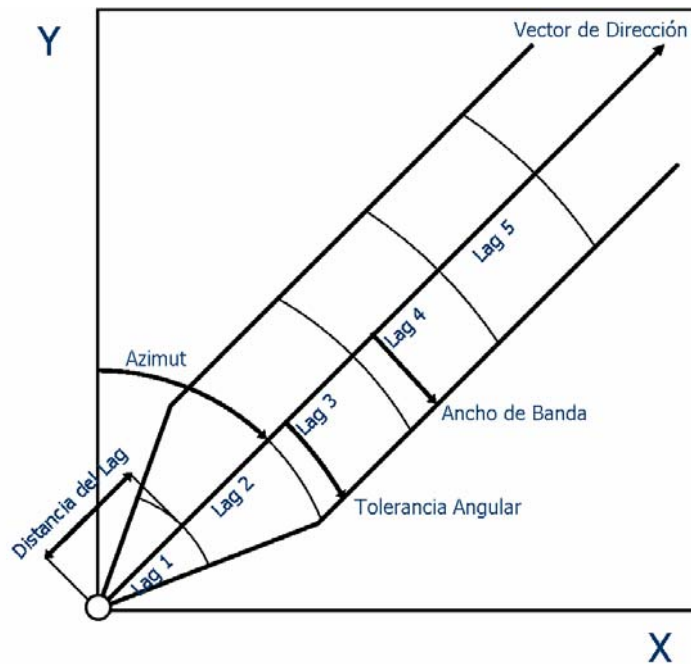


Figura A.6. Componentes del semivariograma experimental (tomado de Da Silva, 2006)

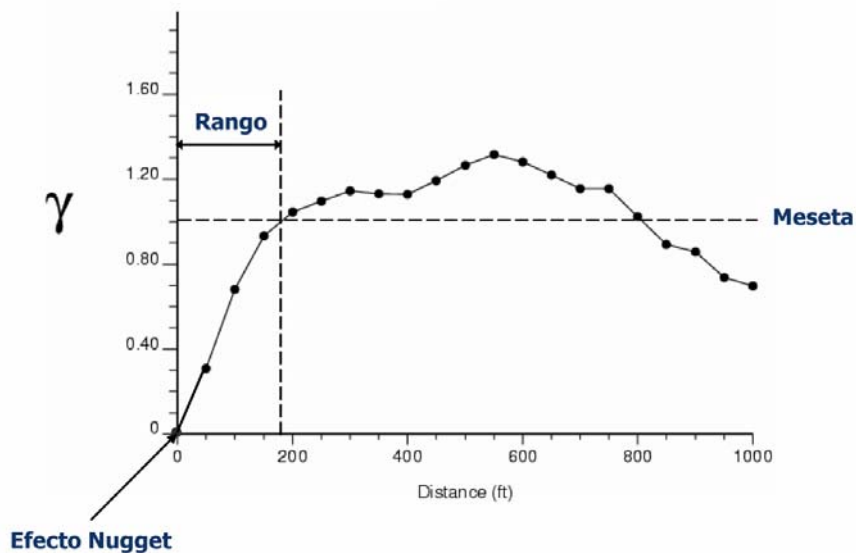


Figura A.7. Parámetros del semivariograma (tomado de Da Silva, 2006)